

Caio Gomes de Oliveira

**Estudo sobre Conservação de Energia Elétrica e
Qualidade de Energia Elétrica**

Campinas, SP
2009

Caio Gomes de Oliveira

Estudo sobre Conservação de Energia Elétrica e Qualidade de Energia Elétrica

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Energia Elétrica.

Orientador: Fujio Sato

Co-orientador: Ernesto Ruppert Filho

Campinas, SP
2009

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

OL4e Oliveira, Caio Gomes de
Estudo sobre conservação de energia elétrica e
qualidade de energia elétrica / Caio Gomes de Oliveira.
–Campinas, SP: [s.n.], 2009.

Orientadores: Fujio Sato, Ernesto Ruppert Filho.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação.

1. Sistemas de energia elétrica. 2. Energia elétrica -
Medição. 3. Energia elétrica - Conservação. 4.
Harmônicas (Ondas elétricas). 5. Filtros elétricos ativos.
I. Sato, Fujio. II. Ruppert Filho, Ernesto. III.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Elétrica e de Computação. IV. Título.

Título em Inglês: Study about energy economy and power quality

Palavras-chave em Inglês: Electric power systems, Electric power - Measuring,
Electric power - Conservation, Harmonic waves electric,
Active electric filters

Área de concentração: Energia Elétrica

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: José Antônio Donizete Rossi, Carlos Alberto Favarin Murari

Data da defesa: 31/08/2009

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

Candidato: Caio Gomes de Oliveira

Data da Defesa: 31 de agosto de 2009

Título da Tese: "Estudo sobre Conservação de Energia Elétrica e Qualidade de Energia Elétrica"

Prof. Dr. Fujio Sato (Presidente): _____

Dr. José Antônio Donizete Rossi: _____

Prof. Dr. Carlos Alberto Favarin Murari: _____

Resumo

Este trabalho trata de dois temas de grande relevância, principalmente nos últimos anos, na área de energia elétrica: a conservação e a qualidade da energia elétrica. Os estudos são baseados em dados de grandezas elétricas coletados por equipamentos de monitoração e gerenciamento de energia instalados em pontos distintos do Campus da Universidade Estadual de Campinas. A conservação de energia elétrica relaciona-se ao seu uso mais eficiente e sem desperdícios, importante por proporcionar um aumento da energia disponível, sem que sejam necessários grandes investimentos em geração, transmissão e distribuição, reduzindo, assim, impactos ambientais. A avaliação deste quesito surge de um projeto piloto, o Projeto Ecogera, cuja finalidade é avaliar a eficiência energética, por meio de um programa de uso racional e da exploração de fontes alternativas de energia elétrica. Aqui é discutido, então, o módulo de conservação de energia, desenvolvido em unidades de consumo com características típicas em relação ao tipo de atividade exercida na universidade, focando na redução de consumo em iluminação. Uma boa qualidade de energia elétrica remete à ausência de variações anormais na tensão, relacionada à continuidade do fornecimento e à forma de onda senoidal da alimentação. Os problemas na qualidade de energia têm se agravado ao longo dos anos, principalmente devido ao aumento das cargas não lineares, à maior sensibilidade dos equipamentos e à grande interconexão da rede elétrica, e podem resultar em má operação ou prejuízo a dispositivos. É dado um maior enfoque nas perturbações na amplitude da tensão e nas distorções na forma de onda, mostrando suas principais causas e meios de contorná-las. No primeiro caso, são registrados transitórios, interrupções, afundamentos e elevações de tensão, feitas as devidas análises, e avaliadas suas influências em equipamentos por meio da Curva ITI (CBEMA), a qual possibilita a determinação de possíveis danos ou falhas nos mesmos. No segundo caso, nos diversos pontos de medição é avaliada a presença de harmônicas, tanto pela análise das formas de onda e de seus conteúdos espectrais como pela taxa de distorção harmônica num período de uma semana. Por fim, são estudadas teorias de potências elétricas trifásicas, em especial a Teoria pq de Potências Instantâneas, importante na aplicação de filtros ativos, cuja função é atenuar as correntes harmônicas geradas por cargas não lineares. Os dados reais medidos das tensões e correntes instantâneas foram submetidos a um programa computacional desenvolvido a partir do modelo matemático de um filtro ativo com compensação paralela e método de compensação baseado na Teoria pq Modificada de Potências Instantâneas, obtendo-se como resposta o desempenho do filtro na eliminação das harmônicas nas correntes vistas pela fonte de alimentação.

Palavras-chave: Conservação de Energia Elétrica, Qualidade de Energia Elétrica, Medições, Harmônicas, Filtro Ativo.

Abstract

This work deals with two issues of large relevance, especially in recent years about electric power: energy economy and power quality. The studies are based on data collected by various measurement and energy management instruments at different points in the Campinas State University Campus (Unicamp), in São Paulo State, Brazil. The performance of energy relates to its more efficiently use and without wasting, which is important to increase the amount of available energy, without large investments in generation, transmission and distribution, thereby reducing environmental impacts. A Project has been developed, named Ecogera, whose purpose is to evaluate the energy efficiency, through a program of rational use and development of alternative sources of energy. The module of energy economy is discussed here, developed in units of consumption with typical characteristics for the type of work performed at the university, focusing on the reduction of lighting consumption. A good power quality refers to the absence of abnormal variations in voltage, related to continuity of supply and the sinusoidal waveform of the power supply. The power quality problems have been increased over the years, mainly due to the increase of nonlinear loads, the increased sensitivity of the equipment and the large interconnection of the power networks, and can result in misoperation or damage of the devices. A greater focus is given on the voltage amplitude disturbances and the distortion in the waveform, showing its main causes and means of overcoming them. In the first case transients, interruptions, sags and swells are recorded, adequate analysis are done, and their influence on the equipment are evaluated by the ITI Curve (CBEMA), which enables the determination of possible damage or failures in them. In the second case, the presence of harmonics is evaluated in the various points of measurement, either by the analysis of waveforms and its spectral content or by the total harmonic distortion over a one-week period. Finally, three-phase electrical power theories are studied, especially the Instantaneous pq Power Theory, which is important in the application of active filters, whose function is to reduce the harmonic currents generated by nonlinear loads. The real measured data of the instantaneous voltages and currents was put in a computational program developed from the mathematical model of an active filter with parallel compensation and using a compensation method based on the Power Instantaneous Modified pq Theory and its influence seem by the current supply is obtained by the harmonic eliminations.

Keywords: Energy Economy, Power Quality, Measurements, Harmonics, Active Filter.

Agradecimentos

Aos meus pais, Maria Alice e Jorge Luiz, e ao meu irmão, Felipe, pelo total apoio e incentivo durante todo o trabalho.

À minha noiva, Larissa, por sempre estar ao meu lado.

Aos meus orientador e co-orientador, professores Fujio Sato e Ernesto Ruppert Filho, por me guiarem no desenvolvimento deste trabalho.

Ao engenheiro Vicente José Costa Vale, da Coordenadoria de Infra-estrutura da Unicamp, pelo apoio técnico.

Ao colega de laboratório Marcelo Gradella Villalva, pela ajuda quanto a filtros ativos.

Ao técnico Marcos Lima, pelo suporte técnico junto aos medidores.

À FINEP e ao CNPq, pelo apoio financeiro.

*Aos meus pais, por todos ensinamentos e exemplos de vida.
À minha noiva, por todo seu carinho, dedicação e amor.
Ao meu irmão, pelos momentos de descontração.
Amo vocês.*

Sumário

Lista de Figuras	xvii
Lista de Tabelas	xxi
Lista de Siglas	xxiii
Trabalhos Publicados pelo Autor	xxv
1 Introdução	1
1.1 Aspectos da Conservação de Energia Elétrica	2
1.2 Caracterização dos Distúrbios de Qualidade de Energia Elétrica	3
1.2.1 Condições ideais de operação de um sistema elétrico	3
1.2.2 Transitórios	5
1.2.3 Variações de tensão de curta duração	7
1.2.4 Variações de tensão de longa duração	8
1.2.5 Desequilíbrio de tensão	9
1.2.6 Distorções na forma de onda	9
1.2.7 Flutuação de tensão	12
1.2.8 Variação na frequência	12
1.3 Organização do Trabalho	14
2 Monitoração e gerenciamento de energia elétrica	15
2.1 Aspectos históricos dos medidores de qualidade de energia	15
2.2 Tipos de instrumentos de medição de qualidade de energia	19
2.3 Instrumentos de valor eficaz verdadeiro	21
2.4 Medidor de energia elétrica	23
2.4.1 Características de <i>hardware</i>	24
2.4.2 Características de <i>software</i>	27
3 Conservação de energia elétrica	37
3.1 Uso racional de energia elétrica	37
3.2 Projeto Ecogera	38
3.2.1 A importância do projeto	38
3.2.2 Unidades de consumo	38
3.2.3 Sistema de iluminação	39

3.2.4	Desenvolvimento do projeto	41
3.3	Estrutura tarifária	44
3.4	Efeito da substituição das luminárias	47
3.5	Outras medidas de conservação de energia	52
3.6	Ampliação do projeto	53
4	Qualidade de energia elétrica	59
4.1	Transitórios	60
4.1.1	Registro de distúrbios	63
4.2	Variações na amplitude da tensão	66
4.2.1	Registro de distúrbios	70
4.3	Curva ITI (CBEMA)	81
4.3.1	Registro de distúrbios	83
4.4	Distorções harmônicas	88
4.4.1	Conceitos relevantes	90
4.4.2	Resultados	94
5	Filtros Ativos	113
5.1	Potências elétricas trifásicas	114
5.1.1	Sistema sob tensões senoidais e cargas lineares	114
5.1.2	Sistema sob tensões senoidais e cargas não lineares	117
5.1.3	Sistema com tensões e correntes distorcidas	120
5.2	Características do filtro ativo	124
5.3	Resultados das simulações	126
6	Conclusões	137
	Referências bibliográficas	140
A	Planta da FEEC	149
B	Programa implementado em MatLab	151
C	Trabalho publicado na INDUSCON 2008	157
D	Trabalho publicado no CBA 2008	165
E	Trabalho publicado no AGRENER GD 2008	173

Lista de Figuras

1.1	Forma de onda ideal de tensões e correntes elétricas de um sistema elétrico em regime permanente.	5
1.2	Transitório impulsivo.	6
1.3	Transitório oscilatório.	6
1.4	Interrupção.	7
1.5	Afundamento de tensão.	8
1.6	Elevação de tensão.	8
1.7	Desequilíbrio de tensão.	9
1.8	Forma de onda com nível contínuo.	10
1.9	Forma de onda com harmônicas.	10
1.10	Forma de onda com interharmônicas.	11
1.11	Forma de onda com recortes de comutação.	11
1.12	Forma de onda com ruído.	12
1.13	Flutuação de tensão.	12
2.1	Gravador de descargas atmosféricas, desenvolvido pela GE na década de 1920. . . .	16
2.2	Gravador de formas de onda de descargas, desenvolvido por Martzloff na década de 1960.	16
2.3	Contador de descargas, desenvolvido por Martzloff no meio da década de 1960. . . .	17
2.4	Monitor e analisador de distúrbios, Dranetz 606.	17
2.5	Gravador de formas de onda de tensão e corrente, Dranetz PP1.	18
2.6	Sistema de monitoração de qualidade de energia.	19
2.7	Medidor de energia ION 7600 com visor integrado.	23
2.8	Esquema de ligação dos medidores.	24
2.9	Tipos de comunicação do ION 7600.	28
2.10	<i>ION Setup</i>	31
2.11	<i>ION Management Console</i>	32
2.12	<i>ION Vista - Network Diagram</i>	32
2.13	<i>ION Vista - Volts/Amps</i>	33
2.14	<i>ION Vista - Power Quality</i>	33
2.15	<i>ION Vista - Revenue</i>	34
2.16	<i>ION Reporter</i>	34
2.17	<i>ION Reporter - Energy & Demand</i>	35
2.18	<i>ION Reporter - Time Of Use Schedule</i>	35

2.19	<i>ION Reporter - Load Profile.</i>	36
2.20	<i>ION Reporter - Power Quality.</i>	36
3.1	Luminárias reflexiva e convencional.	40
3.2	Perfil da Carga da FEEC-F em 2004.	47
3.3	Perfil da Carga da FEEC-F em 2005.	48
3.4	Perfil da Carga da FEEC-F em 2007.	48
3.5	Fator de Potência da FEEC-F em 2004.	49
3.6	Fator de Potência da FEEC-F em 2005.	49
3.7	Fator de Potência da FEEC-F em 2007.	49
3.8	Potência Ativa da FEEC-F em 29/08/2007.	53
3.9	Perfil da Carga da FEEC-A em 04/2009.	55
3.10	Perfil da Carga da FEEC-B em 04/2009.	55
3.11	Perfil da Carga da FEEC-EFG em 04/2009.	56
3.12	Perfil da Carga do CAISM-CME em 04/2009.	58
3.13	Perfil da Carga do CAISM-DA em 04/2009.	58
4.1	Transitório, FEEC-A, 29/03/2009 17:33:21, V_c 143%, 0,065 ms.	64
4.2	Transitório, FEEC-B, 21/02/2009 07:27:22, V_c 149%, 0,130 ms.	64
4.3	Transitório, FEEC-EFG, 16/01/2009 08:23:03, V_a 141%, 0,065 ms.	64
4.4	Transitório, FEEC-EFG, 05/04/2009 17:47:50, V_c 127%, 0,260 ms.	65
4.5	Transitório, FEEC-EFG, 13/04/2009 16:17:55, V_c 130%, 0,455 ms.	65
4.6	Curtos-circuitos num sistema elétrico.	67
4.7	Tempos de operação de um sistema de proteção.	68
4.8	Exemplo de sequência de religamentos de disjuntor.	68
4.9	Esquemático do transformador ferorrressonante.	69
4.10	Diagrama de blocos do UPS.	70
4.11	Interrupção, FEEC-A, 05/04/2009 07:01:54, V_a 0%, V_b 0%, V_c 0%.	71
4.12	Interrupção, FEEC-B, 05/04/2009 07:01:55, V_a 0%, V_b 0%, V_c 0%.	71
4.13	Afundamento, FEEC-A, 01/02/2009 07:57:08, V_a 96%, V_b 76%, V_c 80%, 0,075 s.	72
4.14	Afundamento, FEEC-A, 01/02/2009 07:58:31, V_a 96%, V_b 76%, V_c 81%, 0,074 s.	72
4.15	Afundamento, FEEC-A, 19/03/2009 03:06:19, V_a 65%, V_b 65%, V_c 85%, 0,725 s.	73
4.16	Afundamento, FEEC-A, 05/04/2009 17:53:39, V_a 91%, V_b 90%, V_c 85%, 0,041 s.	73
4.17	Afundamento, FEEC-B, 01/02/2009 07:57:07, V_a 96%, V_b 75%, V_c 80%, 0,075 s.	74
4.18	Afundamento, FEEC-B, 01/02/2009 07:58:31, V_a 96%, V_b 75%, V_c 81%, 0,074 s.	74
4.19	Afundamento, FEEC-B, 19/03/2009 03:06:19, V_a 65%, V_b 65%, V_c 84%, 0,742 s.	75
4.20	Afundamento, FEEC-B, 05/04/2009 17:53:39, V_a 91%, V_b 90%, V_c 85%, 0,050 s.	75
4.21	Afundamento, FEEC-EFG, 19/03/2009 03:05:01, V_a 68%, V_b 88%, V_c 68%, 0,633 s.	76
4.22	Afundamento, FEEC-EFG, 05/04/2009 17:51:12, V_a 94%, V_b 87%, V_c 94%, 0,016 s.	76
4.23	Elevação, CAISM-CME, 16/04/2009 07:16:38, V_a 111%, V_b 86%, V_c 96%, 0,091 s.	77
4.24	Elevação, CAISM-DA, 18/06/2009 07:41:50, V_a 112%, V_b 93%, V_c 91%.	77
4.25	Transferência de alimentador, CAISM-CME, 05/04/2009 17:51:35.854.	78
4.26	Sequência de perturbações, CAISM-DA, 21/04/2009 14:52:37.041.	80
4.27	Curva CBEMA.	81

4.28	Curva ITI (CBEMA).	82
4.29	Curva ITI (CBEMA), FEEC-A, 01-04/2009.	84
4.30	Curva ITI (CBEMA), FEEC-B, 01-04/2009.	85
4.31	Curva ITI (CBEMA), FEEC-EFG, 01-04/2009.	85
4.32	Curva ITI (CBEMA), CAISM-CME, 01-04/2009.	86
4.33	Curva ITI (CBEMA), CAISM-DA, 01-04/2009.	86
4.34	Terceira harmônica no condutor de neutro.	89
4.35	Forma de onda decomposta em suas harmônicas.	92
4.36	Espectro harmônico da função da figura 4.35.	93
4.37	Formas de onda e espectros harmônicos de lâmpadas fluorescentes	96
4.38	Forma de onda da corrente, FEEC-A, 01/04/2009 11:06:39.	97
4.39	Espectro harmônico da corrente, FEEC-A, 01/04/2009 11:06:39.	97
4.40	Forma de onda da tensão, FEEC-A, 01/04/2009 11:06:39.	98
4.41	Espectro harmônico da tensão, FEEC-A, 01/04/2009 11:06:39.	98
4.42	Diagrama fasorial, FEEC-A, 01/04/2009 11:06:39.	98
4.43	Forma de onda da corrente, FEEC-B, 05/05/2009 12:21:37.	99
4.44	Espectro harmônico da corrente, FEEC-B, 05/05/2009 12:21:37.	99
4.45	Forma de onda da tensão, FEEC-B, 05/05/2009 12:21:37.	100
4.46	Espectro harmônico da tensão, FEEC-B, 05/05/2009 12:21:37.	100
4.47	Diagrama fasorial, FEEC-B, 05/05/2009 12:21:37.	100
4.48	Forma de onda da corrente, FEEC-EFG, 05/05/2009 14:21:37.	101
4.49	Espectro harmônico da corrente, FEEC-EFG, 05/05/2009 14:21:37.	101
4.50	Forma de onda da tensão, FEEC-EFG, 05/05/2009 14:21:37.	102
4.51	Espectro harmônico da tensão, FEEC-EFG, 05/05/2009 14:21:37.	102
4.52	Diagrama fasorial, FEEC-EFG, 05/05/2009 14:21:37.	102
4.53	Forma de onda da corrente, CAISM-CME, 01/04/2009 11:09:48.	103
4.54	Espectro harmônico da corrente, CAISM-CME, 01/04/2009 11:09:48.	103
4.55	Forma de onda da tensão, CAISM-CME, 01/04/2009 11:09:48.	104
4.56	Espectro harmônico da tensão, CAISM-CME, 01/04/2009 11:09:48.	104
4.57	Diagrama fasorial, CAISM-CME, 01/04/2009 11:09:48.	104
4.58	Forma de onda da corrente, CAISM-DA, 01/04/2009 11:12:40.	105
4.59	Espectro harmônico da corrente, CAISM-DA, 01/04/2009 11:12:40.	105
4.60	Forma de onda da tensão, CAISM-DA, 01/04/2009 11:12:40.	106
4.61	Espectro harmônico da tensão, CAISM-DA, 01/04/2009 11:12:40.	106
4.62	Diagrama fasorial, CAISM-DA, 01/04/2009 11:12:40.	106
4.63	Distorção harmônica da tensão, FEEC-A, 12-18/04/2009.	108
4.64	Distorção harmônica da corrente, FEEC-A, 12-18/04/2009.	108
4.65	Distorção harmônica da tensão, FEEC-B, 12-18/04/2009.	109
4.66	Distorção harmônica da corrente, FEEC-B, 12-18/04/2009.	109
4.67	Distorção harmônica da tensão, FEEC-EFG, 12-18/04/2009.	109
4.68	Distorção harmônica da corrente, FEEC-EFG, 12-18/04/2009.	110
4.69	Distorção harmônica da tensão, CAISM-CME, 12-18/04/2009.	110
4.70	Distorção harmônica da corrente, CAISM-CME, 12-18/04/2009.	110
4.71	Distorção harmônica da tensão, CAISM-DA, 12-18/04/2009.	111

4.72	Distorção harmônica da corrente, CAISM-DA, 12-18/04/2009.	111
5.1	Triângulo de potências.	116
5.2	Tetraedro de potências.	119
5.3	Representação gráfica da Transformada de Clarke.	120
5.4	Significado físico das potências instantâneas.	122
5.5	Esquema simplificado de um filtro ativo paralelo trifásico a quatro fios.	124
5.6	Compensação de corrente paralela baseado na teoria pq modificada.	125
5.7	Potências na carga, FEEC-A.	127
5.8	Potências a serem compensadas, FEEC-A.	127
5.9	Potências na fonte, FEEC-A.	128
5.10	Correntes na carga, FEEC-A.	128
5.11	Correntes de compensação, FEEC-A.	129
5.12	Correntes na fonte, FEEC-A.	129
5.13	Tensões e correntes da fase A na carga e na fonte, FEEC-A.	130
5.14	Corrente da fase A na carga e seu espectro harmônico, FEEC-A.	130
5.15	Corrente da fase A na fonte e seu espectro harmônico, FEEC-A.	131
5.16	Potências na carga, CAISM-CME.	131
5.17	Potências a serem compensadas, CAISM-CME.	132
5.18	Potências na fonte, CAISM-CME.	132
5.19	Correntes na carga, CAISM-CME.	133
5.20	Correntes de compensação, CAISM-CME.	133
5.21	Correntes na fonte, CAISM-CME.	134
5.22	Tensões e correntes na carga e na fonte, CAISM-CME.	134
5.23	Corrente da fase A na carga e seu espectro harmônico, CAISM-CME.	135
5.24	Corrente da fase A na fonte e seu espectro harmônico, CAISM-CME.	135
A.1	Planta da FEEC, mostrando os medidores instalados.	150

Lista de Tabelas

1.1	Categorias e características dos problemas relacionados à QEE.	13
2.1	Comparação entre diversos sinais para os dois tipos instrumentos.	23
2.2	Especificações de medição do ION 7600.	25
2.3	Especificações de tensões de entrada do ION 7600.	25
2.4	Especificações de correntes de entrada do ION 7600.	26
2.5	Especificações de registro do ION 7600.	26
2.6	Alimentação elétrica do ION 7600.	26
2.7	Condições do ambiente suportadas pelo ION 7600.	26
3.1	Cargas do bloco F da FEEC antes da troca das luminárias.	42
3.2	Ensaio dos reatores.	43
3.3	Cargas do bloco F da FEEC depois da troca das luminárias.	43
3.4	Tipos de tarifas do Grupo “A”.	46
3.5	Tarifa Azul A2 da CPFL para o fornecimento de energia elétrica.	46
3.6	Energia total (kWh) na FEEC-F.	50
3.7	Demanda máxima (kW) fora de ponta na FEEC-F.	50
3.8	Demanda máxima (kW) de ponta na FEEC-F.	51
3.9	Tarifas (R\$) na FEEC-F.	51
3.10	Energia total (kWh) nos três medidores da FEEC.	56
3.11	Demanda máxima (kW) fora de ponta nos três medidores da FEEC.	56
3.12	Demanda máxima (kW) de ponta nos três medidores da FEEC.	57
3.13	Tarifas (R\$) nos três medidores da FEEC.	57
4.1	Eventos ocorridos na FEEC-A, 01-04/2009.	87
4.2	Eventos ocorridos na FEEC-B, 01-04/2009.	87
4.3	Eventos ocorridos na FEEC-EFG, 01-04/2009.	87
4.4	Eventos ocorridos no CAISM-CME, 01-04/2009.	87
4.5	Eventos ocorridos no CAISM-DA, 01-04/2009.	87
4.6	Sequência de fases das harmônicas para um sistema trifásico balanceado.	92

Lista de Siglas

<i>ABNT</i>	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>ANEEL</i>	- Agência Nacional de Energia Elétrica
<i>ASD</i>	- <i>Adjustable Speed Drive</i> (sistema de acionamento a velocidade variável)
<i>CA</i>	- Corrente Alternada
<i>CAISM</i>	- Centro de Atenção Integral à Saúde da Mulher (CME - Central de Materiais e Esterilização, DA - Diretoria Administrativa)
<i>CBEMA</i>	- <i>Computer Business Equipment Manufacturer Association</i>
<i>CC</i>	- Corrente Contínua
<i>CEE</i>	- Conservação de Energia Elétrica
<i>CGCE</i>	- Câmara de Gestão da Crise de Energia Elétrica
<i>CPFL</i>	- Companhia Paulista de Força e Luz
<i>CVT</i>	- <i>Constant-Voltage Transformer</i> (transformador ferroressonante)
<i>DGA</i>	- Diretoria Geral da Administração
<i>ELETRABRÁS</i>	- Centrais Elétricas Brasileiras S.A.
<i>EPA</i>	- <i>Environmental Protection Agency</i>
<i>EPRI</i>	- <i>Electric Power Research Institute</i>
<i>FEEC</i>	- Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Unicamp
<i>FINEP</i>	- Financiadora de Estudos e Projetos
<i>GE</i>	- <i>General Electric Company</i>
<i>IAEEL</i>	- <i>International Association for Energy-Efficient Lighting</i>
<i>IEC</i>	- <i>International Electrotechnical Commission</i>
<i>IEEE</i>	- <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
<i>IGBT</i>	- <i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
<i>ITI</i>	- <i>Information Technology Industry Council</i>
<i>LAN</i>	- <i>Local Area Network</i>
<i>MME</i>	- Ministério das Minas e Energia
<i>MOV</i>	- <i>Metal-Oxide Varistor</i>
<i>NIPE</i>	- Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético da Unicamp
<i>PAC</i>	- Ponto de Acoplamento Comum
<i>PB</i>	- Ciclo Básico II da Unicamp
<i>PROCEL</i>	- Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
<i>PRODIST</i>	- Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

<i>QEE</i>	-	Qualidade de Energia Elétrica
<i>RMS</i>	-	<i>Root Mean Square</i> (valor eficaz)
<i>SCADA</i>	-	<i>Supervisory Control And Data Aquisition</i>
<i>THD</i>	-	<i>Total Harmonic Distortion</i> (distorção harmônica total)
<i>TOU</i>	-	<i>Time Of Use Schedule</i>
<i>TVSS</i>	-	<i>Transient Voltage Surge Suppressor</i> (supressor de transitório)
<i>UNICAMP</i>	-	Universidade Estadual de Campinas
<i>UPS</i>	-	<i>Uninterruptible Power Supply</i> (fonte ininterrupta de energia)
<i>WAN</i>	-	<i>Wide Area Network</i>

Trabalhos Publicados pelo Autor

1. OLIVEIRA, Caio Gomes de; SATO, Fujio; RUPPERT FILHO, Ernesto; KUBO, Marcio Massakiti. Estudo de caso de eficiência energética e qualidade de energia elétrica. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE APLICAÇÕES INDUSTRIAIS, 8. (Induscon 2008), 2008, Poços de Caldas. *Anais...* Poços de Caldas: UNIFEI, 2008. Pen-drive.
2. OLIVEIRA, Caio Gomes de; SATO, Fujio; RUPPERT FILHO, Ernesto; KUBO, Marcio Massakiti. Análise da eficiência energética e da qualidade de energia elétrica na Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Unicamp. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 17. (CBA 2008), 2008, Juiz de Fora. *Anais...* Juiz de Fora: UFJF, 2008. 1 CD-ROM.
3. OLIVEIRA, Caio Gomes de; SATO, Fujio; RUPPERT FILHO, Ernesto; KUBO, Marcio Massakiti. Implantação de um programa de conservação e qualidade de energia elétrica na Unicamp. In: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E ENERGIA NO MEIO RURAL, 7. (AGRENER GD 2008), 2008, Fortaleza. *Anais...* Fortaleza: UNIFOR, 2008. 1 CD-ROM.

Capítulo 1

Introdução

O presente trabalho tem como objetivo a discussão e a análise de dois temas muito recorrentes nos últimos anos no âmbito da energia elétrica: a conservação de energia elétrica e a qualidade de energia elétrica.

A Conservação de Energia Elétrica (CEE) está relacionada com o uso racional da mesma, ou seja, promover a eficiência e evitar o desperdício. “A conservação de energia baseada nos conceitos de eficiência energética não ocasiona a redução do conforto dos usuários. A ação de conservar energia tem o objetivo de eliminar desperdício através do uso racional dos insumos energéticos, com o alto rendimento dos diversos sistemas de uso final dos mesmos” [1]. Essa ação, por outro lado, também reduz os custos e os investimentos setoriais.

A redução do consumo de energia não é um fim em si mesmo, seu uso eficiente está relacionado com objetivos mais abrangentes e de interesse da sociedade [2], entre eles:

- Contribuição para o aumento da confiabilidade do sistema;
- Redução ou adiamento da necessidade de investimento em geração, transmissão e distribuição;
- Redução de impactos ambientais, inerentes à construção de usinas hidrelétricas ou ao funcionamento de usinas térmicas;
- Redução de custos de energia para o consumidor final.

A Qualidade de Energia Elétrica (QEE) está relacionada às alterações que podem ocorrer no sistema elétrico. De acordo com Dugan *et al* [3], a definição de problemas relacionados à qualidade de energia elétrica é: “Qualquer problema de energia manifestado na tensão, corrente ou nas variações de frequência que resulte na falha ou má operação de equipamentos dos consumidores”.

Estes distúrbios vêm se agravando ao longo dos anos devido principalmente às seguintes razões:

- Aumento do número de cargas não lineares. Com um maior interesse na eficiência dos sistemas de potência são empregados equipamentos para a redução das perdas, que, entretanto, levam a um aumento do nível de harmônicas no sistema;
- Maior sensibilidade dos equipamentos que são cada vez mais baseados em microprocessadores e componentes de eletrônica de potência;
- Grande interconexão da rede elétrica, sendo que a falha de um componente pode gerar consequências maiores e mais graves.

Como consequência destes, estão os impactos econômicos gerados tanto para as concessionárias como para os consumidores e as cargas finais, havendo assim uma crescente preocupação no estudo de fenômenos relacionados [3, 4].

1.1 Aspectos da Conservação de Energia Elétrica

Após as crises do petróleo na década de 1970, as quais determinaram a necessidade de se diminuir o seu uso, surgiu o termo “redução do consumo de energia”, aplicada à mudança de hábitos de pessoas e indústrias, mas nesta época relacionado não só à diminuição do consumo como à perda de conforto. Com o passar do tempo este conceito evoluiu para a eficiência energética, que remete ao uso racional de energia, por meio do aumento do rendimento do sistema [5].

Problemas ambientais, como a poluição do ar e o efeito estufa, estão diretamente relacionados à obtenção de energia, mais especificamente ao uso de combustíveis fósseis, seja na geração de eletricidade, no setor de transportes ou na indústria. A produção de energia por usinas hidrelétricas ou nucleares também apresentam alguns problemas específicos. Um meio de resolver estes problemas é a remoção de suas causas, atualmente muito difícil, já que os combustíveis fósseis correspondem a cerca de 80% do consumo de energia mundial. Resultados mais rápidos são obtidos por meio do uso mais eficiente da energia, o qual propicia a extensão da vida útil dos meios de energia e, considerando que a eficiência energética global é de 37%, permitem uma boa ampliação de uso neste sentido [6].

Para se combater os desperdícios, pode-se atuar na conscientização e educação do consumidor, obtidas pela exposição dos resultados em economia e benefícios ambientais gerados pela mudança de hábitos e comportamentos, e na melhoria do rendimento de equipamentos, sistemas e processos, que é atingida pela adequação de normas, e essencialmente pela premiação e reconhecimento das empresas [7].

No Brasil, uma das iniciativas foi o desenvolvimento do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), em 1985, sob coordenação do Ministério das Minas e Energia (MME) e secretaria executiva na Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (Eletrobrás) com a finalidade de promover o combate ao desperdício de energia elétrica, na produção e no consumo, contribuindo para a melhoria da qualidade de produtos e serviços e para a redução dos impactos ambientais. Dentre as ações tomadas está a criação do SELO PROCEL, instituído pelo Decreto Presidencial de 08 de dezembro de 1993, cujo objetivo é orientar o consumidor no ato da compra quanto aos produtos que apresentem melhores índices de eficiência energética dentro de cada categoria, e conseqüentemente estimular a fabricação de produtos mais eficientes [8].

1.2 Caracterização dos Distúrbios de Qualidade de Energia Elétrica

Os problemas de QEE podem se originar tanto na rede elétrica da concessionária como no sistema interno de distribuição do consumidor. Para avaliar esses distúrbios faz-se necessária uma classificação de acordo com as características de cada um deles, dividindo-os em: transitórios, variações de tensão de curta duração, variações de tensão de longa duração, desequilíbrio de tensão, distorções na forma de onda, flutuação de tensão e variação de frequência [9]. A seguir são apresentados os conceitos relativos a cada um dos distúrbios, segundo Dugan *et al* [3] e Deckmann [10], sendo previamente mostradas as condições ideais de operação de um sistema elétrico. Ao final da seção é apresentada a tabela 1.1 que explicita os problemas relacionados com QEE, relacionando seus conteúdos espectrais, durações e magnitudes de tensão típicos.

1.2.1 Condições ideais de operação de um sistema elétrico

Nesta subseção são descritas as condições que um sistema elétrico trifásico ideal deve satisfazer na operação em regime permanente, as quais garantem o atendimento adequado de qualquer carga a ele ligada.

Forma de onda senoidal

A função senoidal garante a reversibilidade do processo de conversão eletromagnética, associada à lei de indução de Faraday, preservando as formas de onda do fluxo e da tensão, a menos da variação de amplitude e do deslocamento de fase resultantes de derivação ou integração. Matematicamente a tensão senoidal fica caracterizada como na equação (1.1).

$$v(t) = A \sin(2\pi ft + \theta) \quad (1.1)$$

Com:

A : amplitude da onda senoidal [V]

f : frequência da onda [Hz]

θ : ângulo de fase relativo à referência temporal [rad]

Amplitude constante

A amplitude da tensão determina o nível de isolamento requerido e o nível de corrente para uma dada potência ou para uma dada impedância. Portanto, para um certo tipo de isolamento, é a amplitude da tensão constante que garante a potência desejada para cargas passivas de impedância constante.

Frequência constante

Há a necessidade de um controle de frequência contínuo e rigoroso para manter o sistema operando em condições estáveis, pois é a frequência da tensão que determina o balanço entre as potências geradas e as consumidas pelas cargas, a estabilidade da operação dos geradores síncronos e o sincronismo entre os vários geradores interligados.

Fases equilibradas

Em sistemas trifásicos, além das características de forma de onda citadas, é preciso que a potência se distribua igualmente entre as fases, para assegurar um sistema equilibrado, no qual para cada fase as cargas devem ter as mesmas características elétricas e magnéticas e as tensões as mesmas amplitudes e defasagens. Estas condições são satisfeitas para as tensões dadas na equação (1.2).

$$\begin{aligned}v_a(t) &= A \operatorname{sen}(2\pi ft + \theta) \\v_b(t) &= A \operatorname{sen}(2\pi ft + \theta - 2\pi/3) \\v_c(t) &= A \operatorname{sen}(2\pi ft + \theta + 2\pi/3)\end{aligned}\tag{1.2}$$

Prova-se que para um sistema equilibrado o fluxo de potência total é unidirecional e constante, indo da fonte para a carga, garantindo a não circulação de potência desnecessária (perdas) ou a sobrecarga de uma fase em relação às outras.

Fator de potência unitário

A operação com fator de potência unitário propicia algumas vantagens como fluxo de potência mínimo na linha para uma determinada carga, já que não há a necessidade de transmissão de potência reativa, perdas de transmissão mínimas e melhora da capacidade de regulação de tensão.

Perdas mínimas

Do ponto de vista da eficiência do transporte de energia elétrica é desejável que as perdas sejam mínimas. Entretanto, são as resistências elétricas presentes no sistema que garantem o amortecimento e a atenuação de transitórios. Usualmente considera-se que perdas na transmissão entre 3 e 5% propiciam uma operação adequada do sistema [10].

Condições reais de operação

Em sistemas elétricos reais estas condições dificilmente são satisfeitas, já que a rede está sempre sujeita a falhas ou perturbações. Entretanto é interessante adotar as condições de operação de um sistema ideal como referência na avaliação da qualidade de energia de um sistema real. A figura 1.1 mostra uma forma de onda que atende às condições ideais.

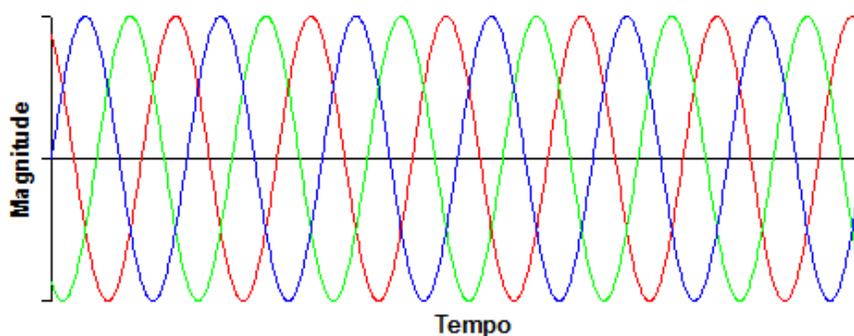


Figura 1.1: Forma de onda ideal de tensões e correntes elétricas de um sistema elétrico em regime permanente.

1.2.2 Transitórios

Transitórios são fenômenos eletromagnéticos oriundos de alterações súbitas nas condições de operação do sistema elétrico, sendo este termo usado para denotar um evento indesejado e de natureza momentânea. Eles podem ser caracterizados em duas categorias: impulsivos e oscilatórios.

Transitório impulsivo

Um transitório impulsivo é uma alteração repentina nas condições de regime permanente da tensão, da corrente ou ambas, caracterizada por impulsos unidirecionais em polaridade (positiva ou negativa) e com frequência bem diferente da frequência da rede, tendo como principal causa a descarga atmosférica. A caracterização de sua forma de onda se dá pela sua profundidade e seu decaimento, como visto na figura 1.2.

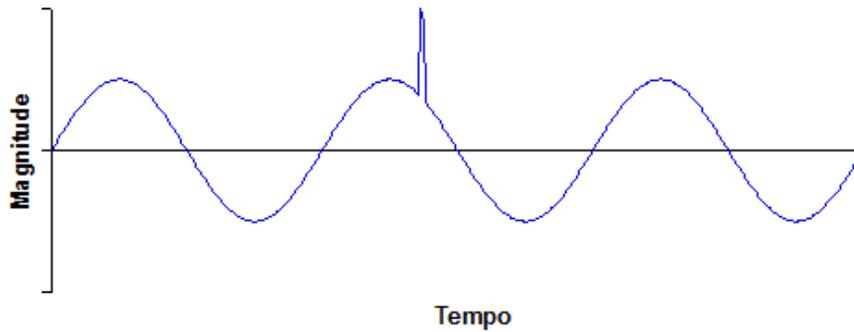


Figura 1.2: Transitório impulsivo.

Transitório oscilatório

Um transitório oscilatório é uma alteração repentina nas condições de regime permanente da tensão, da corrente ou ambas, caracterizada por oscilações com polaridade positiva e negativa. Suas principais causas são a energização de linhas, a eliminação de faltas ou o chaveamento de capacitores ou de transformadores. A característica de sua forma de onda é dada pela frequência, duração e magnitude, exemplificado na figura 1.3.

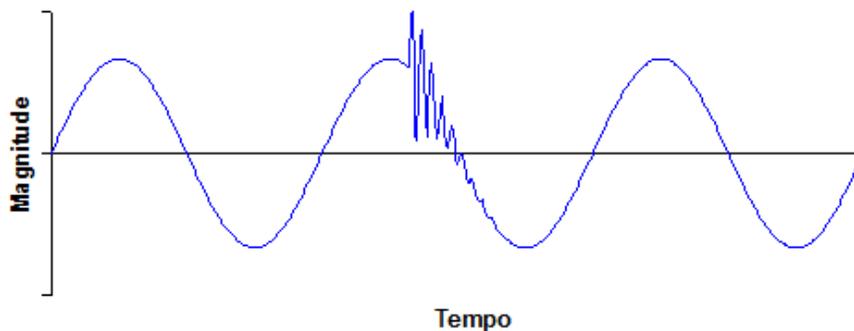


Figura 1.3: Transitório oscilatório.

1.2.3 Variações de tensão de curta duração

Variações de tensão de curta duração são alterações no valor eficaz da tensão, as quais, de acordo com suas durações, classificam-se como instantâneas (de 0,5 a 30 ciclos), momentâneas (de 30 ciclos a 3 s) ou temporárias (de 3 s a 1 min), e portanto são eventos caracterizados pela sua duração e magnitude. Há três categorias: interrupções, afundamentos e elevações de tensão.

Interrupção

Uma interrupção ocorre quando a tensão de alimentação ou a corrente da carga ficam abaixo de $0,1 pu$. Suas causas são: curto-circuito, falha de equipamento ou mau funcionamento de sistemas de controle. Como exemplo tem-se a figura 1.4.

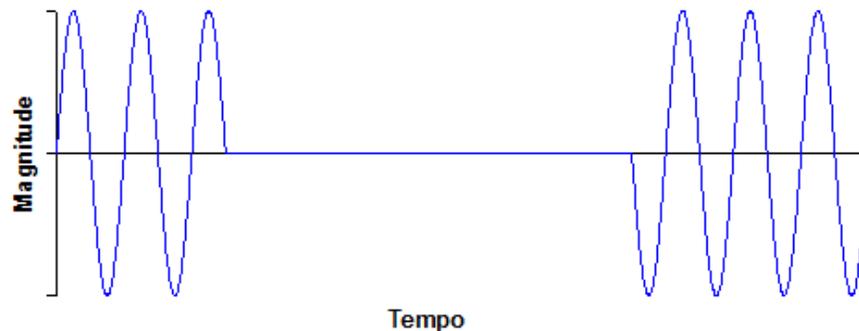


Figura 1.4: Interrupção.

Afundamento de tensão

O afundamento de tensão ou *sag* é caracterizado pela diminuição entre $0,1 pu$ e $0,9 pu$ na magnitude da tensão ou da corrente na frequência do sistema. Tem como causas uma falta no sistema, a energização de cargas pesadas ou a partida de grandes motores. A figura 1.5 exemplifica este evento.

Elevação de tensão

A elevação de tensão ou *swell* é caracterizada pelo aumento na magnitude da tensão ou da corrente entre $1,1 pu$ e $1,8 pu$ na frequência do sistema. Também tem como principal causa o curto-circuito, mas é menos comum que o afundamento de tensão. A figura 1.6 é um exemplo de sua forma de onda.

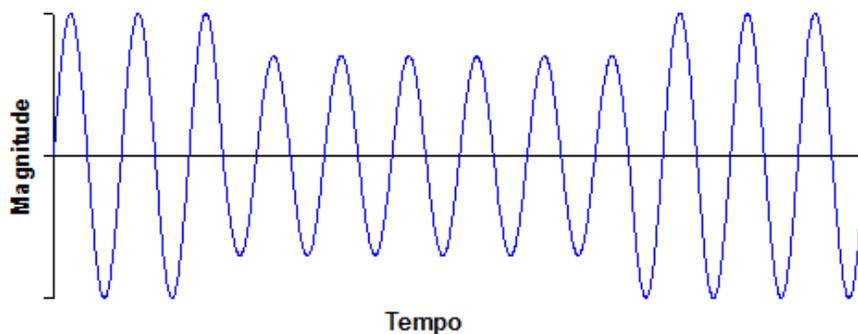


Figura 1.5: Afundamento de tensão.

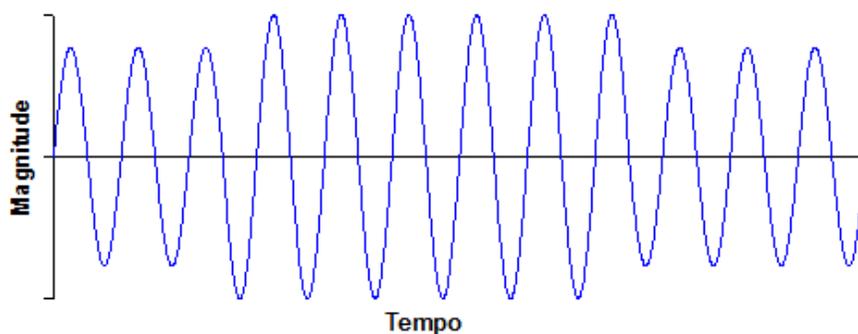


Figura 1.6: Elevação de tensão.

1.2.4 Variações de tensão de longa duração

Variações de tensão de longa duração são desvios na magnitude da tensão com duração acima de 1 min. Podem ser subdivididas em três grupos: interrupção sustentada, subtensão e sobretensão.

Interrupção sustentada

Uma interrupção sustentada tem como característica a tensão igual a zero. É o caso do desligamento de uma linha, sem previsão de retorno imediato. Pode ser tanto de forma imprevista, no caso de defeito, necessitando a intervenção humana para o restabelecimento do sistema, como de forma programada, para manutenção ou transferência de carga.

Subtensão

A subtensão é a diminuição na magnitude da tensão abaixo de $0,9 pu$ na frequência do sistema, correspondendo ao prolongamento do afundamento de tensão. Suas principais causas são o chaveamento de cargas e o desligamento de banco de capacitores.

Sobretensão

A sobretensão é o aumento na magnitude da tensão acima de 1,1 *pu* na frequência do sistema, a qual corresponde ao prolongamento da elevação de tensão. Suas principais causas são o desligamento de cargas e a energização de banco de capacitores.

1.2.5 Desequilíbrio de tensão

O desequilíbrio de tensão é a variação desigual na amplitude e/ou na fase das tensões trifásicas. Sua principal origem está no sistema de distribuição devido às cargas monofásicas distribuídas inadequadamente (geram sequência negativa) e aos consumidores com alimentação trifásica que têm má distribuição em seus circuitos internos. A figura 1.7 mostra uma forma de onda trifásica com desequilíbrio de fase e amplitude. O desequilíbrio de tensão pode causar problemas de sobreaquecimento em motores de indução, maiores perdas no rotor de máquinas síncronas e a geração de harmônicas triplas por retificadores.

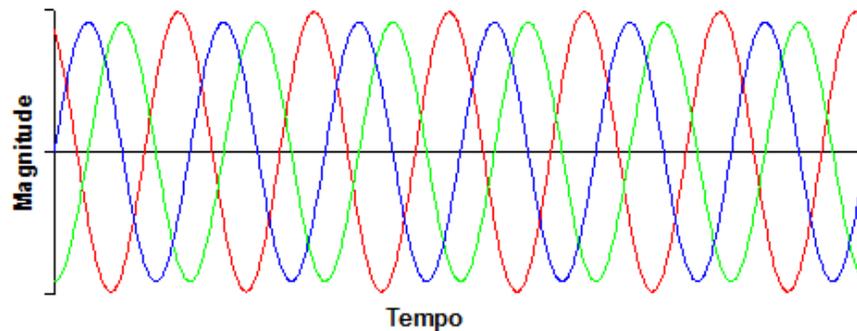


Figura 1.7: Desequilíbrio de tensão.

1.2.6 Distorções na forma de onda

Uma distorção na forma de onda é um desvio, em regime permanente, da forma de onda puramente senoidal na frequência fundamental caracterizada por um conteúdo espectral. Podem ser divididas em: nível contínuo, harmônicas, interharmônicas, recortes de comutações e ruído.

Nível contínuo

Nível contínuo ou nível CC corresponde à presença de uma tensão ou corrente contínuas em um sistema elétrico CA, como na figura 1.8. Pode ocorrer como resultado de distúrbios magnéticos ou assimetrias de conversores de eletrônica de potência.

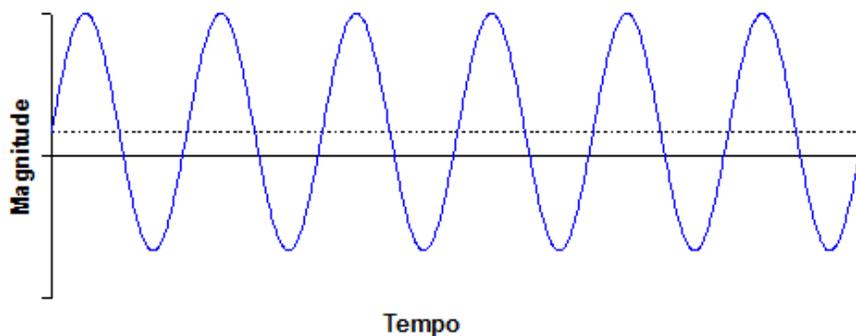


Figura 1.8: Forma de onda com nível contínuo.

Harmônicas

Harmônicas são tensões ou correntes senoidais com frequências múltiplas inteiras da frequência de operação do sistema elétrico (frequência fundamental), exemplificado na figura 1.9. Têm como fonte cargas não lineares, como ponte de retificadores, compensadores controlados a tiristores, cicloconversores, inversores e outros.

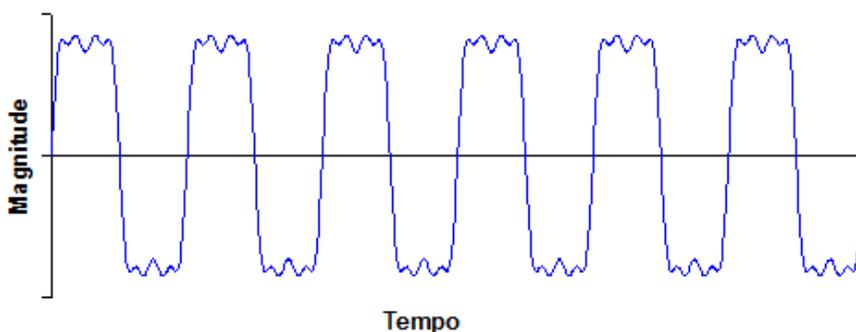


Figura 1.9: Forma de onda com harmônicas.

Interharmônicas

Interharmônicas são tensões ou correntes com frequências não múltiplas inteiras da frequência fundamental do sistema. A figura 1.10 mostra uma onda senoidal com interharmônicas. Conversores estáticos de potência, cicloconversores, motores de indução e equipamentos a arco são exemplos de fontes de interharmônicas.

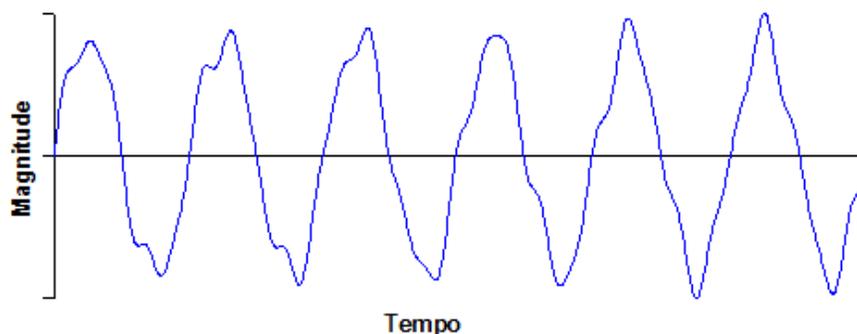


Figura 1.10: Forma de onda com interharmônicas.

Recortes de comutações

Recortes de comutações ou *notching* são transições sucessivas e bruscas de tensão ou corrente entre diferentes níveis, sendo um distúrbio periódico de tensão causado pela operação de equipamentos de eletrônica de potência quando a corrente é comutada de uma fase para outra, como exemplo tem-se a figura 1.11. Este fenômeno pode ser detectado através do conteúdo harmônico da tensão afetada, cujas componentes de frequência são de alto valor.

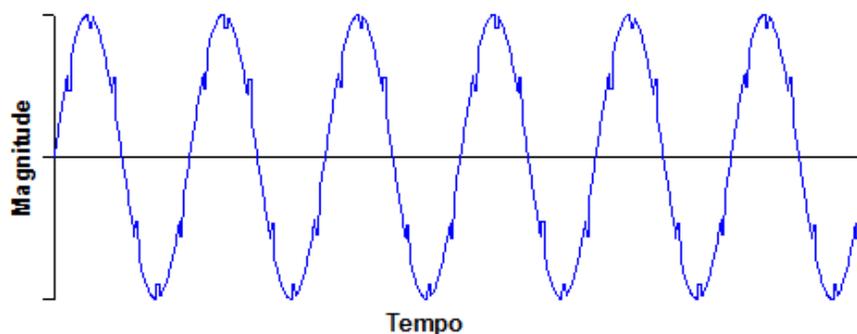


Figura 1.11: Forma de onda com recortes de comutação.

Ruído

Ruído é definido como um sinal elétrico indesejado, contendo uma larga faixa espectral com frequências menores que 200 kHz, que são superpostas às tensões ou às correntes de fase, ou encontradas em condutores de neutro. Um exemplo de ruído aparece na figura 1.12. Pode ser causado por equipamentos de eletrônica de potência, circuitos de controle, equipamentos a arco, fontes chaveadas e normalmente ocorre devido a aterramentos incorretos.

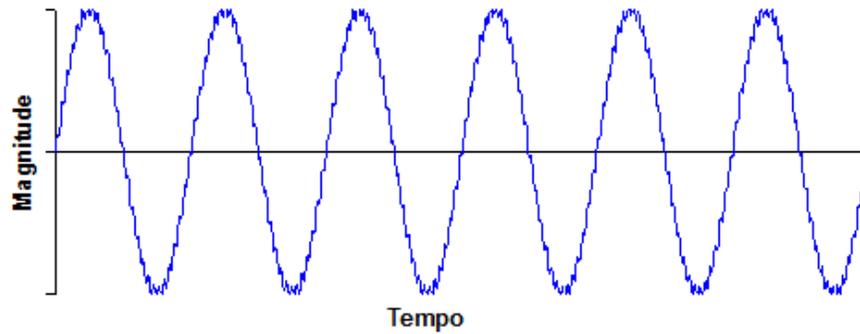


Figura 1.12: Forma de onda com ruído.

1.2.7 Flutuação de tensão

Flutuação de tensão é a variação sistemática da envoltória da tensão ou uma série de variações aleatórias desta, cuja magnitude mantém-se entre $0,9 pu$ e $1,1 pu$. É causada por variações de carga, como fornos a arco, elevadores, bombas e compressores. No sistema elétrico estas flutuações causam oscilações de potência e de torque em motores elétricos, queda de rendimento de equipamentos elétricos, interferência em sistemas de proteção e o efeito de cintilação luminosa ou *flicker*, que ocorre tipicamente como na figura 1.13.

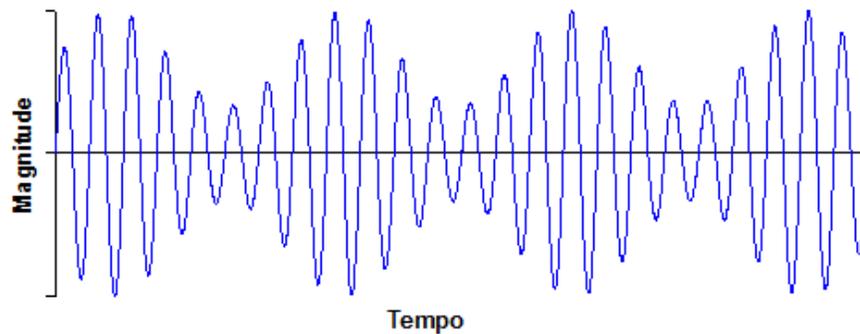


Figura 1.13: Flutuação de tensão.

1.2.8 Variação na frequência

Trata-se do desvio no valor da frequência fundamental do sistema de potência do seu valor nominal especificado. Suas principais causas são faltas no sistema de transmissão, saída de um grande bloco de carga ou de uma grande fonte de geração.

Tabela 1.1: Categorias e características dos problemas relacionados à QEE.

Categorias	Conteúdo espectral típico	Duração típica	Magnitude da tensão típica
Transitórios			
Impulsivo			
Nanosegundo	subida 5 ns	< 50 ns	
Microsegundo	subida 1 μ s	50 ns - 1 ms	
Milisegundo	subida 0,1 ms	> 1 ms	
Oscilatório			
Baixa frequência	< 5 kHz	0,3 - 50 ms	0 - 4 pu
Média frequência	5 - 500 kHz	20 μ s	0 - 8 pu
Alta frequência	0,5 - 5 MHz	5 μ s	0 - 4 pu
Variações de tensão de curta duração			
Instantâneas			
Interrupção		0,5 - 30 ciclos	< 0,1 pu
Afundamento		0,5 - 30 ciclos	0,1 - 0,9 pu
Elevação		0,5 - 30 ciclos	1,1 - 1,8 pu
Momentâneas			
Interrupção		30 ciclos - 3 s	< 0,1 pu
Afundamento		30 ciclos - 3 s	0,1 - 0,9 pu
Elevação		30 ciclos - 3 s	1,1 - 1,4 pu
Temporárias			
Interrupção		3 s - 1 min	< 0,1 pu
Afundamento		3 s - 1 min	0,1 - 0,9 pu
Elevação		3 s - 1 min	1,1 - 1,2 pu
Variações de tensão de longa duração			
Interrupção sustentada		> 1 min	0,0 pu
Subtensão		> 1 min	0,8 - 0,9 pu
Sobretensão		> 1 min	1,1 - 1,2 pu
Desequilíbrio de tensão		Regime permanente	0,5 - 2%
Distorções na forma de onda			
Nível CC		Regime permanente	0 - 0,1%
Harmônicas	0 - 100 ^a harmônica	Regime permanente	0 - 20%
Interharmônicas	0 - 6 kHz	Regime permanente	0 - 2%
Recortes de comutações		Regime permanente	
Ruído	Largura de banda	Regime permanente	0 - 1%
Flutuação de tensão	< 25 Hz	Intermitente	0,1 - 7%
Variação na frequência		< 10 s	

Fonte: Dugan *et al* [3].

1.3 Organização do Trabalho

Esta dissertação é estruturada em seis capítulos.

Este capítulo 1 apresentou uma introdução, na qual mostra-se a importância da aplicação da Conservação de Energia Elétrica e da análise de distúrbios relacionados à Qualidade de Energia Elétrica, e alguns aspectos relevantes quanto a esses assuntos e a característica de cada uma das perturbações que podem ocorrer.

O capítulo 2 é dedicado a aspectos relacionados à monitoração e ao gerenciamento da energia elétrica, mostrando um pouco da história dos medidores, relacionando os tipos existentes e as características dos atuais. Por fim, explicita o equipamento utilizado neste trabalho e suas características de *hardware* e de *software*.

O capítulo 3 trata exclusivamente da conservação de energia elétrica, mostrando a relevância do uso racional de energia e a consequente criação de um programa de avaliação da eficiência energética. Este é, então, detalhado em seu desenvolvimento e seus resultados. Também são apresentados outros meios de conservação de energia e os planos de expansão do projeto.

O capítulo 4 descreve mais detalhadamente os transitórios, as variações na amplitude da tensão e as distorções harmônicas, distúrbios típicos de qualidade de energia elétrica. Mostra suas origens e causas, consequências para o sistema elétrico e soluções encontradas na literatura para a atenuação de seus efeitos. São apresentadas perturbações registradas em cada um dos medidores e as formas de onda das cargas medidas e analisados os dados.

No capítulo 5 são apresentados conceitos relativos a potências elétricas trifásicas, passando pela Teoria Convencional, pela Teoria da Potência Harmônica e pela Teoria de Potências Instantâneas pq , sendo esta importante na aplicação de filtros ativos, discutidos neste capítulo. Como meio de atenuar as correntes harmônicas mostra-se através de simulação a atenuação de um filtro ativo aplicado aos dados reais de medições realizadas.

O capítulo 6 mostra as conclusões pertinentes a cada uma das partes deste trabalho, e são apresentadas algumas sugestões de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Monitoração e gerenciamento de energia elétrica

Para atender um crescente consumo de energia elétrica é preciso grande esforço para manter o equilíbrio entre a demanda e a oferta. Isso implica na construção de mais usinas, subestações e linhas de transmissão que, além de um elevado custo, traz elevados impactos ambientais. Uma das atitudes para se minimizar estes problemas é, sem dúvida, a adoção de programas de eficiência energética pelos consumidores e a adoção de práticas e equipamentos que proporcionem uma melhor qualidade de energia.

A implantação de um programa dessa natureza requer uma infra-estrutura de sistemas de medição, instalando instrumentos em cada área de interesse e interligando-os através de uma rede de comunicação, para a monitoração e o gerenciamento dos dados da energia elétrica. Isto permite efetuar ajustes quanto à energia e demanda, visualizar eventos de variação de tensão, avaliar a presença de harmônicas na rede, podendo, assim, efetivar adequações no sistema [11].

Para o estudo proposto, faz-se, então, necessária a utilização de equipamentos que monitoram e gerenciam a energia elétrica da rede.

2.1 Aspectos históricos dos medidores de qualidade de energia

Pode-se compreender que monitoração de qualidade de energia é, segundo McEachern [12], “o processo de adquirir dados de tensões e correntes, transportá-los para algum lugar que seja útil, e convertê-los em informações para tomada de decisões”.

Provavelmente o primeiro aparelho a efetuar algum tipo de monitoração de QEE foi um gravador de descargas atmosféricas desenvolvido pela GE por volta de 1920 (figura 2.1), o qual registrava dados qualitativos sobre a amplitude do impulso, além da data e o horário da ocorrência do evento.



Figura 2.1: Gravador de descargas atmosféricas, desenvolvido pela GE na década de 1920.

Fonte: Power Standards Labs [13].

Na década de 1960, Martzloff conseguiu, por meio de um arranjo de câmera e osciloscópio analógico (figura 2.2), gravar informações quantitativas de qualidade de energia, registrando formas de onda de descargas atmosféricas. Havia duas limitações nesse instrumento: o mecanismo de disparo e a frequência de resposta pré-definida. Com isso, esse trabalho demonstrou o quanto é importante conhecer as limitações da instrumentação e como elas interferem nos dados.

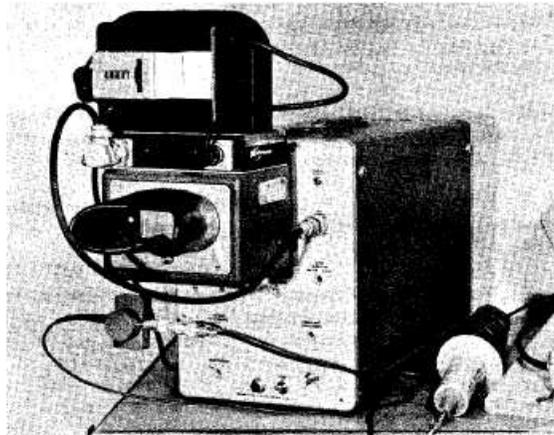


Figura 2.2: Gravador de formas de onda de descargas, desenvolvido por Martzloff na década de 1960.

Fonte: Hahn e Matzloff [14].

Nessa mesma década, houve, pela primeira vez, uma grande quantidade de gravadores de monitoração de qualidade de energia, figura 2.3, instalada em uma rede elétrica com a finalidade de adquirir dados estatísticos. Apareceram, então, os primeiros elementos de um sistema de monitoração de QEE inteligente: ampla distribuição, memória, ainda que mecânica, dos eventos e análise dos dados em uma localização central.

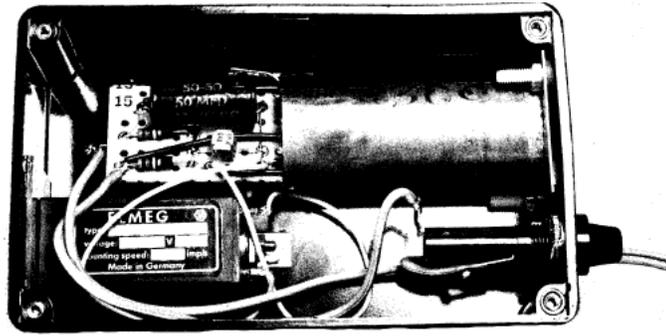


Figura 2.3: Contador de descargas, desenvolvido por Martzloff no meio da década de 1960.
Fonte: Martzloff [15].

Para a história dos medidores de qualidade de energia, também é relevante citar a criação do analisador de distúrbios de potência Série 606 (figura 2.4) na década de 1970, por parte da Dranetz Engineering Laboratories (atualmente Dranetz-BMI). Esse equipamento utilizava microprocessador e tinha como saída o tipo de evento e a magnitude de tensão impressos em fitas de papel. Apesar de algumas limitações, o mecanismo de disparo foi bem desenvolvido.



Figura 2.4: Monitor e analisador de distúrbios, Dranetz 606.
Fonte: Toronto Susplus & Scientific Inc. [16].

Já na década de 1980, apareceram gravadores gráficos de qualidade de energia (figura 2.5), com capacidade de capturar formas de onda e de disponibilizá-las através de linhas telefônicas. Tensões e correntes comportavam-se de acordo com determinadas regras, explicitadas no manual e necessárias para o entendimento de qualquer forma de onda gravada. Mas estes instrumentos ainda trabalhavam isoladamente.



Figura 2.5: Gravador de formas de onda de tensão e corrente, Dranetz PP1.
Fonte: Dranetz-BMI [17].

Foi na década de 1990 que teve início, por meio de um projeto do EPRI, a comunicação entre diversos aparelhos de medição. Gigabytes de dados de diversas localizações foram reunidos ao longo de vários anos, possibilitando a investigação dos problemas associados ao transporte de grande quantidade de informações. Além disso, a biblioteca de dados de qualidade de energia formada forneceu tanto uma base estatística para recomendações e normas, quanto uma preciosa base de dados para programas experimentais de interpretação de formas de onda.

Na virada do século, a internet tornou a comunicação e a troca de dados entre instrumentos mais simples. Sistemas modernos registram quaisquer dados necessários (correntes, tensões, potências, tempo), transportando-os e armazenando-os no local mais adequado, possibilitando o uso de algoritmos capazes de extrair informações úteis tanto para a análise como para a tomada de decisões. A figura 2.6 mostra o *Signature System Architecture*, um sistema de monitoração de QEE desenvolvido pela Electrotek Concepts, Dranetz-BMI, EPRI e Tennessee Valley Authority. Este consiste em um componente de aquisição de dados, *DataNode*, que adquire os valores das grandezas elétricas ou de outras quantidades relevantes e as transmite ao *InfoNode*, responsável por reunir os dados e disponibilizá-los para visualização via rede, por parte dos *WebBrowsers*.

Signature System Architecture

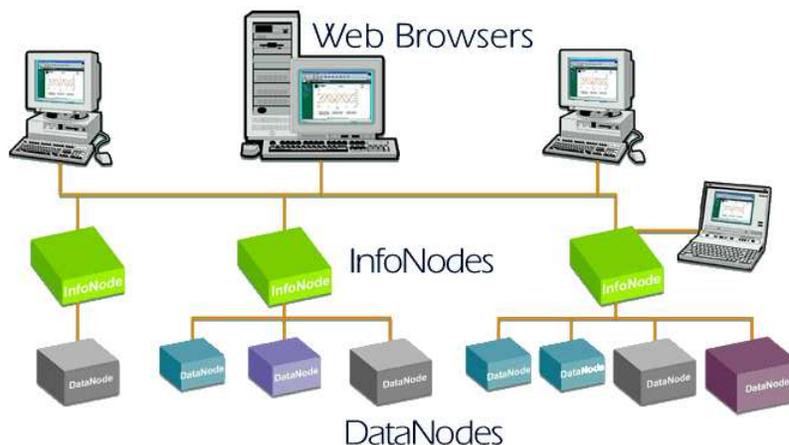


Figura 2.6: Sistema de monitoração de qualidade de energia.
Fonte: Signature System [18].

2.2 Tipos de instrumentos de medição de qualidade de energia

Problemas de qualidade de energia incluem tanto perturbações em diversas faixas de frequências como fenômenos em regime permanente. Dada esta variedade, existem diversos instrumentos que podem avaliar a QEE, dependendo do distúrbio analisado [3].

Multímetros

Os multímetros permitem verificar os níveis de tensão e de corrente elétrica nas instalações, e por meio desta análise pode-se constatar sobrecargas, problemas de sobre e subtensões e de desbalanceamentos entre os circuitos. Há basicamente três métodos de cálculos utilizados para avaliar um sinal elétrico: do valor de pico, do valor médio e do valor eficaz verdadeiro; sendo que os dois primeiros apenas resultam num valor correto para formas de onda perfeitamente senoidais, enquanto para o terceiro não há limitações quanto ao tipo de sinal medido, como está explicitado na seção 2.3.

Osciloscópios

Os osciloscópios podem fornecer informações valiosas em tempo real das formas de onda de tensões e correntes, mesmo sem a análise harmônica, já que são obtidas as magnitudes, visualizadas distorções e detectadas as principais variações dos sinais. Há diversos modelos de osciloscópios, entre eles o digital, o qual é capaz de armazenar dados, possibilitando salvar e analisar formas de onda.

Analisadores de distúrbios

Os analisadores de distúrbios foram desenvolvidos especificamente para análise de qualidade de energia e podem medir desde transitórios até interrupções de longa duração. Há basicamente duas categorias: analisadores convencionais, os quais listam os eventos com informações específicas (magnitudes e durações), e analisadores gráficos, os quais armazenam as formas de onda juntamente com informações descritivas.

Analisadores de espectro harmônico

Os analisadores de espectro harmônico são utilizados para verificar possíveis distorções harmônicas nos sinais. Para realizar a análise espectral são necessárias algumas funcionalidades do instrumento:

- Capacidade de medir tensões e correntes simultaneamente, possibilitando a obtenção do fluxo de potência harmônica;
- Capacidade de medir magnitude e ângulo de fase de cada componente harmônica;
- Sincronização e taxa de amostragem suficientes para obter a medição de componente harmônicas até a 50^a harmônica.

Medidores de *flicker*

Há diversos métodos de medição de *flicker* desenvolvidos, que variam desde o uso de instrumentos de valor eficaz com curvas de *flicker*, à elaboração de equipamentos com filtros sintonizados e análise estatística para determinar o nível de *flicker* na tensão.

Monitor de qualidade de energia inteligente

Trata-se de um instrumento integrado inteligente, o qual além de coletar os dados, converte-os em informações úteis, que podem ser distribuídas entre os usuários, permitindo a tomada de ações necessárias de maneira oportuna, antecipando possíveis ocorrências de eventos. As tecnologias existentes nos dias atuais permitem que a monitoração de um sistema seja um meio eficiente de detectar, resolver e prever problemas. Deste modo, pode-se visualizar distúrbios e suas possíveis causas, e também detectar condições anormais na rede, as quais podem levar a mau funcionamento ou dano a equipamentos.

Medidores existentes no mercado

Atualmente, existe no mercado uma grande variedade de medidores, os quais reúnem as diversas características presentes nos instrumentos acima citados, incluindo, além de mecanismos para o estudo da qualidade de energia elétrica, a capacidade de avaliar a eficiência energética. Entre eles estão: CCK 4220, da CCK Automação [19]; CVMk2, da Ciber do Brasil [20]; ION 7600, da Schneider Electric [21]; Mult-K Plus, da Kron Medidores [22]; Power 1000, da Dranetz-BMI [17]; SEL-734, da Schweitzer Electric [23].

Em geral, eles apresentam as seguintes funcionalidades:

- Capturam e armazenam dados de diversas grandezas elétricas, como tensão, corrente, frequência;
- Realizam cálculos de energia e de demanda (medição de faturamento);
- Registram eventos de qualidade de energia, como transitórios, afundamentos e elevações de tensão, e interrupções de fornecimento de energia elétrica;
- Fazem a análise espectral dos sinais, mostrando as suas harmônicas, além de calcular a taxa de distorção harmônica;
- Fazem a análise fasorial e de componentes simétricas, registrando formas de onda de tensões e de correntes;
- Possuem diversos protocolos de comunicação, tornando mais simples a disponibilização e a centralização dos dados;
- Possuem dispositivos de entrada/saída, admitindo a tomada de ações de controle;
- Proporcionam a visualização dos dados em tempo real.

2.3 Instrumentos de valor eficaz verdadeiro

O valor eficaz (*Root Mean Square* - RMS) de uma corrente alternada corresponde ao valor em corrente contínua que produziria a mesma dissipação de potência em um resistor sujeito a esta corrente alternada. Esse valor é proporcional à raiz quadrada do valor médio da magnitude do sinal analisado. Para formas de onda perfeitamente senoidais, equação (2.1), o valor eficaz relaciona-se com o valor de pico, como em (2.2), enquanto o valor médio (invertendo o ciclo negativo) aparece como em (2.3). Assim, a relação entre valor de pico e valor eficaz (fator de crista) é dado em (2.4) e entre o valor eficaz e o valor médio (fator de forma) em (2.5).

$$v(t) = V_{pico} \text{sen}(\omega t) \quad (2.1)$$

$$V_{ef} = \frac{V_{pico}}{\sqrt{2}} = 0,707V_{pico} \quad (2.2)$$

$$V_{medio} = \frac{2}{\pi}V_{pico} = 0,637V_{pico} \quad (2.3)$$

$$V_{pico} = \sqrt{2}V_{ef} = 1,414V_{ef} \quad (2.4)$$

$$V_{ef} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}}V_{medio} = 1,111V_{medio} \quad (2.5)$$

Os instrumentos de medição de tensão e de corrente usualmente utilizados são projetados para leitura de sinais senoidais. Devido à presença de harmônicas, as leituras desses aparelhos tendem a apresentar erros, isto porque estes efetuam a medição do valor médio da onda. Esses instrumentos de valor médio utilizam o fator de forma para relacionar o valor eficaz com valor médio medido em meio período de um sinal senoidal. Assim, tipicamente, seus circuitos são constituídos por uma ponte de diodos que retifica o sinal, um amplificador que o multiplica por 1,111 e um circuito que calcula o valor médio. Portanto, desde que o sinal seja puramente senoidal, obtém-se o valor eficaz da forma de onda.

Pela necessidade de se medir o valor eficaz de sinais não senoidais (sinais com harmônicas), surgiram os instrumentos de valor eficaz verdadeiro (*True RMS*). Nesses aparelhos é computada a raiz quadrada da média no tempo do quadrado dos valores instantâneos do sinal de entrada. Embora seja obtido corretamente o valor eficaz, sua implementação é limitada pela largura de banda e pelo fator de crista. Quanto à largura de banda, que identifica a faixa de frequências do sinal na qual o medidor é capaz de realizar medidas confiáveis, para medições em sistemas de potências é suficiente considerar até a 50ª harmônica, ou seja, até a frequência de 2500 kHz. Já o fator de crista está diretamente relacionado à precisão de leitura do equipamento. A tabela 2.1 mostra as diferentes respostas dos dois tipos de instrumentos para algumas formas de onda [24, 25].

Como consequência, é fundamental o uso de instrumentos que meçam o valor eficaz verdadeiro em instalações com quantidade significativa de harmônicas, evitando, assim, variações de até 40% nas medidas, as quais poderiam acarretar problemas no dimensionamento de cabos ou de proteções das instalações, ou mesmo erros em estudos realizados.

Tabela 2.1: Comparação entre diversos sinais para os dois tipos instrumentos.

Tipo de onda	Senoidal	Quadrada	Retificada monofásica	Retificada trifásica
Instrumento de valor médio	Correto	10% acima	40% abaixo	5-30% abaixo
Instrumento de valor eficaz verdadeiro	Correto	Correto	Correto	Correto

2.4 Medidor de energia elétrica

Neste trabalho, utilizou-se medidores *ION 7600* da *Power Measurement* [26], figura 2.7, os quais possuem medição de valor eficaz verdadeiro de tensão, corrente, potência e energia e têm a capacidade de registro de eventos e medições para o monitoramento da qualidade de energia elétrica.



Figura 2.7: Medidor de energia ION 7600 com visor integrado.
Fonte: Schneider Electric Brasil [21].

Juntamente com dispositivos de controle, podem ser utilizados em uma variedade de aplicações, tanto isoladamente, quanto como parte de um sistema de gerenciamento de energia. Entre elas estão:

- Medição de rendimento;
- Automação de subestação;
- Monitoração de QEE;
- Medição de operações comerciais;
- Controle de demanda e fator de potência;
- *Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA)*;
- Monitoração e controle de geração distribuída.

2.4.1 Características de *hardware*

Nesta seção são descritas as características físicas do medidor ION 7600.

Esquema de ligação

A figura 2.8 mostra o esquema de ligação usado para conectar os medidores na rede, permitindo a aquisição dos dados.

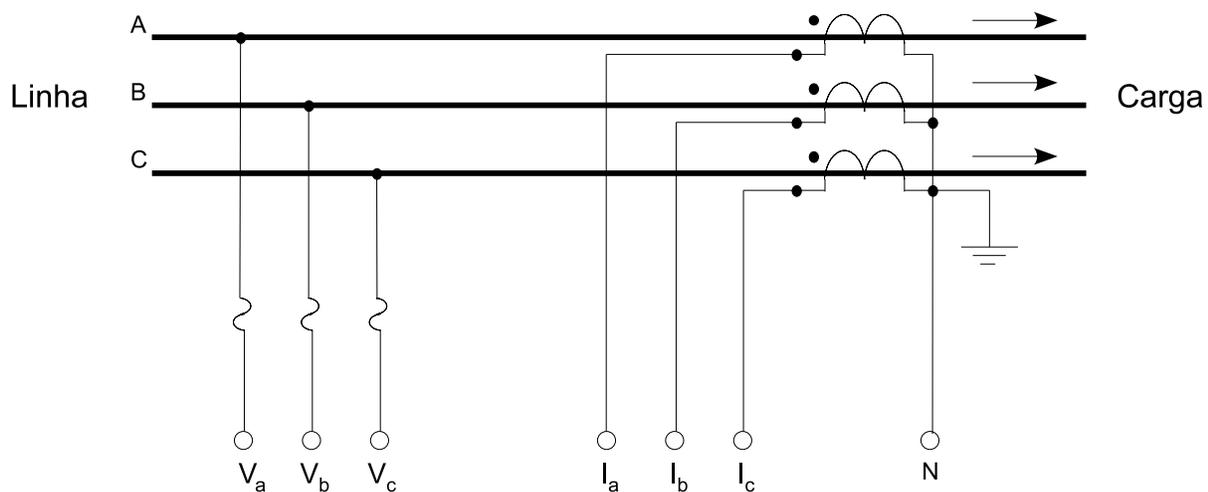


Figura 2.8: Esquema de ligação dos medidores.

Especificações

As tabelas 2.2 a 2.7 mostram alguns dados técnicos do medidor, os quais incluem características de medição, especificações elétricas, taxas de registro de dados e condições que devem ser atendidas para seu correto funcionamento.

Tabela 2.2: Especificações de medição do ION 7600.

Parâmetro	Precisão (\pm % da leitura)	Limites de registro
Tensão (l-l) (l-n)	0,1%	0 a 1×10^6 V
Frequência	0,01%	47 a 63 Hz
Corrente (I_1, I_2, I_3)	0,1%	0 a 1×10^6 A
Corrente (I_4, I_5)	0,4%	0 a 1×10^6 A
kW, kVAr, kVA	classe 0,2	0 a $\pm 3,3 \times 10^7$
kWh, kVArh, kVAh	classe 0,2	0 a $\pm 1 \times 10^{37}$
Demanda de kW, kVA	classe 0,2	0 a $\pm 3,3 \times 10^7$
Fator de potência (ao unitário)	0,5%	-0,01 a -100 e 100 a 0,01
Harmônicas (até a 40 ^a)	IEC 61000-4-7	0 a 1×10^6
Harmônicas (até a 63 ^a)	1% do fundo de escala	0,0001 a 100
Fator k	5% do fundo de escala	0 a 1×10^6
Fator de crista	1% do fundo de escala	0 a 10
Componentes simétricos	Tensão: 0,2% do fundo de escala Corrente: 0,4% do fundo de escala	Magnitude: 0 a 1×10^6 Fase: -180 a 180

Fonte: Power Measurement [27].

Tabela 2.3: Especificações de tensões de entrada do ION 7600.

Parâmetro	Características
Entradas	$V_1, V_2, V_3, V_4, V_{REF}$
Entrada nominal	340 l-n / 600 l-l V_{ef}
Sobrecarga	1500 V_{ef} continuamente
Resistência dielétrica	3250 V_{ef} , 60 Hz por 1 min
Impedância	5 MW/fase
Captura de falta	1400 V_{pico}

Fonte: Power Measurement [27].

Tabela 2.4: Especificações de correntes de entrada do ION 7600.

Parâmetro	Características
Entradas	I_1, I_2, I_3, I_4, I_5
Transformadores de corrente	
Entrada nominal	10 A_{ef} , Tensão máxima: 600 V_{ef}
Sobrecarga	500 A_{ef} por 1 s ou 20 A continuamente
Corrente de partida	0,005 A_{ef}
Impedância	220 $k\Omega$

Fonte: Power Measurement [27].

Tabela 2.5: Especificações de registro do ION 7600.

Parâmetro	Características
Taxa de amostra	256 amostras por ciclo
Taxa dinâmica de tensão de entrada	14 bits efetivos
Taxa dinâmica de corrente de entrada	18 bits efetivos
Taxa de gravação de forma de onda	de 16 amostras por ciclo (96 ciclos) a 256 amostras/ciclo (7 ciclos)

Fonte: Power Measurement [27].

Tabela 2.6: Alimentação elétrica do ION 7600.

Parâmetro	Características
Entrada nominal	CA: 85 a 240 V ($\pm 10\%$), 47 a 63 Hz CC: 110 a 330 V ($\pm 10\%$)
Resistência dielétrica	2000 V_{ef} , 60 Hz por 1 min
Suporte mínimo	96 V por 100 ms (6 ciclos em 60 Hz) 120 V por 200 ms (12 ciclos em 60 Hz) 240 V por 800 ms (48 ciclos em 60 Hz)

Fonte: Power Measurement [27].

Tabela 2.7: Condições do ambiente suportadas pelo ION 7600.

Parâmetro	Características
Temperatura de operação	-20 a 70 °C
Armazenamento	-40 a 85 °C
Umidade	5 a 95%

Fonte: Power Measurement [27].

Comunicação

O instrumento tem a capacidade de comunicação simultânea através de quatro tipos de conexão, promovendo segurança na disponibilidade dos dados. A comunicação se dá por um dos seguintes meios [27]:

- COM 1: Porta RS-232/RS-485

Pode ser escolhido entre uma (conexão direta) ou outra (conexão serial), com taxa de transmissão entre 300 e 115.200 bps.

- COM 2: Porta RS-485

Conexão serial com taxa de transmissão de 300 a 57.600 bps.

- COM 3: Porta de transmissão por infravermelho ou modem interno

Há a opção de um ou outro. A primeira pode ser usada para baixar dados em tempo real para um computador portátil, com taxa de transmissão de até 115.200 bps. O segundo provê conexão rápida com taxa de transmissão de até 33,6 kbps.

- COM 4: Porta Ethernet

Há duas opções de porta: 10 Base-T com conector modular RJ45 ou 10 Base-FL com conector tipo ST. Oferece acesso direto a uma LAN/WAN, e permite a transferência de dados entre uma rede Ethernet e até 62 dispositivos por meio das 2 portas seriais dos medidores. A taxa de transmissão é de até 10 Mbps.

A figura 2.9 mostra os diversos modos de comunicação utilizados na conexão dos medidores, os quais possibilitam a formação de uma rede de monitoração.

2.4.2 Características de *software*

O medidor ION 7600 possui o *software ION Setup* (figura 2.10) [28] que proporciona a configuração e o controle dos dispositivos monitorados. Oferece uma interface gráfica para definir dados do medidor, instalar modelos nele, ver valores em tempo real e zerar os acumulados, verificar sua calibração e suas medições, definir opções de segurança.

É gerenciado pelo *software ION Enterprise* [29], o qual processa, analisa, armazena e compartilha as informações coletadas da rede. É este que habilita um medidor para fazer parte de um sistema de informação, que juntamente com os outros medidores e com os computadores locais, forma a rede de trabalho. É o responsável por gerenciar a rede monitorada, registrar os valores das grandezas elétricas,

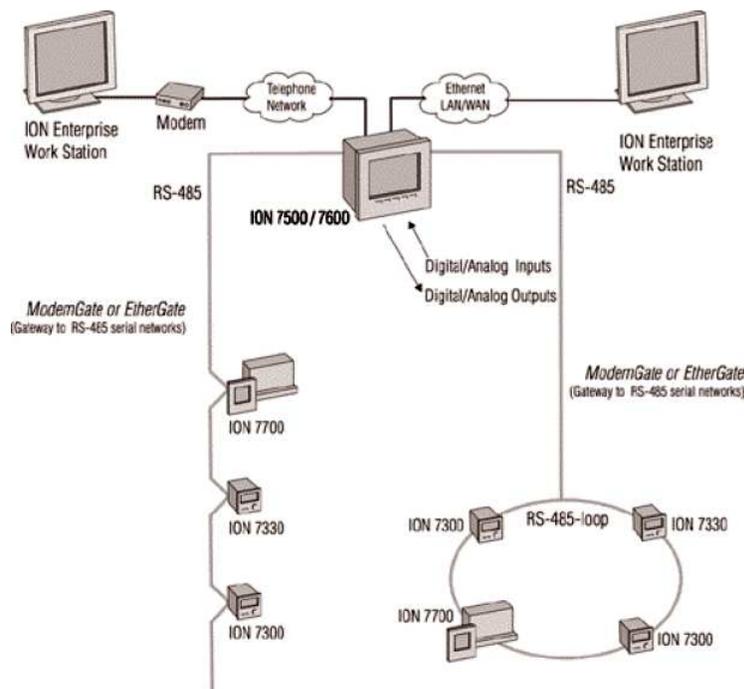


Figura 2.9: Tipos de comunicação do ION 7600.

Fonte: Power Measurement [27].

interpretar os dados de tempo real e armazenados, gerar relatórios do sistema e criar funcionalidades específicas no nível do medidor, admitindo, assim, a avaliação e a monitoração do sistema.

Para a realização dessas funções um pacote de *softwares* é disponibilizado pelo *ION Enterprise*, entre eles *ION Management Console*, *ION Vista* e *ION Reporter*.

ION Management Console

Este aplicativo (figura 2.11) lista os componentes da rede de trabalho, sendo responsável pela montagem da mesma. Através dele pode-se adicionar, remover, configurar e inicializar dispositivos do sistema e aplicações da base de dados.

Cada um dos componentes da rede são descritos a seguir:

- *Server*

Um servidor trata de um computador rodando o sistema *ION Enterprise*, que controla o acesso à rede e aos seus recursos. Um servidor roda componentes de serviço que criam a comunicação entre os sistemas *ION Enterprise*, além de habilitar links para a base de dados.

- *Sites*

Um *site* é um grupo de dispositivos que compartilham links de comunicação. Pode ser serial, modem ou *Ethernet gateway*.

- *Devices*

Um dispositivo é um medidor, ou outro aquisitor de dados ou componente de comunicação, instalado na rede de trabalho. Pode se conectar ao servidor via porta serial, rede sem fio, modem e *Ethernet*.

- *Dialout Modems*

Este modem é utilizado por um servidor para se comunicar com um modem remoto.

- *Connection Schedules*

Um agendamento de conexão é uma rotina programada em que um servidor pode se conectar ou se desconectar de um dispositivo.

ION Vista

É um *software* de visualização, análise e controle, tratando-se da principal interface com o usuário. Fornece uma visão gráfica do sistema, permitindo a observação de dados instantâneos dos medidores de energia ou de dados históricos do banco de dados, e relata a condição dos equipamentos informando sobre situações de alarme e habilitando a atuação de controles. Isto é feito através de um grupo de diagramas, sendo os principais listados abaixo:

- *Network Diagram*

É o diagrama da rede de trabalho (figura 2.12) que mostra e permite o acesso aos dados de cada um dos medidores monitorados no sistema.

- *Volts/Amps*

Este diagrama (figura 2.13) inclui uma ilustração simples do sistema exibindo valores em tempo real das tensões e correntes instantâneas e médias, do desbalanço da tensão, da frequência e do fator de potência. Também pode-se visualizar parâmetros mínimos e máximos no período, registro de eventos do medidor e dados históricos das tensões, correntes, potências, frequência e fator de potência médios no intervalo de 15 minutos.

- *Power Quality*

O diagrama de qualidade de energia (figura 2.14) relata os detalhes sobre harmônicas e os distúrbios de tensão. Em *Harmonics Measurements* há os valores em tempo real da Distorção Harmônica Total das tensões e correntes, um botão para acesso aos dados de histórico das THDs médias das tensões e correntes das fases e fator k, e outro para acesso aos valores mínimos e máximos das THDs no período. Em *Flicker Measurements* estão os dados em tempo real da severidade do *flicker* para o *short term* (Pst) e o *long term* (Plt). Já em *Voltage Disturbances* há o total de eventos de afundamento e elevação de tensão e transitórios, um histórico com valores estatísticos dos distúrbios ocorridos que podem ser inseridos na curva ITI (CBEMA), o registro das formas de onda das tensões e correntes dos eventos que podem ser traçadas em gráficos. Também há a possibilidade de gravar e ver as curvas instantâneas das tensões e correntes, e analisar suas harmônicas, componentes simétricas e diagramas fasoriais.

- *Revenue*

Este diagrama (figura 2.15) mostra os valores momentâneos medidos das potências e de energia e demanda. Em *Instantaneous Power* aparecem as potências ativa, reativa e aparente instantâneas distribuídas nos quatro quadrantes. A seção *Energy & Demand* apresenta a demanda e a energia acumulada das potências, enviadas e recebidas. Pode-se, além destas funcionalidades, observar a energia e demanda por quadrante, as demandas máxima e mínima e fazer a compensação de perdas de transformadores e linhas.

ION Reporter

É um aplicativo (figura 2.16) que permite a definição e a criação de relatórios baseados nas informações do banco de dados proveniente da monitoração da rede. A partir do pedido do usuário, ele processa as informações selecionadas e gera um relatório final no formato de planilha do Microsoft Excel ou HTML. Há alguns tipos pré-configurados como Qualidade de Energia, Perfil de Carga, e Energia e Demanda, mas também é possível criar relatórios personalizados a partir dos dados armazenados. Na sequência estão os principais relatórios pré-configurados:

- *Energy & Demand*

Este relatório (figura 2.17) mostra detalhes sobre o consumo de energia e o pico de demanda em um período especificado. Definindo-se as tarifas de energia elétrica adequadas para cada período do ano e horários do dia, por meio de um *Time Of Use Schedule* (TOU), figura 2.18, obtém-se o custo da energia elétrica no intervalo de tempo requerido.

- *Load Profile*

Este relatório (figura 2.19) gera o gráfico de perfil de carga (potências ativa, reativa e aparente) de um período desejado. Caracteriza os máximos de carga e pode ser usado para determinar e limitar os picos de demanda que resultam em penalidades financeiras para os consumidores.

- *Power Quality*

Este relatório (figura 2.20) lista o número dos afundamentos e elevações de tensão e transitórios, mostrando quando cada um ocorreu, sua severidade, duração e magnitude, e representando graficamente as formas de onda capturadas de cada evento individualmente. Os distúrbios mais graves são inseridos na curva ITI (CBEMA).

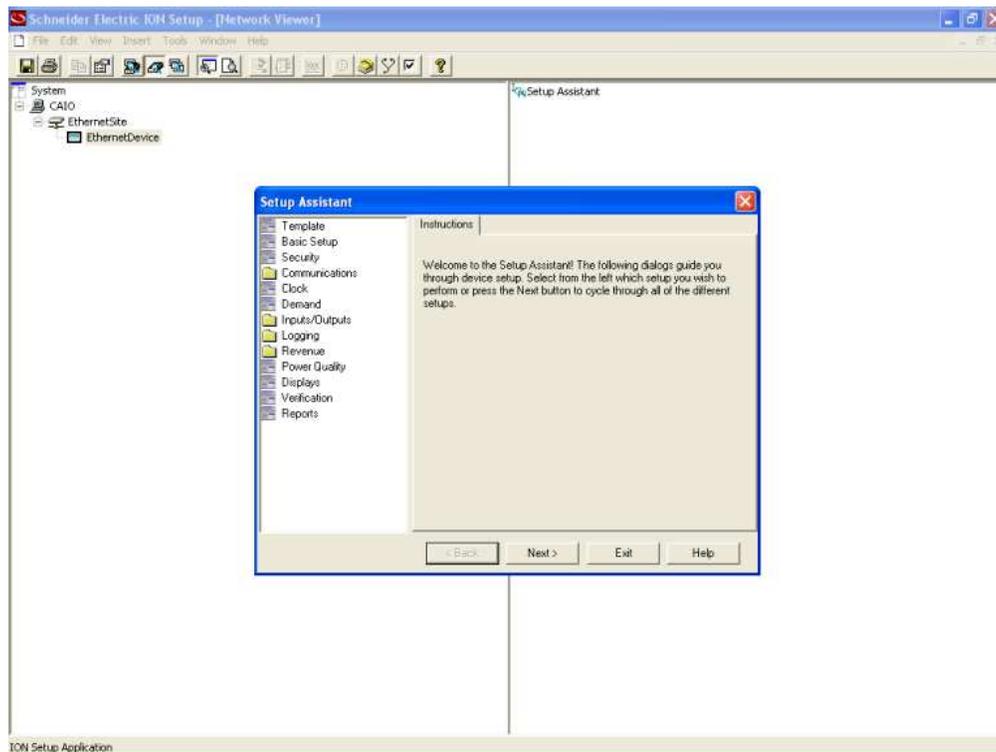
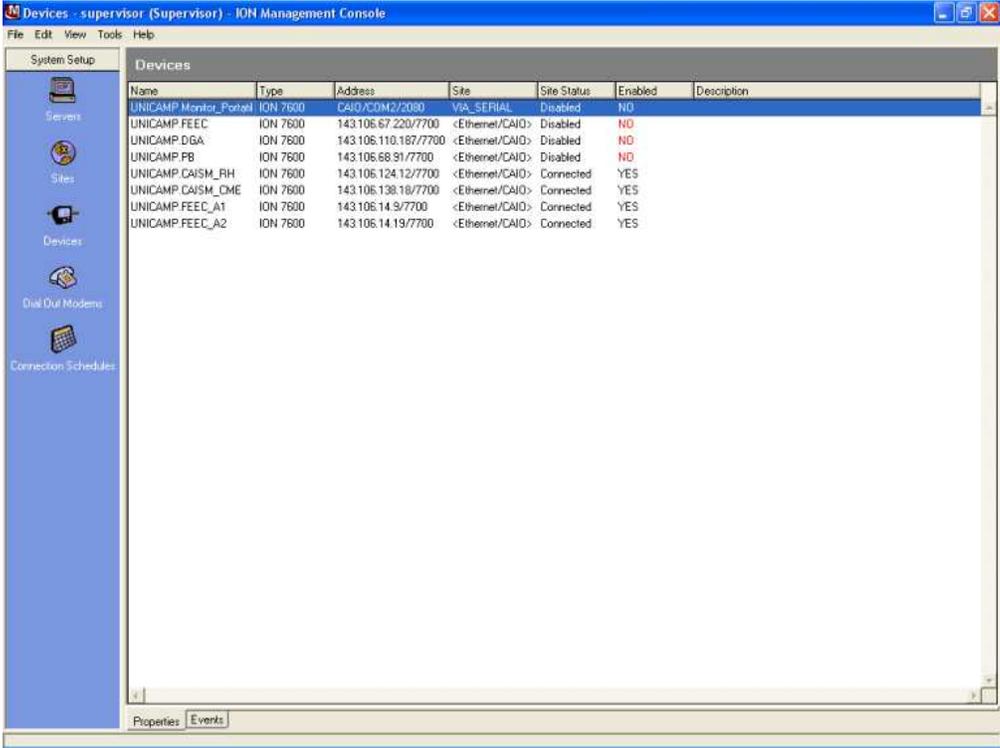


Figura 2.10: *ION Setup*.



The screenshot shows the 'Devices' tab in the ION Management Console. The table lists the following devices:

Name	Type	Address	Site	Site Status	Enabled	Description
UNICAMP_Monitor_Portatil	ION 7600	CAID/ACOM2/2000	VIA_SERIAL	Disabled	NO	
UNICAMP FEEC	ION 7600	143.106.67.220/7700	<Ethernet/CAID>	Disabled	NO	
UNICAMP DGA	ION 7600	143.106.110.187/7700	<Ethernet/CAID>	Disabled	NO	
UNICAMP PB	ION 7600	143.106.68.91/7700	<Ethernet/CAID>	Disabled	NO	
UNICAMP CAISM_RH	ION 7600	143.106.124.12/7700	<Ethernet/CAID>	Connected	YES	
UNICAMP CAISM_CME	ION 7600	143.106.138.18/7700	<Ethernet/CAID>	Connected	YES	
UNICAMP FEEC_A1	ION 7600	143.106.14.9/7700	<Ethernet/CAID>	Connected	YES	
UNICAMP FEEC_A2	ION 7600	143.106.14.19/7700	<Ethernet/CAID>	Connected	YES	

Figura 2.11: ION Management Console.

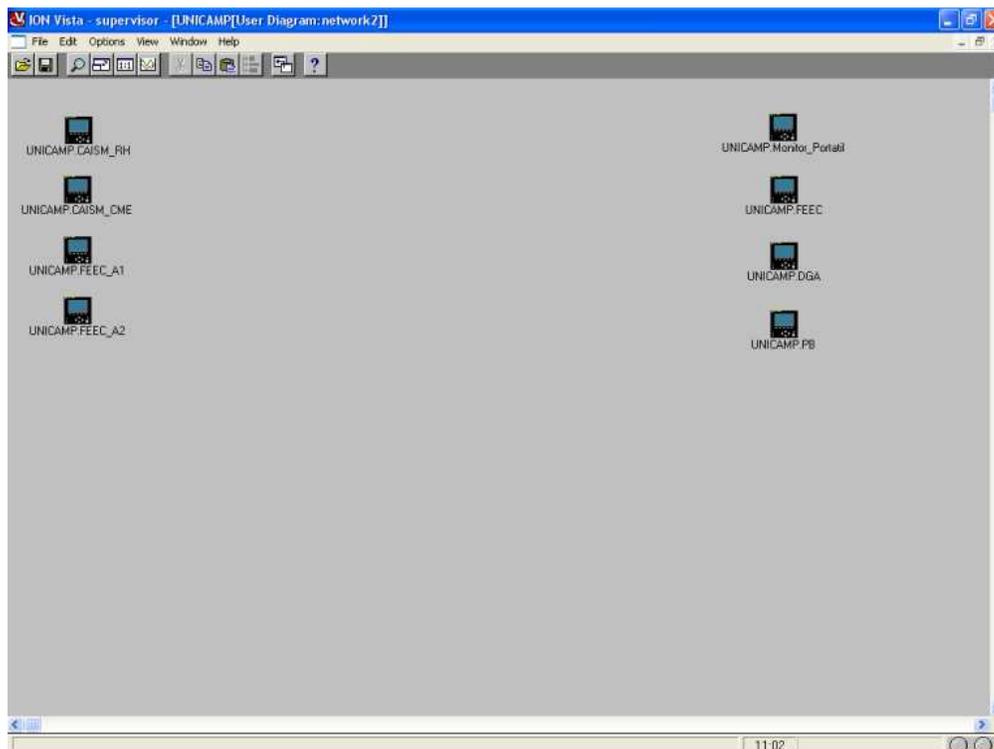


Figura 2.12: ION Vista - Network Diagram.

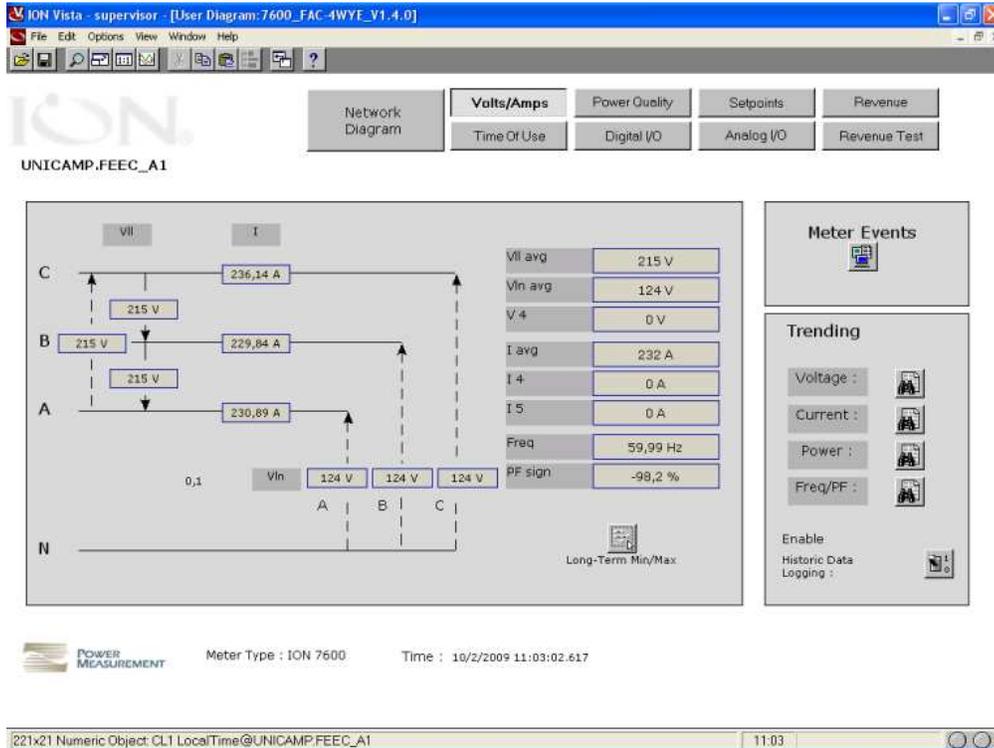


Figura 2.13: ION Vista - Volts/Amps.

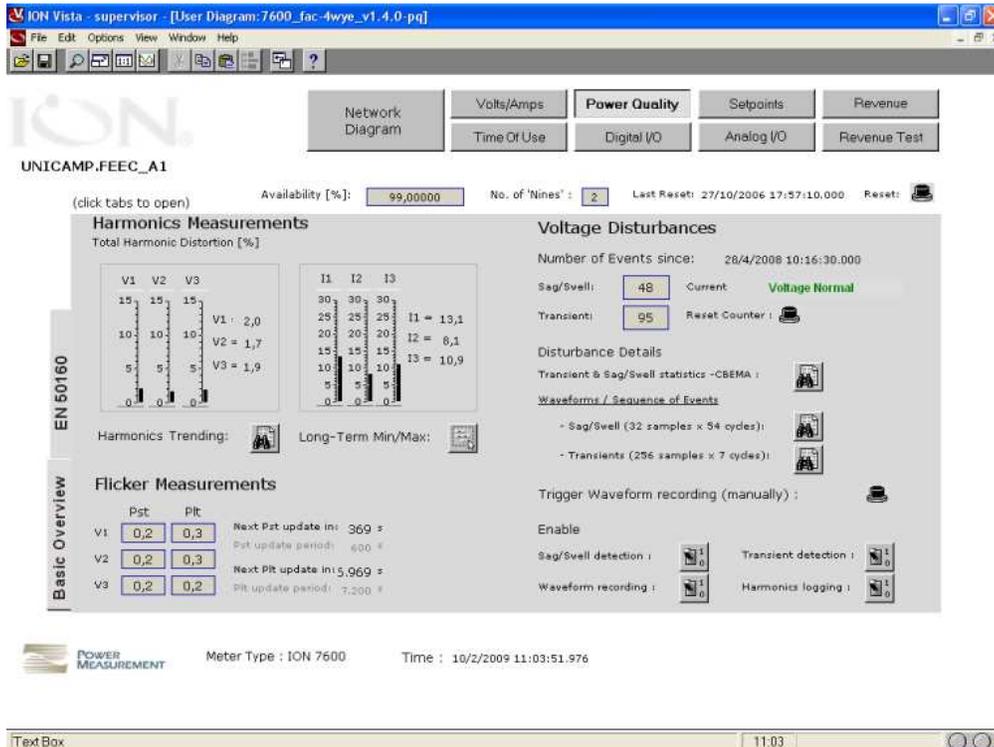


Figura 2.14: ION Vista - Power Quality.

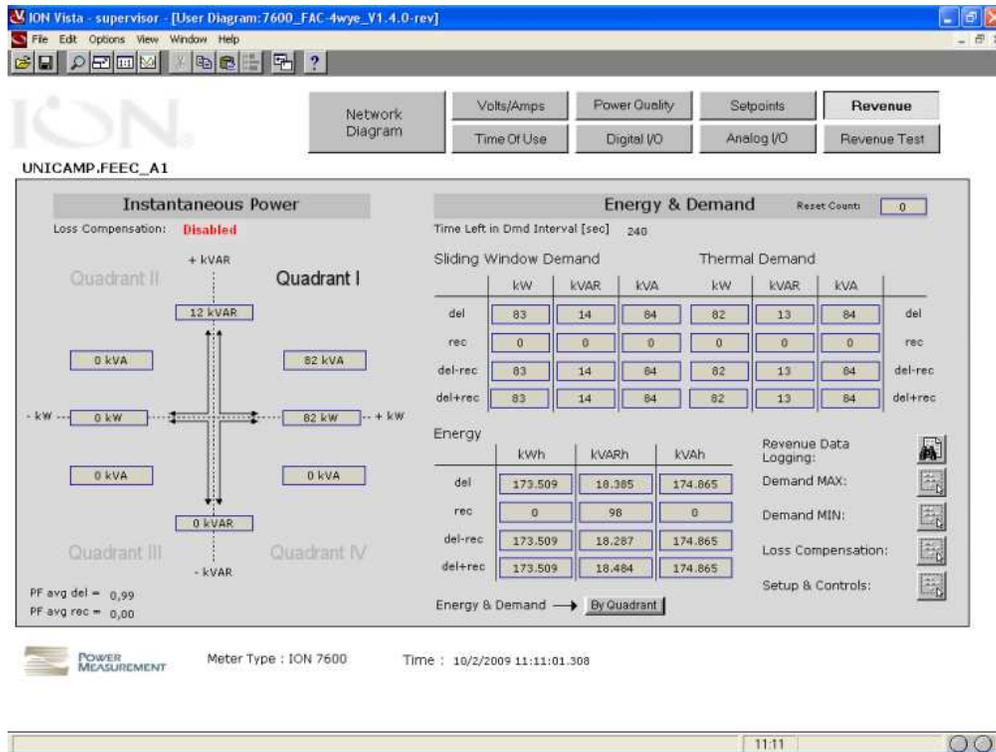


Figura 2.15: ION Vista - Revenue.



Figura 2.16: ION Reporter.

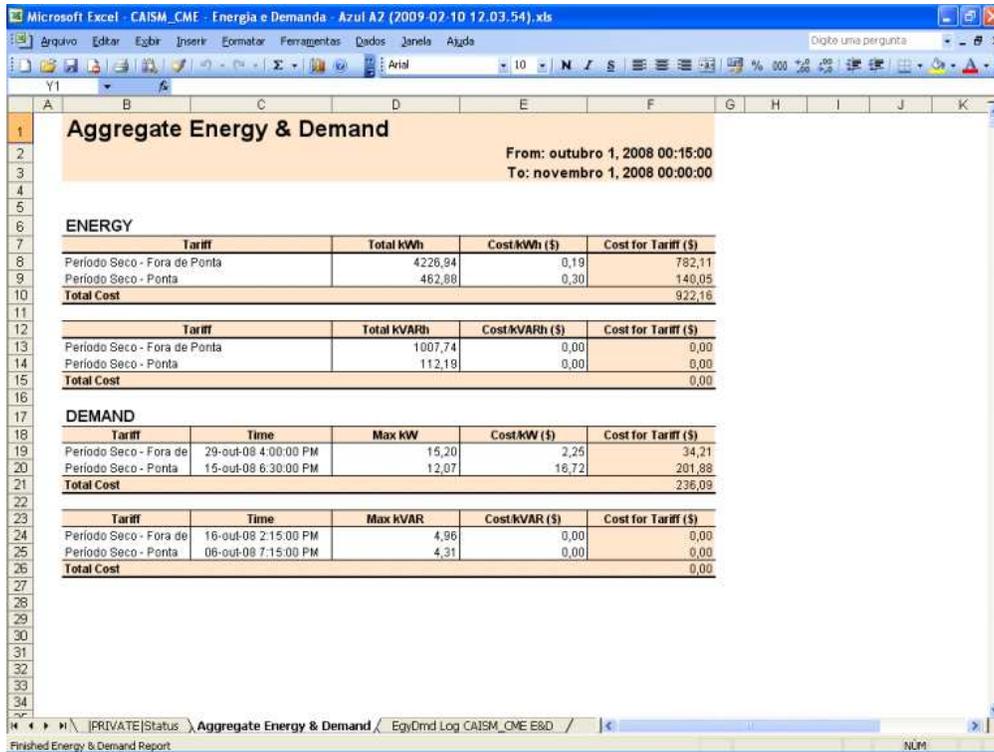


Figura 2.17: ION Reporter - Energy & Demand.

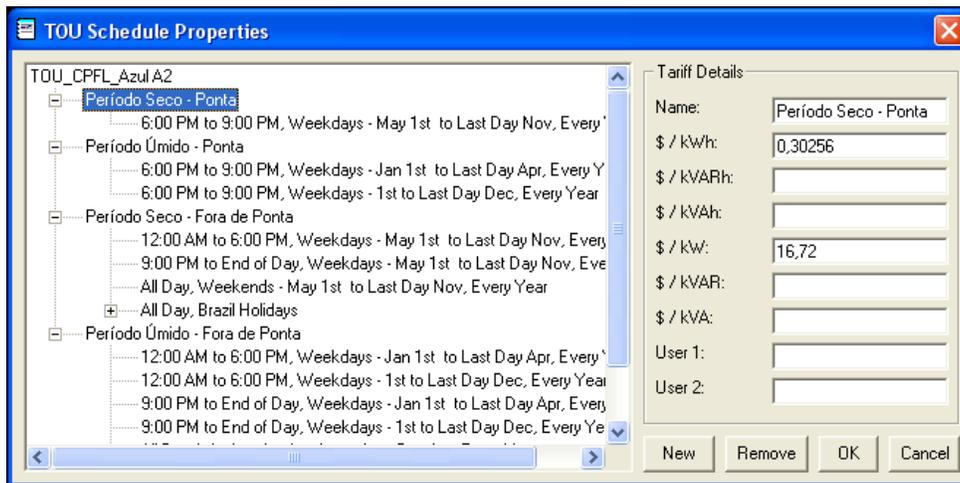


Figura 2.18: ION Reporter - Time Of Use Schedule.

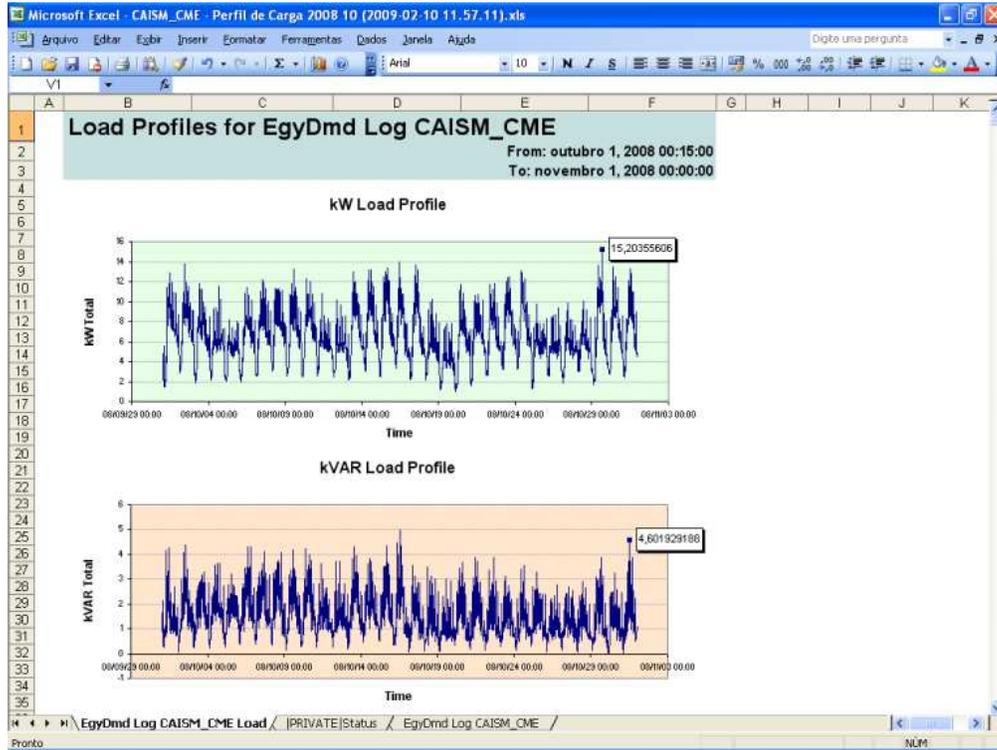


Figura 2.19: ION Reporter - Load Profile.

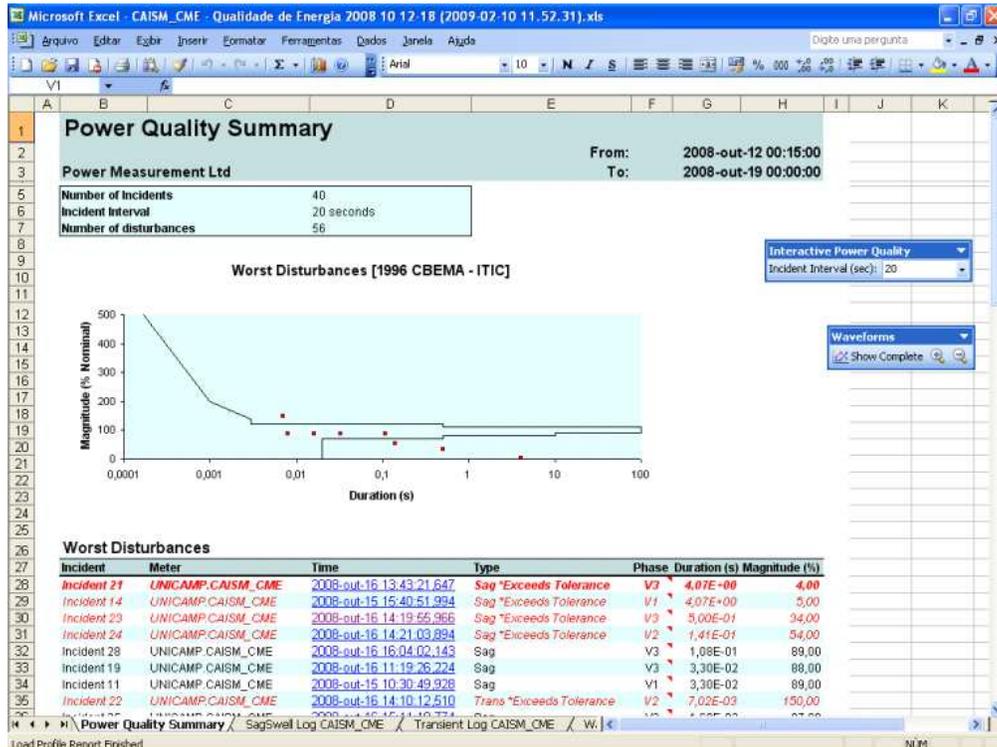


Figura 2.20: ION Reporter - Power Quality.

Capítulo 3

Conservação de energia elétrica

Em 2001, devido à crise de energia elétrica, o governo federal brasileiro criou a Câmara de Gestão da Crise de Energia Elétrica (CGCE), que teve a finalidade de administrar a oferta de eletricidade mediante racionamento de 20%, entre junho de 2001 e fevereiro de 2002, especialmente nas regiões Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste [30].

Com a crise, ficou evidente a necessidade do uso racional da energia elétrica pelos vários segmentos da sociedade, bem como a necessidade de gerar mais energia elétrica usando outros tipos de fontes que não a hidráulica. Isso levou a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) a lançar um edital para projetos de economia de energia elétrica. Assim, na Unicamp iniciou-se a implantação de um projeto piloto, com financiamento da FINEP, para avaliar a eficiência energética através de um programa de uso racional de energia elétrica e de exploração de fontes alternativas de energia elétrica.

3.1 Uso racional de energia elétrica

A energia elétrica tem grande destaque na matriz energética brasileira. Devido ao seu consumo crescente deve-se buscar alternativas para seu fornecimento além da construção de novas usinas, sejam hidroelétricas ou termoelétricas, que passam pela implantação de campanhas de combate ao seu desperdício e pelo investimento em ações visando o aumento da eficiência no seu uso.

Geralmente a aplicação de programas de uso eficiente e racional de energia apresentam custos e tempo de retorno de investimentos relativamente pequenos e os resultados quanto à redução de consumo são imediatos, tornando esta uma boa solução a curto prazo. O uso racional dá-se junto às unidades consumidoras, por meio da otimização dos equipamentos elétricos presentes na instalação, reduzindo o consumo, sem comprometer o desempenho. O consumidor final tem como vantagens, portanto, a redução do gasto com energia elétrica, a otimização da sua instalação elétrica e a preservação ambiental [31].

3.2 Projeto Ecogera

O Projeto Ecogera, financiado pela Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e administrado pela Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC) e pelo Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético da Unicamp (NIPE), contempla dois módulos:

- Conservação de energia;
- Geração de energia elétrica através de fontes alternativas de energia (neste caso, especificamente, o gás natural).

Este trabalho descreve somente o primeiro módulo, que tem por objetivo realizar a avaliação da eficiência energética na Unicamp a partir de uma célula inicial de trabalho, composta de quatro unidades de consumo de energia elétrica características da universidade em relação ao tipo de atividade realizada em cada uma delas, focando na redução do consumo de energia elétrica em iluminação.

3.2.1 A importância do projeto

A Unicamp é considerada um dos grandes consumidores da Região Metropolitana de Campinas, com consumo mensal variando entre 4.700 e 6.100 MWh e demanda em torno de 18 MW. É atendida em 11,95 kV por uma subestação de 138-11,95 kV da Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL) com um transformador de potência exclusivo de 25 MVA e a distribuição da energia elétrica é feita através de cinco alimentadores. Assim sendo, é relevante a implantação de ações que visem a economia de recursos na universidade.

3.2.2 Unidades de consumo

A célula inicial de trabalho foi subdividida em: uma instituição de ensino, um prédio de salas de aulas, uma unidade administrativa e uma unidade hospitalar, a qual contempla uma área médica e outra de caráter administrativo.

Em geral, cada uma das unidades é alimentada por mais de um transformador. Pelo fato de não haver medidores em quantidade suficiente para serem instalados em todos os quadros de distribuição existentes em cada uma delas, escolheu-se quadros de distribuição significativos do ponto de vista do consumo de energia elétrica das cargas a eles ligadas.

As unidades de consumo avaliadas são:

- Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC), uma instituição de ensino, pesquisa e extensão completa;

- Ciclo Básico II (PB), um prédio somente com salas de aulas;
- Diretoria Geral da Administração (DGA), uma unidade de natureza puramente administrativa;
- Centro de Atenção Integral à Saúde da Mulher (CAISM), uma unidade hospitalar, com dois medidores: um na Central de Materiais e Esterilização (CME) e outro na Diretoria Administrativa (DA).

3.2.3 Sistema de iluminação

Em prédios públicos, no Brasil, tem-se o seguinte perfil de consumo de energia elétrica: 48% ar condicionado, 24% iluminação, 15% equipamentos de escritório e 13% elevadores e bombas [32]. Junto a este fato, ainda há a ampla utilização de tecnologias de iluminação não eficientes, comprovando que existe um grande potencial para a conservação de energia elétrica, proporcionada pela melhoria da eficiência dos sistemas de iluminação, associada às características técnicas, à eficiência e ao rendimento dos elementos que os compõem, os quais são descritos a seguir [31, 33].

- Lâmpada

Trata-se de um dos componentes fundamentais, correspondendo ao elemento irradiador de luz, e pode ser, de acordo com seu princípio de funcionamento, incandescente ou de descarga (na qual incluem-se as fluorescentes).

As lâmpadas fluorescentes tubulares proporcionam uma boa forma de iluminação econômica, pois têm alta eficiência e longa durabilidade. As convencionais (T8 - 26 mm de diâmetro), muito presentes nas instalações da universidade, têm rendimento luminoso entre 33 e 62 lm/W, com reatores eletromagnéticos. Avanços tecnológicos permitiram o desenvolvimento de lâmpadas fluorescentes mais eficientes e compactas, as T5 (16 mm de diâmetro), as quais proporcionam um maior desenvolvimento óptico dos refletores, levando a melhorias na eficiência das luminárias, e são alimentadas diretamente por reatores eletrônicos. Em geral, as T5 têm rendimento luminoso em lúmen/Watt 7% maior que as T8, ambas alimentadas por reatores eletrônicos. Uma lâmpada T8 de 36 W apresenta 89 lm/W, enquanto uma T5 de 35 W, 95 lm/W [34].

- Reator

O reator tem por finalidade na ignição fornecer uma tensão impulsiva, permitindo a ionização do gás, e durante seu funcionamento manter a tensão no valor operacional da lâmpada e limitar a corrente elétrica circulante por ela.

São dois os tipos de reatores existentes: o reator eletromagnético, que possui baixo fator de potência (entre 0,6 e 0,7) e considerável perda de energia, dissipada no núcleo e no enrolamento, e o reator eletrônico, o qual tem melhor fator de potência, 0,95, e opera com chaveamento de um circuito eletrônico em alta frequência, havendo, assim, maior eficiência na conversão de energia elétrica em luminosa, e conseqüentemente uma redução do consumo de energia, de 12 a 25%, da sua temperatura de operação e do nível de ruído, aumento da vida útil da lâmpada e eliminação do efeito *flicker* [35].

- Luminária

Tem como principal função a distribuição da luz emitida pelas lâmpadas. Um de seus parâmetros mais importantes é a eficiência, a qual corresponde à porcentagem da luz irradiada pela lâmpada que efetivamente é emitida pela luminária. Avanços tecnológicos possibilitaram o desenvolvimento de luminárias mais eficientes equipadas com refletores espelhados de alumínio polido, que como na figura 3.1, reduzem a perda por reflexão e levam à redução de perdas devido à ausência de lâmpadas vizinhas, que evitam a absorção da luz emitida de uma por outra. Devido ao seu menor diâmetro e à sua temperatura de operação mais adequada, a utilização de lâmpadas T5 no lugar de T8 aumenta a eficiência energética do conjunto em até 15% [34].

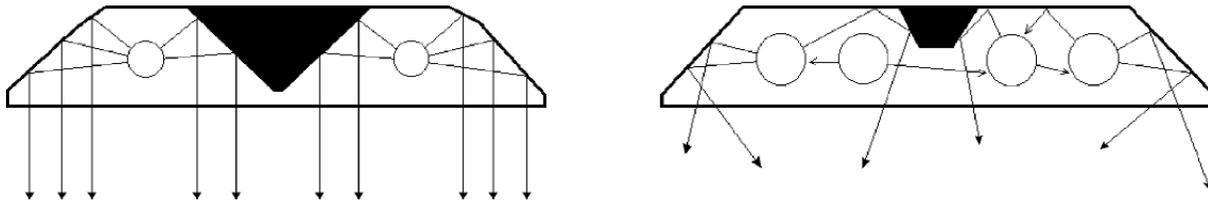


Figura 3.1: Luminárias reflexiva e convencional.

Fonte: Alvarez [31].

- Sensor de presença

A substituição do sistema de iluminação visa o aumento da eficiência, diminuindo a potência instalada, e se possível aumentando o desempenho, levando a uma redução do consumo de energia. Outra maneira de promover esta redução é pela minimização dos desperdícios, promovendo assim o uso racional da energia elétrica.

O sensor de presença é um dispositivo eletrônico capaz de identificar a presença de usuários nos ambientes monitorados e acender as luminárias do local, e desligá-las após certo tempo de ausência de movimentação. Desta maneira, proporcionam a economia de energia, já que evitam que as lâmpadas permaneçam acesas quando não há necessidade.

3.2.4 Desenvolvimento do projeto

Este trabalho apresenta as medições e resultados quanto à conservação de energia obtidos somente na FEEC, visto que é a única unidade consumidora, até o momento, na qual todas as medições antes e após a troca das luminárias foram efetuadas. Nas outras unidades as instalações estão em fase de conclusão.

Ponto de medição

Na Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação foi escolhido um painel que alimenta parcialmente o bloco F (FEEC-F) e compreende os seguintes ambientes:

- 6 salas de aula;
- 3 anfiteatros;
- Empresa Júnior da Engenharia Elétrica (Jr3E);
- Empresa Júnior da Engenharia de Computação (Compec);
- Centro Acadêmico da Engenharia Elétrica (CABS), com sala de jogos;
- 6 banheiros e 1 vestiário;
- corredores e escadas.

Na tabela 3.1 são listadas as cargas presentes antes das mudanças, num total aproximado de 38 kW.

Estudo preliminar

Antes da aquisição das novas luminárias fez-se um breve estudo nas salas de aula da FEEC para a verificação de suas condições quanto à iluminação e para que as modificações se enquadrassem nos critérios da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) presentes na NBR 5413 (Iluminância de Interiores), a qual estabelece para salas de aula uma iluminância entre 200 e 500 lux [36], dependendo das condições de uso do ambiente.

Além da análise acima, também realizou-se ensaios em laboratório de dois tipos de reatores: eletromagnético e eletrônico. Utilizou-se, então, duas variedades de luminárias: uma convencional, muito presente na unidade, com dois reatores eletromagnéticos e quatro lâmpadas de 40 W; e outra reflexiva, com um reator eletrônico, duas lâmpadas de 32 W e refletor espelhado. Os resultados estão

Tabela 3.1: Cargas do bloco F da FEEC antes da troca das luminárias.

Local	Tipo	Quantidade	Potência Total (W)
Salas de aula	luminárias 4 x 32 W	4	512
	luminárias 4 x 40 W	78	12480
	lâmpadas incandescentes 60 W	8	480
	lâmpadas incandescentes 100 W	8	800
	lâmpadas incandescentes 200 W	1	200
Anfiteatros	luminárias 2 x 32 W	2	128
	luminárias 2 x 40 W	19	1520
	lâmpadas fluorescentes 32 W	49	1568
	lâmpadas fluorescentes 40 W	118	4720
	lâmpadas incandescentes 60 W	2	120
Empresas Júniores Centro Acadêmico	lâmpadas incandescentes 100 W	8	800
	luminárias 2 x 20 W	1	40
	luminárias 2 x 32 W	2	128
	luminárias 1 x 40 W	4	160
	luminárias 2 x 40 W	7	560
	luminárias 3 x 40 W	4	480
	lâmpadas incandescentes 60 W	1	60
	lâmpadas incandescentes 100 W	2	200
	ar condicionado computadores outros aparelhos	4 13 -	5460 1950 800
Banheiros Vestiário	luminárias 2 x 20 W	1	40
	luminárias 3 x 32 W	2	192
	luminárias 2 x 40 W	3	240
	luminárias 3 x 40 W	6	720
Corredores e escadas	luminárias 2 x 20 W	4	160
	luminárias 2 x 32 W	2	128
	luminárias 2 x 40 W	41	3280
	luminárias 1 x 110 W	2	220

na tabela 3.2, da qual nota-se uma menor potência total e um melhor fator de potência no segundo tipo, e uma distorção da forma de onda que não é mais significativa em relação ao primeiro tipo. Outra constatação é o fato desta nova luminária não afetar de forma sensível o fluxo luminoso.

Mudanças realizadas

Determinou-se a substituição de todas as luminárias com lâmpadas fluorescentes pelas já apresentadas (luminárias com refletor espelhado, duas lâmpadas fluorescentes T5 de 32 W e reator eletrônico)

Tabela 3.2: Ensaio dos reatores.

Reator Eletromagnético (4 lâmpadas de 40 W)	Reator Eletrônico (2 lâmpadas de 32 W)
Tensão: 220,03 V Corrente: 0,9842 A Potência: 162,13 W Fator de potência: 0,75	Tensão: 220,93 V Corrente: 0,2862 A Potência: 60,30 W Fator de potência: 0,95
Tensão: 219,98 V (comp. fund.) Corrente: 0,97 A (comp. fund.) THD da tensão: 2,20% THD da corrente: 14,81%	Tensão: 220,83 V (comp. fund.) Corrente: 0,27 A (comp. fund.) THD da tensão: 3,00% THD da corrente: 14,27%

e a instalação de sensores de presença nos ambientes citados. A nova distribuição de cargas aparece na tabela 3.3, ficando no total em torno de 26 kW.

Tabela 3.3: Cargas do bloco F da FEEC depois da troca das luminárias.

Local	Tipo	Quantidade	Potência Total(W)
Salas de aula	luminárias 2 x 32 W	96	6144
Anfiteatros	luminárias 2 x 32 W	96	6144
	lâmpadas incandescentes 100 W	11	1100
Empresas Júniores Centro Acadêmico	luminárias 2 x 32 W	19	1216
	ar condicionado	4	5460
	computadores outros aparelhos	13 -	1950 800
Banheiros Vestiário	luminárias 2 x 32 W	16	1024
Corredores e escadas	luminárias 2 x 32 W	40	2560

Impactos previstos

A partir dos resultados, comparando as luminárias pouco refletoras e reator eletromagnético com as óptico-refletoras e reator eletrônico, e considerando o número de luminárias existentes, estimou-se uma redução do consumo de energia elétrica em torno de 30% com a aplicação das mudanças propostas, além da melhora do fator de potência como mostrado nos dados experimentais mencionados anteriormente.

3.3 Estrutura tarifária

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), por meio da Resolução nº456, de 29 de novembro de 2000, estabelece as condições de fornecimento de energia elétrica que devem ser seguidas pelas concessionárias e pelos consumidores [37].

As tarifas de energia elétrica são definidas com base na demanda de potência e no consumo de energia [38]. A primeira é medida em quilowatt e corresponde à média da potência elétrica requerida num intervalo de tempo (normalmente quinze minutos) e é faturada pelo maior valor obtido durante o período de fornecimento (usualmente trinta dias). O segundo é medido em megawatt-hora e corresponde ao valor acumulado de potência elétrica consumida ao longo de um período comumente de trinta dias. As tarifas de demanda de potência são fixadas em reais por quilowatt (R\$/kW) e as de consumo de energia elétrica em reais por megawatt-hora (R\$/MWh). A demanda de potência não é cobrada de todos os consumidores, variando de acordo com a estrutura tarifária dos mesmos.

A ANEEL define como estrutura tarifária o conjunto de tarifas aplicadas, de acordo com as modalidades de fornecimento, às componentes de consumo de energia elétrica e demanda de potência. No Brasil, as tarifas de energia elétrica são estruturadas com base em dois grupos de consumidores.

O Grupo “A” é composto de unidades consumidoras ligadas à rede de alta tensão, com fornecimento igual ou superior a 2,3 kV, ou abaixo desta, mas atendidas por sistema subterrâneo de distribuição. Sua estruturação tarifária é binômia (descrita como um conjunto de tarifas de fornecimento dado tanto pelo consumo de energia elétrica ativa como pela demanda faturável), e subdivide-se segundo o nível de tensão em:

- Subgrupo A1, com tensão de fornecimento igual ou superior a 230 kV;
- Subgrupo A2, com tensão de fornecimento de 88 kV a 138 kV;
- Subgrupo A3, com tensão de fornecimento de 69 kV;
- Subgrupo A3a, com tensão de fornecimento de 30 kV a 44 kV;
- Subgrupo A4, com tensão de fornecimento de 2,3 kV a 25 kV;
- Subgrupo AS, com tensão de fornecimento inferior a 2,3 kV, atendidas por sistema de distribuição subterrâneo (caráter opcional).

Do Grupo “B” fazem parte os consumidores atendidos em baixa tensão, inferior a 2,3 kV, ou acima desta para alguns casos excepcionais especificados na própria resolução. Este grupo tem estruturação tarifária monômia (dada somente por custos em relação ao consumo de energia elétrica ativa), e é subdividido conforme o tipo de consumidor em:

- Subgrupo B1, residencial e residencial de baixa renda;
- Subgrupo B2, rural, cooperativa de eletrificação rural e serviço público de irrigação;
- Subgrupo B3, demais classes;
- Subgrupo B4, iluminação pública.

Para o Grupo “A”, existem duas estruturas tarifárias possíveis:

- Estrutura Tarifária Convencional, cujas tarifas de consumo de energia e demanda de potência são independentes das horas de utilização no dia e dos períodos do ano (Tarifa Convencional);
- Estrutura Tarifária Horo-sazonal, na qual as tarifas de consumo de energia elétrica e de demanda de potência variam segundo as horas de utilização no dia e os períodos do ano, especificada abaixo:
 - Tarifa Azul, cujo custo de consumo de energia é diferenciado nas horas de utilização no dia e nos períodos do ano, e a tarifa de demanda varia de acordo com as horas de utilização no dia;
 - Tarifa Verde, com variação de tarifa de consumo de energia elétrica diferenciada ao longo do dia e dos períodos do ano, e custo de demanda de potência único.

Para a aplicação das tarifas horo-sazonais, ficam caracterizados:

- Horário de Ponta, intervalo de três horas diárias consecutivas, definido pela concessionária entre 17 e 22 horas, exceto para fins de semana e feriados nacionais;
- Horário Fora de Ponta, período composto de horas diárias consecutivas, complementar ao anterior;
- Período Seco, faixa de sete meses consecutivos, abrangendo maio a novembro;
- Período Úmido, compreende cinco meses, entre dezembro a abril do anos seguinte.

No horário de ponta as tarifas de consumo de energia e demanda de potência são mais elevadas do que as do horário fora de ponta, e no período seco são um pouco mais altas em relação ao período úmido. A tabela 3.4 apresenta um resumo da distribuição das tarifas para cada uma das modalidades de fornecimento.

Tabela 3.4: Tipos de tarifas do Grupo “A”.

	Convencional	Verde	Azul
Demanda (kW)	Valor Único	Valor Único	Valor Ponta
			Valor Fora de Ponta
Consumo (kWh)	Valor Único	Valor Ponta, Período Seco	
		Valor Fora de Ponta, Período Seco	
		Valor Ponta, Período Úmido	
		Valor Fora de Ponta, Período Úmido	

A definição sobre qual estrutura tarifária é aplicada aos consumidores dos Grupo “A” segue os seguintes critérios:

- Unidades consumidoras atendidas com tensão inferior a 69 kV e com demanda contratada inferior a 300 kW, podem optar pela Tarifa Convencional, Azul ou Verde;
- Unidades consumidoras atendidas com tensão de fornecimento inferior a 69 kV, cuja demanda contratada seja igual ou superior a 300 kW, devem escolher entre a Tarifa Azul e Verde;
- Unidades consumidoras atendidas em tensão igual ou superior a 69 kV obrigatoriamente se enquadram na Tarifa Azul.

Com base nessas definições, a Unicamp poderia optar pela Tarifa Verde ou Azul, integrando o Grupo A4, que engloba os consumidores atendidos com tensão de fornecimento entre 2,3 e 25 kV [39]. Entretanto, a Unicamp tem estabelecido em seu contrato com a CPFL a aplicação da Tarifa Azul do Grupo A2. A tabela 3.5 mostra os valores da CPFL para esta tarifa, vigente em 2007. Na CPFL o horário de ponta abrange das 18 às 21h.

Tabela 3.5: Tarifa Azul A2 da CPFL para o fornecimento de energia elétrica.

Demanda (R\$/kW)		Consumo (R\$/MWh)			
Ponta	Fora de Ponta	Período Seco		Período Úmido	
		Ponta	Fora de Ponta	Ponta	Fora de Ponta
16,72	2,25	302,56	185,03	272,71	167,72

Fonte: CPFL Energia [40].

3.4 Efeito da substituição das luminárias

Após concluídas as mudanças, realizaram-se medições de intensidade luminosa em diversos pontos importantes das salas de aulas para verificar os níveis de iluminância das mesmas, as quais estavam de acordo com as tabelas constantes na norma NBR 5413.

Foram registradas dados antes e após a substituição das luminárias e a instalação dos sensores de presença, resultando nos perfis anuais das cargas mostrados nas figuras 3.2 a 3.4. Em 2006, por problemas operacionais o medidor ficou inativo, sendo substituído posteriormente pelo da DGA, já que lá houve uma reestruturação dos ambientes e os dados obtidos com as alterações do sistema de iluminação não teriam mais consistência.

Analisando a figura 3.3 percebe-se, entre os meses de abril e maio de 2005, uma redução nos valores tanto da potência ativa como da potência reativa, correspondendo ao período de troca das luminárias.

Avaliando-se o período antes das alterações realizadas, ano de 2004, figura 3.2, em comparação com um período após as mesmas, ano de 2007, figura 3.4, nota-se que houve uma queda da demanda máxima no intervalo da ordem de 26,4 kW para 18,1 kW, alcançando 31,8% de redução.

Percebe-se a melhora do fator de potência nas figuras 3.5 a 3.7, que em 2004 teve uma média anual de 97,62% e em 2007 passou a 99,32%. Esta redução pode ser observada também nos perfis de carga, nos quais a queda da potência reativa envolvida foi proporcionalmente maior em relação à diminuição da potência ativa.

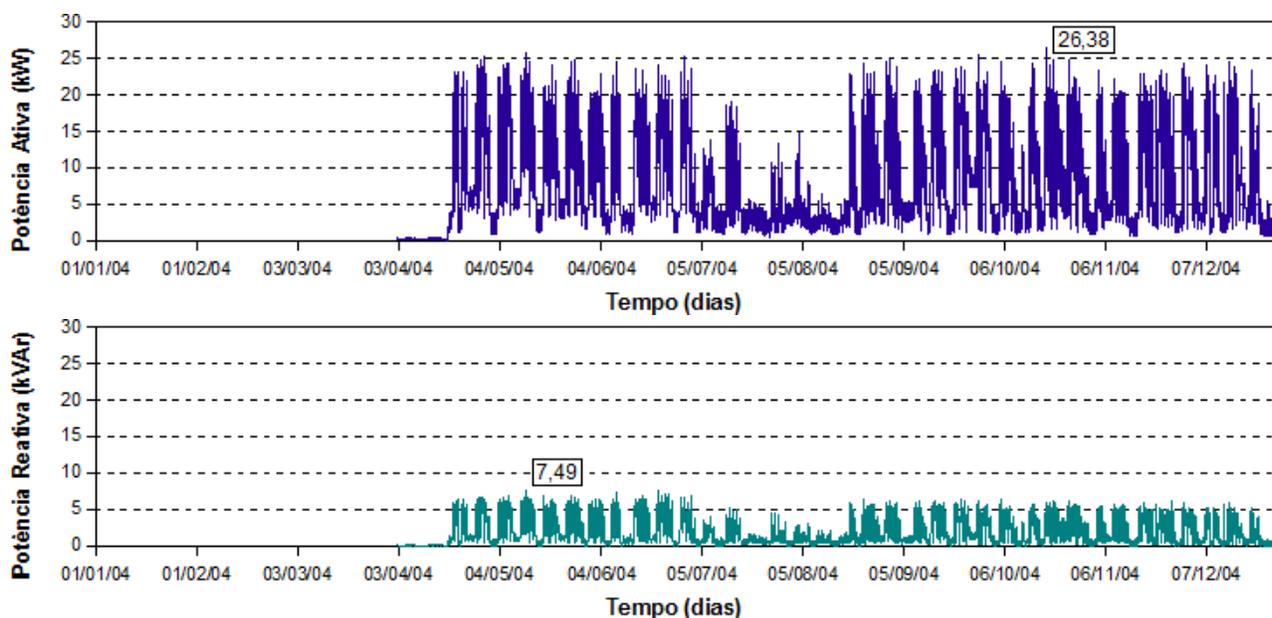


Figura 3.2: Perfil da Carga da FEEC-F em 2004.

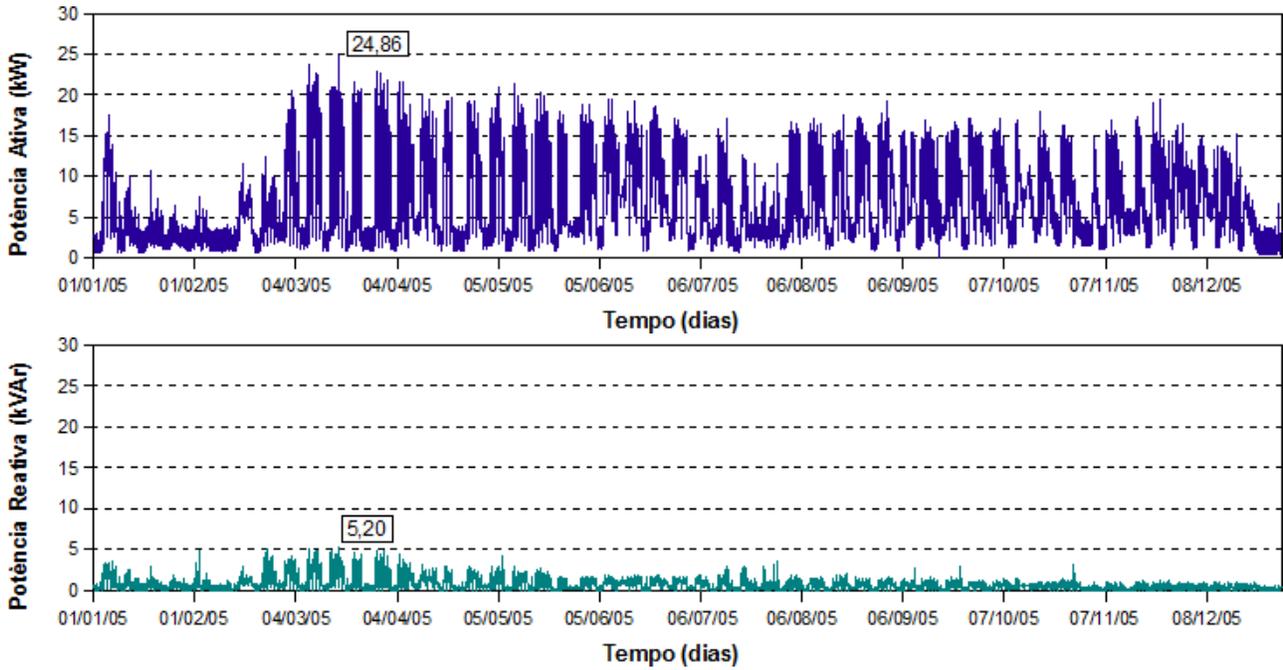


Figura 3.3: Perfil da Carga da FEEC-F em 2005.

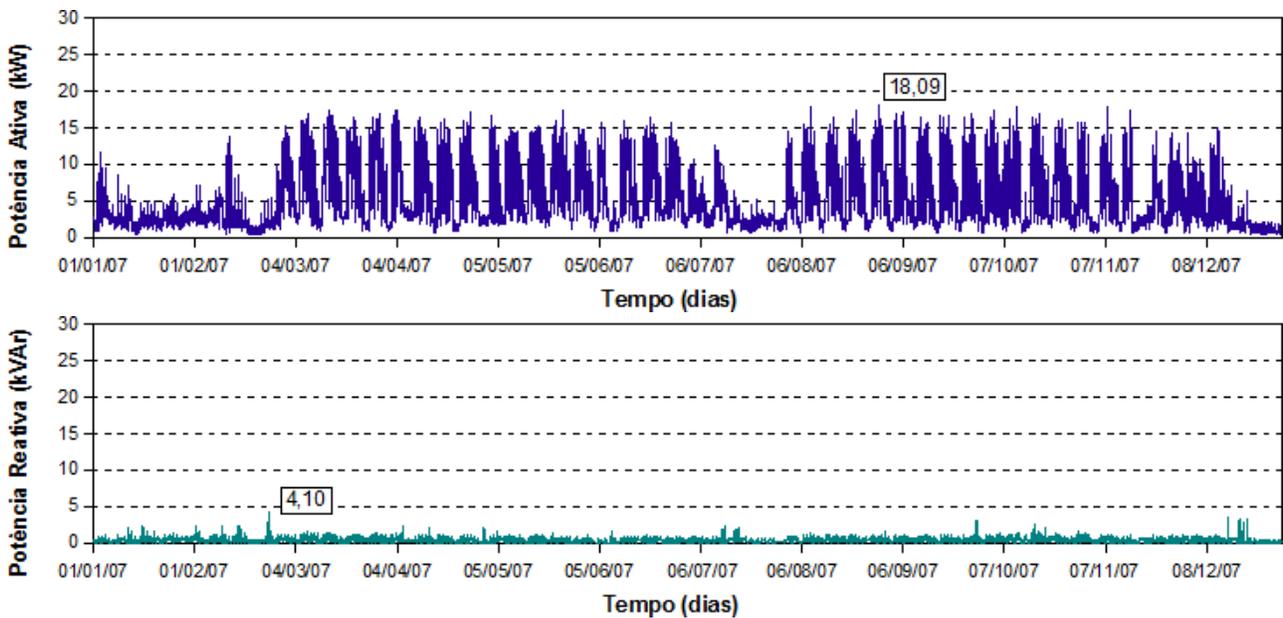


Figura 3.4: Perfil da Carga da FEEC-F em 2007.

As tabelas 3.6 a 3.8 mostram as comparações de consumo de energia e demanda no bloco F da FEEC para os períodos antes e após as mudanças, e as respectivas reduções proporcionadas. Avaliando o consumo de energia elétrica, comparativamente mês a mês, nota-se que houve uma boa diminuição do mesmo, com exceção do mês de agosto, no qual ocorreu greve na universidade.

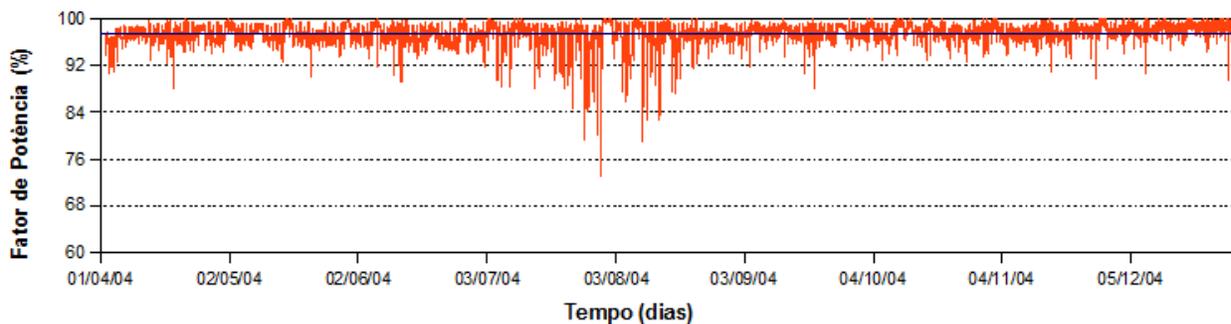


Figura 3.5: Fator de Potência da FEEC-F em 2004.

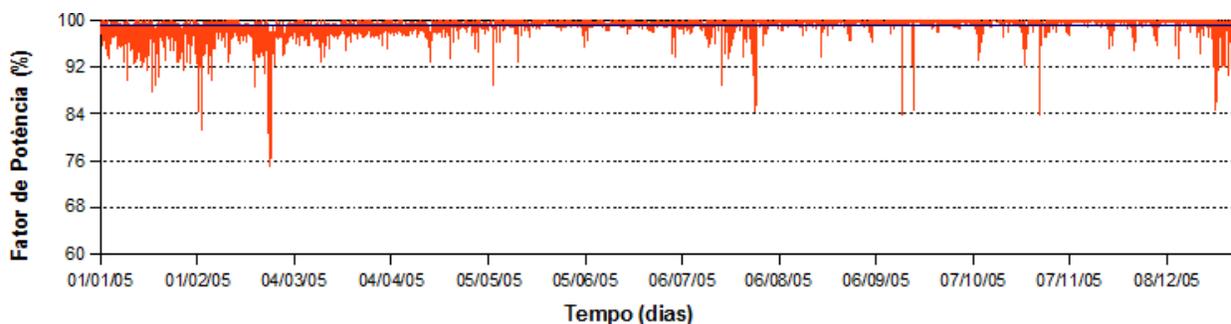


Figura 3.6: Fator de Potência da FEEC-F em 2005.

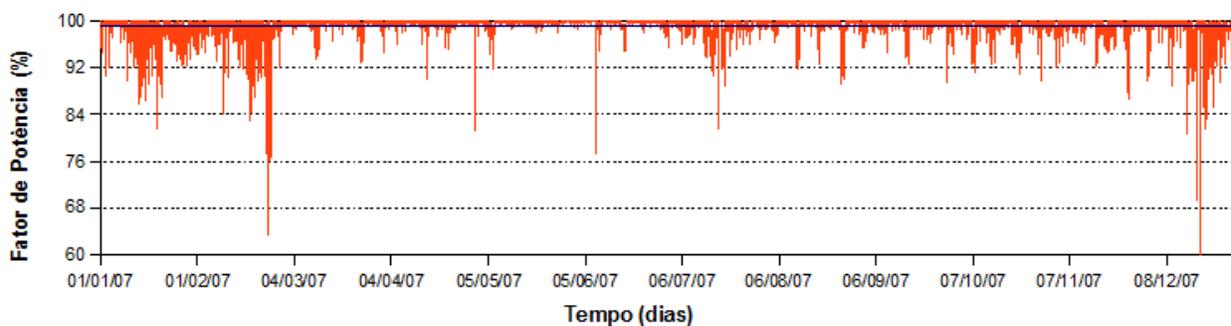


Figura 3.7: Fator de Potência da FEEC-F em 2007.

Já aplicando uma somatória anual, porcentualmente obteve-se um decréscimo de 31,6%, atingindo o objetivo de conservação de energia proposto. Quanto à demanda, no geral reduziu-se em 30%, o que também contribuiu para uma menor tarifa mensal.

Com os dados obtidos nas medições, aplicou-se a tarifa da CPFL, conforme a tabela 3.5. A tabela 3.9 mostra uma comparação mensal das tarifas antes e após as alterações. Destes valores estimou-se que a FEEC, somente no bloco analisado, teria um gasto anual com energia elétrica em torno de R\$ 17.700,00 antes e de R\$ 12.000,00 após a troca das luminárias, uma redução de gastos de 32%. A aquisição do novo sistema de iluminação teve um custo aproximado de R\$ 20.000,00, mostrando tratar de um investimento de retorno relativamente rápido, em menos de quatro anos.

Tabela 3.6: Energia total (kWh) na FEEC-F.

Mês	Ano		Antes da troca	Após a troca	Redução
Janeiro		2	2.582,25	2.003,49	22,4%
Fevereiro		0	2.438,64	1.932,64	20,7%
Março		0	6.273,04	5.461,96	12,9%
Abril		5	5.457,17	4.279,80	21,6%
Maio		2	7.388,08	4.825,73	34,7%
Junho		0	6.868,99	4.228,18	38,4%
Julho	2	0	3.471,98	2.349,73	32,3%
Agosto	0	7	4.305,68	4.491,75	-4,3%
Setembro	0		7.164,60	4.225,04	41,0%
Outubro	4		6.644,31	4.733,79	28,8%
Novembro			6.145,01	3.224,39	47,5%
Dezembro			5.267,07	1.998,05	62,1%
Total			64.006,82	43.754,56	31,6%

Tabela 3.7: Demanda máxima (kW) fora de ponta na FEEC-F.

Mês	Ano		Antes da troca	Após a troca	Redução
Janeiro		2	17,62	11,72	33,5%
Fevereiro		0	13,25	15,10	-13,9%
Março		0	24,86	17,34	30,3%
Abril		5	20,52	17,32	15,6%
Maio		2	25,78	17,31	32,8%
Junho		0	24,47	15,98	34,7%
Julho	2	0	19,42	12,67	34,7%
Agosto	0	7	24,75	16,26	34,3%
Setembro	0		25,38	17,09	32,7%
Outubro	4		26,38	17,53	33,5%
Novembro			24,35	16,33	32,9%
Dezembro			24,48	15,05	38,5%

Tabela 3.8: Demanda máxima (kW) de ponta na FEEC-F.

Mês	Ano		Antes da troca	Após a troca	Redução
Janeiro	2		17,04	5,51	67,6%
Fevereiro	0		11,52	14,98	-30,0%
Março	0		23,78	16,75	29,6%
Abril	5		21,59	17,45	19,2%
Maio		2	25,79	16,59	35,7%
Junho		0	25,17	16,27	35,3%
Julho	2	0	23,52	11,94	49,2%
Agosto	0	7	23,70	18,09	23,7%
Setembro	0		24,62	16,89	31,4%
Outubro	4		24,79	17,77	28,3%
Novembro			23,73	17,82	24,9%
Dezembro			23,71	11,01	53,6%

Tabela 3.9: Tarifas (R\$) na FEEC-F.

Mês	Ano		Antes da troca	Após a troca
Janeiro	2		791,73	471,88
Fevereiro	0		657,28	627,72
Março	0		1.620,48	1.318,73
Abril	5		1.417,60	1.112,88
Maio		2	1.994,23	1.292,32
Junho		0	1.882,53	1.161,39
Julho	2	0	1.146,05	695,23
Agosto	0	7	1.330,21	1.250,75
Setembro	0		1.924,94	1.174,46
Outubro	4		1.818,93	1.293,18
Novembro			1.704,34	987,60
Dezembro			1.416,92	575,99
Total			11.962,13	17.705,24

3.5 Outras medidas de conservação de energia

Aqui cabe ressaltar que, após realizadas modificações no sistema de iluminação visando a redução do consumo de energia, passa a ser de grande importância a implantação de programas de manutenção. Devem ser verificadas periodicamente as condições de operação do sistema, substituindo as lâmpadas com vida média expirada, calibrando os dispositivos de controle, limpando as luminárias, evitando, deste modo, um aumento de consumo, dado pelo desgaste prematuro dos equipamentos.

De um modo mais geral, para que um programa de conservação de energia atinja bons resultados é importante a conscientização e a motivação dos usuários, deixando-se claro que conservação não significa racionamento, não implica em perda de qualidade de vida, conforto ou segurança e não compromete a produtividade ou o desempenho em qualquer tipo de estabelecimento, mas sim trata-se de eliminar desperdícios, usufruindo da energia, sem gastos desnecessários, e promovendo a adoção de hábitos racionais no uso da energia elétrica [31, 32]. Para tanto, podem ser realizadas palestras educativas e distribuídos cartazes que informem sobre o programa, e fixados avisos em pontos específicos alertando sobre medidas que evitem o gasto desnecessário de energia, como apagar as luzes quando não houver ninguém no ambiente, desligar os computadores e/ou seus monitores quando não estiverem em uso, manter as portas e janelas fechadas quando estiver em uso aparelhos de ar condicionado.

Um programa de uso racional de energia pode se estender para outras fontes, como computadores e aparelhos de ar condicionado. No caso de computadores pode-se acionar o Programa *Energy Star*, o qual limita a potência do aparelho quando este entra no modo de espera, após certo tempo de ociosidade [32]. Em Maiolla *et al* [41] faz-se um estudo dos computadores presentes na FEEC e mostra-se que em geral estes têm 50% do seu consumo de energia devido ao monitor e os outros 50% para o restante, e o primeiro quando desligado ou em estado de espera têm seu consumo praticamente nulo, sendo assim, concluem que há uma boa redução do gastos com energia se os computadores forem desligados no período noturno, nos quais não estão em uso, e configurados via sistema operacional para colocarem os monitores em espera no período diurno quando ociosos.

Já em relação a ar condicionado, algumas medidas simples e sem a necessidade de investimentos podem ser tomadas, como [32]:

- Desligar os aparelhos em ambientes que fiquem um longo tempo desocupados;
- Limpar o filtro do aparelho periodicamente;
- Manter desobstruídas as grelhas de circulação de ar;
- Manter livre a entrada de ar do condensador;

- No verão, não refrigerar excessivamente o ambiente, combinando temperatura (22 a 24° C) e umidade relativa do ar (50 a 60%);
- Em dias frios, desligar o compressor e manter somente a ventilação;
- Estudar a possibilidade de ventilar os ambientes à noite, retardando o acionamento do sistema de ar durante o dia.

Além disso, deslocar o consumo para fora do horário de ponta é outra medida interessante a ser tomada por grandes consumidores, o que pode ser obtido pela análise do perfil de carga de um dia da semana. No caso avaliado, a potência ativa de um dia aparece na figura 3.8, nota-se que o maior consumo compreende das 19 às 22h, o qual cai por duas horas no período de ponta da CPFL, entretanto aqui particularmente é difícil mudar o consumo para o período fora de ponta, por corresponder ao horário de aulas do período noturno.

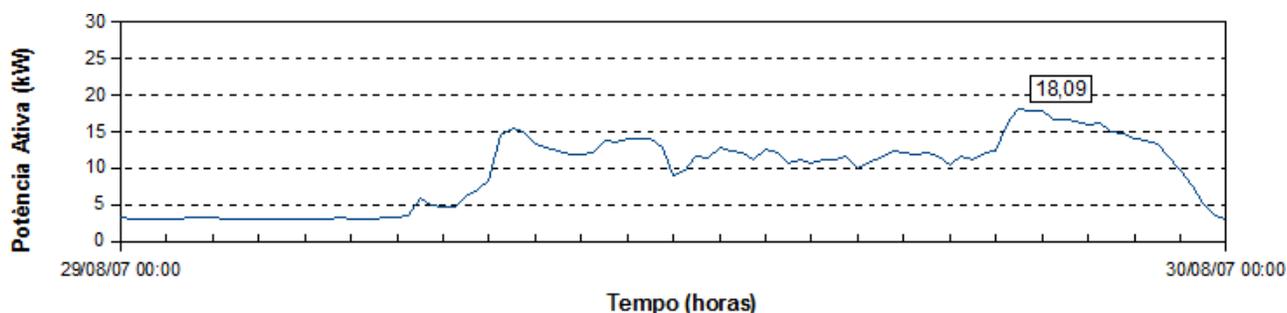


Figura 3.8: Potência Ativa da FEEC-F em 29/08/2007.

3.6 Ampliação do projeto

A FEEC ocupa uma área construída de aproximadamente 12.500 m², incluindo 1.100 m² de laboratórios de pesquisa dos Departamentos de Comunicações (DECOM), de Eletrônica e Microeletrônica (DEMIC), de Microondas e Óptica (DMO) e de Sistemas e Controle de Energia (DSCE), e 120 m² do Departamento de Engenharia Biomédica (DEB), que estão estabelecidos fora da região ocupada pelos blocos A, B, C, E, F, G1, G2 e H.

Visto que a carga medida anteriormente na FEEC corresponde a uma pequena fração da total, estipulou-se no fim de 2008 a instalação de medidores englobando cargas significativas na própria faculdade, sempre focando em pontos nas quais serão feitas alterações no sistema de iluminação. Para tanto retirou-se o medidor do bloco F da FEEC, o qual já havia feito medições suficientes; e do PB, pois sua carga era relativamente baixa (demanda em torno de 4 kW); e também utilizou-se um medidor portátil.

Assim, os três medidores instalados para o gerenciamento de energia elétrica passaram a cobrir as seguintes instalações: bloco (FEEC-A), bloco B (FEEC-B), e blocos E, F, G1 e G2 (FEEC-EFG), como é mostrado na planta da faculdade no anexo A. Com isso as medições passaram a abranger uma área de aproximadamente 8.400 m², ou 67% da total. Cada um dos blocos contam com os seguintes ambientes:

- Bloco A: diretoria, salas dos professores e Laboratório de Engenharia de Computação e Automação Industrial (LCA);
- Bloco B: auditório, salas de reuniões, salas de alunos da pós-graduação, laboratórios de pesquisa dos Departamento de Comunicações (DECOM), Departamento de Microondas e Óptica (DMO), Departamento de Sistemas e Controle de Energia (DSCE), Departamento de Sistemas de Energia Elétrica (DSEE), Departamento de Semicondutores, Instrumentos e Fotônica (DESIF) e Departamento de Telemática (DT) e Laboratório de Pesquisas em Comunicações Ópticas e em Microondas (LAPCOM);
- Bloco E: almoxarifado, laboratórios de ensino da graduação e Setor de Informática da FEEC (SIFEEC);
- Bloco F: anfiteatros, salas de aula da graduação, Empresa Júnior da Engenharia Elétrica (Jr3E), Empresa Júnior da Engenharia de Computação (Compec) e Centro Acadêmico da Engenharia Elétrica (CABS);
- Bloco G1: oficinas, depósito e xérox;
- Bloco G2: laboratórios de pesquisa dos Departamento de Comunicações (DECOM), Departamento de Engenharia de Sistemas (DENSIS) e Departamento de Semicondutores, Instrumentos e Fotônica (DESIF) e Laboratório de Engenharia de Computação e Automação Industrial (LCA).

Os tipos de cargas predominantes são: iluminação, sistemas de computação e aparelhos de ar condicionado. Por se tratar de uma instituição de ensino e pesquisa fica evidente durante o ano uma queda no consumo de energia nos períodos de férias em comparação ao período letivo, como pode ser notado nos perfis de carga do bloco F da FEEC. Nas figuras 3.9 a 3.11, são mostrados os perfis de carga de um mês de cada um dos medidores num período de aulas. Nestes o horário de pico de demanda é entre as 14 e 17h, início da tarde em que começam as aulas e a temperatura é mais alta, aumentando o consumo dos aparelhos de ar condicionado.

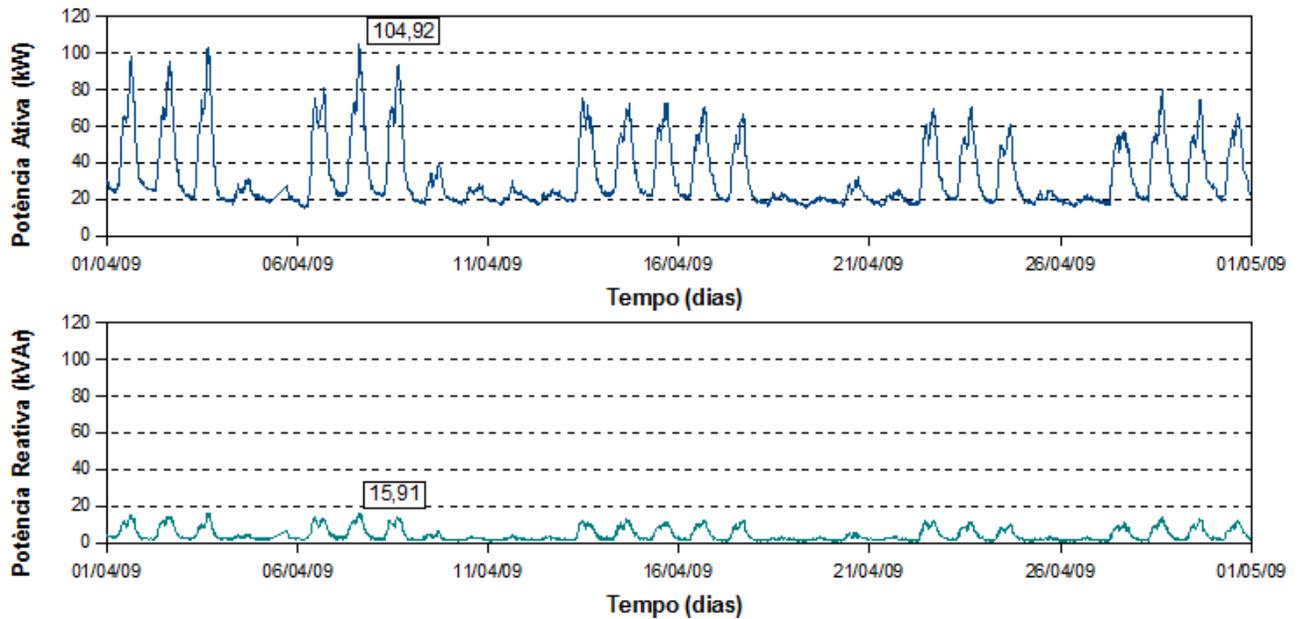


Figura 3.9: Perfil da Carga da FEEC-A em 04/2009.

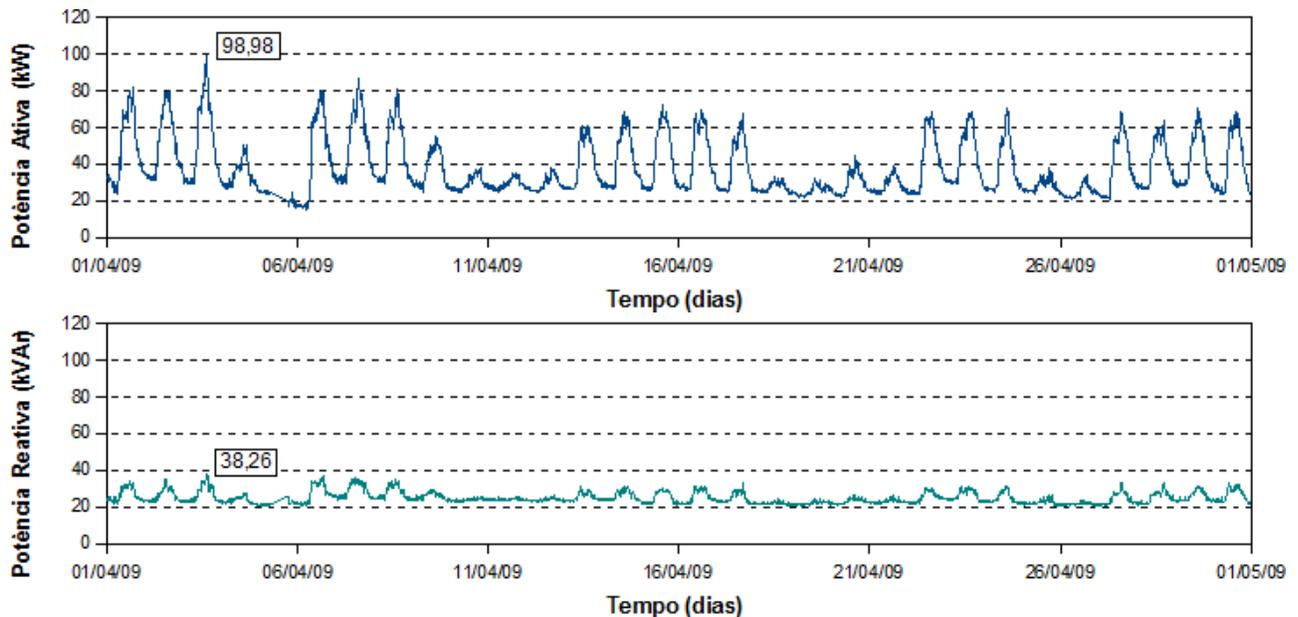


Figura 3.10: Perfil da Carga da FEEC-B em 04/2009.

As tabelas 3.10 a 3.12 mostram os valores de energia e demanda para os medidores dos meses de janeiro a junho de 2009. A mesma comparação é feita na tabela 3.13, em relação ao custo mensal, utilizando a tarifa Azul A2 da CPFL vigente em 2007. Um fato notado são os baixos valores em abril, que chegam a ser similares aos de janeiro. Isto ocorre pois houve dois feriados no mês, um numa sexta (dia 10) outro numa terça-feira (dia 21), além das temperaturas mais amenas durante este.

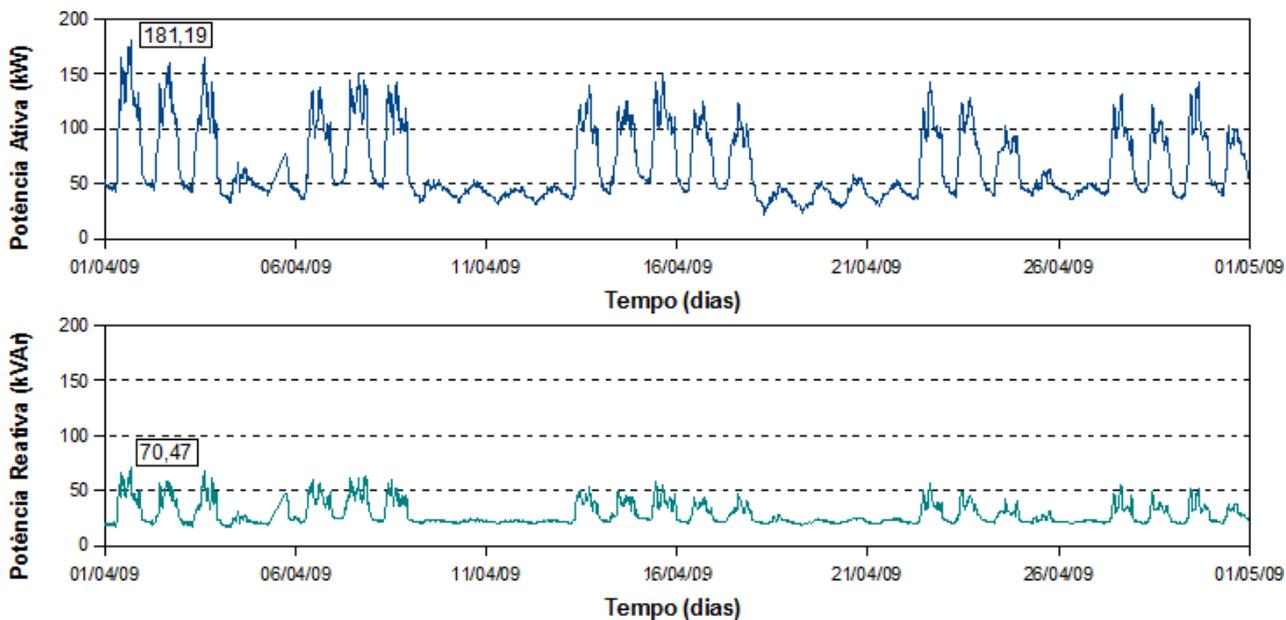


Figura 3.11: Perfil da Carga da FEEC-EFG em 04/2009.

Em junho também há uma queda, devido a diminuição das atividades na faculdade e às temperaturas baixas do mês.

Tabela 3.10: Energia total (kWh) nos três medidores da FEEC.

Mês	FEEC-A	FEEC-B	FEEC-EFG
Janeiro	23.139,67	32.854,54	39.971,31
Fevereiro	24.273,48	29.236,27	37.809,38
Março	34.173,27	37.980,21	55.043,60
Abril	23.217,33	26.897,09	47.377,13
Mai	22.945,75	25.911,00	47.561,06
Junho	19.949,50	21.185,72	36.177,25

Tabela 3.11: Demanda máxima (kW) fora de ponta nos três medidores da FEEC.

Mês	FEEC-A	FEEC-B	FEEC-EFG
Janeiro	91,69	94,33	109,18
Fevereiro	115,19	104,23	123,25
Março	157,15	108,90	175,01
Abril	104,92	98,98	181,19
Mai	82,30	85,90	148,22
Junho	54,61	53,76	96,06

Tabela 3.12: Demanda máxima (kW) de ponta nos três medidores da FEEC.

Mês	FEEC-A	FEEC-B	FEEC-EFG
Janeiro	78,51	72,38	80,99
Fevereiro	74,46	71,50	109,06
Março	101,83	99,89	138,75
Abril	71,61	68,28	143,84
Maio	56,46	62,97	118,66
Junho	47,32	46,73	85,80

Tabela 3.13: Tarifas (R\$) nos três medidores da FEEC.

Mês	FEEC-A	FEEC-B	FEEC-EFG	Total
Janeiro	5.627,78	7.280,52	8.692,70	21.601,00
Fevereiro	5.819,43	6.627,09	8.839,49	21.286,01
Março	8.148,09	8.696,74	12.574,32	29.419,15
Abril	5.579,87	6.157,27	11.371,44	23.108,58
Maio	5.635,24	6.326,90	11.743,84	23.705,98
Junho	4.859,84	5.084,68	8.859,83	18.804,35

Considerando como quatro o número de meses de férias e oito os meses letivos num ano, pode-se, a partir dos valores acima, projetar uma média dos mesmos e obter uma aproximação do gasto anual de energia elétrica da FEEC, analisando agora grande parte de suas instalações. Fazendo isto chega-se a estimativa de R\$ 280.000,00. Por esta soma, fica evidente que a implantação de um programa de conservação de energia envolvendo os três tipos característicos de cargas traria excelentes resultados.

Por fim, cabe aqui explicitar os perfis de carga mensais das figuras 3.12 e 3.13, os quais correspondem ao CAISM-CME e CAISM-DA, respectivamente, o qual também está englobado no projeto e terá a substituição da iluminação.

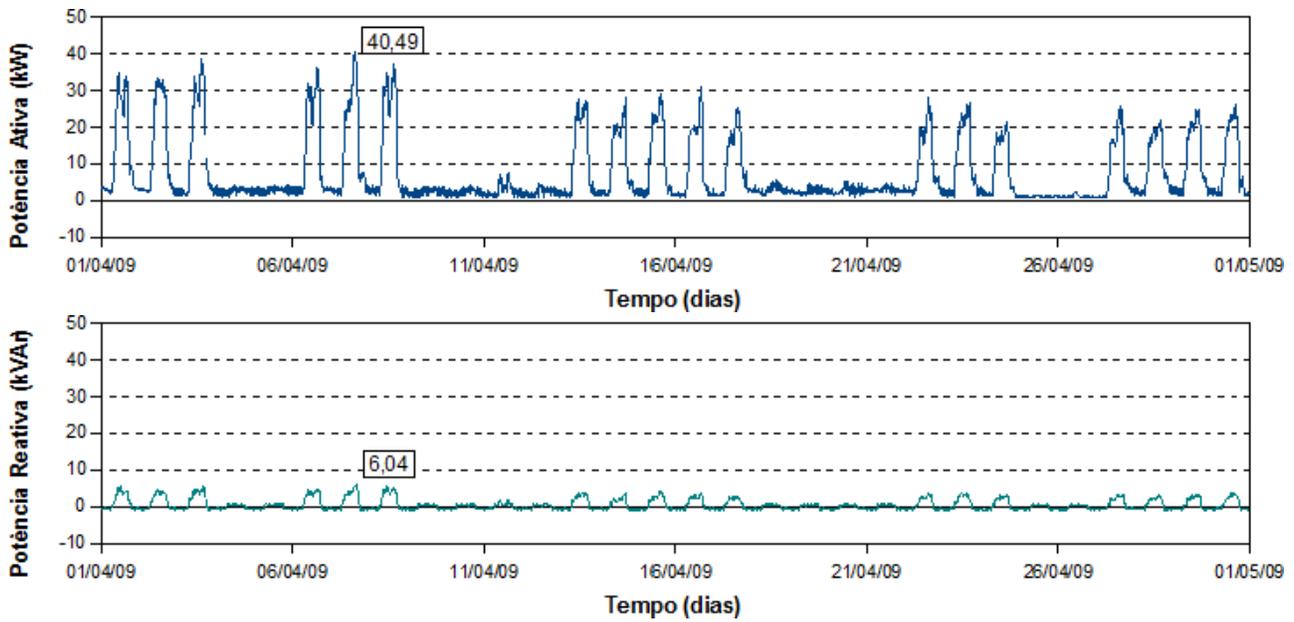


Figura 3.12: Perfil da Carga do CAISM-CME em 04/2009.

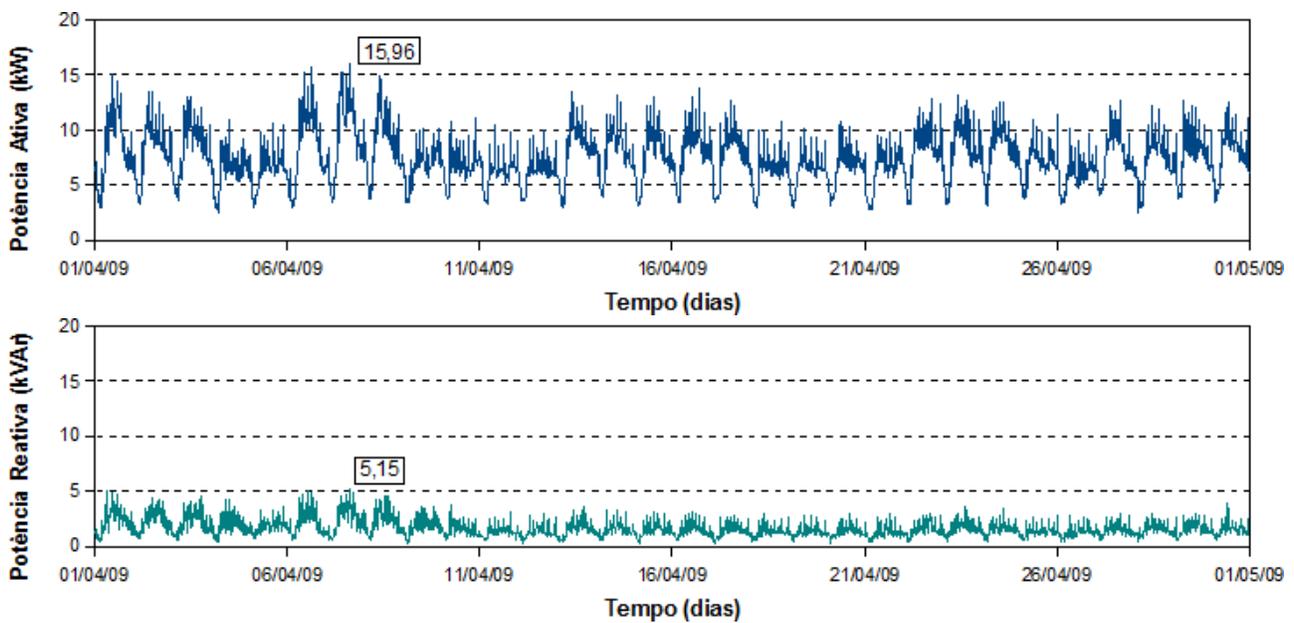


Figura 3.13: Perfil da Carga do CAISM-DA em 04/2009.

Capítulo 4

Qualidade de energia elétrica

A qualidade é uma característica que determina o quanto é adequado um bem ou serviço ao seu uso ou finalidade [42] . A norma NBR ISO 9000 padronizou o termo “qualidade” como a totalidade de atributos de uma entidade que cumpra com as necessidades por ela proposta. Padrões de qualidade devem ser estabelecidos inclusive no fornecimento de energia elétrica. Para tanto, um sistema de alimentação tem que satisfazer algumas características, as quais garantem um suprimento de energia elétrica que proporcione o correto funcionamento dos equipamentos, sem alterar significativamente seu desempenho.

Em termos práticos, uma boa qualidade de energia elétrica refere-se à ausência de variações anormais na tensão fornecida ao consumidor, sendo a geração representada por um “barramento infinito”, com forma de onda senoidal de amplitude constante, caracterizando, conseqüentemente, as condições ideais de operação de um sistema elétrico. Portanto, a qualidade de fornecimento de energia elétrica pode ser dividida em dois quesitos técnicos a serem atendidos: continuidade de fornecimento e forma de onda da tensão de alimentação. Nos dias atuais, ainda surge um outro conceito: a relação do fornecedor com o cliente. Resumidamente estes atributos são descritos como:

- Continuidade do fornecimento, relacionada com a disponibilidade e caracterizada pela frequência e duração de eventuais interrupções.
- Forma de onda da tensão de alimentação, dada pela amplitude, frequência e simetria da tensão das três fases, as quais podem ser afetadas por perturbações.
- Relação do fornecedor com o cliente, ligada à disponibilização de informações confiáveis e rápidas em termos de qualidade e quantidade de energia fornecida, e a um bom atendimento ao consumidor.

Os fenômenos relacionados à qualidade de energia elétrica não são novos, entretanto com a evolução tecnológica e a desregulamentação dos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica ressurgiu um grande interesse em seus estudos, isto porque, além da proliferação dos dispositivos eletrônicos, grandes causadores dos distúrbios da QEE, é crescente a dependência da economia mundial em energia elétrica, atribuída pela maior sensibilidade dos equipamentos, que impacta diretamente na continuidade de operação e nos lucros das empresas [43].

Neste trabalho são analisados alguns distúrbios ocorridos e registrados pelos medidores instalados na FEEC e no CAISM, avaliando as seguintes perturbações na amplitude de tensão: transitórios, afundamentos, elevações e interrupções, e suas influências nos equipamentos elétricos, além do estudo das distorções harmônicas nas formas de onda.

4.1 Transitórios

Um transitório é um distúrbio, em geral de duração de subciclo, característico por promover uma alteração na forma de onda. Devido à sua curta duração, esse tipo de perturbação é um dos mais difíceis de ser detectado e tratado. Sua ocorrência é aleatória, sua intensidade varia de acordo com a situação do sistema operado no momento e seus efeitos variam conforme o dispositivo e sua localização no sistema. Grandes dispositivos eletromagnéticos como transformadores e motores praticamente não são afetados por esses fenômenos, entretanto há problemas quanto a dispositivos eletrônicos e circuitos de controle, muito sensíveis a eles. Além do fato de microprocessadores serem o centro da operação de indústrias e comércio, há ainda uma maior preocupação no que tange aos equipamentos médicos, os quais têm se tornado, nos últimos anos, cada vez mais sofisticados e conseqüentemente mais suscetíveis a esses eventos [44].

As principais causas de transitórios são a descarga atmosférica e o chaveamento de capacitores, as quais serão descritas mais detalhadamente abaixo, havendo, entretanto, outros decorrentes de chaveamento de cargas e de linhas e de interrupção de faltas.

- Descarga atmosférica [3, 44]

A descarga atmosférica é uma importante fonte de transitórios impulsivos e a maior causa natural de falhas em equipamentos elétricos, visto que há conseqüências não só quando ocorre uma descarga diretamente numa linha elétrica, mas principalmente devido aos campos elétrico e magnético que se formam pelas tensões induzidas nas linhas em uma descarga indireta, e à corrente que flui para a terra, por causa de uma diferença de potencial excessiva estabelecida entre a linha e o solo. Assim sobretensões transitórias semelhantes ocorrem tanto por uma descarga direta numa linha como pelas correntes que fluem pelos condutores de aterramento, podendo circular pelos aterramentos do primário, do secundário ou mesmo pela estrutura.

Uma descarga direta em um condutor de fase geralmente causa um arco na linha ao redor do ponto de incidência, gerando um transitório impulsivo, além de afundamentos de tensão e interrupções. O impulso provocado pelo raio pode ser conduzido a distâncias consideráveis ao longo da linha, sendo interceptado se pára-raios forem corretamente instalados. Dependendo da qualidade do aterramento, pode haver alguma corrente para as cargas.

Uma descarga atmosférica que caia próxima a uma linha pode induzir um impulso por meio do campo elétrico criado. Caindo no solo, uma descarga pode subir consideravelmente a referência da terra, podendo forçar correntes nos condutores aterrados a fluir para cargas sensíveis. Por se tratar de um fenômeno de alta frequência, através das capacitâncias existentes entre enrolamentos quantidades de energia podem passar do primário para o secundário de um transformador, fluindo do sistema para as cargas.

- Chaveamento de capacitores [3, 44, 45]

Trata-se de uma das operações de chaveamento mais comuns no sistema elétrico, visto que a inserção de capacitores é utilizada para corrigir o fator de potência, como meio de reduzir as perdas e a potência reativa do circuito. Usualmente chaveado durante os horários de pico de carga, os capacitores são bastante utilizados devido aos baixos custos de aquisição e manutenção.

Contudo, a energização de banco de capacitores tipicamente resulta em um transitório oscilatório, com frequência natural entre 300 e 900 Hz, magnitude de pico de até 2 pu, atingido após aproximadamente 1 ms, que devido ao amortecimento fica em torno de 1,3 e 1,5 pu, e duração total entre 0,5 e 3 ciclos (8 a 50 ms).

Um sintoma comum deste tipo de perturbação é sua ocorrência em horários próximos todos os dias, já que em alimentadores com cargas industriais capacitores são adicionados ao circuito como forma de antecipar o aumento de carga no início do dia de trabalho. Equipamentos elétricos podem suportar um número limitado de altos picos de tensão, pois estes enfraquecem o isolamento, causando prováveis curto-circuitos em dispositivos. Os sistemas de acionamento a velocidade variável (*Adjustable Speed Drives - ASD*) são sensíveis a elevações de tensão e podem parar o motor caso a tensão supere o máximo valor tolerado. Outro problema recai sobre dispositivos que trabalham com os cruzamentos da forma de onda com o zero, os quais podem perder a precisão quando ocorrem oscilações em torno do eixo de tempo.

Tanto a concessionária de energia elétrica como o consumidor final podem minimizar este tipo de perturbação. No caso da primeira pode-se [3]:

- Contra a descarga atmosférica, proteger as linhas instalando uma rede neutra aterrada sobre os cabos das fases, com a finalidade de interceptar os raios, não permitindo que caiam nelas;

e instalar pára-raios em diversos pontos ao longo da linha, fazendo com que cada um deles absorva parte do surto;

- Em transitórios de chaveamento de capacitores, determinar um horário mais adequado para sua ocorrência; instalar resistores de pré-inserção, os quais reduzem consideravelmente os transitórios; utilizar disjuntores de fechamento sincronizado, os quais fecham cada fase antecipando o zero de tensão, reduzindo a magnitude da corrente *inrush* do capacitor para algo em torno de 1,1 pu; e trocar a posição do banco de capacitores, criando uma maior impedância entre este e a carga sensível, atenuando o problema.

Para proteger seus equipamentos o consumidor deve [3]:

- Limitar a tensão sobre isolações sensíveis;
- Desviar a corrente de surto da carga;
- Bloquear a entrada da corrente de surto na carga;
- Agrupar os aterramentos nos equipamentos;
- Reduzir ou prevenir o fluxo da corrente de surto entre aterramentos;
- Criar um filtro passa-baixas.

Estas ações ocorrem pela aplicação de dispositivos de proteção, descritos abaixo [3]:

- Pára-raio e Supressor de transitórios

O pára-raio e o supressor de transitórios (*Transient Voltage Surge Suppressor* - TVSS) protegem os equipamentos de sobretensões transitórias limitando a tensão sobre eles. Estes dispositivos atuam absorvendo o surto ou desviando-o para a terra, por meio de um caminho preferencial, assim é importante que sejam instalados próximos às isolações sensíveis a serem protegidas, restringindo suas tensões a valores seguros. Usualmente, os TVSSs são associados aos dispositivos de proteção contra sobrecarga usados nos equipamentos das cargas, e têm um número maior de elementos limitadores de surto do que os pára-raios, os quais comumente consistem de *Metal-Oxide Varistors* (MOVs). Esse tipo de pára-raios possui dois parâmetros principais: máxima tensão de operação contínua, que é, no mínimo, 125% da tensão nominal do sistema; e taxa de dissipação de energia, dada em joules.

- Transformador de isolamento

O transformador de isolamento é usado para atenuar ruídos de alta frequência e transitórios. Sua principal característica é isolar eletricamente a carga do sistema, por meio de sua indutância de dispersão. Assim, a carga não é atingida por ruídos de alta frequência e transitórios, tanto de chaveamento de capacitores como de descargas atmosféricas, impedindo o desligamento de equipamentos, ao mesmo tempo que qualquer ruído ou transitório gerado pela carga não atinge o resto do sistema elétrico, exemplificado pelos recortes de comutação originados no chaveamento de dispositivos de eletrônica de potência.

- Filtro passa-baixas

O filtro passa-baixas utiliza um circuito π para prover uma melhor proteção contra transitórios de alta frequência. É composto por indutâncias em série e capacitores em paralelo numa combinação que proporcione um caminho de baixa impedância para a terra para as frequências selecionadas. No caso de proteção contra surtos, resistores não lineares ou varistores (como os pára-raios de MOV), são adicionados em paralelo com os capacitores.

4.1.1 Registro de distúrbios

Apresenta-se a seguir algumas eventos de sobretensões transitórias ocorridas na Unicamp e detectadas pelos medidores.

As figuras 4.1 e 4.2 mostram transitórios oscilatórios nos medidores da FEEC-A e FEEC-B, respectivamente, devido ao chaveamento de banco de capacitores na rede de 11,95 kV, sendo que, dadas as baixas durações e magnitudes, não houve danos em equipamentos. Já as figuras 4.3 a 4.5 mostram transitórios impulsivos registrados no medidor FEEC-EFG, os quais, como consequência da baixa magnitude, não chegaram a afetar equipamentos. É interessante notar que os dois últimos provocaram deformações nas formas de onda da tensão, as quais perduraram por alguns ciclos.

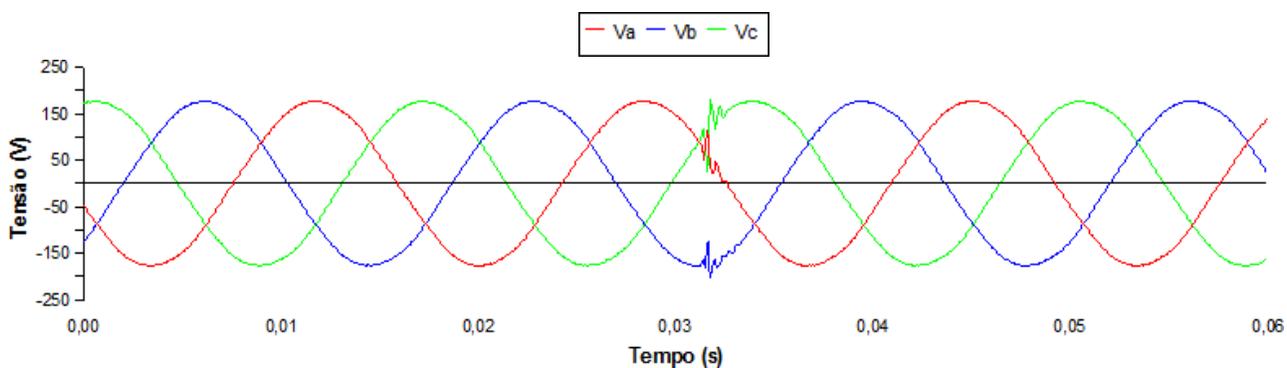


Figura 4.1: Transitório, FEEC-A, 29/03/2009 17:33:21, V_c 143%, 0,065 ms.

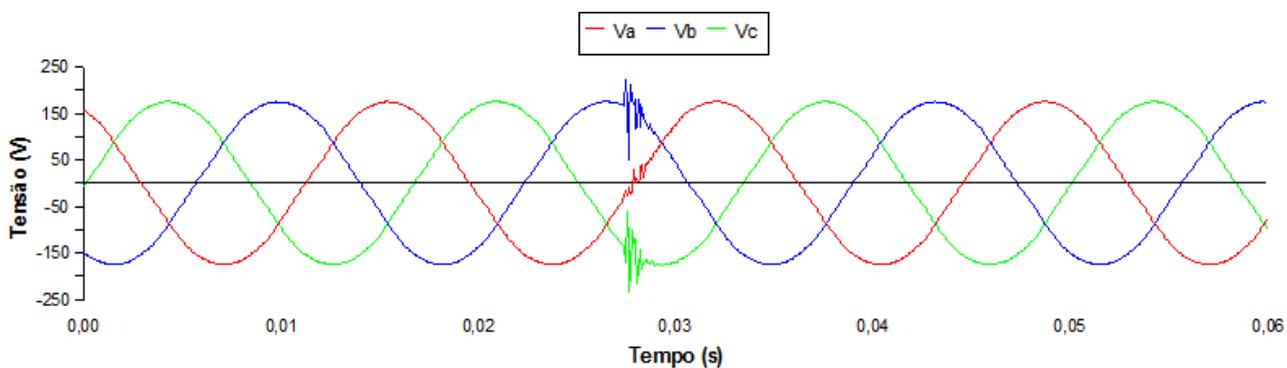


Figura 4.2: Transitório, FEEC-B, 21/02/2009 07:27:22, V_c 149%, 0,130 ms.

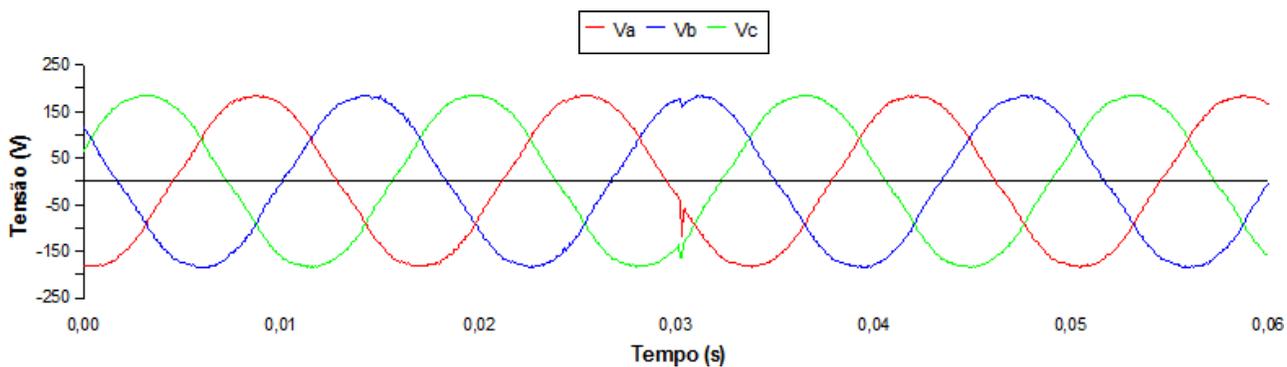


Figura 4.3: Transitório, FEEC-EFG, 16/01/2009 08:23:03, V_a 141%, 0,065 ms.

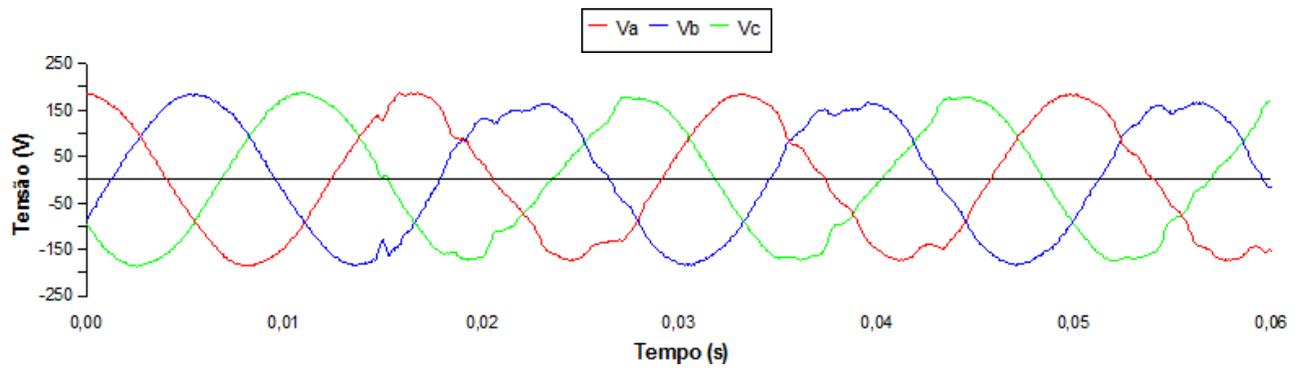


Figura 4.4: Transiente, FEEC-EFG, 05/04/2009 17:47:50, V_c 127%, 0,260 ms.

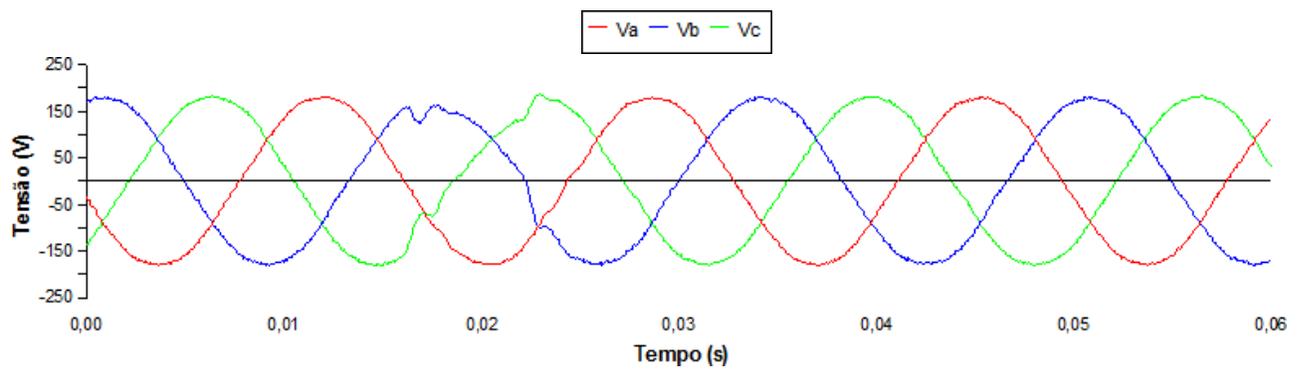


Figura 4.5: Transiente, FEEC-EFG, 13/04/2009 16:17:55, V_c 130%, 0,455 ms.

4.2 Variações na amplitude da tensão

A variação na amplitude da tensão está diretamente relacionada aos problemas de qualidade de energia, visto que é caracterizada por uma alteração da tensão eficaz além da faixa de operação normal. Tem como causas a energização de cargas pesadas que requerem altas correntes de partida e o curto-circuito no sistema elétrico. Dependendo do local da ocorrência e das condições do sistema elétrico os resultados podem ser afundamento da tensão, elevação da mesma ou sua interrupção total, em pontos distintos da rede. Abaixo são descritos como esses distúrbios afetam a tensão.

- Energização de cargas pesadas [46]

Na partida destas cargas a corrente é muitas vezes superior ao valor normal de operação. Como a fonte e os cabos da instalação são dimensionados para as correntes nominais essa alta corrente causa uma diminuição da tensão tanto na rede de alimentação como na instalação, com a magnitude dependendo da impedância dos cabos da instalação e da impedância no ponto de acoplamento comum (PAC). Os afundamentos de tensão, neste caso, são caracterizados por menor magnitude e maior duração em relação aos causados por faltas, que duram tipicamente entre um e dez segundos, e estas chegam a até um segundo.

Se o problema for causado por alta resistência interna as cargas devem ser ligadas em um ponto em que haja um nível de tensão apropriado, seja no PAC ou no secundário do transformador de alimentação. Caso ocorra devido à impedância no PAC, isto é, “fonte fraca”, há duas soluções possíveis: instalar um *soft starter* no equipamento em questão, limitando sua corrente de partida a um valor mais baixo, por um maior tempo; ou negociar com a concessionária uma menor impedância na conexão, ou seja, uma troca dos cabos da linha alimentadora por outros de maior secção transversal, o que pode ser caro dependendo do sistema.

- Curto-circuito no sistema [3, 46, 47]

Este evento é o principal causador de variação na amplitude da tensão. Como exemplo, pode-se ver na figura 4.6 que o consumidor ligado ao alimentador do disjuntor 1, caso ocorra um curto-circuito F1 (falta no mesmo alimentador), sofreria uma afundamento de tensão durante o mesmo, seguido de interrupção na abertura do disjuntor para sua extinção. Sendo a falta de natureza temporária, ocorrerá o religamento e o retorno a normalidade. Normalmente o disjuntor opera entre 4 e 15 ciclos, correspondente ao tempo de duração do afundamento. Em geral, fica aberto em torno de 12 ciclos, representando a interrupção, o que já pode causar o desligamento de cargas sensíveis, como mostrado na figura 4.7. É bem mais comum a ocorrência de um curto-circuito em outro alimentador da linha, seja em um paralelo (F2) ou em um no sistema de transmissão (F3), sendo que este afeta um número maior de consumidores. Em ambos os

casos, o consumidor citado anteriormente sofreria sucessivos afundamentos de tensão correspondentes à sequência de religamentos dos disjuntores. Como mostrado na figura 4.8, com os tempos variando de acordo a concessionária, para que a tensão volte a valores normais. Para a extinção da falta F2 pode-se abrir tanto o disjuntor como o fusível, dependendo da prática da concessionária. No curto-circuito F3 os disjuntores A e B devem operar, e como há duas linhas suprindo a subestação de distribuição, haveria apenas o afundamento e não uma interrupção.

A maioria dos curto-circuitos no sistema elétrico são monofásicos fase-terra, frequentemente resultantes de eventos naturais, como descargas atmosféricas e ventos. As primeiras constituem a causa mais comum, podendo a descarga ocorrer diretamente no condutor de fase ou em um objeto aterrado, como as torres de transmissão, levando a um arco, e à corrente de curto-circuito. Usualmente, estes curto-circuitos são temporários e a linha é religada. Para minimizar a ocorrência de arcos são utilizados pára-raios, os quais desviam a corrente à terra, evitando a degradação do isolamento de linhas, transformadores e demais elementos do sistema. É interessante ressaltar que num curto-circuito monofásico as fases não envolvidas estariam sujeitas a elevações de tensão. Além disso, faltas trifásicas, embora mais severas, são mais raras.

O impacto de uma falta em um ponto da rede depende da sua topologia e das impedâncias do sistema no caso de afundamento de tensão, somando-se a estes fatores o aterramento para a elevação de tensão. A duração varia com o tempo gasto para os dispositivos de proteção detectar e isolar o curto-circuito.

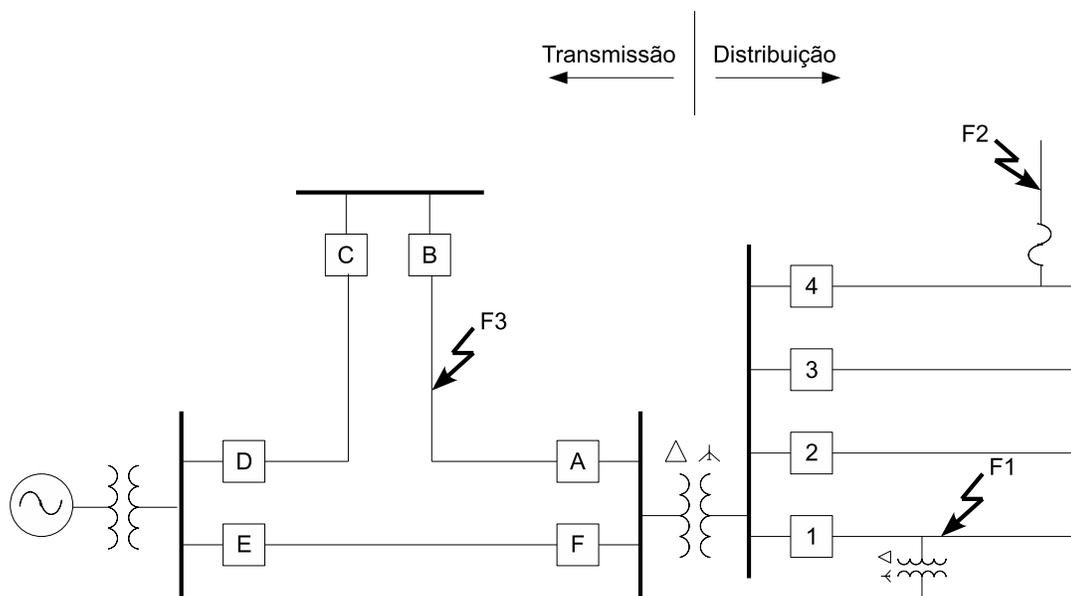


Figura 4.6: Curtos-circuitos num sistema elétrico.

Fonte: Dugan *et al* [3].

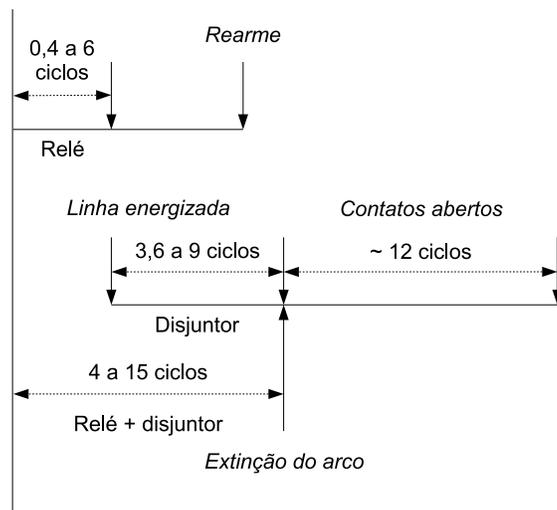


Figura 4.7: Tempos de operação de um sistema de proteção.
Fonte: Sato [48].

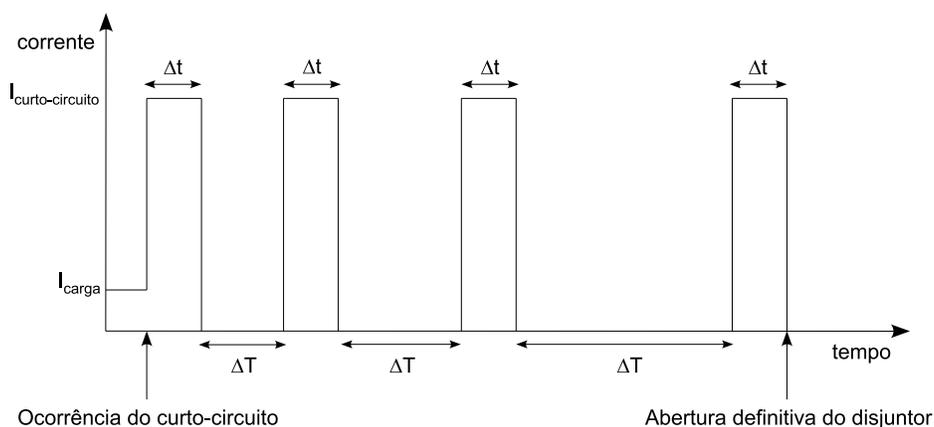


Figura 4.8: Exemplo de sequência de religamentos de disjuntor.

As variações na amplitude da tensão, assim como grande parte dos problemas de qualidade de energia, foram evidenciadas devido à alimentação de equipamentos computacionais, e os problemas aparentemente aleatórios que então surgiram. Estes passaram então a ser estudados e a curva CBEMA, a qual será detalhada na seção 4.3, foi desenvolvida e posteriormente modificada, originando a curva ITL.

A preocupação das concessionárias quanto a estes fenômenos tem crescido, já que os consumidores de todos os setores, residencial, comercial e industrial, cada vez mais possuem cargas sensíveis às variações de tensão, representadas principalmente por equipamentos computacionais e outros tipos de controladores eletrônicos. Como os processos controlados estão cada vez mais complexos, levam um tempo maior para reiniciar, reduzindo a produção e gerando impactos econômicos [46].

Para reduzir o número e a severidade dos curto-circuitos as concessionárias podem basicamente atuar com duas opções [3]:

- Prevenção de faltas, atuando no corte de árvores, na lavagem de isoladores, na proteção a animais, na instalação de pára-raios e outras ações estruturais que possam minimizar os efeitos das descargas atmosféricas;
- Modificação das práticas de extinção de faltas, o que inclui a adição de religadores nas linhas, a adição de esquemas em anel e a modificação da disposição dos alimentadores do sistema.

Apesar de produzir bons efeitos, estas opções não eliminam completamente as variações de tensão, sendo importante para o consumidor tomar medidas preventivas, que envolvam a instalação de equipamentos que regulem a tensão, dentre os quais [3, 47, 49]:

- Transformador ferorrressonante ou transformador de tensão constante (*Constant-Voltage Transformer - CVT*)

O CVT, figura 4.9, consiste em um transformador com um enrolamento primário e três secundários, juntamente com um capacitor em paralelo, mantendo a relação 1:1, excitado no alto da curva de saturação, proporcionando uma tensão de saída praticamente não afetada pelas variações de tensão de entrada. Seu uso é recomendado para cargas constantes e de baixa potência, pois cargas variáveis representam um problema para o ajuste do circuito na saída e o transformador ferorrressonante deve ter uma dimensão bem superior à carga.

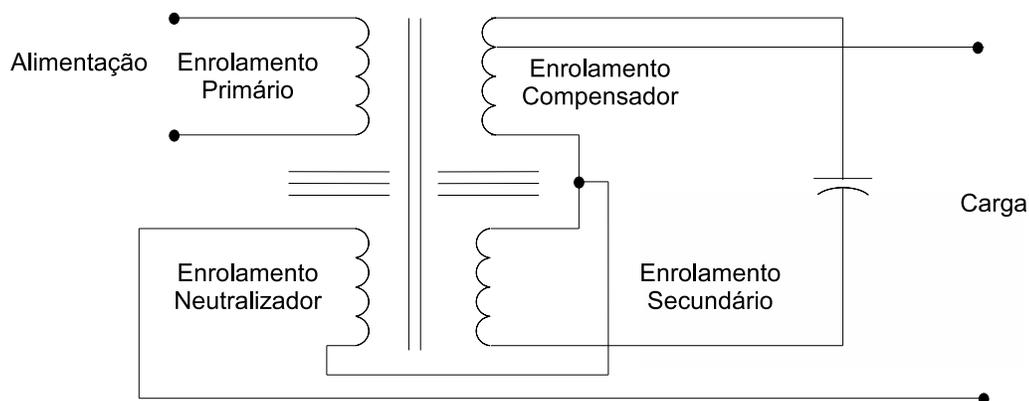


Figura 4.9: Esquemático do transformador ferorrressonante.

Fonte: Dugan *et al* [3].

- Fonte ininterrupta de energia (*Uninterruptible Power Supply* - UPS)

Este dispositivo é projetado para dar continuidade no fornecimento de energia à carga quando houver falha na alimentação. É composto de um retificador, o qual transforma CA em CC, carregando um banco de baterias, e um inversor que faz a operação oposta, alimentando a carga. Há dois tipos principais de UPS: *on-line*, o qual alimenta a carga todo o tempo, com a chave da figura 4.10 na posição inferior, e provê boa isolação das cargas críticas a grande parte dos distúrbios de energia, mas aumenta as perdas e é desnecessário para a maioria das cargas; *off-line*, quando um distúrbio é detectado a chave da figura 4.10, que em operação estaria na posição superior, transfere a carga para o inversor e o banco de baterias num tempo capaz de garantir a continuidade da operação da mesma, embora devido à esta característica não proporcione proteção a transitórios e regulação de tensão.

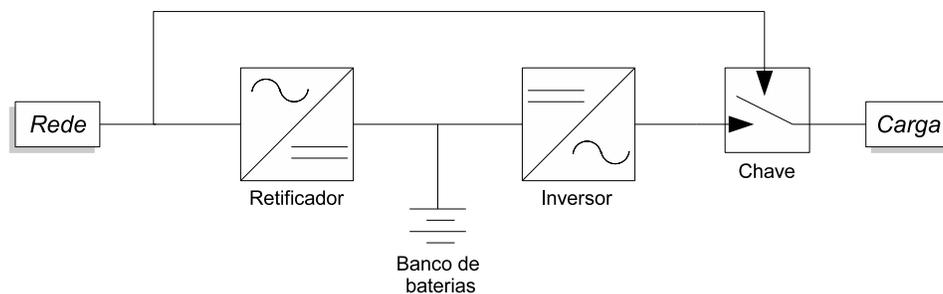


Figura 4.10: Diagrama de blocos do UPS.
Fonte: Markiewicz e Klajn [50].

4.2.1 Registro de distúrbios

Nesta subseção são apresentados diversos distúrbios ocorridos na Unicamp, divididos de acordo com o tipo de evento. Em geral, nota-se nos três medidores da FEEC a ocorrência dos mesmos eventos de variação na amplitude da tensão, visto que estão ligados ao mesmo alimentador.

Interrupção

No dia 05/04/2009 ocorreu um evento deste tipo detectado pelos três medidores da FEEC, entretanto não teve a forma de onda registrada pelo medidor da FEEC-EFG. O distúrbio avaliado, figuras 4.11 e 4.12, levou a zero a tensão nas três fases, e teve como causa provável a abertura de disjuntor do alimentador. Por se tratar de uma interrupção sustentada, houve o desligamento dos diversos equipamentos elétricos presentes na faculdade.

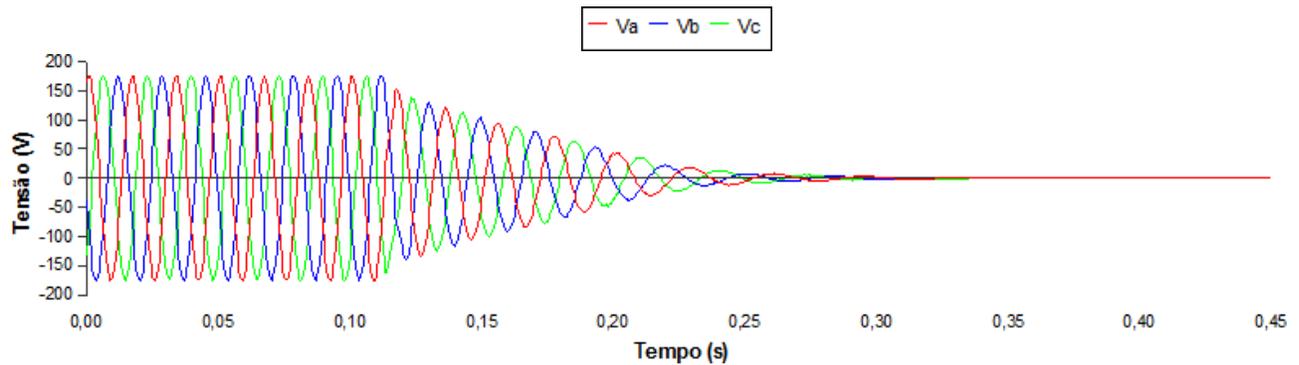


Figura 4.11: Interrupção, FEEC-A, 05/04/2009 07:01:54, V_a 0%, V_b 0%, V_c 0%.

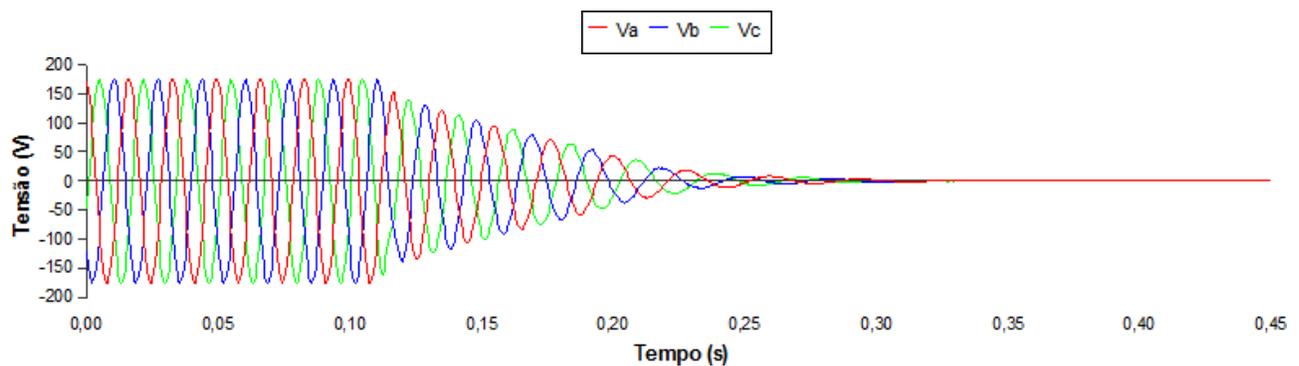


Figura 4.12: Interrupção, FEEC-B, 05/04/2009 07:01:55, V_a 0%, V_b 0%, V_c 0%.

Afundamento de tensão

Alguns afundamentos de tensão detectados pelos medidores são mostrados abaixo. As figuras 4.13, 4.14, 4.16, 4.17, 4.18, 4.20 e 4.22 mostram afundamentos de tensão não severos, acontecidos simultaneamente nos medidores da FEEC. Na FEEC-EFG, apesar de não constar as formas de onda do dia 01/02/2009, os eventos foram detectados pelo medidor com os seguintes valores: às 07:57 $V_a = 102\%$, $V_b = 83\%$, $V_c = 79\%$ e duração de 0,058 s; e às 07:58 $V_a = 102\%$, $V_b = 84\%$, $V_c = 79\%$ e duração de 0,058 s. Mais relevante é o afundamento momentâneo das figuras 4.15, 4.19 e 4.21, o qual teve duração acima de 0,5 s e magnitude abaixo de 70%, causado por um curto-circuito em outro alimentador na rede de 11,95 kV. Este evento causou o desligamento de equipamentos computacionais da faculdade, já que estes são sensíveis a variações na magnitude da tensão, e nesse caso a ocorrência foi relativamente longa. No medidores do CAISM, apesar de em grande quantidade, não houve casos de afundamentos de grande importância.

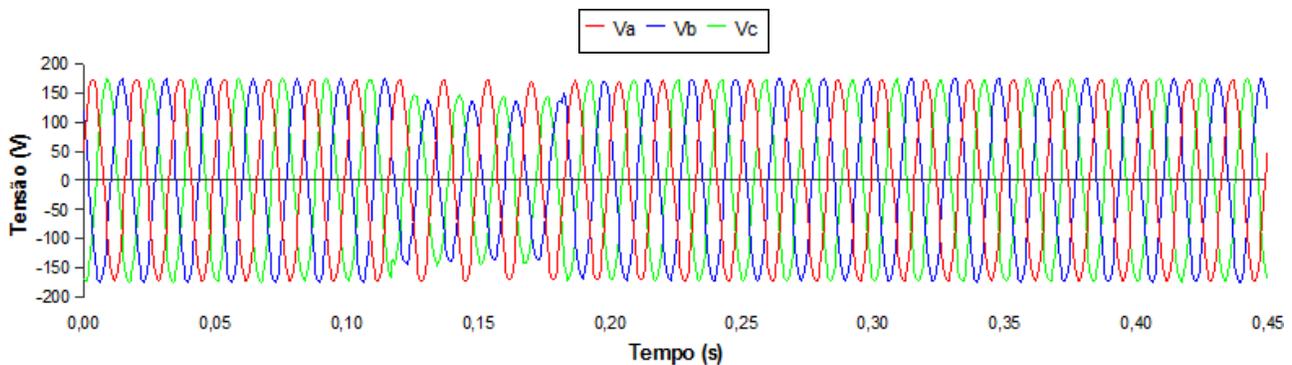


Figura 4.13: Afundamento, FEEC-A, 01/02/2009 07:57:08, V_a 96%, V_b 76%, V_c 80%, 0,075 s.

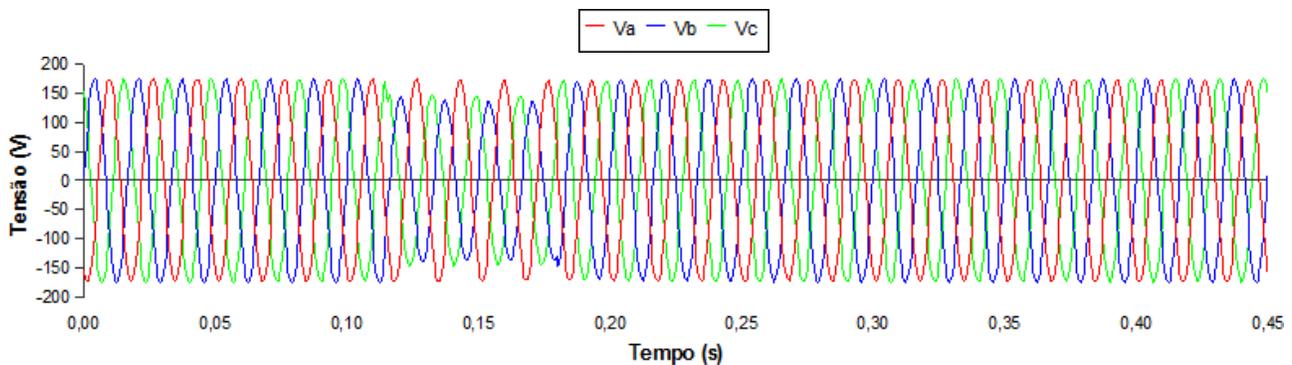


Figura 4.14: Afundamento, FEEC-A, 01/02/2009 07:58:31, V_a 96%, V_b 76%, V_c 81%, 0,074 s.

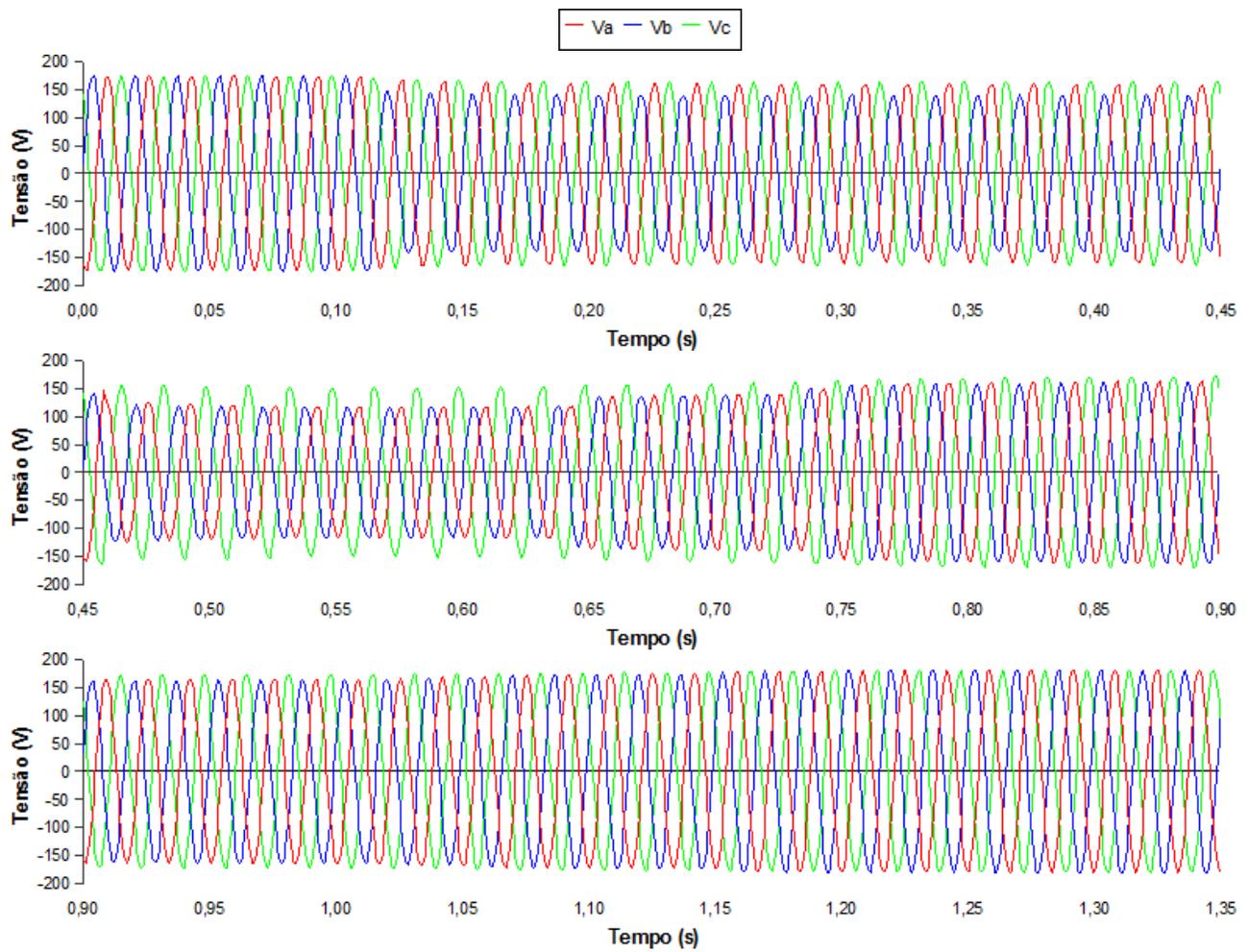


Figura 4.15: Afundamento, FEEC-A, 19/03/2009 03:06:19, V_a 65%, V_b 65%, V_c 85%, 0,725 s.

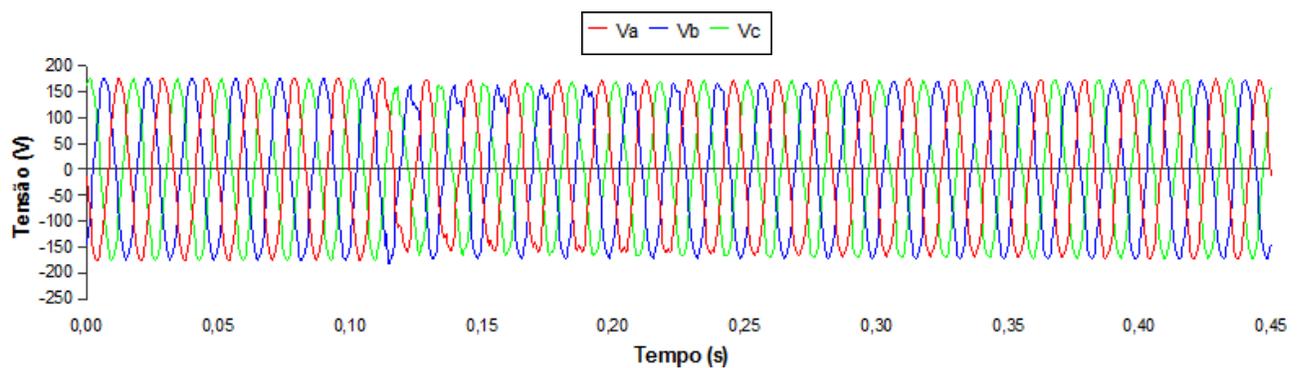


Figura 4.16: Afundamento, FEEC-A, 05/04/2009 17:53:39, V_a 91%, V_b 90%, V_c 85%, 0,041 s.

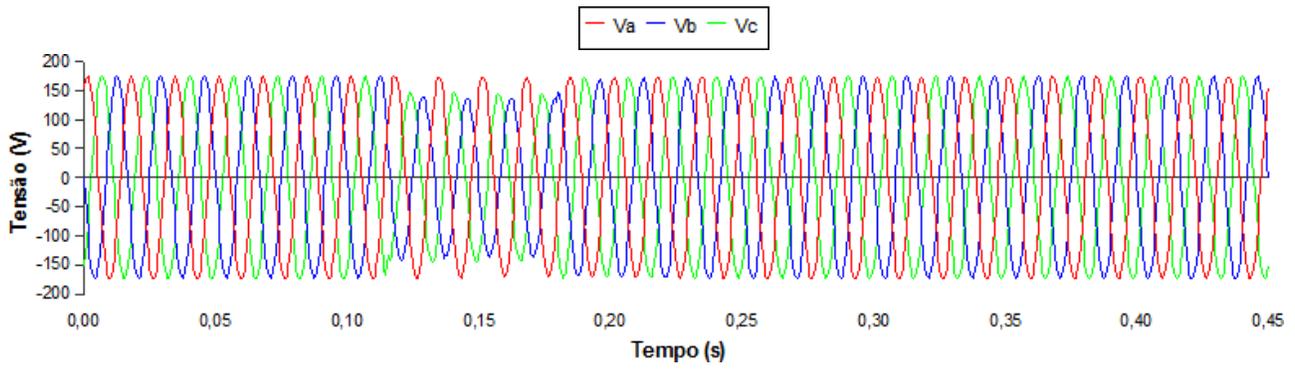


Figura 4.17: Afundamento, FEEC-B, 01/02/2009 07:57:07, V_a 96%, V_b 75%, V_c 80%, 0,075 s.

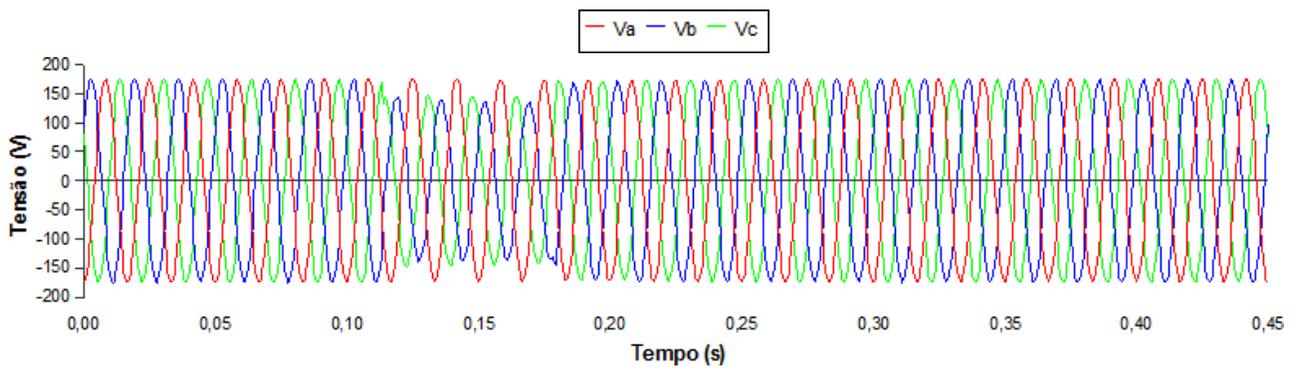


Figura 4.18: Afundamento, FEEC-B, 01/02/2009 07:58:31, V_a 96%, V_b 75%, V_c 81%, 0,074 s.

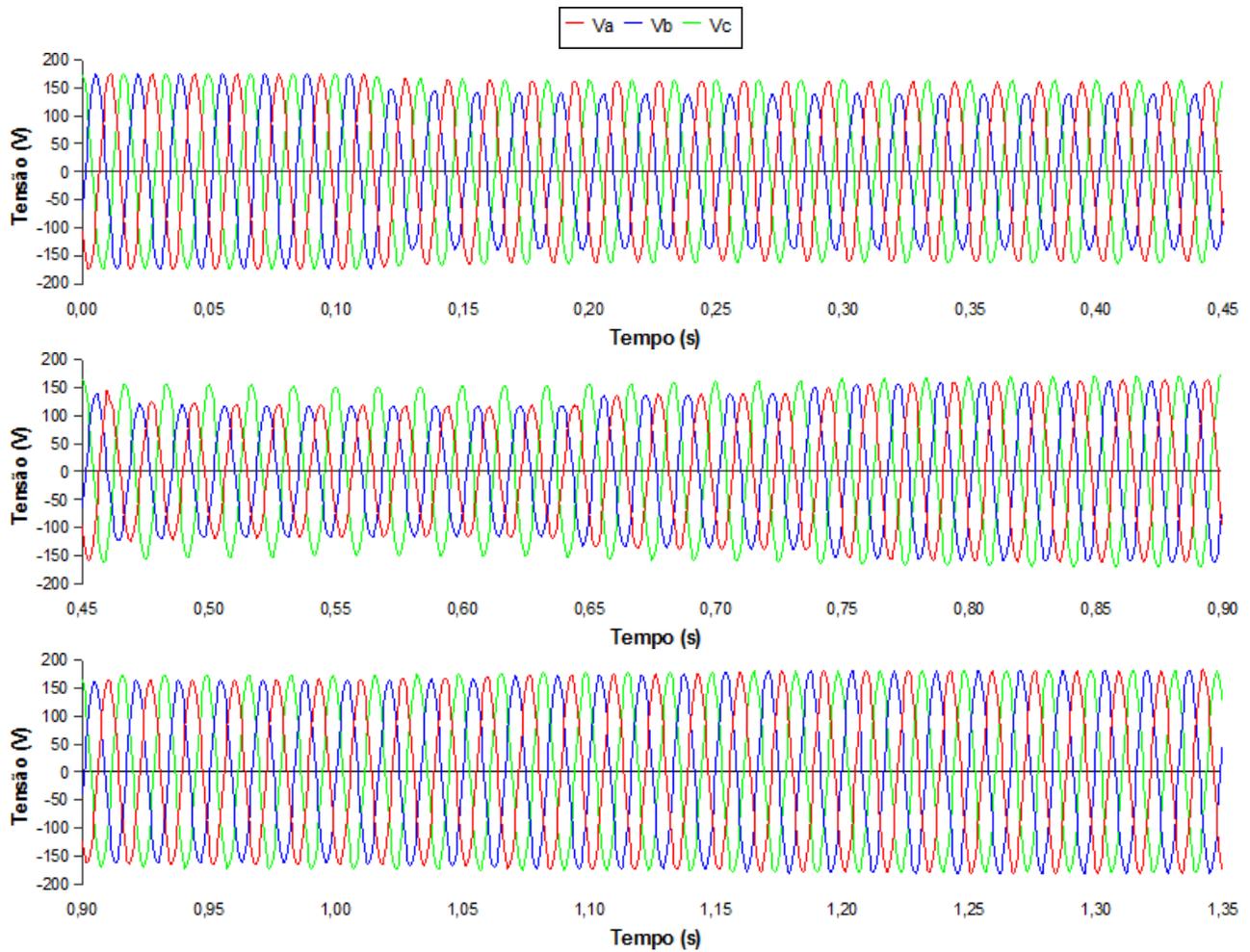


Figura 4.19: Afundamento, FEEC-B, 19/03/2009 03:06:19, V_a 65%, V_b 65%, V_c 84%, 0,742 s.

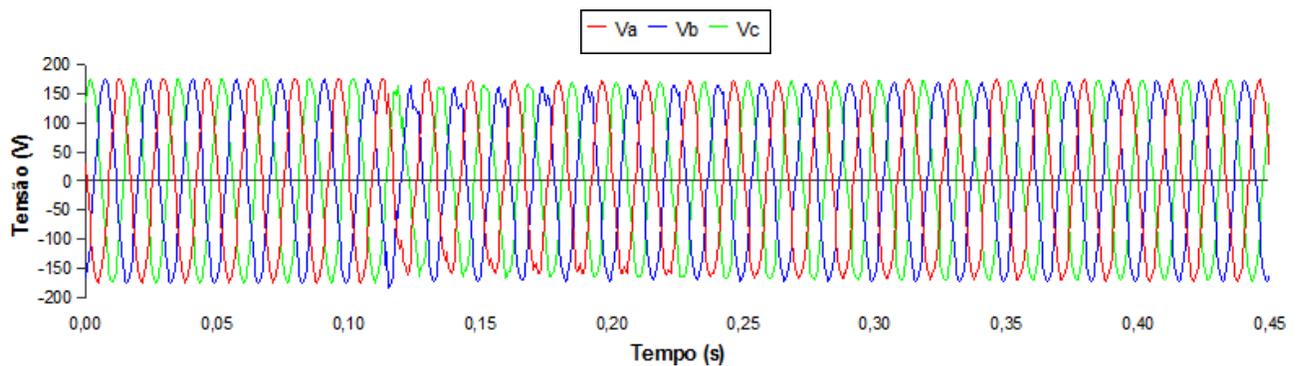


Figura 4.20: Afundamento, FEEC-B, 05/04/2009 17:53:39, V_a 91%, V_b 90%, V_c 85%, 0,050 s.

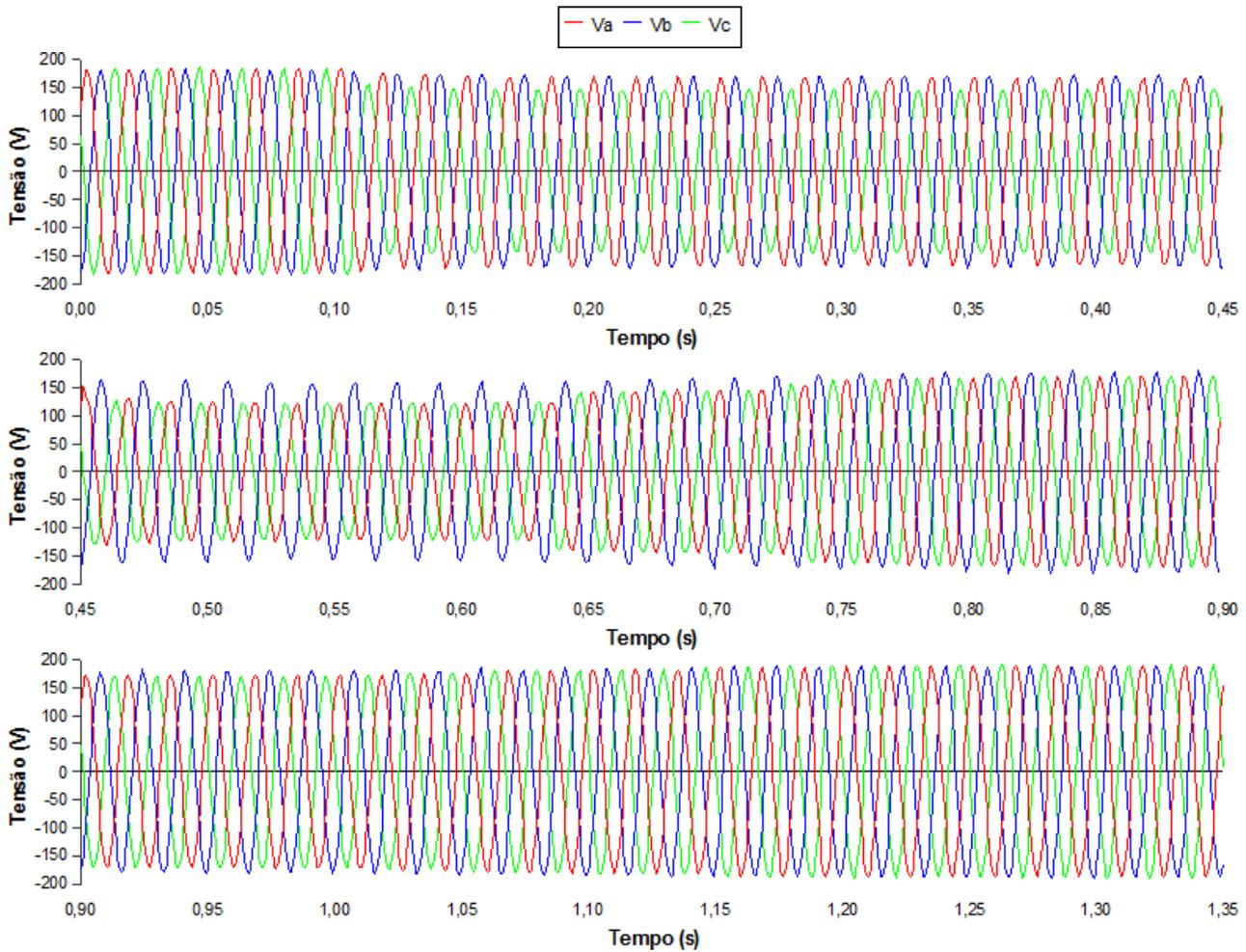


Figura 4.21: Afundamento, FEEC-EFG, 19/03/2009 03:05:01, V_a 68%, V_b 88%, V_c 68%, 0,633 s.

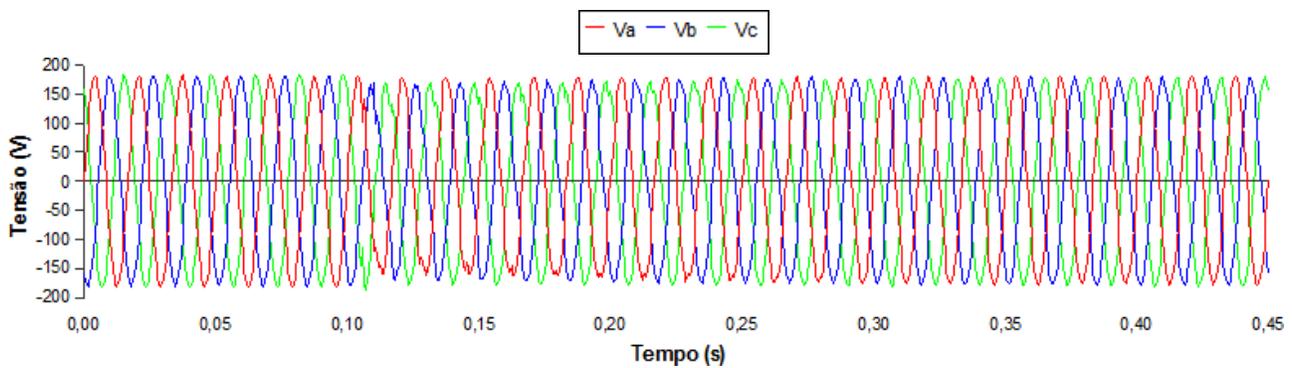


Figura 4.22: Afundamento, FEEC-EFG, 05/04/2009 17:51:12, V_a 94%, V_b 87%, V_c 94%, 0,016 s.

Elevação de tensão

As figuras 4.23 e 4.24 mostram elevações de tensão que ocorreram no CAISM. A primeira ocorreu no CAISM-CME na fase A, teve curta duração e foi acompanhada de um afundamento de tensão nas outras fases, não sendo um evento que acarrete consequências indesejadas aos equipamentos. O segundo evento aconteceu no CAISM-DA, o qual apresentou magnitude não muito elevada na fase A, mas teve grande duração, podendo causar danos aos equipamentos ligados nesta rede.

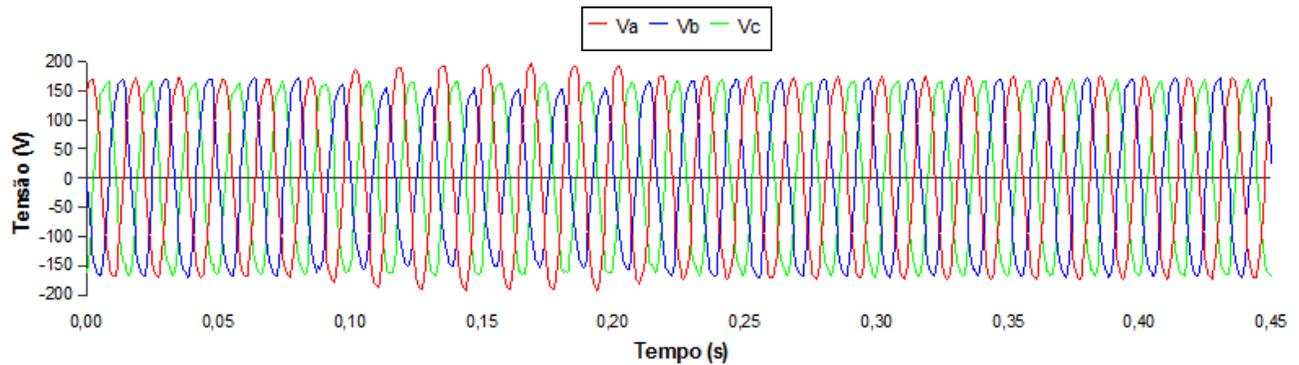


Figura 4.23: Elevação, CAISM-CME, 16/04/2009 07:16:38, V_a 111%, V_b 86%, V_c 96%, 0,091 s.

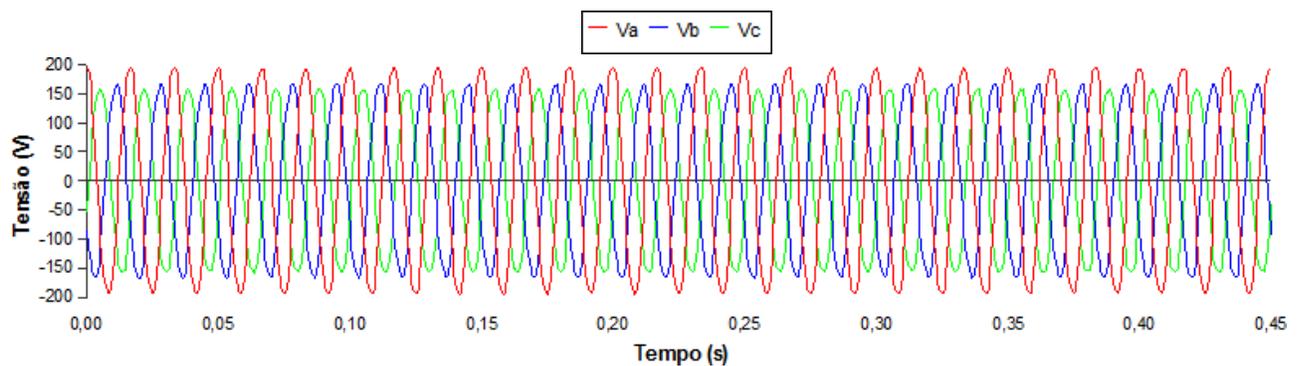


Figura 4.24: Elevação, CAISM-DA, 18/06/2009 07:41:50, V_a 112%, V_b 93%, V_c 91%.

Transferência de alimentador

Um evento interessante ocorre no CAISM-CME, em geral, mensalmente, e é mostrado na figura 4.25. Trata-se de uma transferência de alimentador. Primeiramente ocorre a interrupção da tensão. Em seguida, após cerca de trinta segundos a tensão retorna com um valor eficaz acima do nominal, em torno de 1,15 pu. Então outra interrupção ocorre e em um segundo a tensão é restabelecida em seu valor nominal.

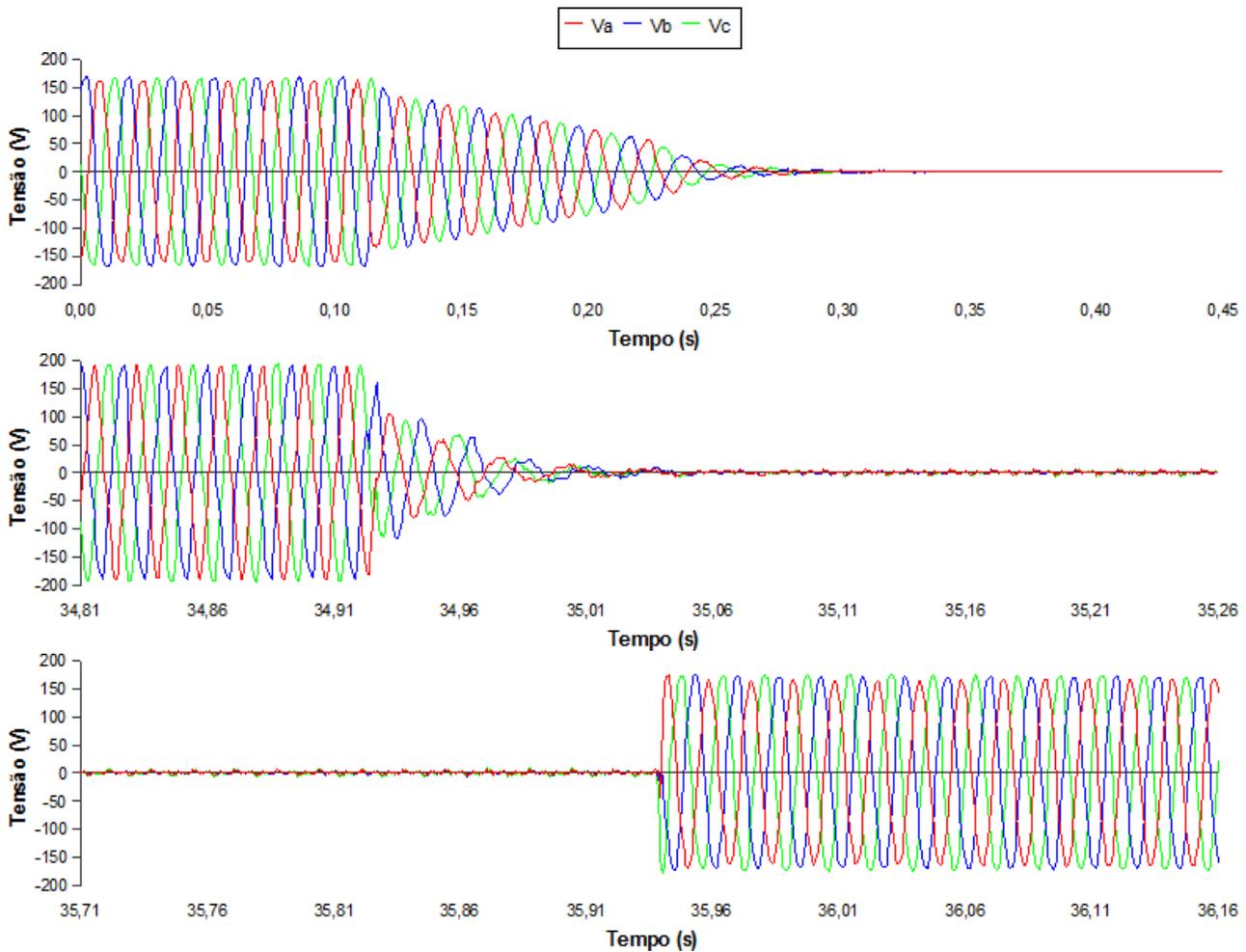
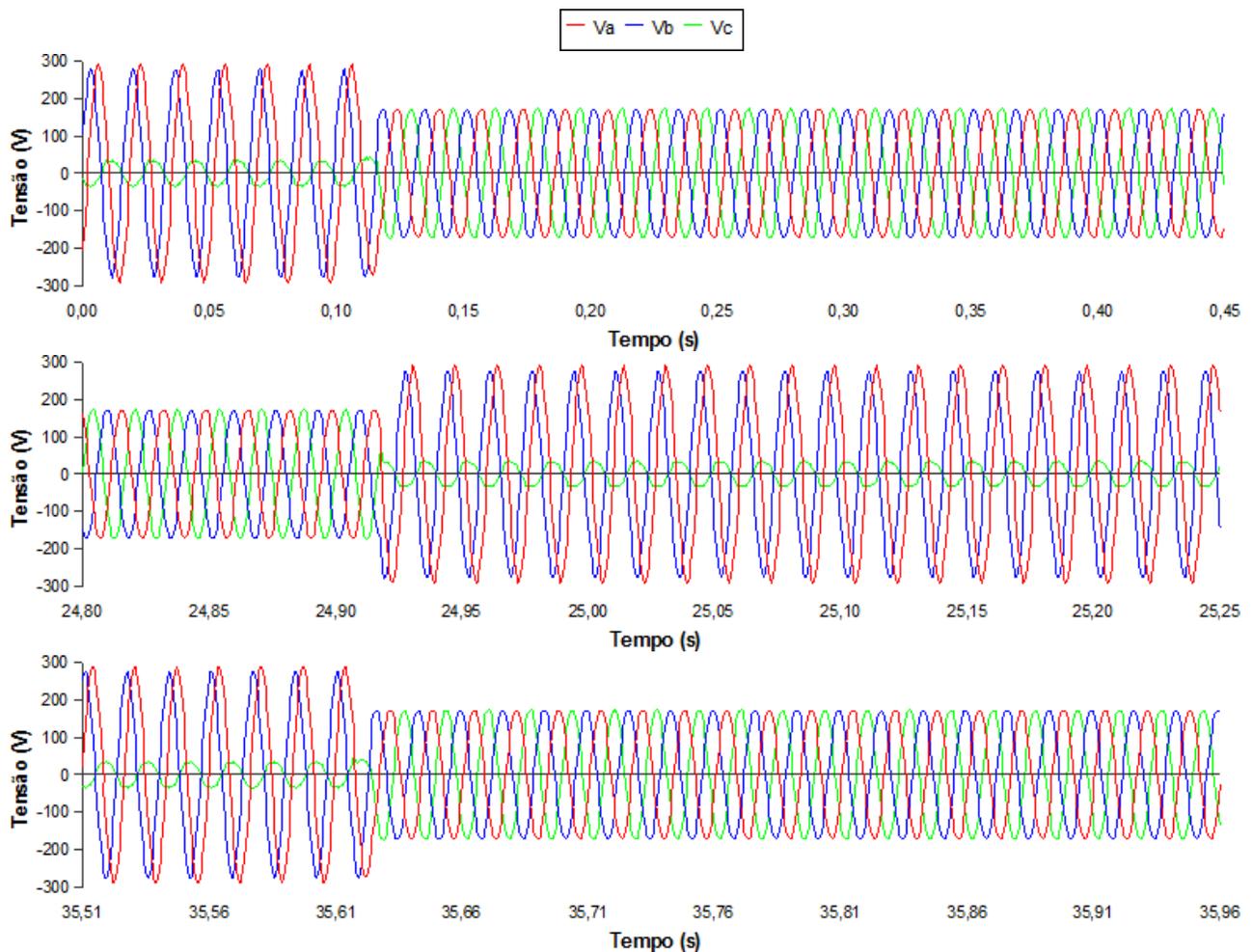


Figura 4.25: Transferência de alimentador, CAISM-CME, 05/04/2009 17:51:35.854.

Sequência de perturbações

Na figura 4.26 tem-se uma sequência de variações de tensão, consequência de um curto-circuito monofásico em um alimentador paralelo. Como visto na seção 4.2, no caso de uma falta deste tipo, a fase afetada sofre um afundamento de tensão, como ocorrido na C - 0,21 pu, e as outras têm sua tensão elevada, A - 1,76 pu - e B - 1,67 pu. Também é interessante notar que o fato ocorreu diversas vezes, devido às tentativas de religamento por parte da concessionária, visando o restabelecimento do sistema.



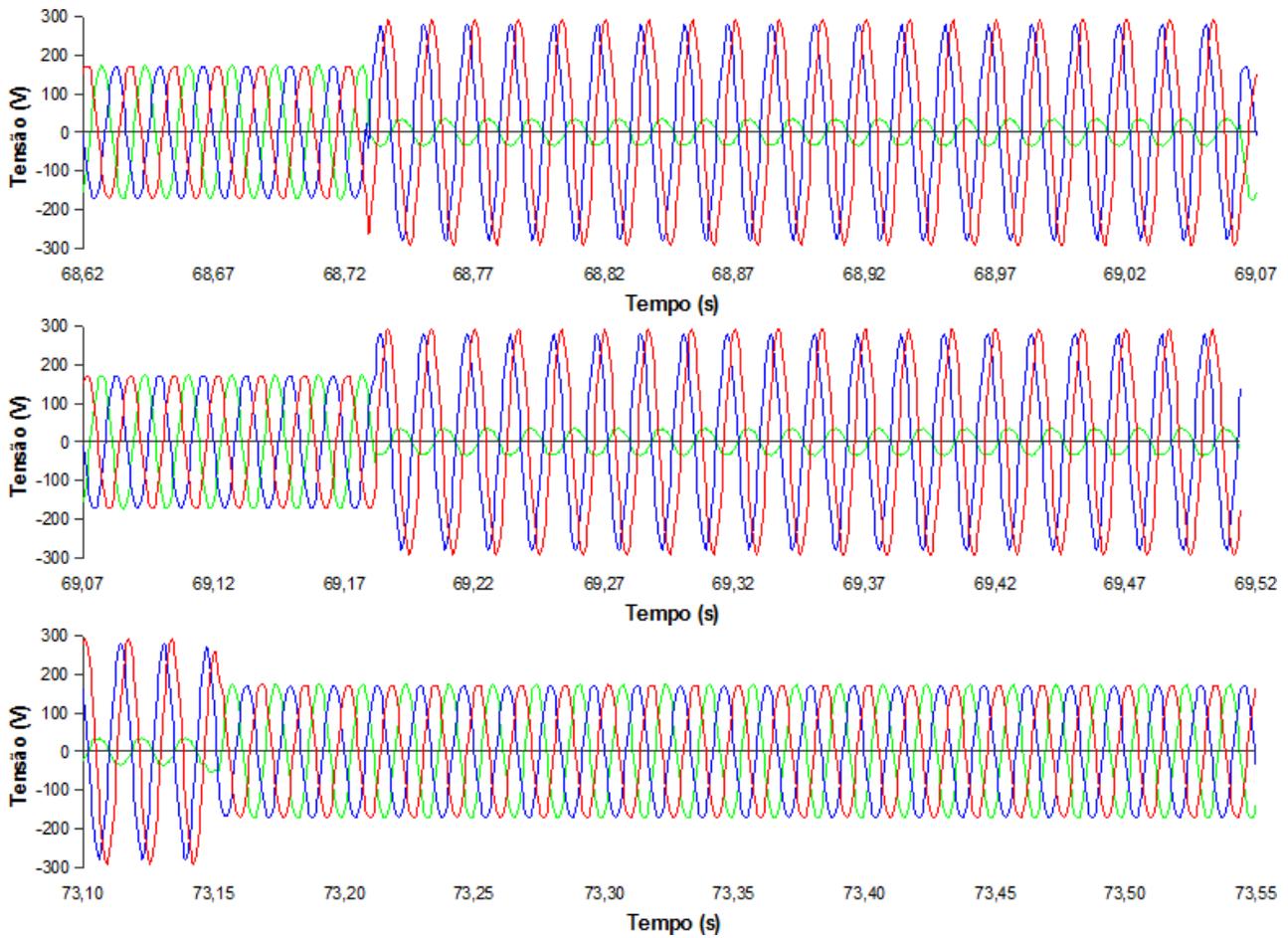


Figura 4.26: Sequência de perturbações, CAISM-DA, 21/04/2009 14:52:37.041.

4.3 Curva ITI (CBEMA)

Devido ao aumento do uso de equipamentos de informática e eletrônicos, bastante sensíveis às variações de tensão, a *Computer Business Equipment Manufacturer Association* (CBEMA) propôs uma curva (figura 4.27), presente na *IEEE Standard 446 (IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications)*, guia para testes de suportabilidade dos equipamentos a distúrbios da rede, com metas em relação a variações na magnitude da tensão e suas durações admissíveis, a serem satisfeitas pelas fontes e dispositivos que alimentam computadores [10].

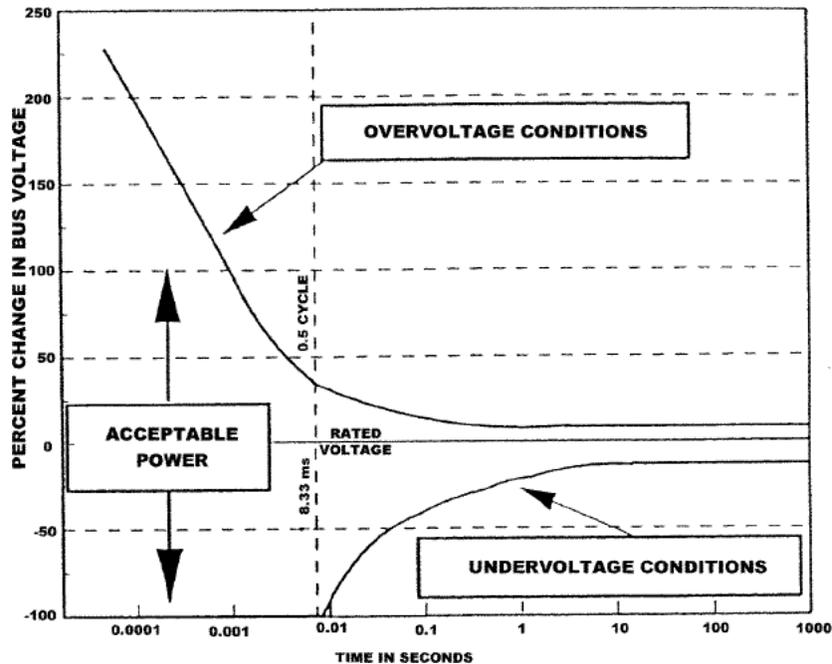


Figura 4.27: Curva CBEMA.

Fonte: Kyei *et al* [51].

A CBEMA foi renomeada *Information Technology Industry Council* (ITI) e uma nova curva, figura 4.28, foi desenvolvida. Esta curva descreve uma envoltória para a tensão CA de entrada tolerada pela maioria dos equipamentos de tecnologia de informação sem perda de função de trabalho, podendo ser empregada tanto para regime permanente como para condições transitórias e é aplicada para tensão nominal de 120 V e frequência de 60 Hz [52].

A curva ITI (CBEMA) pode ser usada para avaliar a qualidade da tensão em um sistema de energia elétrica quanto a afundamentos e elevações de tensão, interrupções e transitórios. Na abscissa tem-se a duração do evento e na ordenada sua magnitude. Na região entre as curvas, *No Interruption in Function Region*, espera-se que o equipamento opere normalmente. Abaixo da envoltória,

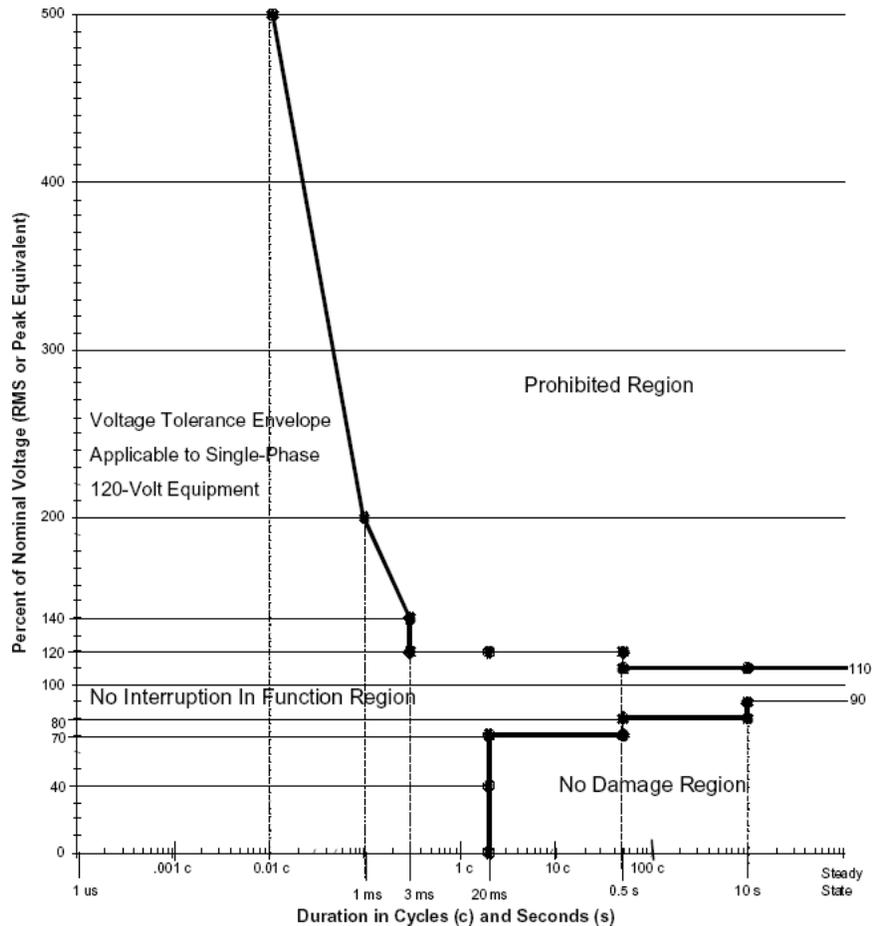


Figura 4.28: Curva ITI (CBEMA).

Fonte: Information Technology Industry Council (ITI) [52].

No Damage Region, pode ocorrer falha na operação ou mau funcionamento. Acima da envoltória, *Prohibited Region*, pode ocorrer algum dano ao equipamento [53].

A ITI publicou um conjunto de observações (*Application Notes*) sobre os valores tolerados descritos abaixo [52], e que são aplicados para tesões de fase de 120 V oriundas do sistema trifásico de 208 V de tensão de linha. Por extensão, pode-se considerá-las válidas para o sistema brasileiro de 220 V / 127 V.

- Tolerância em regime permanente

Corresponde a uma faixa de variação de $\pm 10\%$ da tensão nominal, na qual a tensão pode permanecer por períodos indefinidos de tempo, e é função das cargas e das perdas do sistema de distribuição.

- Elevação de tensão de linha

Tensão eficaz de até 120% da nominal, com no máximo 0,5 s de duração, provavelmente devido a retirada de grandes cargas ou a curtos-circuitos monofásicos no sistema de distribuição.

- Transitório com decaimento de baixa frequência

Dependendo das frequências de ressonância do sistema, pode acontecer entre 200 Hz e 5 kHz, com amplitudes de 140% a 200% do pico da tensão nominal em 60 Hz, respectivamente. Considera-se que o transitório está completamente encerrado após meio ciclo de sua ocorrência. Tem como principal motivo a conexão, no sistema de distribuição, de capacitores para correção de fator de potência.

- Transitório impulsivo de alta frequência

Aplica-se a amplitude de pico e a duração, e descreve transitórios que ocorrem devido a descargas atmosféricas. A intenção é de promover a imunidade à transitórios de no mínimo 80 J.

- Afundamento de tensão

Podem ter tensão nominal de até 80% e duração de no máximo 10 s ou até 70% e 0,5 s. Geralmente ocorre devido à entrada de cargas pesadas e faltas no sistema.

- Desligamento

Inclui tanto os afundamentos de tensão severos quanto as interrupções completas de tensão, com duração de até 20 ms. Resulta tipicamente da ocorrência e extinção das faltas do sistema.

Como a curva ITI (CBEMA) pode ser aplicada a equipamentos elétricos industriais em geral, sujeitos a sub e sobretensões, esta passou a ser uma referência para a verificação do nível de vulnerabilidade de equipamentos, por meio da comparação da curva de sensibilidade do equipamento com a curva de variações observadas num determinado intervalo de tempo.

4.3.1 Registro de distúrbios

Nas figuras 4.29 a 4.31 foram marcados na curva ITI os eventos ocorridos na FEEC entre janeiro e abril de 2009, enquanto as tabelas 4.1 a 4.3 os totalizam, e mostram quantos excederam a tolerância. Em geral, a maioria dos eventos foram de afundamento de tensão e somente alguns distúrbios tiveram grande gravidade, ultrapassando os valores estipulados pela curva. No mês de março, nos três medidores, aparece um afundamento de tensão fora dos limites da envoltória, tratando-se do referido nas formas de onda das figuras 4.15, 4.19 e 4.21. Os transitórios fora da tolerância mostrados na FEEC-A somente tiveram seus valores analíticos registrados, com magnitudes de 143 ou 144% e

duração de 7 ou 8 ms; o mesmo valendo para os da FEEC-EFG, cujas magnitudes foram de 140 ou 141% e duração de 8 ms. Alguns transitórios, apesar de constarem nas tabelas, não aparecem nos gráficos por extrapolarem os valores de duração dos mesmos, abaixo de 0,1 ms, o mesmo valendo para a interrupção sustentada do mês de abril, acima de 100 s.

Já as figuras 4.32 e 4.33 mostram os principais distúrbios registrados entre os meses de janeiro e abril de 2009 nos medidores do CAISM, também apresentados nas tabelas 4.4 e 4.5. Os transitórios, mesmo em grande número principalmente no CAISM-DA, não foram muito severos, tendo, apesar de magnitudes elevadas, curtas durações. No CAISM-CME, embora em pouca quantidade houveram algumas interrupções que acarretaram o desligamento de equipamentos ligados à rede. Afundamentos e elevações de tensão ocorreram com frequência elevada, sobretudo no CAISM-DA, podendo resultar em problemas para equipamentos, tanto quanto ao desligamento e perda de dados, como a danos físicos aos mesmos. Em especial, em janeiro os afundamentos no CAISM-DA tiveram magnitude entre 80 e 90%, com duração acima de 10 segundos, fato que os fez ficar aquém da envoltória. Pelos gráficos nota-se uma grande quantidade de elevações, nem todas contabilizadas nas tabelas nos meses de janeiro, fevereiro e março. Isto acontece porque nestes casos os afundamentos foram mais severos, e considerados como os distúrbios ocorridos.

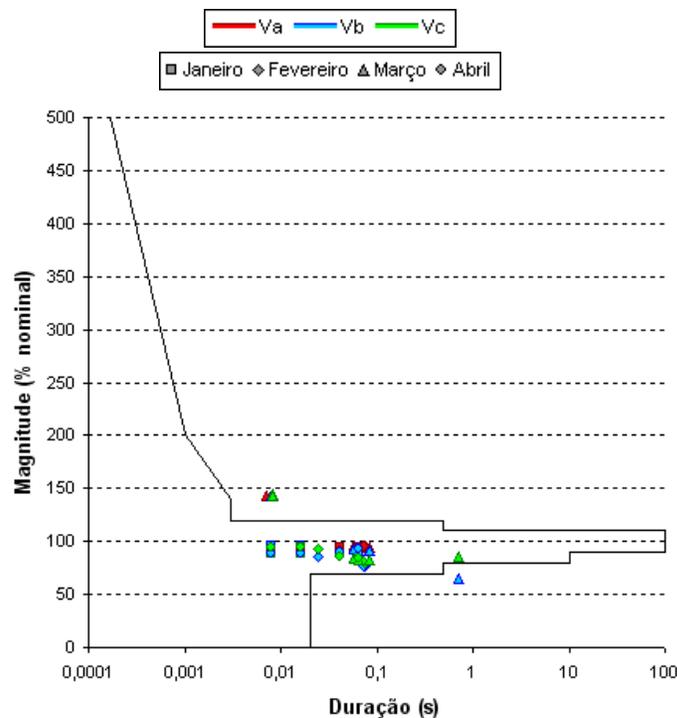


Figura 4.29: Curva ITI (CBEMA), FEEC-A, 01-04/2009.

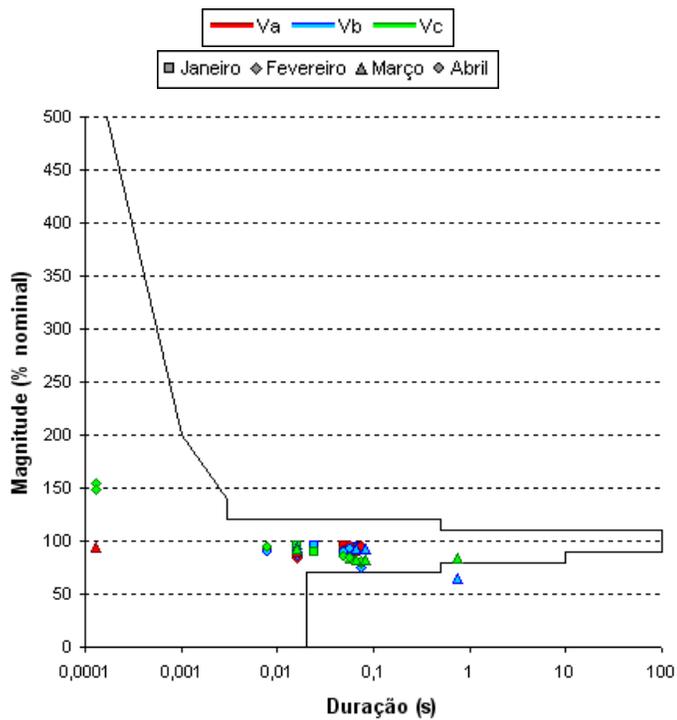


Figura 4.30: Curva ITI (CBEMA), FEEC-B, 01-04/2009.

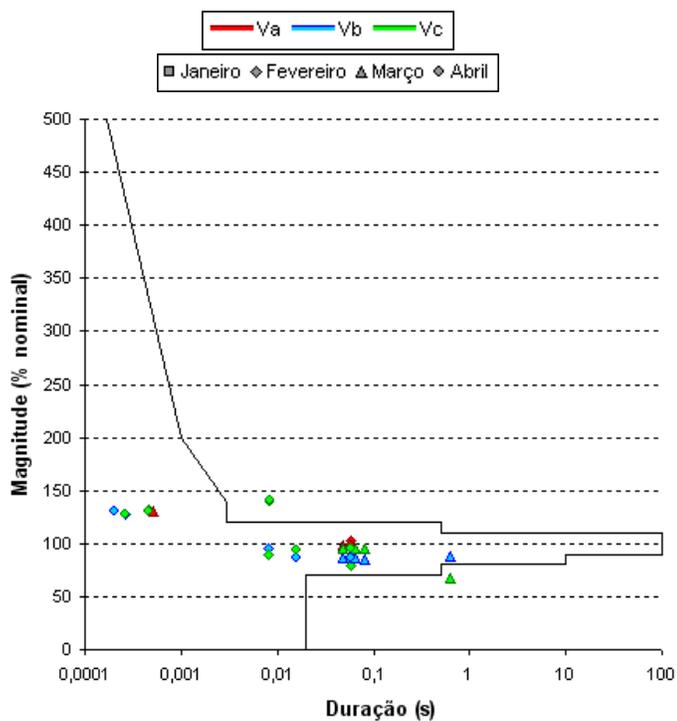


Figura 4.31: Curva ITI (CBEMA), FEEC-EFG, 01-04/2009.

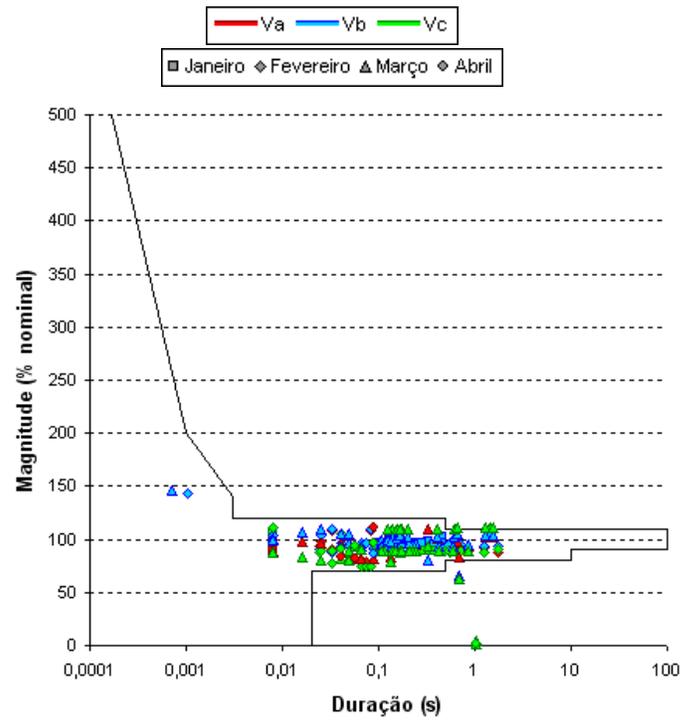


Figura 4.32: Curva ITI (CBEMA), CAISM-CME, 01-04/2009.

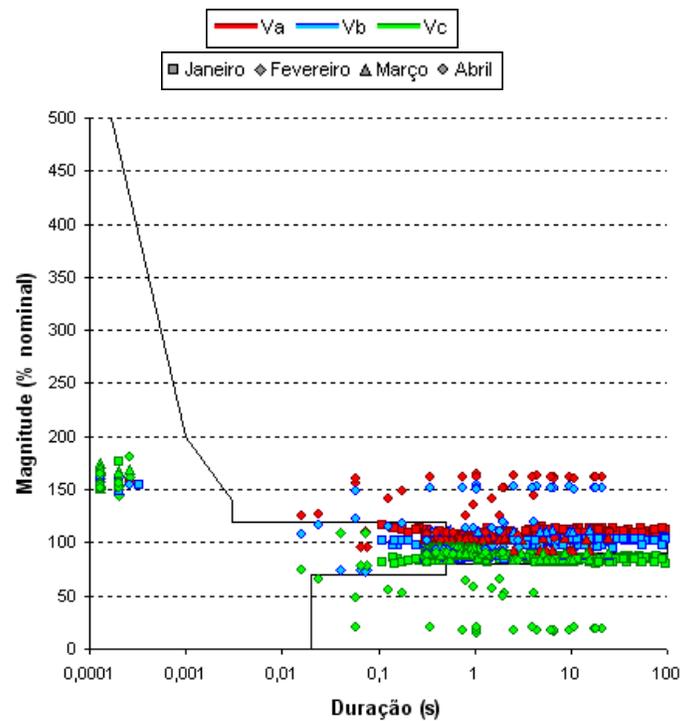


Figura 4.33: Curva ITI (CBEMA), CAISM-DA, 01-04/2009.

Tabela 4.1: Eventos ocorridos na FEEC-A, 01-04/2009.

Mês	Transitório	Interrupção	Afundamento	Elevação
Janeiro	0/0	0/0	6/0	0/0
Fevereiro	0/0	0/0	3/0	0/0
Março	7/6	0/0	4/1	0/0
Abril	0/0	1/1	4/0	0/0

Tabela 4.2: Eventos ocorridos na FEEC-B, 01-04/2009.

Mês	Transitório	Interrupção	Afundamento	Elevação
Janeiro	2/0	0/0	6/0	0/0
Fevereiro	9/0	0/0	3/0	0/0
Março	0/0	0/0	5/1	0/0
Abril	0/0	1/1	4/0	0/0

Tabela 4.3: Eventos ocorridos na FEEC-EFG, 01-04/2009.

Mês	Transitório	Interrupção	Afundamento	Elevação
Janeiro	1/0	0/0	0/0	0/0
Fevereiro	2/0	0/0	3/0	0/0
Março	1/0	0/0	4/1	0/0
Abril	10/0	1/1	2/0	0/0

Tabela 4.4: Eventos ocorridos no CAISM-CME, 01-04/2009.

Mês	Transitório	Interrupção	Afundamento	Elevação
Janeiro	4/0	0/0	12/0	0/0
Fevereiro	8/0	1/1	19/0	1/0
Março	5/0	2/2	29/1	15/4
Abril	9/0	1/1	3/0	0/0

Tabela 4.5: Eventos ocorridos no CAISM-DA, 01-04/2009.

Mês	Transitório	Interrupção	Afundamento	Elevação
Janeiro	36/0	0/0	157/58	0/0
Fevereiro	19/0	0/0	28/0	0/0
Março	50/0	0/0	127/5	0/0
Abril	35/0	0/0	22/18	19/12

4.4 Distorções harmônicas

O sistema de energia elétrica opera, no Brasil, em 60 Hz, entretanto, alguns tipos de cargas produzem correntes em diferentes frequências, múltiplas inteiras da fundamental (60 Hz), caracterizando uma forma de poluição na rede elétrica, conhecida como poluição por componentes harmônicas ou simplesmente harmônicas.

A distorção harmônica [54] é observada desde o início da história dos sistemas de energia elétrica em tensão alternada. Atualmente, suas principais causadoras são as cargas eletrônicas, as quais utilizam diodos, retificadores controlados (SCRs), transistores de potência e outras chaves eletrônicas, que atuam cortando as formas de onda senoidais para controle de potência ou conversão de contínua para alternada, e vice-versa. Com isso a corrente na carga deixa de ser senoidal e aparece recortada, e da sua interação com a impedância do sistema originam-se distorções na tensão e, em alguns casos, ressonância. Dadas suas vantagens quanto à eficiência e controlabilidade, este tipo de carga tem aumentado consideravelmente, acarretando problemas ao sistema elétrico.

Além dos dispositivos de eletrônica de potência, também são fontes geradoras de harmônicas os dispositivos que operam com saturação de seus núcleos de ferro, caso dos transformadores, máquinas elétricas e lâmpadas fluorescentes com reatores eletromagnéticos. Por razões econômicas, a maioria dos transformadores e motores operam no joelho da curva de saturação de seus núcleos, resultando em correntes de magnetização de pico ricas em terceira harmônica.

Como consequência, inúmeros efeitos indesejados afetam os componentes do sistema elétrico. Dentre os mais comuns estão [24, 54, 55, 56, 57]:

- Desligamento de cargas sensíveis;
- Redução da capacidade de transmissão de potência, devido a circulação de correntes harmônicas;
- Diminuição da precisão em medições, especialmente dos medidores monofásicos com disco de indução;
- Ressonância, a qual ocorre entre um capacitor e uma indutância em paralelo. Determinadas harmônicas podem ser amplificadas, provocando danos ou falhas dos capacitores;
- Sobreaquecimento de máquinas rotativas, devido ao aumento das perdas no ferro e no cobre, diminuindo a eficiência e o torque disponível, além de provocar aumento de ruído;
- Sobrecarga e perdas excessivas por histerese e correntes parasitas em transformadores, ocorrendo mais continuamente no caso de transformadores dedicados a uma grande carga não linear;

- Aquecimento excessivo de condutores, provocado pelo “efeito pelicular” (*skin effect*). Quanto maior a frequência da corrente, usualmente a partir da sétima harmônica, maior sua tendência de circular pela periferia dos mesmos, aumentando a resistência, e conseqüentemente as perdas por efeito Joule;
- Disparo indevido de dispositivos de proteção. O sinal harmônico pode ter corrente eficaz baixa, mas elevado valor de pico, podendo acionar dispositivos de proteção termomagnéticos ou diferenciais. No primeiro caso, provocado por um aquecimento ou pela formação de um campo magnético não desejado. No segundo, o efeito variará de acordo com sua resposta às correntes pulsantes;
- Sobrecarga de condutores de neutro. Num sistema trifásico ligado em estrela a soma das correntes das três linhas passa por este condutor, as componentes de sequência positiva e negativa se anulam, mas o mesmo não ocorre com as componentes de sequência zero. Havendo harmônicas triplas, de sequência zero, estas adicionam-se no condutor de neutro, pois estão em fase como mostrado na figura 4.34, podendo sobrecarregá-lo. Este fato, é muito comum em prédios comerciais, já que computadores apresentam terceira harmônica até superiores a 80%, podendo a corrente no neutro chegar a 240% da fundamental.

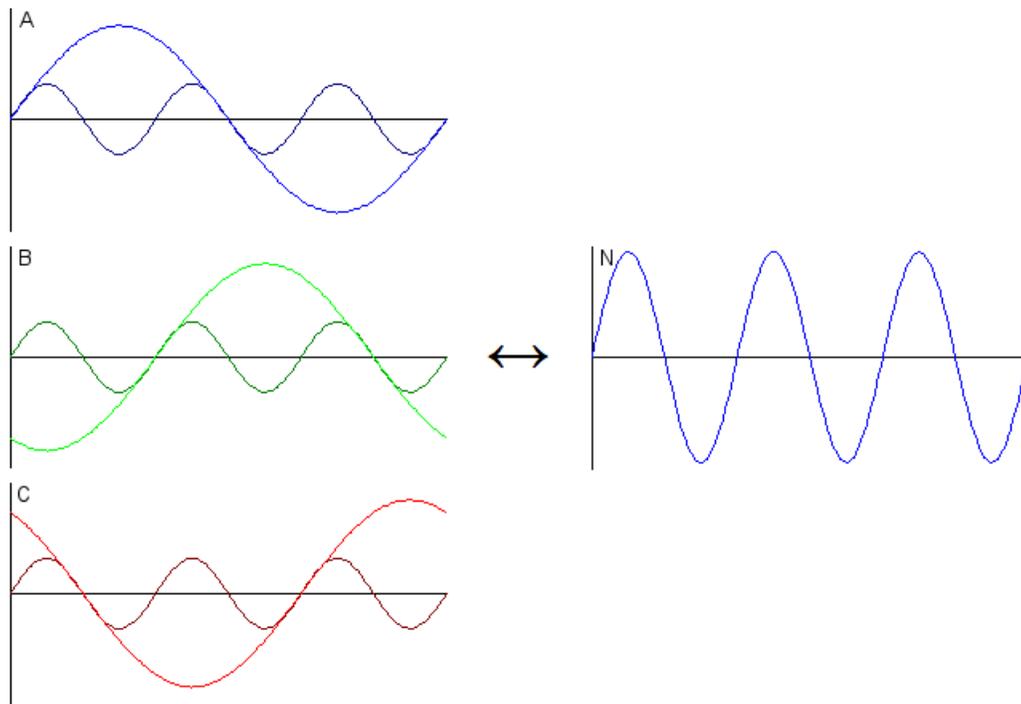


Figura 4.34: Terceira harmônica no condutor de neutro.
Fonte: Desmet e Baggini [57].

A partir desses problemas, há os seguintes impactos econômicos [58]:

- Perda de energia, pelo efeito Joule, em condutores e equipamentos;
- Sobredimensionamento de condutores e de equipamentos, com o conseqüente aumento da potência nominal de geradores, transformadores e UPSs;
- Redução da vida útil dos equipamentos. Como exemplo, uma distorção na tensão de 10% pode reduzir a vida estimada dos equipamentos em: 32,5% para máquinas monofásicas; 18% para máquinas trifásicas e 5% para transformadores;
- Desligamento indevido de chaves e disjuntores da instalação, causados por correntes de pico dadas por harmônicas, resultando em perdas de produção.

Para atenuá-los pode-se [24, 55, 58]:

- Aplicar a alteração da potência nominal em transformadores, por meio do fator K;
- Dimensionar os condutores de fase e neutro, levando em consideração a presença de harmônicas;
- Agrupar as cargas não lineares, alimentando-as por diferentes barramentos ou se possível por transformadores diferenciados;
- Utilizar transformadores de isolamento, para separar cargas das fontes, evitando que essas prejudiquem o sistema. O emprego de transformador com ligação triângulo-estrela (Dy) confina as harmônicas triplas, enquanto o uso de transformador com duplo secundário (Dyd), havendo um defasamento angular de 30° entre os enrolamentos, reduzem as harmônicas de 5ª e 7ª ordem;
- Caso as ações preventivas acima não sejam suficientes, passa a ser interessante a instalação de filtros, os quais podem ser: passivo, projetados para cada ordem de harmônica que deseja-se filtrar, proporciona um caminho de baixa impedância para esta corrente harmônica; ou ativo, como nem sempre é possível saber quais harmônicas estão presentes na instalação, este filtro mede o conteúdo harmônico da corrente, gera o oposto deste e o injeta na rede, mantendo a corrente da fonte senoidal e somente com a componente fundamental.

4.4.1 Conceitos relevantes

Para realizar uma análise harmônica são importantes alguns conceitos, os quais são listados abaixo, considerando uma forma de onda periódica de 60 Hz [42, 58, 59].

Conteúdo harmônico

Uma forma de onda periódica qualquer, representada por $f(t) = f(t + T)$, pode ser descrita através da Série de Fourier como a soma de um elemento contínuo e de senos e cossenos, como na equação (4.1).

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)] \quad (4.1)$$

Com:

$\omega_0 = 2\pi f_0$: frequência fundamental da onda [rad/s]

$f_0 = 1/T$: frequência fundamental da onda [Hz]

T : período da onda [s]

n : ordem da harmônica

a_0 : valor médio da função

a_n : amplitude em cosseno da harmônica de ordem n

b_n : amplitude em seno da harmônica de ordem n

A série pode assumir uma forma compacta, resultando na equação (4.2).

$$f(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [c_n \sin(n\omega_0 t + \phi_n)] \quad (4.2)$$

Com:

$c_0 = a_0/2$: amplitude da componente contínua

$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$: amplitude da harmônica de ordem n

$\phi_n = \tan^{-1} \left(\frac{a_n}{b_n} \right)$: ângulo de fase da harmônica de ordem n [rad]

Assim, um sinal com distorção harmônica é composto de senóides, com frequências harmônicas de diferentes valores múltiplos inteiros da fundamental ω_0 . Como exemplo, a onda $f(t)$ da figura 4.35, pode ser decomposta como a soma de $f_n = c_n \sin(n\omega_0 t + \phi_n)$, para $n = 1, 3, 5, 7, 9, 11$.

Na presença de harmônicas, mesmo em um sistema balanceado, pode haver a presença de componentes de sequência negativa ou zero, como mostra a tabela 4.6. Entretanto, em redes de distribuição trifásicas, ocorrem mais frequentemente as harmônicas de ordem ímpar, e comumente suas amplitudes diminuem com o aumento das frequências. Em geral, é suficiente considerar até a 50ª ordem, desprezando as superiores a esta.

Outro conceito interessante é o valor eficaz de uma onda periódica em função das componentes harmônicas, dado pela equação (4.3), sendo o valor eficaz de cada componente harmônica n , que são funções senoidais, mostrado na equação (4.4).

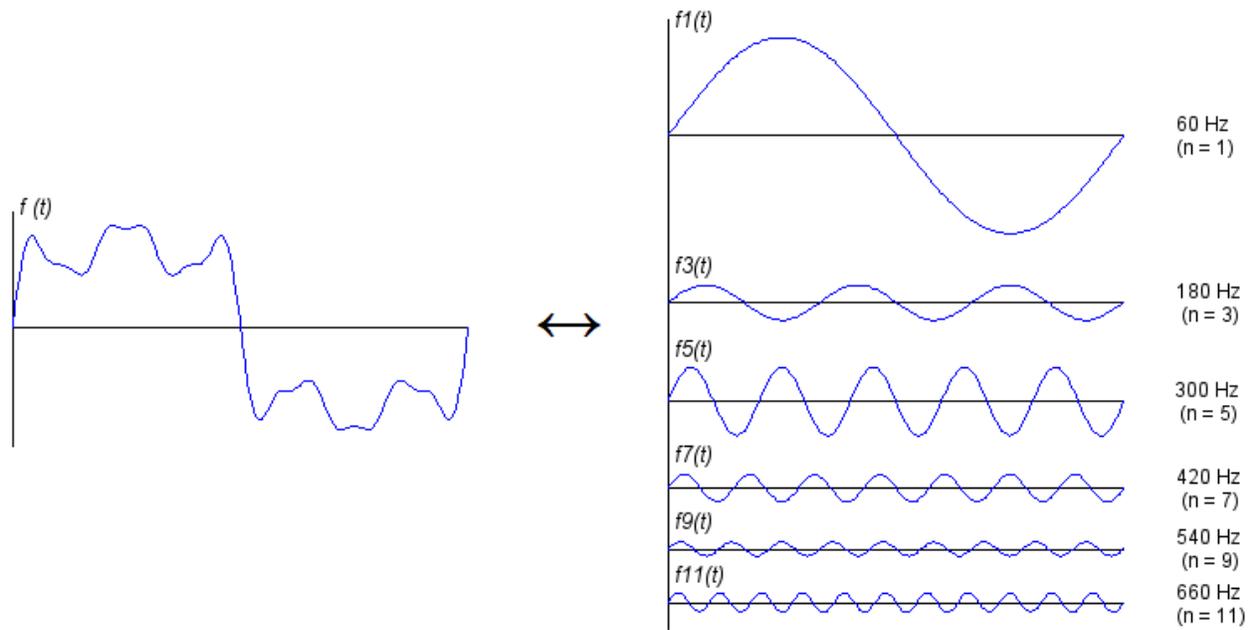


Figura 4.35: Forma de onda decomposta em suas harmônicas.

Tabela 4.6: Sequência de fases das harmônicas para um sistema trifásico balanceado.

Ordem da harmônica	Frequência (Hz)	Sequência de fase
1 ^a	60	+
2 ^a	120	-
3 ^a	180	0
4 ^a	240	+
5 ^a	300	-
6 ^a	360	0
n	n.60	...

Fonte: Grady e Santoso [54].

$$F_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f(t)^2 dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} c_n^2} \quad (4.3)$$

$$F_{nef} = \frac{c_n}{\sqrt{2}} \quad (4.4)$$

Espectro harmônico

O espectro harmônico, ou espectro de frequência, de uma onda é um gráfico que mostra o valor das harmônicas do sinal em função do valor da fundamental, incluindo a componente contínua se existir. Como exemplo, o espectro harmônico da onda da figura 4.35 é apresentado na figura 4.36, no qual é representada a ordem e a magnitude de cada componente harmônica presente.

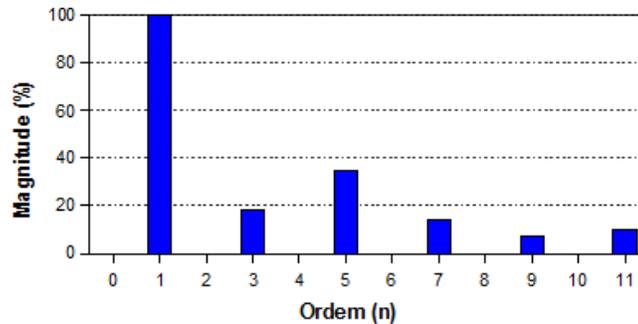


Figura 4.36: Espectro harmônico da função da figura 4.35.

Taxa de distorção harmônica total

A taxa de distorção harmônica total (*Total Harmonic Distortion* - THD) é um índice de desempenho amplamente utilizado para quantificar o conteúdo harmônico de um sinal distorcido. Para um sinal Y , é definida como na equação (4.5).

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} Y_n^2}}{Y_1} \quad (4.5)$$

Com:

Y_1 : amplitude da componente fundamental do sinal analisado

Y_n : amplitude da harmônica de ordem n do sinal analisado

Esta definição está de acordo com a Norma IEC 61000-2-2, a qual também especifica que a ordem da harmônica, n , pode ser limitada a 50. A THD pode também ser avaliada pela equação (4.6).

$$THD = \sqrt{\left(\frac{Y_{ef}}{Y_{1ef}}\right)^2 - 1} \quad (4.6)$$

Através de um único número, esta taxa permite avaliar a distorção que afeta a corrente ou a tensão num determinado ponto da rede, traduzindo a variação existente entre uma forma de onda periódica e uma forma de onda senoidal, ou seja, a relação do conteúdo harmônico de uma forma de onda e seu valor fundamental. Usualmente, é representada em termos de porcentagem.

4.4.2 Resultados

Nesta seção os resultados estão separados entre a análise da presença de harmônicas e da taxa de distorção harmônica total.

Análise harmônica

Em geral, as cargas presentes nas unidades de consumo avaliadas são divididas basicamente em três categorias: resistivas, indutivas e eletrônicas. No estudo em questão, os dois últimos grupos são considerados relevantes, e caracterizados como [60]:

- As cargas indutivas implicam na demanda de potência reativa e produzem harmônicas pela distorção da corrente. O grupo é composto por aparelhos que possuem na sua entrada motores e transformadores, representado, nos ambientes estudados, principalmente por aparelhos de ar condicionado e lâmpadas fluorescentes com reatores eletromagnéticos;
- As cargas eletrônicas tipicamente possuem um estágio retificador a diodos com filtro capacitivo na saída, resultando em uma corrente de entrada com bastante distorção e baixo fator de potência. Nos locais analisados possuem estas características aparelhos computacionais e lâmpadas fluorescentes com reatores eletrônicos.

Nas figuras 4.38 a 4.62 são listadas as formas de onda, espectros harmônicos e diagramas fasoriais das correntes e tensões de todos os pontos de medição, e a seguir realizadas as análises pertinentes a cada um deles. Como observações, para se obter uma melhor visualização, nem todas as escalas das formas de onda são as mesmas e nos espectros harmônicos o valor da fundamental é 100%, embora este valor possa estar limitado pela figura.

Analisando a corrente dos medidores da FEEC, percebe-se a influência tanto das cargas eletrônicas como das cargas indutivas devido à relevante presença de harmônicas ímpares, nos três pontos de medição. Entretanto, nota-se que há uma semelhança maior entre os medidores FEEC-B e FEEC-EFG em relação ao medidor FEEC-A, figuras 4.43, 4.44, 4.48, 4.49, 4.38 e 4.39, respectivamente. Avaliando as formas de onda típicas e as características dos espectros harmônicos de cargas eletrônicas e indutivas, como mostradas em Dugan *et al* [3] das lâmpadas fluorescentes com reator

eletrônico e com reator eletromagnético, figura 4.37 ou em Pomílio [60] de aparelho de televisão e refrigerador, percebe-se que na FEEC-A existe, proporcionalmente, uma carga maior de equipamentos eletrônicos, já que suas formas de onda tendem a assumir um formato triangular típico deste tipo de carga, e as harmônicas têm valores maiores em relação à fundamental. Em nenhum dos medidores há a presença de harmônicas triplas considerável que possa causar sobrecarga no condutor de neutro. A distorção da corrente é provocada pela carga, e distorção da tensão é consequência da primeira [24]. Visto isto, apesar da corrente na FEEC-A ter uma distorção considerável, não há um grande reflexo na tensão, a qual não apresenta harmônicas consideráveis, o mesmo valendo para a FEEC-B e FEEC-EFG, figuras 4.40, 4.41, 4.45, 4.46, 4.50, 4.51, respectivamente.

Avaliando, agora, as correntes dos medidores do CAISM, também fica evidente a presença de cargas eletrônicas e indutivas, dada pelas harmônicas ímpares que constam no espectro harmônico, mas aqui a distorção é um pouco mais elevada, figuras 4.53, 4.54, 4.58 e 4.59. Do mesmo modo que ocorreu nos medidores da FEEC-A, a proporção das primeiras é maior do que as de outras, sobretudo no CAISM-DA, o qual possui grande quantidade de aparelhos computacionais, além de lâmpadas fluorescentes com reator eletromagnético e ar condicionado, enquanto o CAISM-CME tem cargas tipicamente indutivas, como luminárias com reator eletromagnético, aparelhos de ar condicionado e equipamentos hospitalares com características indutivas e outras predominantemente resistivas, de aparelhos hospitalares. Nestes medidores, igualmente, não há a presença de harmônicas triplas relevantes. Diferentemente, no CAISM há uma grande distorção na tensão, principalmente quanto à presença da terceira e quinta harmônicas, além de algum nível de ruído, figuras 4.55, 4.56, 4.60 e 4.61.

Aproveitando as formas de onda, também são mostrados os diagramas fasoriais para cada um dos pontos de medição, mesmo não fazendo parte da análise harmônica, mas sim de uma avaliação de desequilíbrio das tensões e correntes. Estes diagramas são dados nas figuras 4.42, 4.47, 4.52, 4.57, 4.62. Como esperado, as cargas são predominantemente indutivas. Nota-se pelas correntes atrasadas em relação às tensões. Em geral, não há um desbalanço considerável nas tensões, visto que estas apresentam magnitudes iguais entre as fases e defasagens de aproximadamente 120° entre elas. Percebe-se tanto pelas formas de onda como pelos diagramas fasoriais que as correntes apresentam grande desequilíbrio entre as fases, com magnitudes diferentes entre elas, e deslocamentos de fase variados.

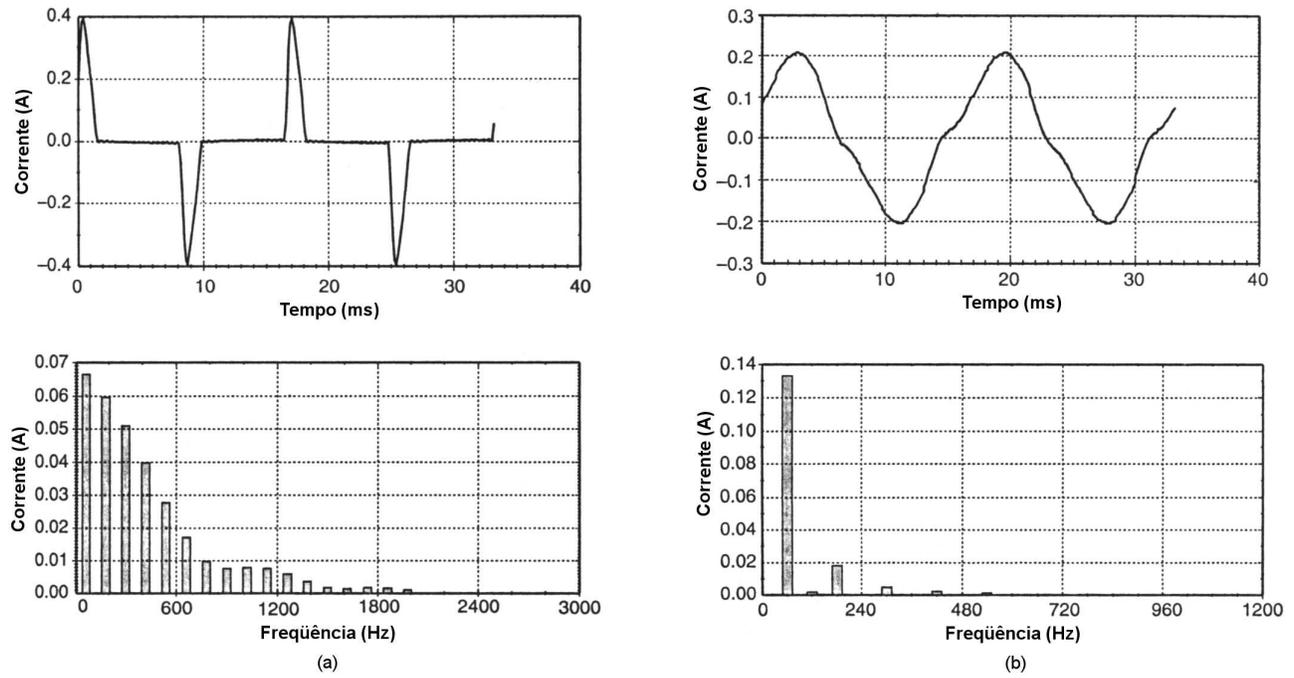


Figura 4.37: Formas de onda e espectros harmônicos de lâmpadas fluorescentes com reator eletrônico (a) e com reator eletromagnético (b).

Fonte: Dugan *et al* [3].

• Medidor FEEC-A

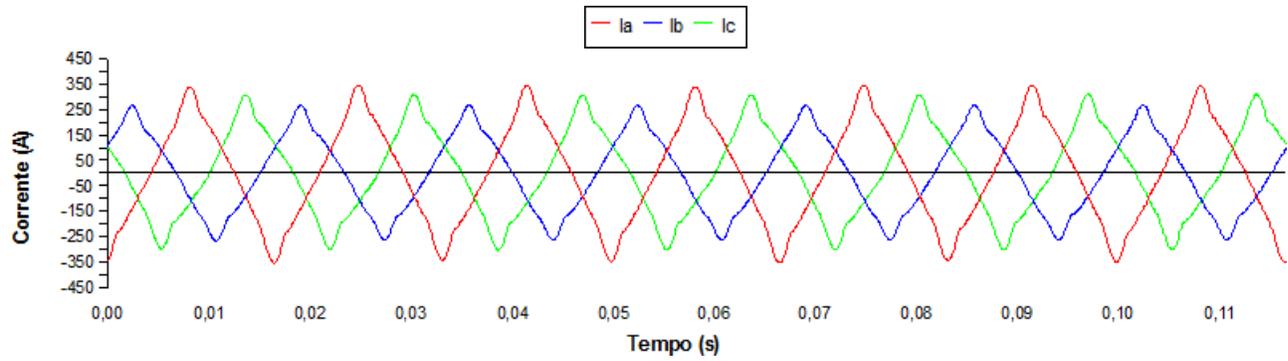


Figura 4.38: Forma de onda da corrente, FEEC-A, 01/04/2009 11:06:39.

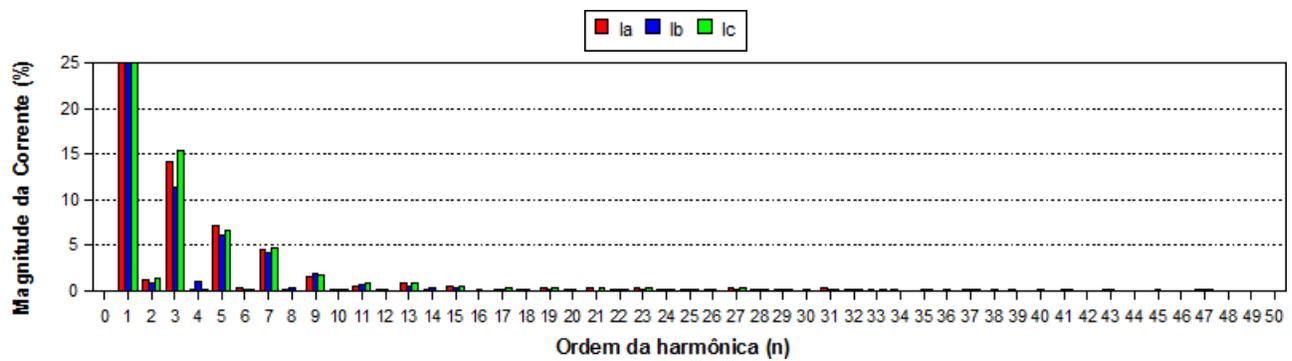


Figura 4.39: Espectro harmônico da corrente, FEEC-A, 01/04/2009 11:06:39.

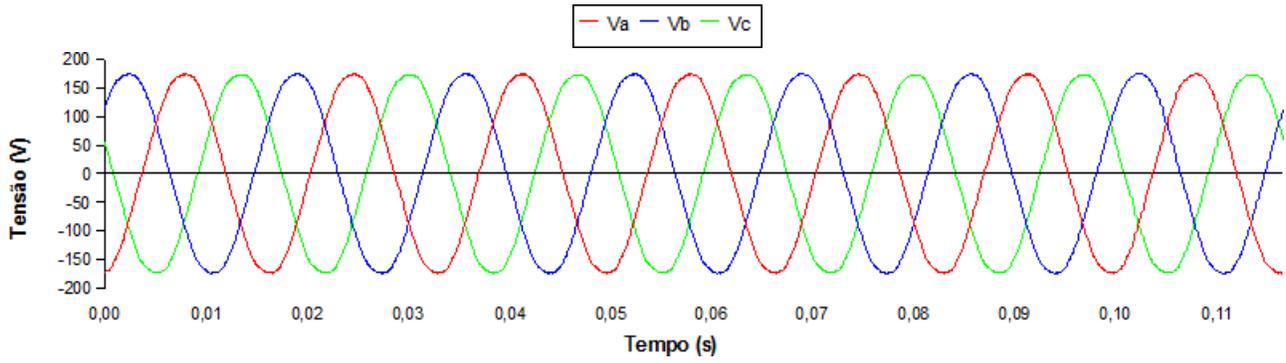


Figura 4.40: Forma de onda da tensão, FEEC-A, 01/04/2009 11:06:39.

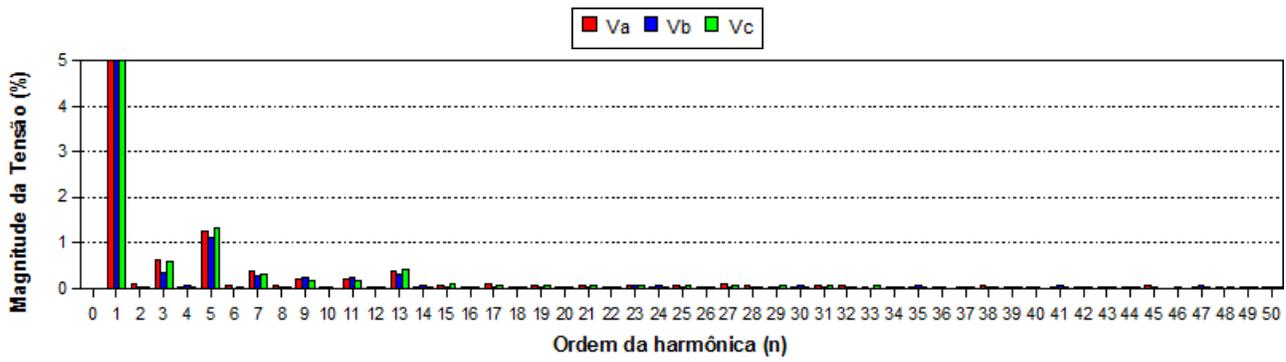


Figura 4.41: Espectro harmônico da tensão, FEEC-A, 01/04/2009 11:06:39.

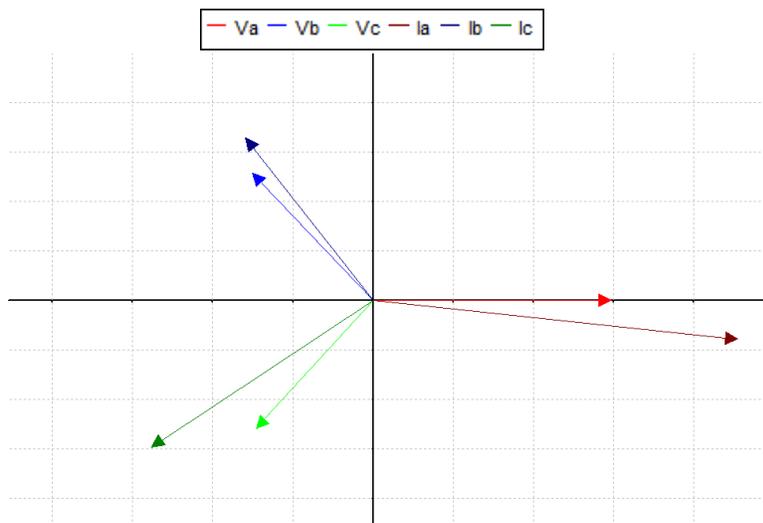


Figura 4.42: Diagrama fasorial, FEEC-A, 01/04/2009 11:06:39.

- *Medidor FEEC-B*

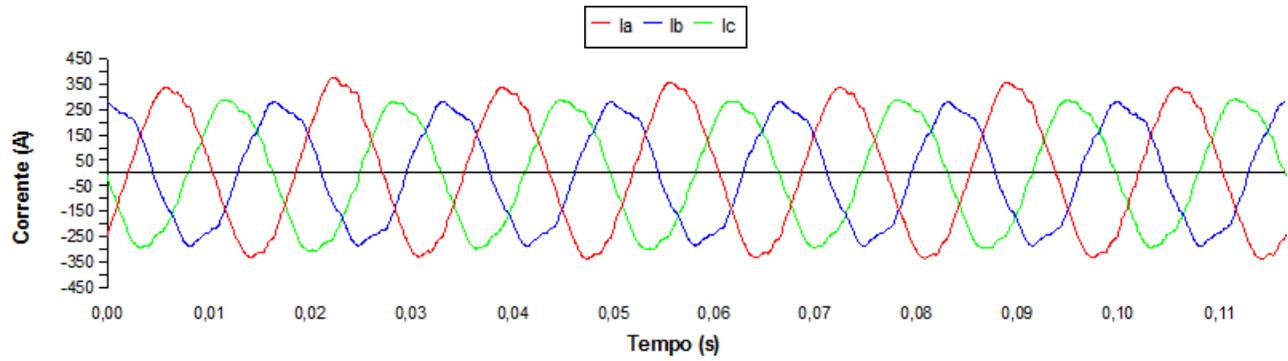


Figura 4.43: Forma de onda da corrente, FEEC-B, 05/05/2009 12:21:37.

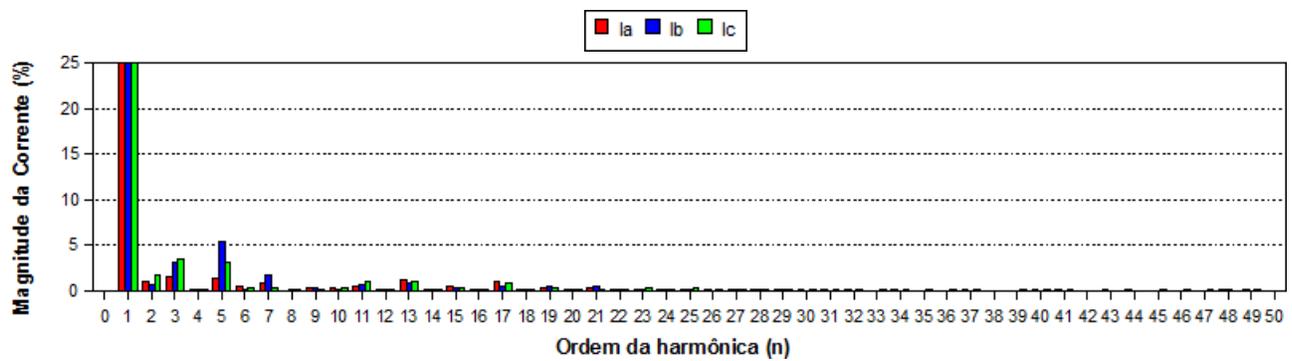


Figura 4.44: Espectro harmônico da corrente, FEEC-B, 05/05/2009 12:21:37.

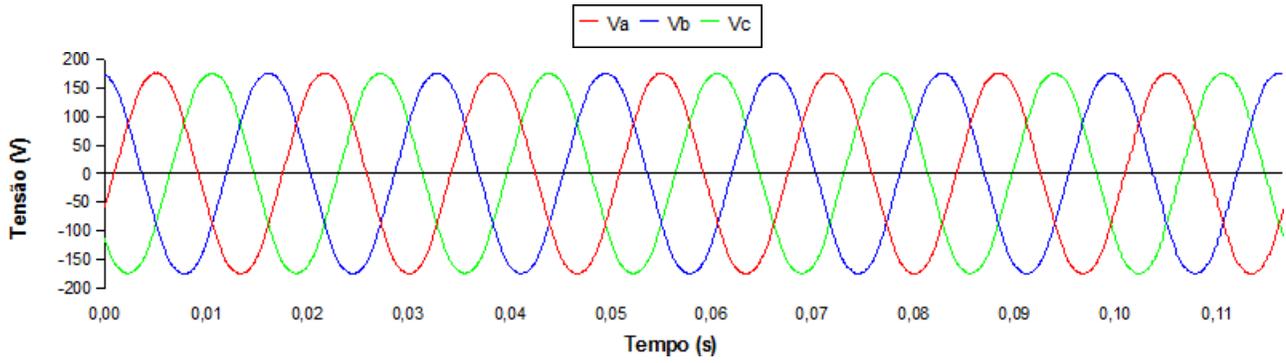


Figura 4.45: Forma de onda da tensão, FEEC-B, 05/05/2009 12:21:37.

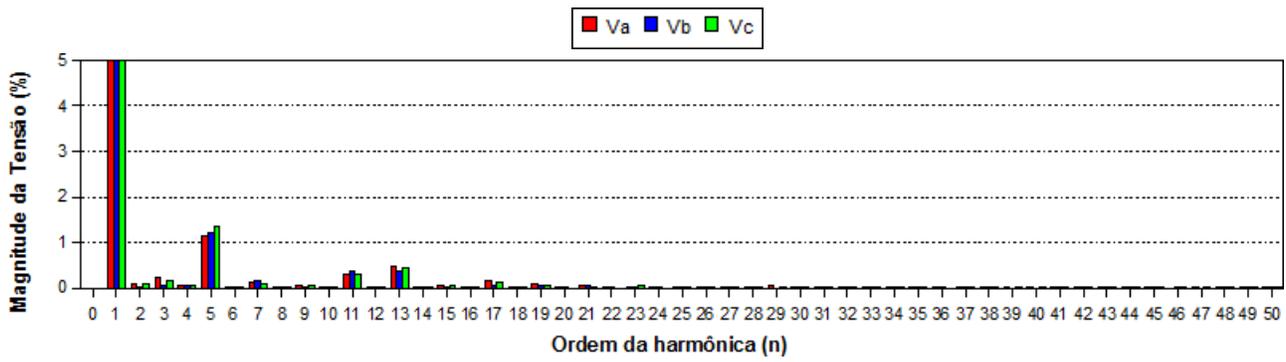


Figura 4.46: Espectro harmônico da tensão, FEEC-B, 05/05/2009 12:21:37.

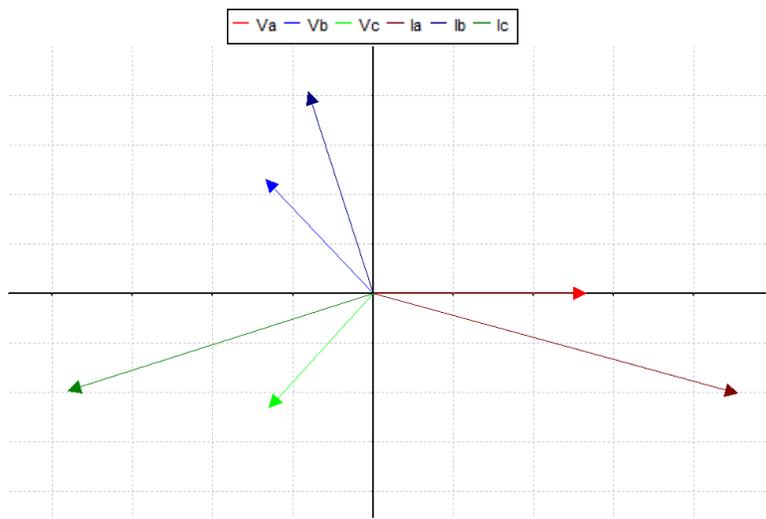


Figura 4.47: Diagrama fasorial, FEEC-B, 05/05/2009 12:21:37.

- *Medidor FEEC-EFG*

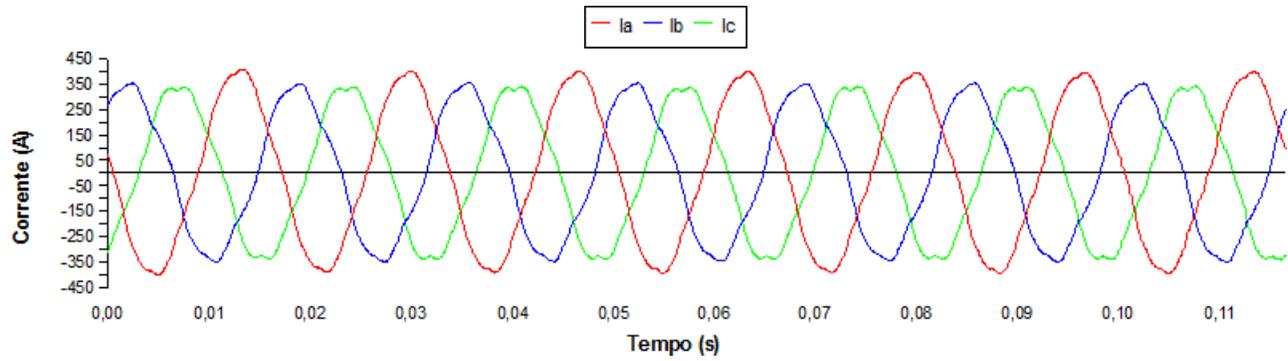


Figura 4.48: Forma de onda da corrente, FEEC-EFG, 05/05/2009 14:21:37.

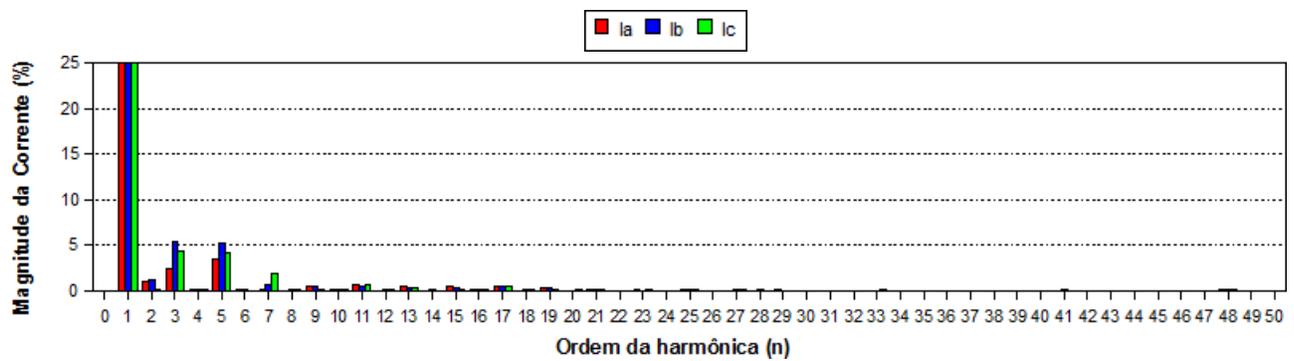


Figura 4.49: Espectro harmônico da corrente, FEEC-EFG, 05/05/2009 14:21:37.

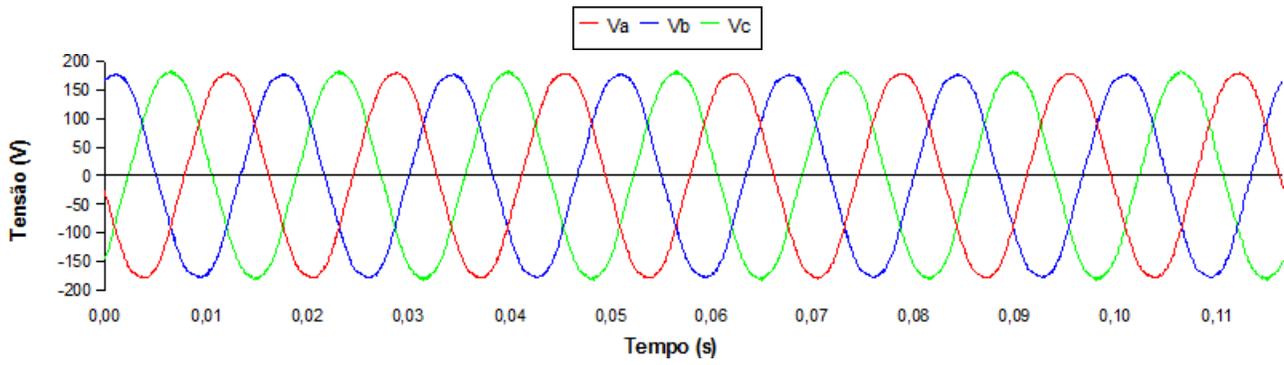


Figura 4.50: Forma de onda da tensão, FEEC-EFG, 05/05/2009 14:21:37.

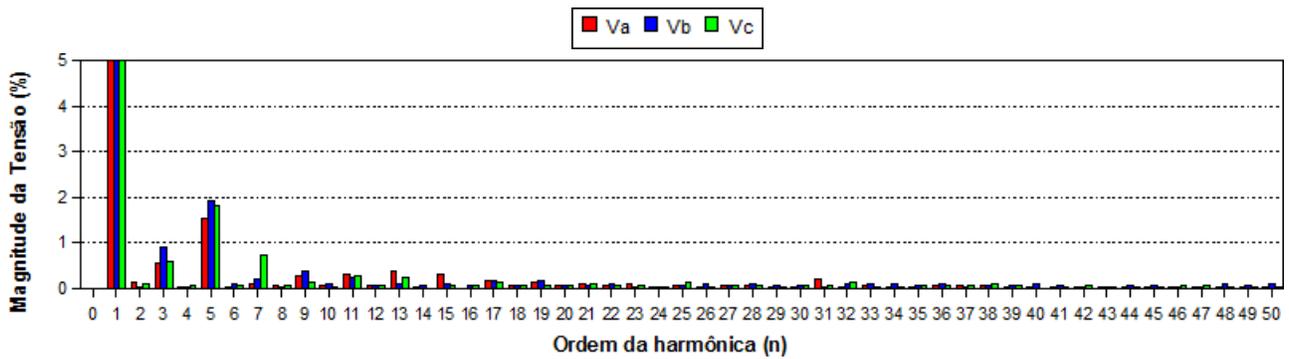


Figura 4.51: Espectro harmônico da tensão, FEEC-EFG, 05/05/2009 14:21:37.

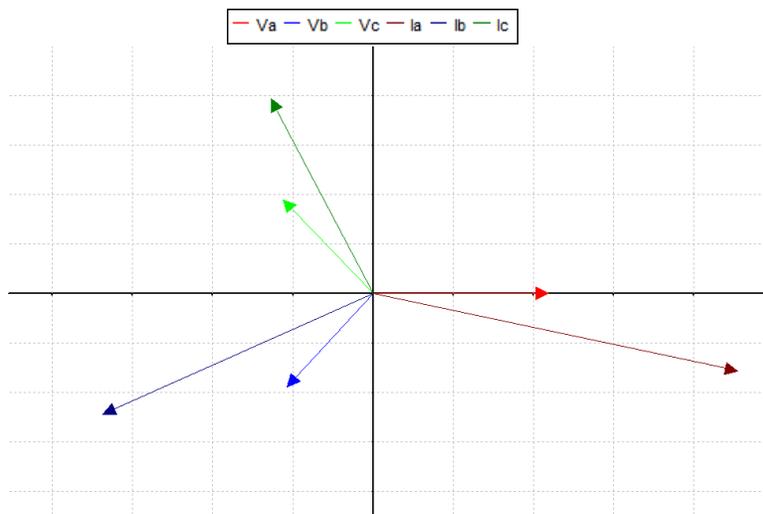


Figura 4.52: Diagrama fasorial, FEEC-EFG, 05/05/2009 14:21:37.

- Medidor CAISM-CME

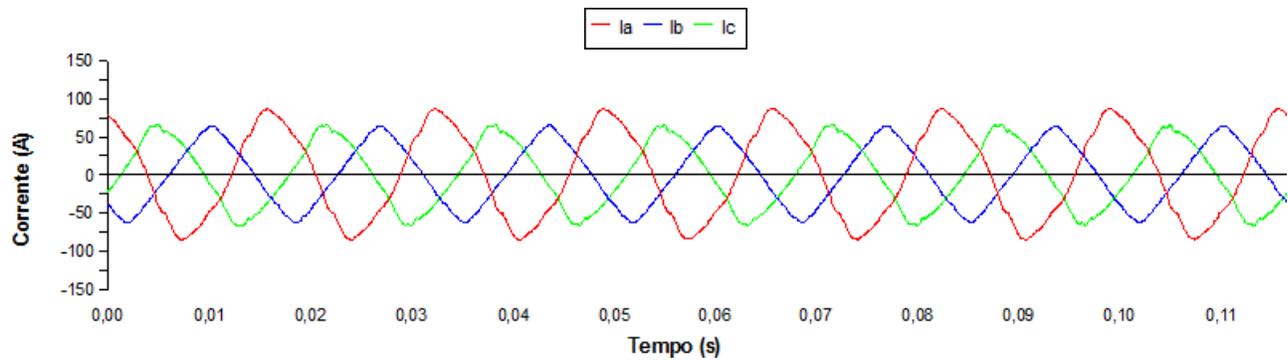


Figura 4.53: Forma de onda da corrente, CAISM-CME, 01/04/2009 11:09:48.

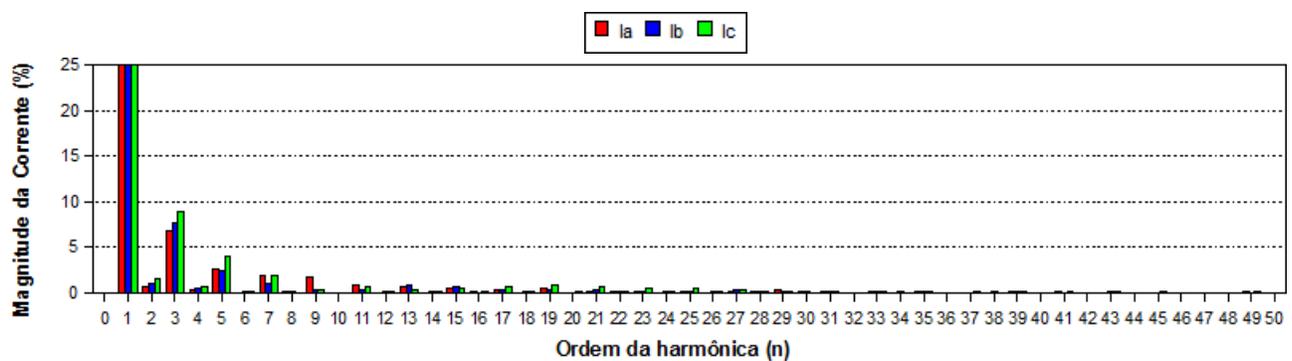


Figura 4.54: Espectro harmônico da corrente, CAISM-CME, 01/04/2009 11:09:48.

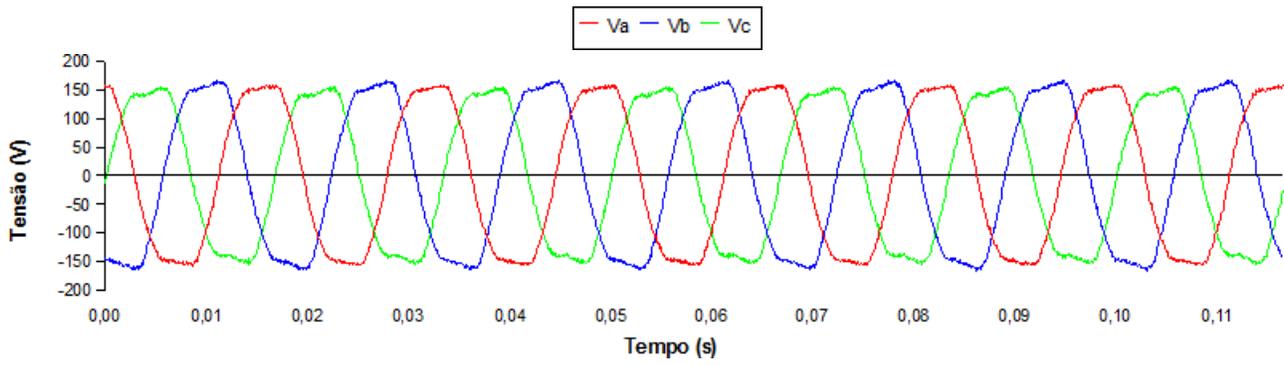


Figura 4.55: Forma de onda da tensão, CAISM-CME, 01/04/2009 11:09:48.

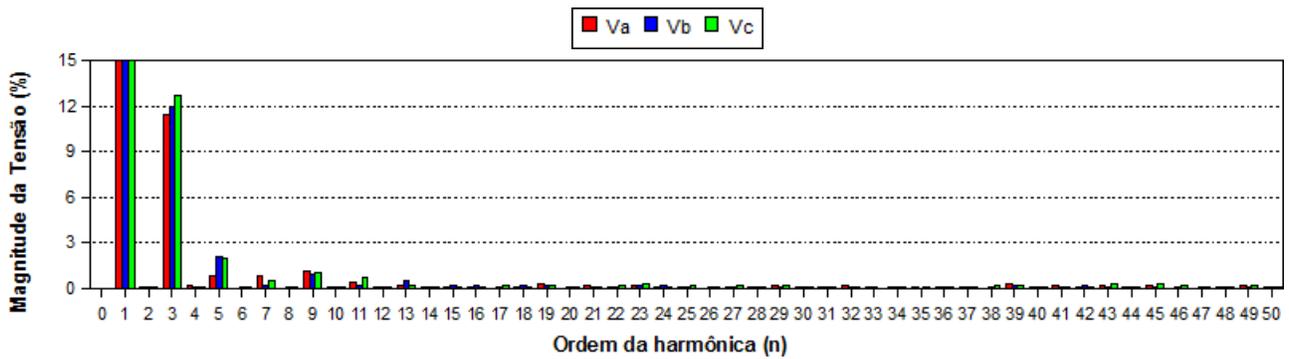


Figura 4.56: Espectro harmônico da tensão, CAISM-CME, 01/04/2009 11:09:48.

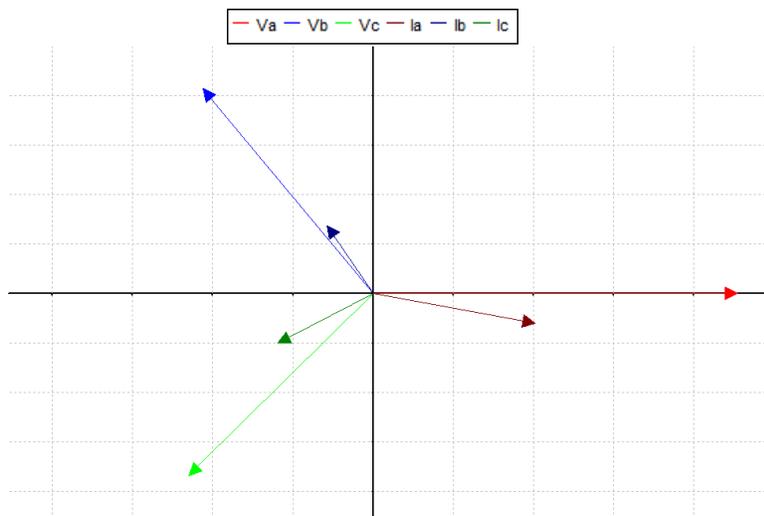


Figura 4.57: Diagrama fasorial, CAISM-CME, 01/04/2009 11:09:48.

- Medidor CAISM-DA

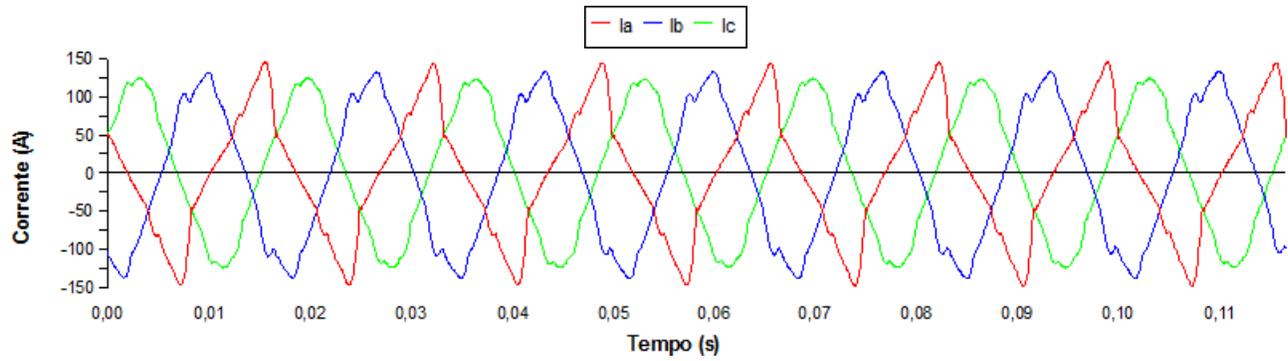


Figura 4.58: Forma de onda da corrente, CAISM-DA, 01/04/2009 11:12:40.

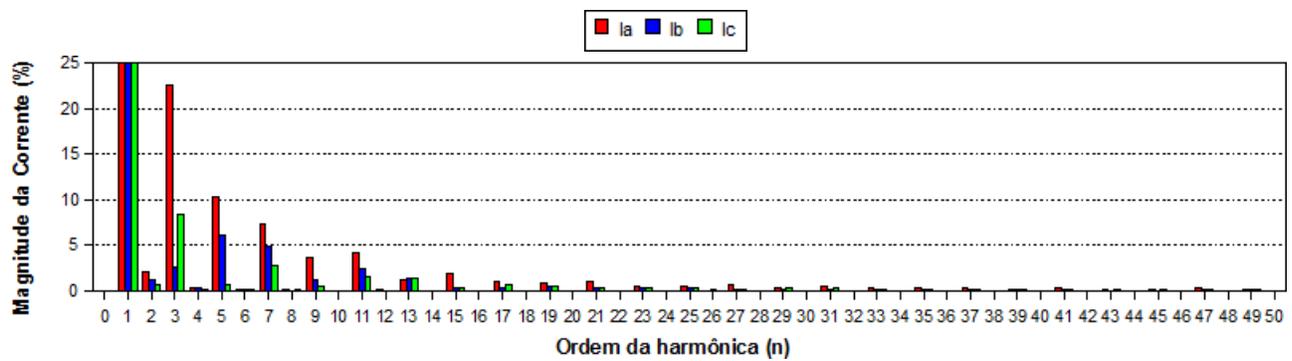


Figura 4.59: Espectro harmônico da corrente, CAISM-DA, 01/04/2009 11:12:40.

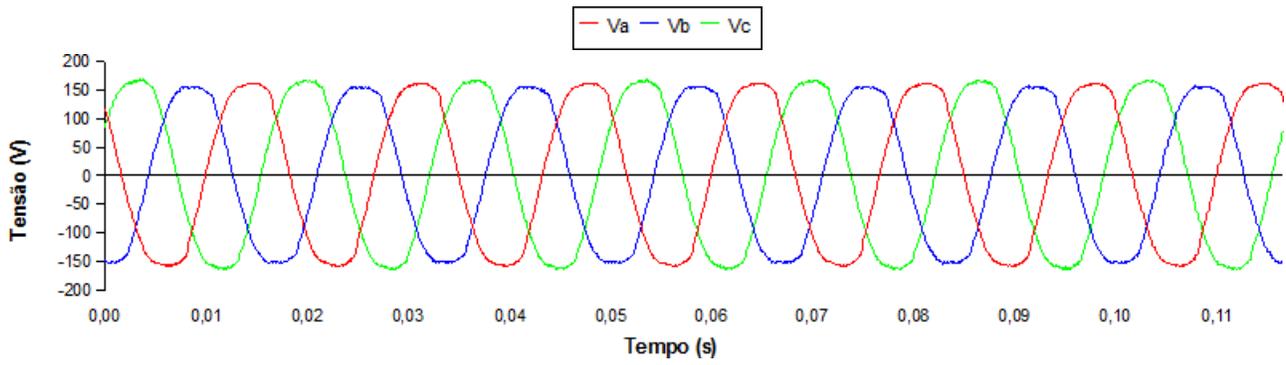


Figura 4.60: Forma de onda da tensão, CAISM-DA, 01/04/2009 11:12:40.

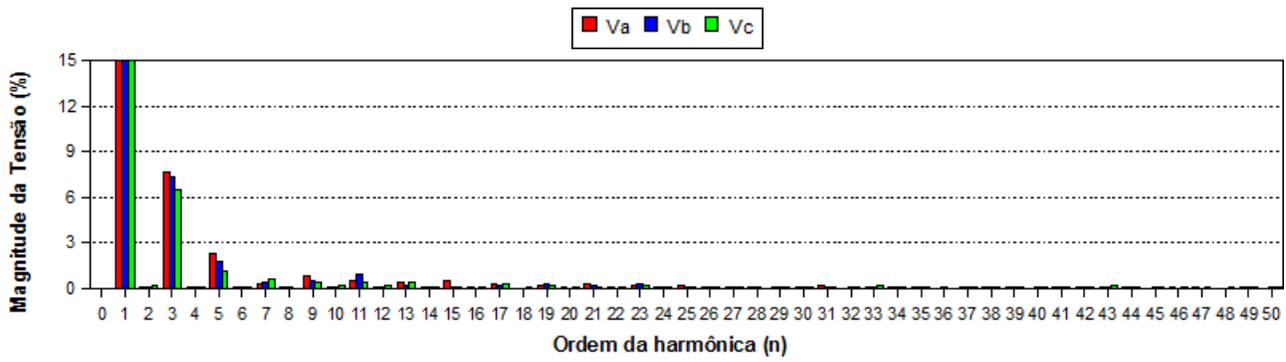


Figura 4.61: Espectro harmônico da tensão, CAISM-DA, 01/04/2009 11:12:40.

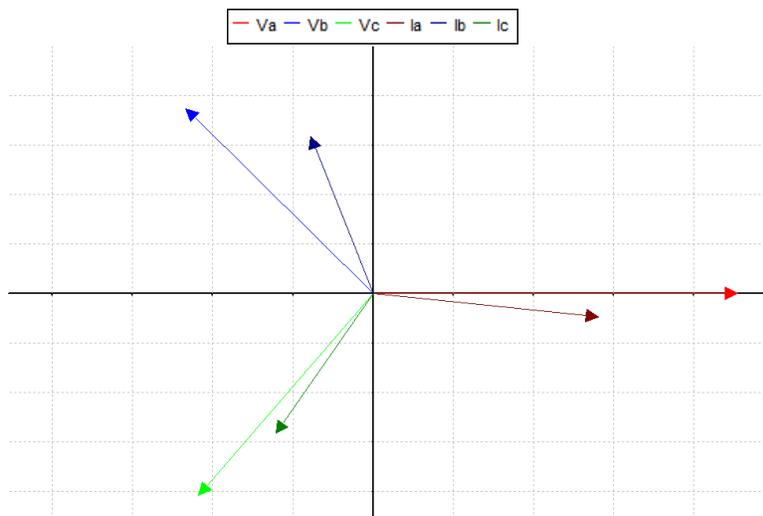


Figura 4.62: Diagrama fasorial, CAISM-DA, 01/04/2009 11:12:40.

Análise da taxa de distorção harmônica total

Freqüentemente a taxa de distorção harmônica total é utilizada para descrever a distorção harmônica da tensão, pois como a fundamental sofre pouca variação e as harmônicas são referenciadas a esta, a THD da tensão (THD_v) tende a não alterar significativamente. Não é comum analisar a THD da corrente (THD_i), visto que é relevante para esta a magnitude e não necessariamente sua distorção relativa. Como exemplo tem-se a corrente de entrada de motores com controle de velocidade (ASDs), bastante distorcida quando operando com cargas leves, mas de baixa magnitude.

Avaliar a variação da THD ao longo de um período de tempo é importante para representar a atuação de cargas não lineares no sistema, e a observação por uma semana já é suficiente para se obter resultados significativos em um ciclo [3].

No Brasil, ainda não há uma regulamentação definida no que tange a distorção harmônica da tensão no sistema de distribuição [61], entretanto a ANEEL no módulo 8 do PRODIST, de 24 de agosto de 2005 e atualizado em 27 de agosto de 2007, propõe para tensões até 1 kV uma THD máxima de 10% [62], a qual já pode causar uma distorção significativa.

Já de acordo com a norma IEC 61000-2-2 há os seguintes valores da THD_v, que serão os valores de referência utilizados, relacionados ao respectivos fenômenos associados [58]:

- Menor que 5%: situação normal, sem risco de mau funcionamento dos equipamentos;
- Entre 5 e 8%: poluição harmônica significativa, podendo ocorrer algum mau funcionamento;
- Maior que 8%: grande poluição harmônica, com possibilidade inerente de ocorrer mau funcionamento, sendo necessária a instalação de dispositivos atenuadores.

O mesmo faz-se para a THD_i [58]:

- Menor que 10%: situação normal, sem risco de mau funcionamento;
- Entre 10 e 50%: poluição harmônica significativa, com risco de aumento de temperatura e necessidade de sobredimensionamento de cabos e fontes;
- Maior que 50%: grande poluição harmônica, com possibilidade inerente de ocorrer mau funcionamento, sendo necessária a instalação de dispositivos atenuadores.

As figuras 4.63 a 4.72 mostram as THDs das tensões e correntes de uma semana para todos os medidores. Nestes casos, é interessante mostrar as distorções das correntes, pois estas têm amplitudes consideráveis.

Pelas figuras 4.63, 4.65 e 4.67 vê-se que as distorções harmônicas de tensão em todos os medidores da FEEC permanecem abaixo de 3% nas três fases, estando dentro da recomendação normal.

Avaliando a distorção da corrente, figuras 4.64, 4.66 e 4.68, percebe-se valores mais altos das 18 horas de um dia às 8 horas do seguinte, período em que há uma carga menor de aparelhos de ar condicionado, os quais possuem proporcionalmente às cargas eletrônicas menor valor de harmônicas. Na FEEC-A a THDi assume valores altos estando sempre entre 10 e 45%, sendo mais elevadas nas fases A e C, e nos medidores da FEEC-B e FEEC-EFG seus valores são menores, mantendo-se no primeiro abaixo de 20% nas três fases e no segundo abaixo de 10% nas fases A e C e inferior a 25% na fase B.

Nos medidores do CAISM a situação é mais crítica, especialmente no CAISM-CME. As THDv, figuras 4.69 e 4.71, assumem valores mais altos nos seus períodos de funcionamento, de segunda a sexta-feira entre as 8 e 18 horas, chegando a 13% no CAISM-CME e em torno de 8% no CAISM-DA, o que representa uma forte distorção, podendo causar o mau funcionamento de equipamentos. Avaliando a THDi, figuras 4.70 e 4.72, no CAISM-CME há uma poluição harmônica relevante, permanecendo entre 10 e 50%, enquanto no CAISM-DA há uma alta poluição harmônica na fase A, a qual em metade do período ultrapassa os 50%, podendo ocasionar danos em equipamentos, e também evidenciando a má distribuição das cargas nas fases.

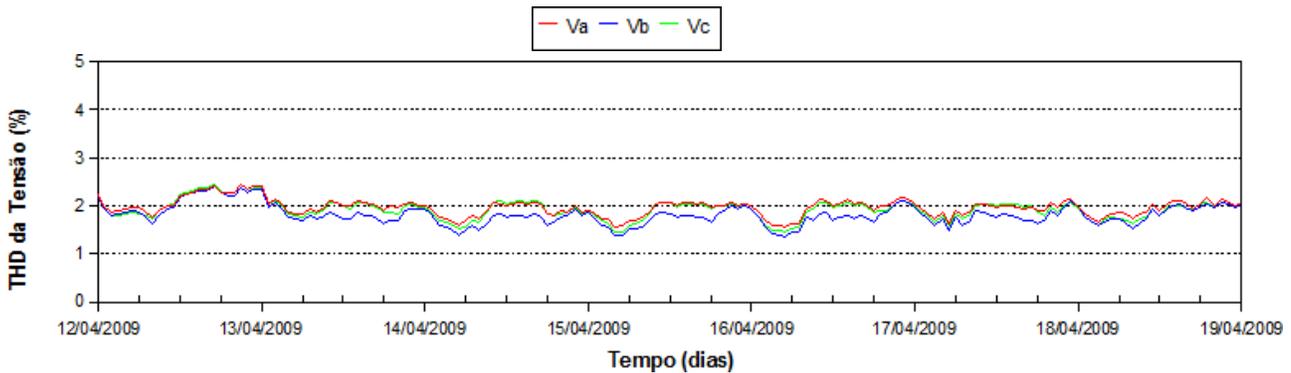


Figura 4.63: Distorção harmônica da tensão, FEEC-A, 12-18/04/2009.

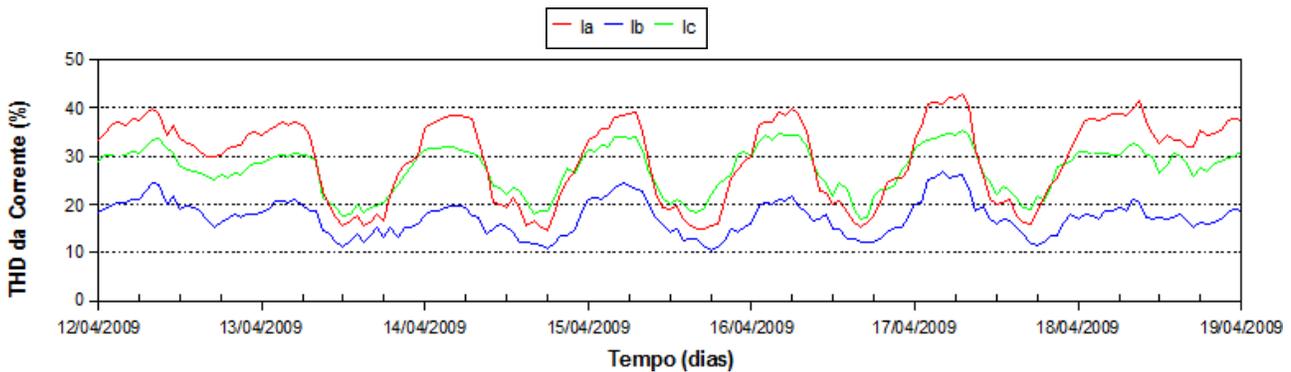


Figura 4.64: Distorção harmônica da corrente, FEEC-A, 12-18/04/2009.

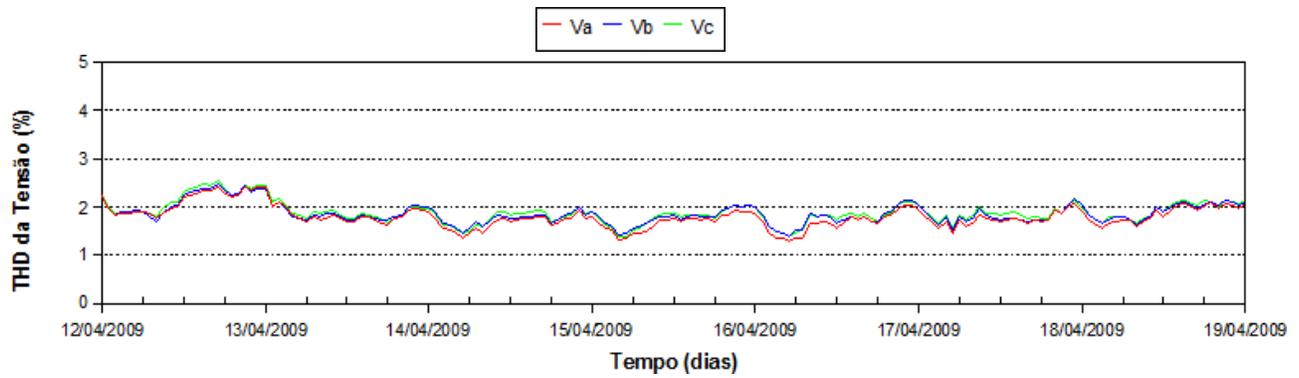


Figura 4.65: Distorção harmônica da tensão, FEEC-B, 12-18/04/2009.

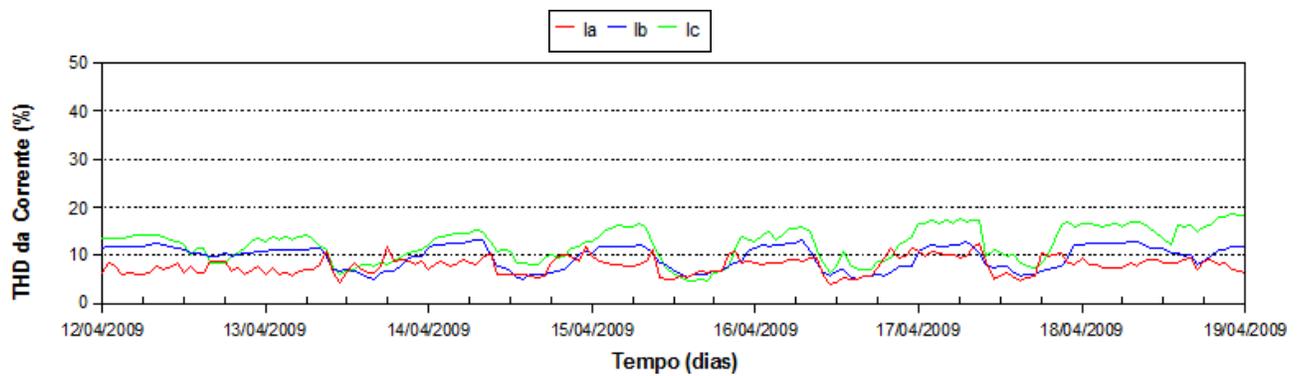


Figura 4.66: Distorção harmônica da corrente, FEEC-B, 12-18/04/2009.

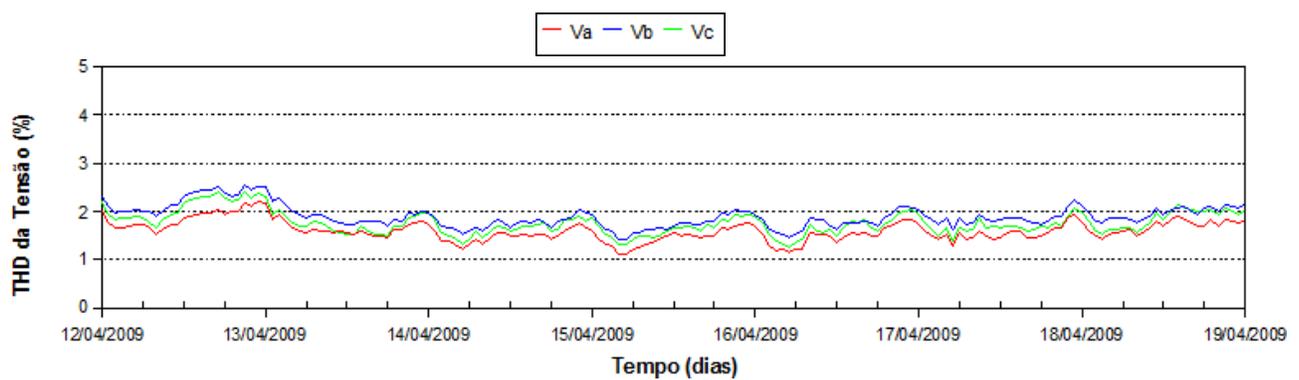


Figura 4.67: Distorção harmônica da tensão, FEEC-EFG, 12-18/04/2009.

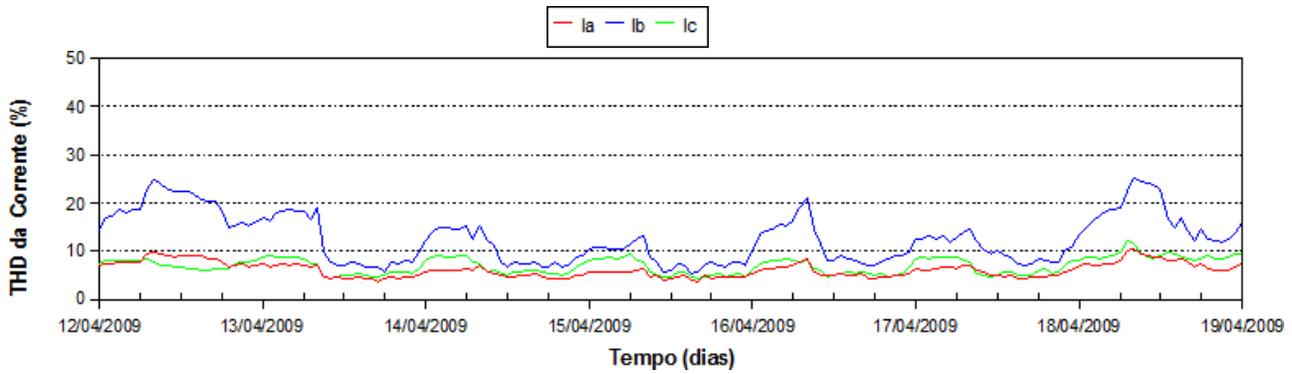


Figura 4.68: Distorção harmônica da corrente, FEEC-EFG, 12-18/04/2009.

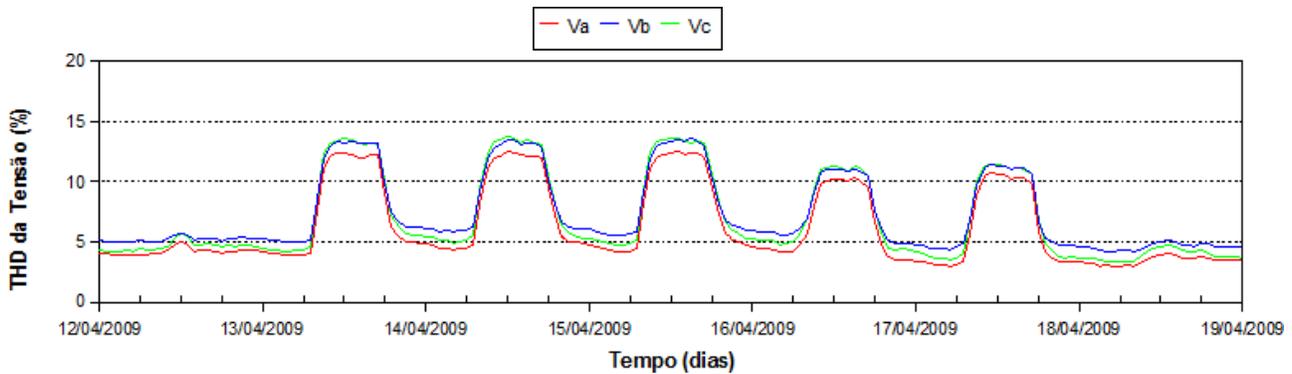


Figura 4.69: Distorção harmônica da tensão, CAISM-CME, 12-18/04/2009.

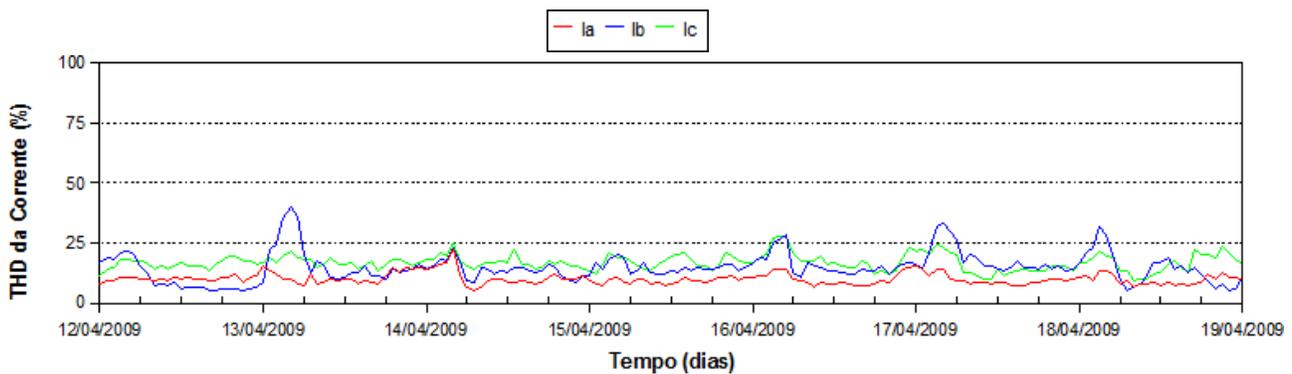


Figura 4.70: Distorção harmônica da corrente, CAISM-CME, 12-18/04/2009.

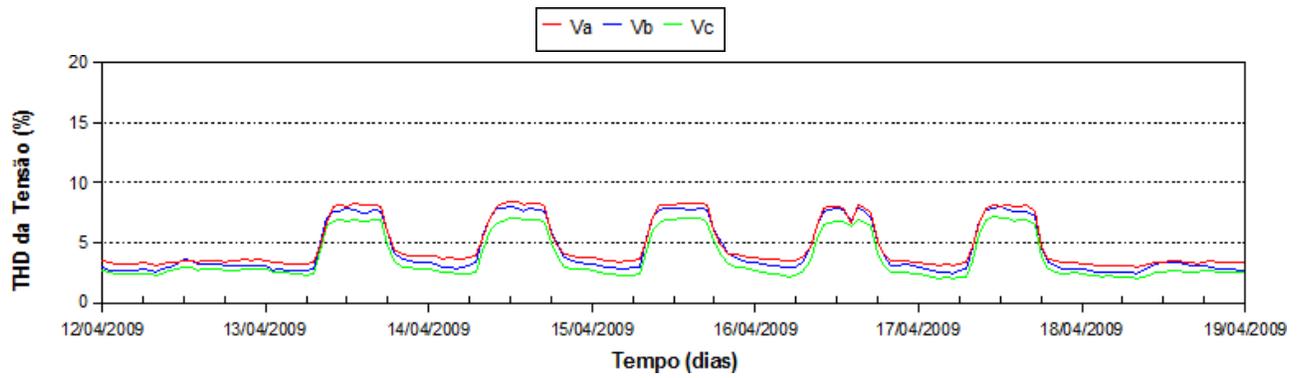


Figura 4.71: Distorção harmônica da tensão, CAISM-DA, 12-18/04/2009.

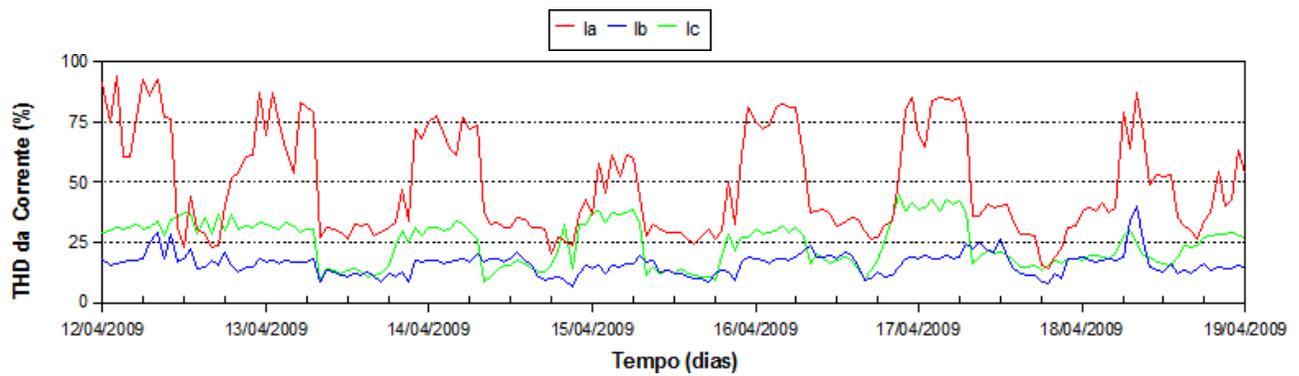


Figura 4.72: Distorção harmônica da corrente, CAISM-DA, 12-18/04/2009.

Capítulo 5

Filtros Ativos

Como mostrado nos capítulos anteriores, atualmente as harmônicas estão muito presentes no sistema elétrico, tornando seu controle cada vez mais necessário, para se garantir uma baixa distorção de tensão a níveis que assegurem uma alimentação praticamente senoidal. Para reduzir essas distorções é necessária a redução das correntes harmônicas presentes na instalação, controladas por meio de filtros tanto passivos como ativos [24].

O filtro passivo paralelo consiste num arranjo LC utilizado para, além de causar a supressão de harmônicas, também para melhorar o fator de potência. Ele provê um caminho de baixa impedância para as frequências harmônicas selecionadas em relação à impedância da fonte, assim, as correntes harmônicas passam por ele e não fluem para a fonte, e conseqüentemente para as outras cargas do sistema. Portanto, as características do filtro dependem da razão da sua impedância em relação à da fonte. Daí surgem alguns problemas [63]:

- Como a impedância da fonte não é conhecida com precisão e pode variar com a configuração da rede, a precisão do filtro é afetada;
- O filtro também proporciona um caminho para as correntes harmônicas da fonte, e em casos piores pode entrar em ressonância série com a mesma;
- Em uma frequência específica há uma ressonância paralela entre a impedância da fonte e do filtro, ocorrendo a amplificação harmônica.

Uma possível solução destes problemas é a aplicação de um filtro ativo, o qual pode ser instalado em paralelo ou em série com a carga. A idéia deste filtro é relativamente antiga, já proposta na década de 1970, porém não havia tecnologia de eletrônica de potência suficiente para sua implantação, mas tornou-se viável nos últimos anos, com o desenvolvimento de dispositivos eletrônicos de chaveamento rápido, como o IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), e de processadores digitais de sinais. Seu

estudo teve origem na necessidade de se compensar potência reativa, sequência negativa, harmônicas e *flicker* presentes na rede. Baseia-se num conceito simples, em que as correntes harmônicas na fonte, geradas pelas cargas não lineares, são compensadas, mantendo na alimentação somente sua componente fundamental. O filtro amostra a corrente distorcida e por meio de dispositivos de eletrônica de potência envia à fonte uma corrente com magnitude, componentes de frequência e deslocamento de fase necessários para cancelar as harmônicas presentes na carga. Têm como vantagem a maleabilidade quanto a variações na carga e níveis de harmônicas, entretanto ainda têm custo elevado e não são praticáveis para pequenas instalações [44, 63, 64].

5.1 Potências elétricas trifásicas

Por um longo tempo, a principal preocupação em relação a equipamentos elétricos devia-se à correção do fator de potência, e havendo somente cargas lineares, fluíam da fonte de tensão senoidal para a carga correntes senoidais, e, portanto, a teoria convencional de potências ativa, reativa e aparente era suficiente para as análises do sistema. Com os problemas originados pelas cargas não lineares, passou a ser importante o desenvolvimento de novas teorias sobre potência elétrica, as quais permitissem a análise do sistema sob condições não senoidais e também durante transitórios. Nesta seção serão apresentados alguns conceitos de potências elétricas trifásicas válidas para as diversas condições de um sistema de energia elétrica [65, 66, 67].

5.1.1 Sistema sob tensões senoidais e cargas lineares

As definições de potências para sistemas sob estas condições já estão bem estabelecidas e aceitas, tanto no domínio do tempo como no da frequência. Em um sistema trifásico balanceado com fontes de tensões senoidais e cargas lineares, como consequência correntes senoidais, tem-se as tensões entre fase e neutro dadas pelas equações (5.1) e as correntes de fase dadas por (5.2).

$$\begin{aligned}v_a(t) &= \sqrt{2}V \text{sen}(\omega t) \\v_b(t) &= \sqrt{2}V \text{sen}(\omega t - 2\pi/3) \\v_c(t) &= \sqrt{2}V \text{sen}(\omega t + 2\pi/3)\end{aligned}\tag{5.1}$$

$$\begin{aligned}i_a(t) &= \sqrt{2}I \text{sen}(\omega t - \phi) \\i_b(t) &= \sqrt{2}I \text{sen}(\omega t - 2\pi/3 - \phi) \\i_c(t) &= \sqrt{2}I \text{sen}(\omega t + 2\pi/3 - \phi)\end{aligned}\tag{5.2}$$

Com:

V : tensão eficaz [V]

I : corrente eficaz [A]

ω : frequência angular [rad/s]

ϕ : ângulo de fase [rad]

A potência instantânea de cada fase é dada pelo produto da tensão instantânea pela corrente instantânea correspondente, que rearranjadas resultam nas equações (5.3).

$$\begin{aligned} p_a(t) = v_a(t)i_a(t) &= VI\cos\phi[1 - \cos(2(\omega t))] - VI\sin\phi[\sin(2(\omega t))] \\ p_b(t) = v_b(t)i_b(t) &= VI\cos\phi[1 - \cos(2(\omega t - 2\pi/3))] - VI\sin\phi[\sin(2(\omega t - 2\pi/3))] \\ p_c(t) = v_c(t)i_c(t) &= VI\cos\phi[1 - \cos(2(\omega t + 2\pi/3))] - VI\sin\phi[\sin(2(\omega t + 2\pi/3))] \end{aligned} \quad (5.3)$$

Convencionalmente, a potência instantânea é representada como na equação (5.4), podendo ser dividida em duas partes distintas, as quais originam os conceitos tradicionais de potência ativa e reativa.

$$\begin{aligned} p_a(t) &= \underbrace{P[1 - \cos(2(\omega t))]}_I - \underbrace{Q[\sin(2(\omega t))]}_{II} \\ p_b(t) &= \underbrace{P[1 - \cos(2(\omega t - 2\pi/3))]}_I - \underbrace{Q[\sin(2(\omega t - 2\pi/3))]}_{II} \\ p_c(t) &= \underbrace{P[1 - \cos(2(\omega t + 2\pi/3))]}_I - \underbrace{Q[\sin(2(\omega t + 2\pi/3))]}_{II} \end{aligned} \quad (5.4)$$

Na parte I há um valor médio e um componente oscilatório com o dobro da frequência da linha. Essa nunca tem valor negativo, representando, assim, um fluxo de potência unidirecional, que efetivamente é transmitido da fonte à carga. O seu valor médio é definido como a potência ativa, P , equação (5.5), e tem como unidade o *Watt*, W .

$$P = VI\cos\phi \quad (5.5)$$

A parte II é uma potência oscilatória com o dobro da frequência, resultando em um valor médio igual a zero. O valor máximo é definido como a potência reativa, Q , equação (5.6), e tem como unidade o *Volt-Ampère Reativo*, VAr . Essa parte existe quando a corrente de fase está deslocada no tempo em relação à respectiva tensão, sendo assim, ϕ não é nulo. O sinal do ângulo de fase caracteriza o tipo de carga, o qual é adotado como positivo para potência reativa indutiva e negativo para potência reativa capacitiva. Em um sistema somente com esses tipos de cargas, pode-se dizer que a potência

reativa oscila entre a fonte e a carga, porém não realiza trabalho, pois seu valor médio é nulo.

$$Q = VI \sin \phi \quad (5.6)$$

Também é usual a definição de potência aparente, $|S|$, equação (5.7), cuja unidade é o *Volt-Ampère*, VA , e representa a máxima potência ativa que realmente pode ser transmitida da fonte à carga ou vice-versa.

$$|S| = VI = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (5.7)$$

Derivado da definição de fator de potência, o termo $\cos \phi$ é igual a razão entre P e $|S|$, equação (5.8). Sob condições senoidais, um fator de potência unitário representa potência ativa igual à aparente, e, conseqüentemente, potência reativa nula, ou seja, carga puramente resistiva.

$$fp = \frac{P}{|S|} = \frac{VI \cos \phi}{VI} = \cos \phi \quad (5.8)$$

Essas potências podem ser representados no triângulo de potências, como na figura 5.1.

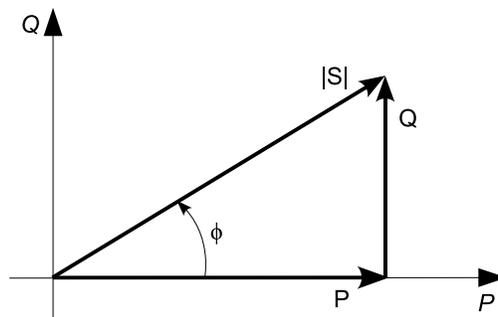


Figura 5.1: Triângulo de potências.

Da equação (5.4), a potência ativa trifásica instantânea total pode ser escrita como em (5.9).

$$p_{3\phi}(t) = p_a(t) + p_b(t) + p_c(t) = 3P \triangleq P_{3\phi} \quad (5.9)$$

As somas das partes I é um valor constante, e corresponde ao triplo da potência ativa de cada fase. Já a soma das partes II se anulam, entretanto, por meio dos conceitos convencionais, define-se a potência reativa trifásica em (5.10), a qual é independente em cada fase.

$$Q_{3\phi} \triangleq 3Q \quad (5.10)$$

A potência aparente trifásica é definida em (5.11).

$$|S|_{3\phi} = \sqrt{P_{3\phi}^2 + Q_{3\phi}^2} = 3|S| \quad (5.11)$$

Atualmente, sistemas com estas características são praticamente inexistentes, portanto, faz-se necessária a adoção de teorias que abordem as distorções presentes nas formas de onda de tensões e correntes.

5.1.2 Sistema sob tensões senoidais e cargas não lineares

Neste caso, as tensões permanecem senoidais, entretanto as correntes possuem harmônicas advindas das cargas não lineares. Por simplicidade, aqui são explicitadas somente as equações referentes à fase A. A tensão entre fase e neutro é dada pela mesma equação de (5.1), e é reescrita em (5.12) destacando a presença somente da componente fundamental. Já a corrente de fase leva em consideração as harmônicas de frequências múltiplas de ω , como em (5.13).

$$v_a(t) = \sqrt{2}V_1 \text{sen}(\omega t) \quad (5.12)$$

$$i_a(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2}I_n \text{sen}(n\omega t - \phi_n) \quad (5.13)$$

Com:

V_1 : tensão eficaz da componente fundamental [V]

I_n : corrente eficaz da harmônica de ordem n [A]

ϕ_n : ângulo de fase da harmônica de ordem n [rad]

n : ordem da harmônica

Consequentemente a potência instantânea da fase A fica como em (5.14), e de forma análoga obtém-se as potências instantâneas das fases B e C.

$$p_a(t) = V_1 I_1 \cos \phi_1 [1 - \cos(2(\omega t))] - V_1 I_1 \text{sen} \phi_1 [\text{sen}(2(\omega t))] + \sum_{n=2}^{\infty} 2V_1 I_n \text{sen}(\omega t) \text{sen}(n\omega t - \phi_n) \quad (5.14)$$

O valor eficaz da corrente é mostrado em (5.15), e em (5.16) é definido o termo composto pela somatória das correntes eficazes das harmônicas.

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_a(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} = \sqrt{I_1^2 + I_H^2} \quad (5.15)$$

$$I_H^2 = \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 \quad (5.16)$$

A potência aparente pode ser calculada como na equação (5.17).

$$|S| = VI = V_1 \sqrt{I_1^2 + I_H^2} = \sqrt{V_1^2 I_1^2 + V_1^2 I_H^2} \quad (5.17)$$

Na definição convencional da seção anterior a tensão e a corrente só possuem componente fundamental, portanto a potência aparente pode assumir a forma da equação (5.18).

$$|S| = \sqrt{P^2 + Q^2 + H^2} \quad (5.18)$$

A potência aparente passa, então, a possuir um componente ativo, (5.19), e um componente reativo fundamentais, (5.20), e um componente harmônico, (5.21), o qual corresponde à potência devido às correntes harmônicas.

$$P = V_1 I_1 \cos \phi_1 \quad (5.19)$$

$$Q \triangleq V_1 I_1 \sin \phi_1 \quad (5.20)$$

$$H \triangleq V_1 I_H = V_1 \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} \quad (5.21)$$

Assim como no caso anterior, num sistema trifásico balanceado, as potências têm seus valores multiplicados por três. P e Q dependem somente da componente de corrente de frequência ω (fundamental), enquanto H depende das componentes de corrente de frequências diferentes de ω (harmônicas). Enquanto Q pode ser eliminada pelo uso de capacitores e indutores, num arranjo que proporcione uma corrente na frequência ω , atuante nos componentes reativos requeridos pela carga, o mesmo não ocorre com H , o qual depende de diversas frequências, somente podendo ser atenuado pelo uso de filtros, os quais atuam como curto-circuitos para as correntes harmônicas geradas pelas cargas.

As relações acima podem ser representadas num tetraedro de potências, como na figura 5.2. Neste são definidos o fator de potência da componente fundamental, equação (5.22), o qual corresponde ao fator de potência num sistema sem harmônicas; o fator de potência total, (5.23), dependente da componente fundamental e de todas as componentes harmônicas; e o fator de distorção, (5.24), relacionado às componentes harmônicas.

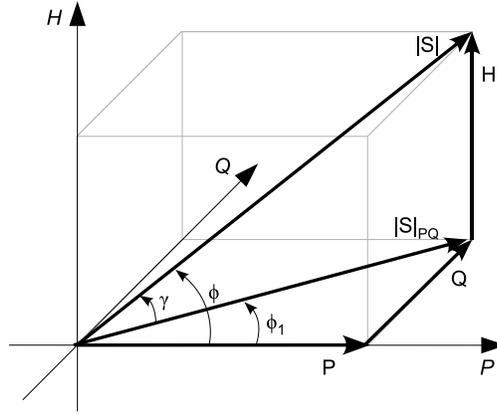


Figura 5.2: Tetraedro de potências.
Fonte: Akagi, Watanabe e Aredes [65].

$$f_{p1} = \frac{P}{|S|_{PQ}} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \cos\phi_1 \quad (5.22)$$

$$f_p = \frac{P}{|S|} = \cos\phi \quad (5.23)$$

$$f_d = \frac{|S|_{PQ}}{|S|} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{|S|} = \frac{I_1}{I} = \cos\gamma \quad (5.24)$$

A THD foi definida na equação (4.5). Para a corrente, a THDi é dada por (5.25).

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (5.25)$$

A partir daí, pode-se relacionar o fator de potência com a THDi como em (5.26).

$$f_p = \frac{P}{|S|} = \frac{V_1 I_1 \cos\phi_1}{V I} = \frac{V_1 I_1 \cos\phi_1}{V_1 \sqrt{I_1^2 + I_H^2}} = \frac{\cos\phi_1}{\sqrt{1 + THDi^2}} \quad (5.26)$$

A análise realizada nesta seção pode ser estendida a sistemas cujas tensões possuam distorções que possam ser desprezadas, entretanto em casos nos quais as tensões e as correntes apresentam componentes harmônicos é necessária uma abordagem diferenciada, como a teoria de potências instantâneas apresentada na seção seguinte.

5.1.3 Sistema com tensões e correntes distorcidas

Na avaliação de um sistema com harmônicas é importante o uso de uma teoria que não imponha restrições às formas de onda da tensão ou da corrente. Para tanto pode-se usar a Teoria de Potências Instantâneas pq (Teoria pq), a qual é baseada em potências instantâneas definidas no domínio do tempo, podendo ser aplicada em sistemas trifásicos com ou sem neutro, e válida tanto em regime permanente como transitório.

Esta teoria utiliza a transformação $\alpha\beta 0$, ou Transformada de Clarke, figura 5.3, a qual consiste em uma matriz real, que transforma as tensões e correntes trifásicas instantâneas em outras tensões e correntes relacionadas a um sistema de referência estacionário de dois eixos ortogonais α e β e uma componente de sequência zero que existirá caso as tensões ou correntes trifásicas sejam desbalanceadas, e define, posteriormente, as potências instantâneas nesta.

A Transformada de Clarke mapeia as tensões das coordenadas abc nos eixos $\alpha\beta 0$, como em (5.27), cuja transformada inversa é dada em (5.28), o mesmo valendo para as correntes em (5.29) e (5.30).

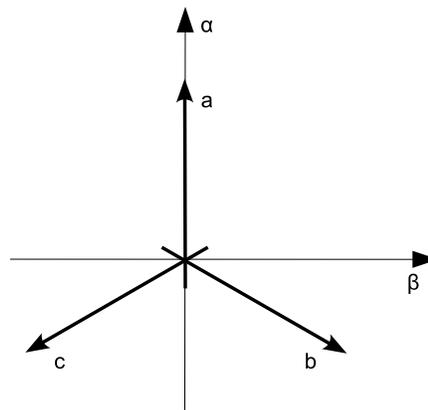


Figura 5.3: Representação gráfica da Transformada de Clarke.

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (5.27)$$

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (5.28)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (5.29)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (5.30)$$

Esta transformação tem a vantagem de separar as componentes de sequência zero dos componentes de fase abc , sendo que as componentes α e β não contribuem com a esta sequência. No caso de sistemas trifásicos a três fios i_0 é eliminada das equações, o mesmo ocorrendo para v_0 quando as tensões das fases são balanceadas. Outra característica desta transformada é ser invariante em potência, importante quando se pretende fazer uma análise baseada em potências instantâneas em sistemas trifásicos.

Em sistemas trifásicos a quatro fios, ou seja, com a presença de condutor de neutro, as componentes de sequência zero permanecem nas equações, e as potências instantâneas são definidas como na equação (5.31).

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ p_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta & 0 \\ -v_\beta & v_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & v_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (5.31)$$

A potência real p é composta de termos que dependem tanto de p como de q . Em qualquer instante de tempo, as parcelas ligadas a q se anulam, sendo consideradas por analogia à teoria convencional como reativas. Já as componentes em função de p , as quais fluem entre a fonte e a carga, são ditas ativas. A unidade utilizada é o *Watt*, W .

A potência q , denominada potência imaginária em Akagi, Watanabe e Aredes [65], é proporcional à quantidade de energia trocada entre as fases do sistema e não contribui para o fluxo de energia entre a fonte e a carga, entretanto como aqui não são usados os fasores das correntes e tensões, mas sim seus valores instantâneos, trata-se de uma nova grandeza, cuja unidade sugerida é o *Volt-Ampère Imaginário*, $V Ai$.

A potência de sequência zero p_0 não possui parcela reativa, é uma componente ativa, não contribui para as potências real e imaginária, e compõe o fluxo total de energia entre a fonte e a carga juntamente com p .

A potência ativa trifásica pode ser escrita em termos dos componentes $\alpha\beta 0$ como em (5.32).

$$p_{3\phi} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta + v_0 i_0 = p + p_0 \quad (5.32)$$

A figura 5.4 demonstra os conceitos acima mencionados.

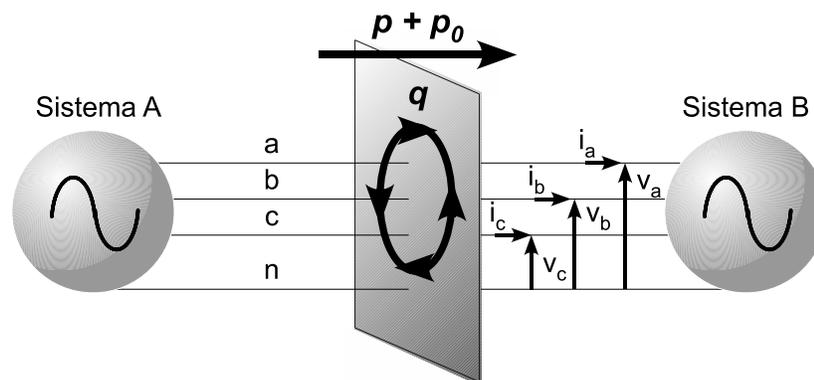


Figura 5.4: Significado físico das potências instantâneas.

Fonte: Akagi, Watanabe e Aredes [65].

Como meio de expandir o conceito de potência imaginária foi desenvolvida a Teoria pq Modificada. Vetores de tensão e corrente podem ser definidos a partir das tensões e correntes instantâneas transformadas em $\alpha\beta 0$, como em (5.33) e (5.34).

$$\mathbf{v}_{\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (5.33)$$

$$\mathbf{i}_{\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (5.34)$$

A potência instantânea ativa trifásica $p_{3\phi}$, representa o produto escalar entre (5.33) e (5.34), como mostrado em (5.32), enquanto a potência imaginária deriva do produto vetorial dos mesmos. Nesta teoria há apenas uma potência ativa instantânea, $p_{\alpha\beta 0}$, (5.35), composta da soma das potências real e de sequência zero da teoria pq original. Por outro lado, é definido um vetor de potência imaginária, $\mathbf{q}_{\alpha\beta 0}$, como em (5.36), contendo três elementos.

$$p_{\alpha\beta 0} = \mathbf{v}_{\alpha\beta 0} \cdot \mathbf{i}_{\alpha\beta 0} = v_{\alpha}i_{\alpha} + v_{\beta}i_{\beta} + v_0i_0 \quad (5.35)$$

$$\mathbf{q}_{\alpha\beta 0} = \mathbf{v}_{\alpha\beta 0} \times \mathbf{i}_{\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} \begin{vmatrix} v_{\beta} & v_0 \\ i_{\beta} & i_0 \end{vmatrix} \\ \begin{vmatrix} v_0 & v_{\alpha} \\ i_0 & i_{\alpha} \end{vmatrix} \\ \begin{vmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ i_{\alpha} & i_{\beta} \end{vmatrix} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{\alpha} \\ q_{\beta} \\ q_0 \end{bmatrix} \quad (5.36)$$

As potências instantâneas podem ser combinadas em uma matriz, como em (5.37).

$$\begin{bmatrix} p_{\alpha\beta 0} \\ q_{\alpha} \\ q_{\beta} \\ q_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} & 0 \\ 0 & -v_0 & -v_{\beta} \\ v_0 & 0 & -v_{\alpha} \\ -v_{\beta} & v_{\alpha} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (5.37)$$

A potência imaginária q_0 tem a mesma definição da original q , entretanto há o acréscimo de duas outras potências imaginárias, relacionados aos componentes α e β , dependentes da sequência zero. A norma das potências instantâneas imaginárias representa a potência instantânea imaginária “total”, como em (5.38).

$$q_{\alpha\beta 0} = |\mathbf{q}_{\alpha\beta 0}| = \sqrt{q_{\alpha}^2 + q_{\beta}^2 + q_0^2} \quad (5.38)$$

A transformação inversa de (5.37) é dada por (5.39).

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2 + v_0^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & 0 & v_0 & -v_{\beta} \\ v_{\beta} & -v_0 & 0 & v_{\alpha} \\ v_0 & v_{\beta} & -v_{\alpha} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{\alpha\beta 0} \\ q_{\alpha} \\ q_{\beta} \\ q_0 \end{bmatrix} \quad (5.39)$$

Estas definições são utilizadas na compensação de correntes paralela, e aplicadas em filtros ativos, como mostrado na seção seguinte.

5.2 Características do filtro ativo

Neste trabalho optou-se pela abordagem do filtro ativo paralelo, o qual atua nas correntes elétricas da carga, eliminando ou minimizando seus componentes harmônicos e impedindo sua circulação pelo sistema. Um esquema simplificado deste filtro é mostrado na figura 5.5. Uma carga não linear requer uma corrente i_L composta das componentes fundamental e harmônicas, o filtro adquire os sinais das tensões e correntes da carga, determina as correntes a serem compensadas i_C^* e produz as correntes de compensação i_C , confinando as correntes harmônicas da carga entre seus terminais, evitando a poluição do sistema. O filtro ativo é composto principalmente por duas partes: compensador de correntes e controle de correntes [65, 66].

O compensador de correntes é responsável por processar os sinais recebidos das tensões e correntes e determinar em tempo real as correntes instantâneas a serem compensadas. A escolha destas é baseada no tipo de compensação desejada, a qual pode visar além da eliminação das correntes harmônicas, o balanceamento das fases e a eliminação das potências reativas.

O controle de correntes adquire os valores das correntes de referência e sintetiza as mesmas que devem ser injetadas na rede nos pontos de acoplamento, fazendo a fonte receber correntes senoidais ou fluxo de potência contante. O filtro ativo funciona como uma fonte controlada de corrente, composta por um inversor trifásico tipo fonte de tensão, indutores de acoplamento e um controlador de correntes.

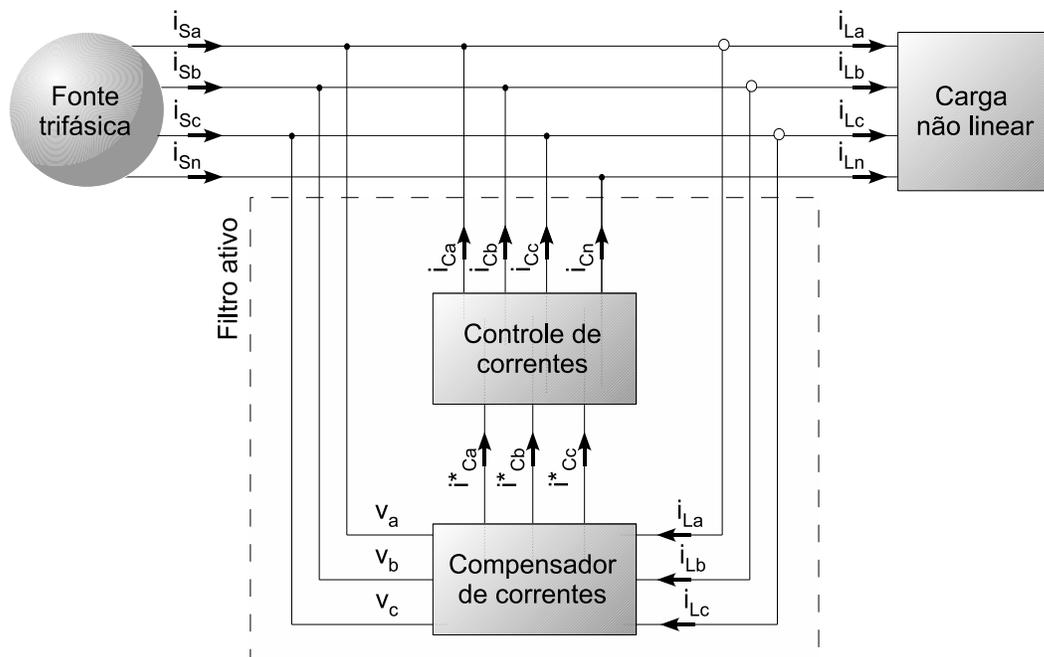


Figura 5.5: Esquema simplificado de um filtro ativo paralelo trifásico a quatro fios.

Como este trabalho não visa um estudo detalhado de filtros ativos, mas tem o objetivo de demonstrar a sua capacidade quanto a atenuação das correntes harmônicas geradas pelas cargas não lineares, não são mostrados seus diversos tipos de compensação ou sistemas de controles, e o meio físico pelo qual são implantados. A partir dos dados reais obtidos das tensões e correntes instantâneas nos medidores, foi desenvolvido um programa usando o aplicativo MatLab (Apêndice B), simulando a operação de um filtro ativo paralelo instalado de modo a abranger as cargas ligadas aos equipamentos de medição, com método de compensação baseado na teoria pq modificada, compensando a potência real harmônica e as potências imaginárias, ou seja, anulando as componentes harmônicas das correntes e proporcionando a compensação das potências reativas. O método utilizado é mostrado no algoritmo da figura 5.6.

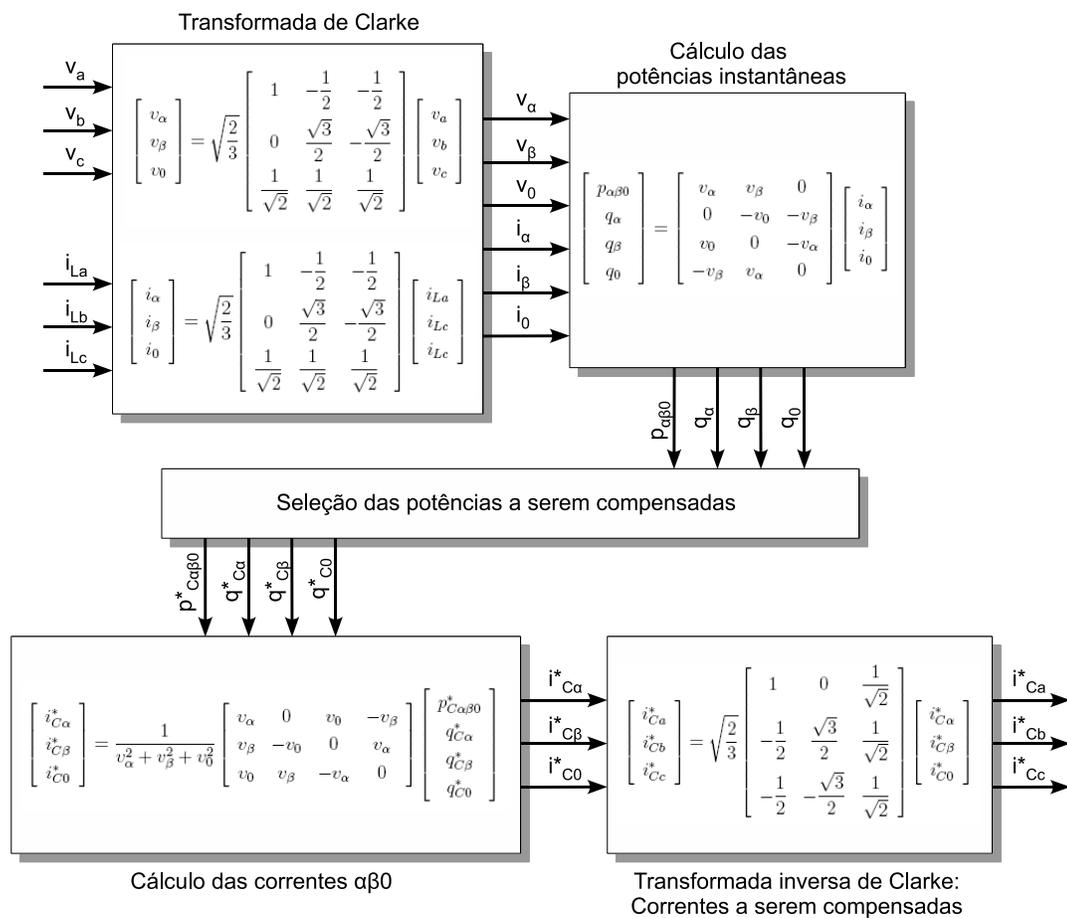


Figura 5.6: Compensação de corrente paralela baseado na teoria pq modificada.
Fonte: Akagi, Watanabe e Aredes [65].

5.3 Resultados das simulações

Para os dados de tensões e correntes dos medidores FEEC-A e CAISM-CME, cujas formas de onda são mostradas nas figuras 4.40, 4.38, 4.55 e 4.53, respectivamente, aplicou-se o programa desenvolvido, resultando nos gráficos a seguir. Foram escolhidos estes medidores, visto que as medidas apresentam maiores distorções entre os da FEEC e do CAISM, respectivamente.

- *Compensação das correntes de carga medidas na FEEC-A*

A partir dos dados das tensões e correntes e da aplicação da transformada de Clarke, obteve-se as potências instantâneas real, $p_{\alpha\beta 0}$, e imaginárias, q_{α} , q_{β} e q_0 , da carga, figura 5.7. Nesta figura, vê-se que a potência ativa é composta de uma parcela constante e outra oscilatória. Optou-se pela compensação de todas potências imaginárias e da parte harmônica da potência real, como mostrado na figura 5.8. Com isso, a potência ativa vista pela fonte passou a ser constante e as imaginárias nulas, como em 5.9. Do mesmo modo são mostradas as correntes das fases e do neutro da carga, 5.10, as de compensação, 5.11, obtidas a partir da seleção da potências, e as vistas pela fonte, 5.12, as quais correspondem à aplicação do filtro ativo e consequente atenuação das harmônicas. A figura 5.13 apresenta as tensões e as correntes da fase A da carga e da fonte. Nota-se, como esperado, a atenuação da distorção da corrente, e o fim de sua defasagem em relação à tensão. Nas figuras 5.14 e 5.15 estão as formas de onda da corrente da fase A na carga e na fonte, e seus espectros harmônicos, em que se percebe uma diminuição quase total da magnitude das harmônicas.

- *Compensação das correntes de carga medidas no CAISM-CME*

Para este medidor foi realizado o mesmo procedimento. As potências instantâneas da carga, compensadas e da fonte são mostradas nas figuras 5.16 a 5.18. Como anteriormente, obteve-se um fluxo de potência ativa constante na fonte, e extinção das demais. Na figuras 5.19 a 5.21 são apresentadas as correntes. Nota-se que na fonte ainda há distorção, isto acontece pois seu cálculo é baseado nas tensões medidas, as quais possuem componentes harmônicas. Entretanto, em um sistema real a interação das correntes com as tensões provavelmente levariam a menores distorções nestas com consequente maior atenuação das variações naquelas, fato não ocorrido aqui por se tratar de uma simulação matemática que não modela o sistema. Pela figura 5.22 percebe-se, novamente, que a corrente resultante na rede está em fase com a tensão. As figuras 5.23 e 5.24 apresentam as formas de onda da corrente da fase A na carga e na fonte, e suas análises espectrais, nas quais vê-se a diminuição das harmônicas, com excessão da terceira harmônica, devido ao fato acima comentado.

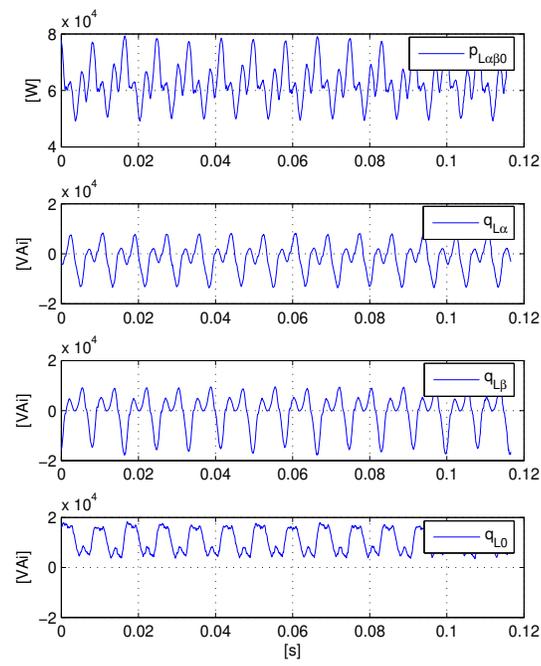


Figura 5.7: Potências na carga, FECC-A.

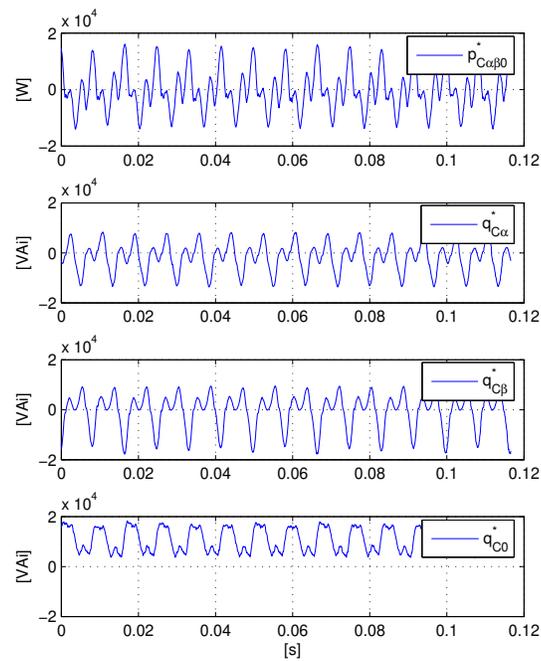


Figura 5.8: Potências a serem compensadas, FECC-A.

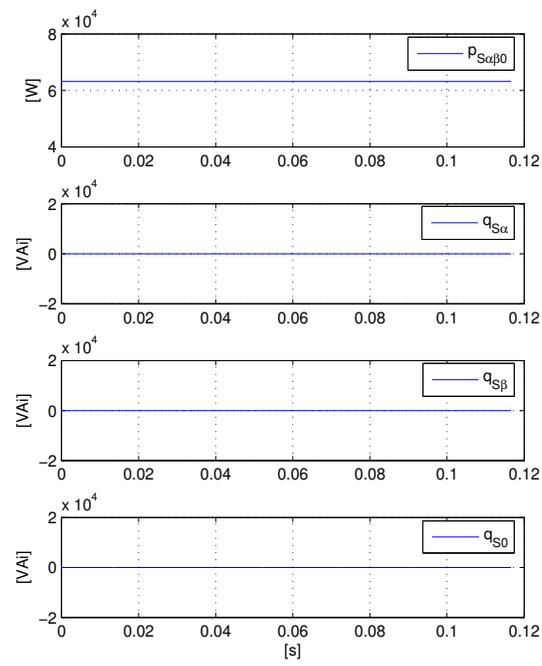


Figura 5.9: Potências na fonte, FEEC-A.

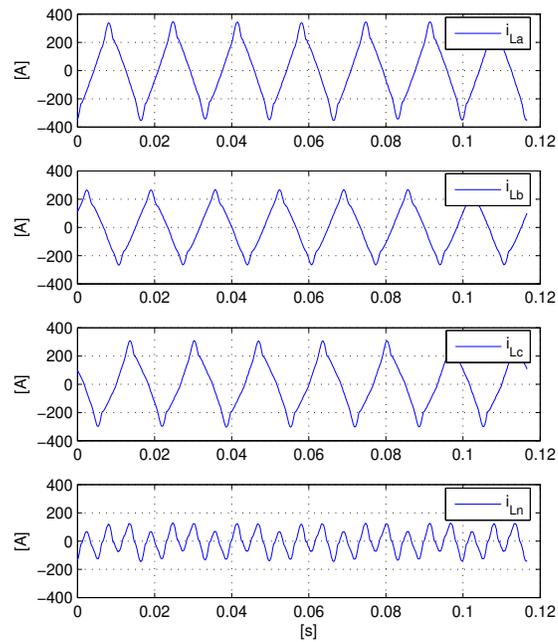


Figura 5.10: Correntes na carga, FEEC-A.

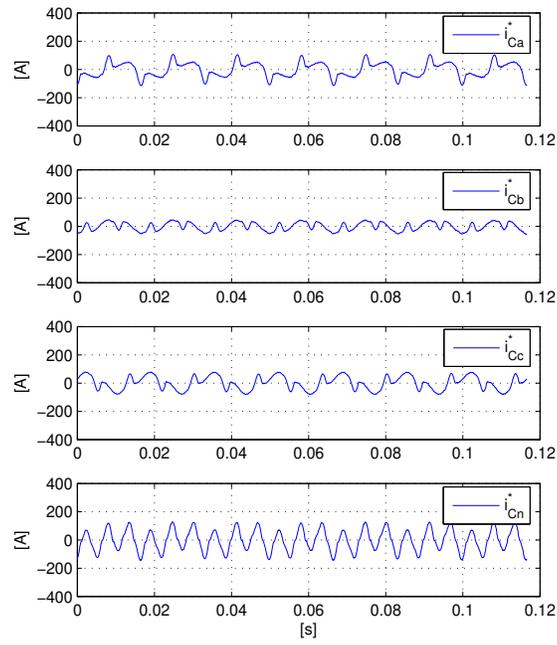


Figura 5.11: Correntes de compensação, FEEC-A.

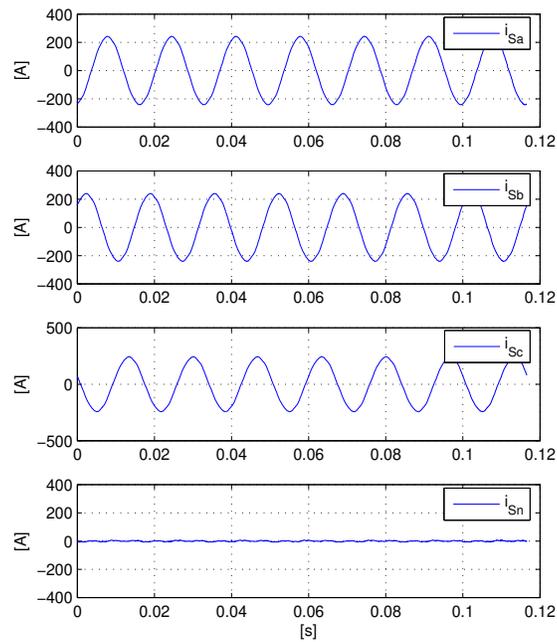


Figura 5.12: Correntes na fonte, FEEC-A.

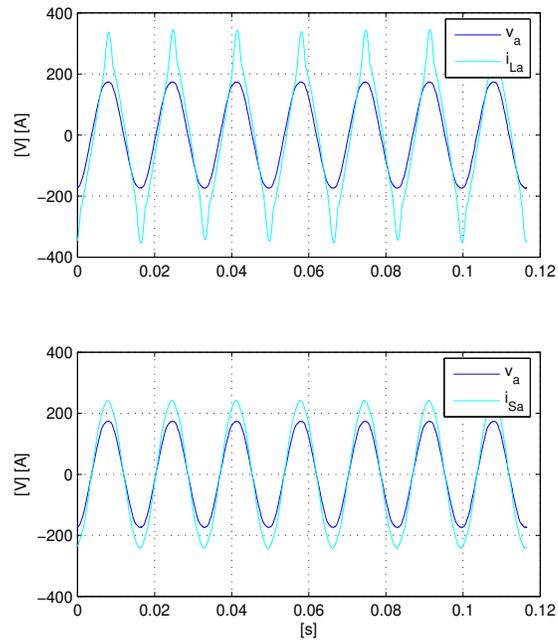


Figura 5.13: Tensões e correntes da fase A na carga e na fonte, FEEC-A.

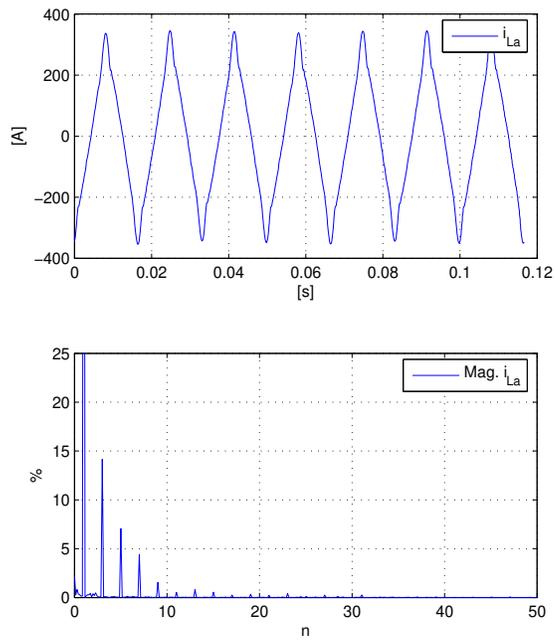


Figura 5.14: Corrente da fase A na carga e seu espectro harmônico, FEEC-A.

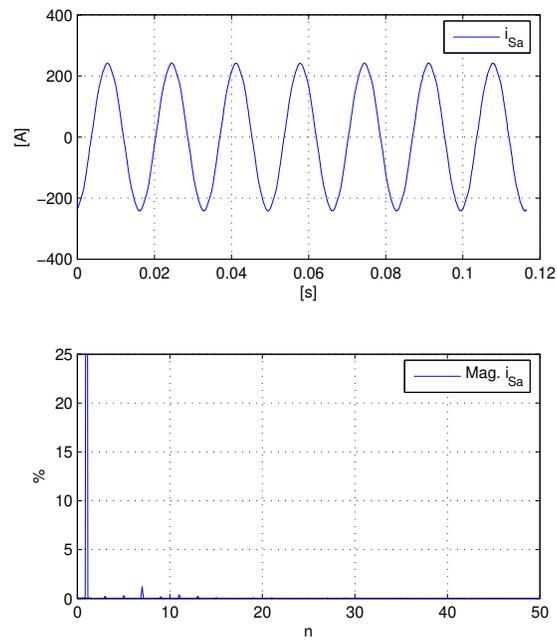


Figura 5.15: Corrente da fase A na fonte e seu espectro harmônico, FEEC-A.

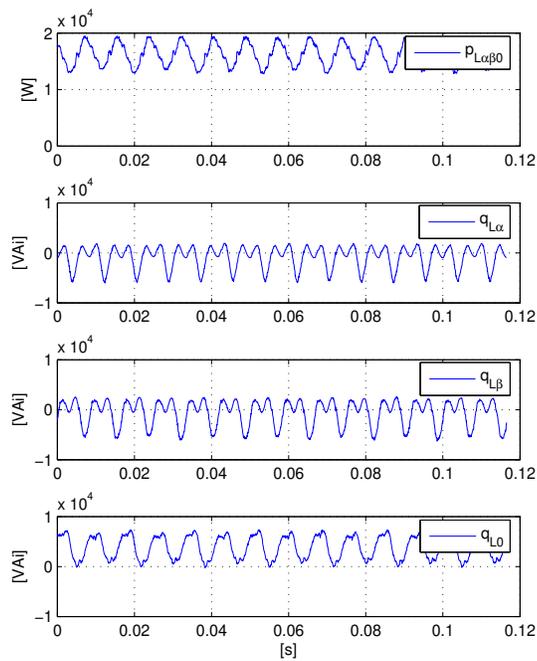


Figura 5.16: Potências na carga, CAISM-CME.

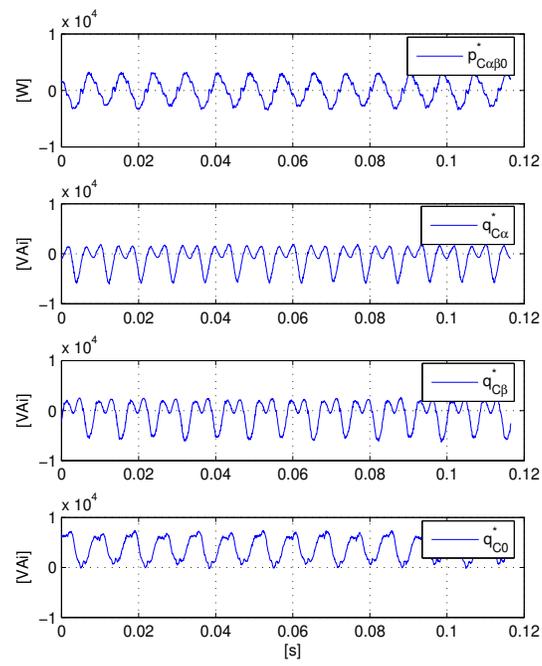


Figura 5.17: Potências a serem compensadas, CAISM-CME.

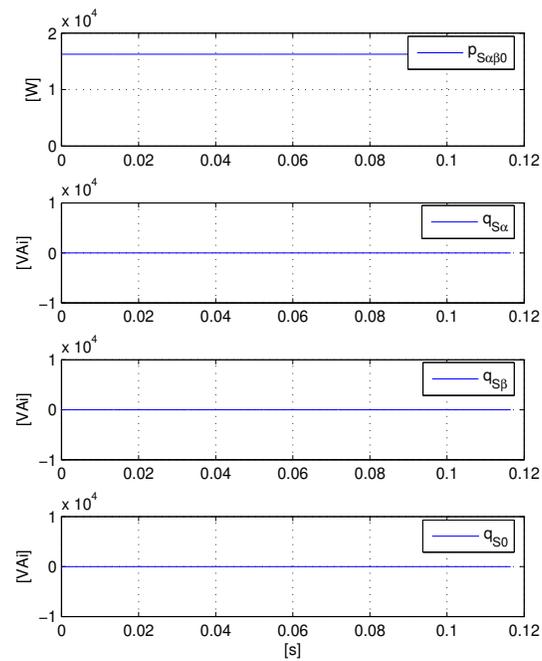


Figura 5.18: Potências na fonte, CAISM-CME.

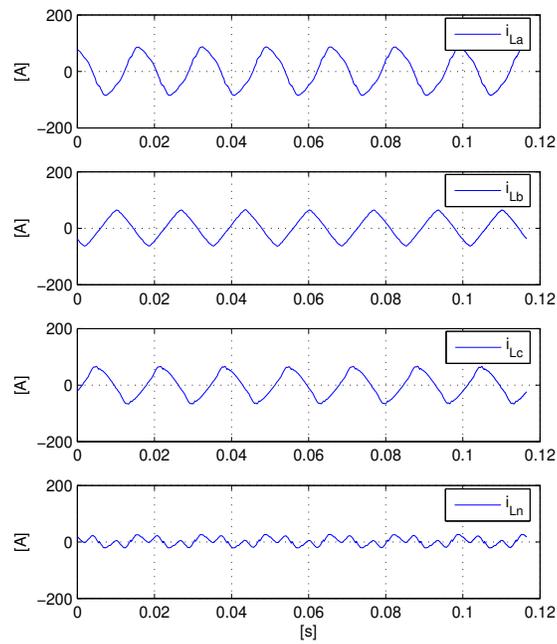


Figura 5.19: Correntes na carga, CAISM-CME.

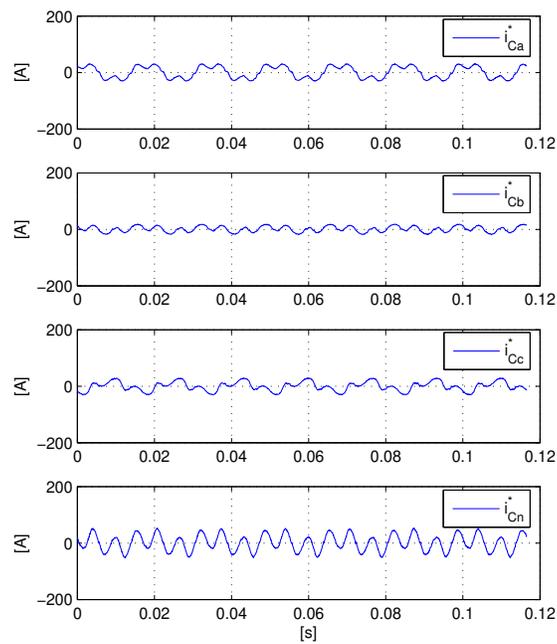


Figura 5.20: Correntes de compensação, CAISM-CME.

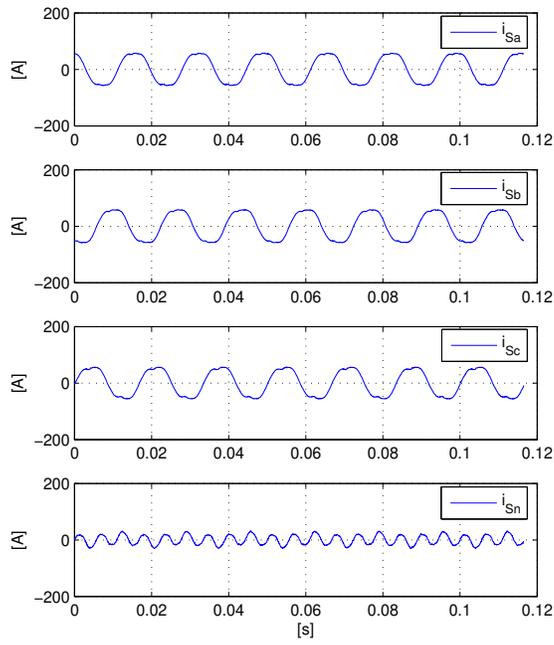


Figura 5.21: Correntes na fonte, CAISM-CME.

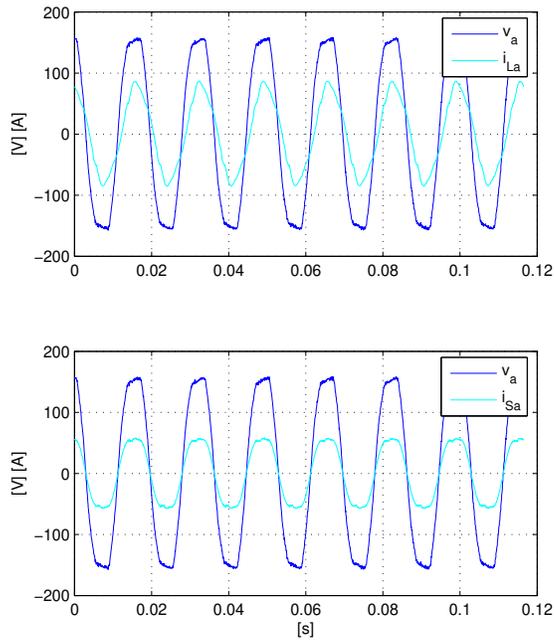


Figura 5.22: Tensões e correntes na carga e na fonte, CAISM-CME.

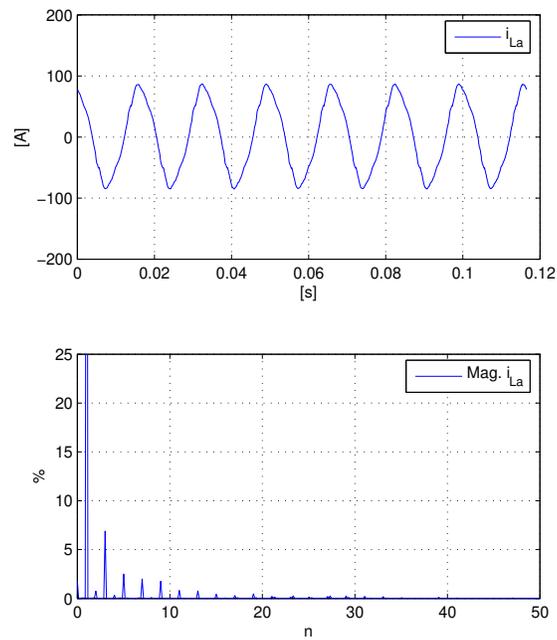


Figura 5.23: Corrente da fase A na carga e seu espectro harmônico, CAISM-CME.

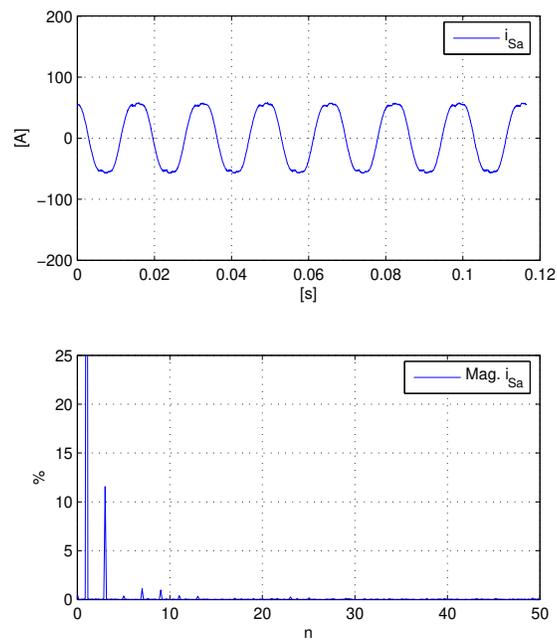


Figura 5.24: Corrente da fase A na fonte e seu espectro harmônico, CAISM-CME.

Capítulo 6

Conclusões

Este trabalho teve por objetivo estudar dois importantes aspectos de sistemas de energia elétrica, aos quais estão intimamente ligados o desempenho do sistema elétrico e o custo da energia elétrica: a conservação de energia elétrica e a qualidade de energia elétrica, dois temas abrangentes e de crescente interesse nesta área.

O Capítulo 1 procurou mostrar definições dos assuntos a serem tratados e explorar algumas das razões por serem frequentemente estudados. Fez-se uma pequena introdução à conservação de energia elétrica e caracterizou-se distúrbios relacionados à qualidade de energia elétrica, dividindo-os em transitórios, variações de tensão de curta duração, variações de tensão de longa duração, desequilíbrio de tensão, distorções na forma de onda, flutuação de tensão e variação na frequência.

Para a realização deste estudo, como apresentado no Capítulo 2, foram instalados instrumentos que monitoram e gerenciam a energia elétrica, capazes de adquirir e armazenar dados de grandezas elétricas, realizar cálculos de energia e demanda, registrar e analisar a qualidade de energia através de indicadores, visualizar dados em tempo real, e enviá-los para uma localização central, na qual possam ser extraídas informações úteis quanto a adequações ou controle do sistema.

Ao longo do trabalho, ficou evidente que, para grandes consumidores, é quase imprescindível a utilização de um sistema de medição, pois o registro das ocorrências torna possível a identificação das causas de um problema, bem como a análise das características do sistema, permitindo a tomada de ações corretivas ou preditivas mais eficientes.

No Capítulo 3, foram apresentados detalhes do Projeto Ecogera, especificamente do módulo de conservação de energia, visando a redução do consumo de energia elétrica em iluminação. Apresentou-se os dados obtidos pela substituição do sistema de iluminação de um bloco de salas de aula da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Unicamp, os quais mostraram que tanto o consumo de energia, como a demanda ou o custo das tarifas reduziram-se em torno de 30%, comparando períodos de um ano, e comprovando tratar-se de um investimento de retorno relativo rápido,

neste caso em torno de quatro anos, além de permitir uma maior disponibilidade de energia elétrica já a partir do início da implantação do projeto.

Registrou-se, posteriormente, medições de grande parte da FEEC, cujo consumo de 67% de sua área física fica entre 75 e 125 MWh ao mês, com uma estimativa de gasto anual de R\$ 280.000,00, evidenciando que a implantação de um programa de conservação de energia, mesmo restrito a sistemas de iluminação, pode trazer bons resultados econômicos. Como um adendo, este projeto piloto pode servir de base para um sistema geral de medição e monitoração no campus da universidade, cuja finalidade seria discriminar a conta de energia para cada unidade, providência já parcialmente prevista pelo Plano Diretor da Unicamp, que visa a implantação de dez Centros de Medições (CM) e um Centro de Operação e Monitoração (COM).

No Capítulo 4, algumas formas de onda de perturbações registradas nos medidores da FEEC e do CAISM foram apresentadas. Em geral, nos cinco medidores durante seis meses não ocorreram distúrbios muito significativos em magnitude ou duração. As perturbações ocorridas entre janeiro e abril de 2009 foram colocadas na Curva ITI (CBEMA). Na FEEC a maioria dos eventos ficaram no interior da envoltória, passando a ser preocupante no CAISM, pois uma quantia elevada de afundamentos e elevações de tensão ficaram aquém e além da curva, sobretudo na Diretoria Administrativa.

A avaliação das distorções harmônicas ocorreu nas formas de onda momentâneas e nos seus espectros harmônicos, e revelou a forte presença harmônica devido a correntes de cargas indutivas (aparelhos de ar condicionado) e eletrônicas (dispositivos computacionais), conforme esperado nesses tipos de instalações. Quanto à tensão, na FEEC praticamente não há distorção, enquanto no CAISM há a presença principal das terceira e quinta harmônicas. O mesmo ocorre quanto a avaliação das taxas de distorção harmônica total, as quais demonstraram na FEEC valores não muito significativos, mas alta poluição harmônica no CAISM.

É importante salientar que tanto o alto número de afundamentos e elevações no CAISM-DA quanto o significativo índice de harmônicas nos dois medidores do CAISM, serão comunicados ao responsável pelas instalações elétricas local, visando adequações das instalações.

Nesta dissertação constata-se a íntima relação entre a conservação e a qualidade de energia elétrica. Aqui, em específico, percebe-se que a instalação de um sistema de iluminação mais eficiente, do ponto de vista da conservação de energia, pode levar a um aumento nas distorções das correntes, e conseqüentemente das tensões, provocado pela utilização de cargas com características não lineares, afetando, deste modo, a qualidade da energia.

No Capítulo 5, realizou-se uma simulação do uso de um filtro ativo com compensação paralela aos dados reais das tensões e correntes adquiridos pelos medidores da FEEC-A e do CAISM-CME. Mesmo tratando-se de um modelo matemático, mostrou-se que o filtro ativo é capaz de reduzir as distorções das correntes, e até mesmo compensar a potência reativa.

No caso do medidor da FEEC, os resultados foram muito bons, praticamente eliminando as distorções das correntes. No CAISM, ainda houve certas harmônicas nas correntes, pois na simulação não foi considerada a interação entre a fonte e a carga, as quais acabam por atenuar harmônicas das tensões e correntes. Dadas as magnitudes das correntes vistas pelos medidores, torna-se viável a instalação de um filtro ativo no secundário dos transformadores.

Como sugestões para trabalhos futuros, pode-se projetar um medidor de energia, utilizando como comparação dados dos medidores já instalados. Outra possibilidade, é o desenvolvimento de um filtro ativo a ser instalado em um dos pontos de medição, visto que atualmente já existem dispositivos capazes de suportar estas cargas.

Referências Bibliográficas

- [1] ELETROBRÁS. *PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica*. Disponível em: <<http://www.eletrabras.com/elb/procel>>. Acesso em: 14 maio 2008.
- [2] JANNUZZI, Gilberto de Martino. Aumentando a eficiência nos usos finais de energia no Brasil. In: CONFERÊNCIA SUSTENTABILIDADE NA GERAÇÃO E USO DE ENERGIA NO BRASIL: os próximos vinte anos, 2002, Campinas. *Anais eletrônicos...* Campinas: UNICAMP, 2002. Disponível em: <<http://www.cgu.unicamp.br/energia2020>>. Acesso em: 11 fev. 2009.
- [3] DUGAN, Roger C.; MCGRANAGHAN, Mark F.; SANTOSO, Surya; BEATY, H. Wayne. *Electrical power systems quality*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 2002. 528p.
- [4] AFONSO, João Luiz; MARTINS, Júlio S. Qualidade de energia eléctrica. *Revista o Electricista*. Portugal, v.3, n.9, p.66-71, jul./set. 2004. Disponível em: <<https://repositorium.sdum.uminho.pt>>. Acesso em: 10 jun. 2008.
- [5] OLIVEIRA, Fabielli Guerra de; ALBERTIN, Marcos Ronaldo. Estudo de caso - eficiência energética no prédio da ESTUFOR. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 27. (ENEGEP 2007), 2007, Foz do Iguaçu. . *Anais...* Foz do Iguaçu: [s.n.], 2007. Disponível em: <www.abepro.org.br>. Acesso em: 15 maio 2009.
- [6] GOLDEMBERG, José; VILLANUEVA, Luz Dondero. *Energia, meio ambiente & desenvolvimento*. Tradução de André Koch. 2. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003. 226p.
- [7] LORA, Electo Eduardo Silva; TEIXEIRA, Flávio Neves. Energia e meio ambiente. In: CONSERVAÇÃO de energia: eficiência energética de instalações e equipamentos. Itajubá: FUPAI, 2001. p.30-93.
- [8] ELETROBRÁS. *Regulamento do Selo PROCEL de economia de energia*. Rio de Janeiro: PROCEL, 2005. Revisão 1. 10p. Disponível em: <<http://www.eletrabras.gov.br/elb/procel>>. Acesso em: 20 fev. 2009.

- [9] FRANCO, Edgard. *Qualidade de energia - causas, efeitos e soluções*. Engecomp Tecnologia em Automação e Controle Ltda. Disponível em: <<http://www.engecomp.com.br>>. Acesso em: 23 jan. 2008.
- [10] DECKMANN, Sigmar Maurer. *Avaliação da qualidade da energia elétrica*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, 2008.
- [11] VENCESLAU, Claudemiro. Monitoramento e gerenciamento de energia. *Revista o Setor Elétrico*. São Paulo, v.2, n.23, p.44-45, dez. 2007.
- [12] MCEACHERN, Alex. Roles of intelligent systems in power quality monitoring: past, present, and future. *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*. Vancouver, v.2, p.1103-1105, 15-19 Jul. 2001. Disponível em: <<http://www.ieee.org>>. Acesso em: 25 abr. 2008.
- [13] POWER STANDARDS LABS. *Power quality newsletter - january 2006*. Disponível em: <<http://www.powerstandards.com>>. Acesso em: 10 jan. 2009.
- [14] HAHN, G. J.; MARTZLOFF, F. D. Surge voltages in residential power circuits. *IEEE Summer Power Meeting*. Portland, 9-14 Jul. 1967. Disponível em: <<http://www.eeel.nist.gov>>. Acesso em: 14 maio 2009.
- [15] MARTZLOFF, F. D. *Low cost surge counter*. General Electric, 1964. 11p. Disponível em: <<http://www.eeel.nist.gov>>. Acesso em: 14 maio 2009.
- [16] TORONTO SURPLUS & SCIENTIFIC INC. *Telecom test equipment*. Disponível em: <<http://www.torontosurplus.com>>. Acesso em: 10 jan. 2009.
- [17] DRANETZ-BMI. *Power quality monitoring experts*. Disponível em: <<http://www.dranetz-bmi.com>>. Acesso em: 10 jan. 2009.
- [18] SIGNATURE SYSTEM. *The power do manage your power*. Disponível em: <<http://www.signaturesystem.com>>. Acesso em: 11 jan. 2009.
- [19] CCK AUTOMAÇÃO LTDA. *Sistema de gerenciamento de energia elétrica*. Disponível em: <<http://www.cck.com.br>>. Acesso em: 11 jan. 2009.
- [20] CBR - CIBER DO BRASIL. *Eficiência energética elétrica*. Disponível em: <<http://www.ciberdobrasil.com.br>>. Acesso em: 11 jan. 2009.
- [21] SCHNEIDER ELECTRIC BRASIL LTDA. *Eficiência energética: auditoria e qualidade de energia*. Disponível em: <<http://www.schneider-electric.com.br>>. Acesso em: 11 jan. 2009.

- [22] KRON INSTRUMENTOS ELÉTRICOS LTDA. *Kron medidores*. Disponível em: <<http://www.kron.com.br>>. Acesso em: 11 jan. 2009.
- [23] SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, COMERCIAL LTDA. *Tornando a energia elétrica mais segura, mais confiável e mais econômica*. Disponível em: <<http://www.selinc.com.br>>. Acesso em: 11 jan. 2009.
- [24] MORENO, Hilton. *Harmônicas nas instalações elétricas: causas, efeitos e soluções*. São Paulo: Procobre - Instituto Brasileiro do Cobre, 2001. 65p. Disponível em: <<http://www.procobrebrasil.org>>. Acesso em: 10 mar. 2008.
- [25] WEST, Ken. True RMS - the only true measurement. In: Copper Development Association (Org.). *Power quality application guide*. United Kingdom: Copper Development Association, 2001. 4p. Disponível em: <<http://www.cda.org.uk>>. Acesso em: 10 mar. 2008.
- [26] POWER MEASUREMENT. *ION 7600: user's guide*. Canada: Power Measurement, May 2003. 370p. 1 CD-ROM.
- [27] POWER MEASUREMENT. *ION 7500 7600: datasheet*. Canada: Power Measurement, Oct. 2001. 8p. Disponível em: <<http://www.pwrm.com>>. Acesso em: 16 ago. 2007.
- [28] POWER MEASUREMENT. *ION Setup 2.0: user's guide*. Canada: Power Measurement, Oct. 2003. 150p. 1 CD-ROM.
- [29] POWER MEASUREMENT. *ION Enterprise: client user's guide*. Canada: Power Measurement, Aug. 2003. 158p. 1 CD-ROM.
- [30] PÊGO FILHO, Bolívar; MOTA, José Aroudo; CARVALHO, José Carlos Jacob de; PINHEIRO, Maurício Mota Saboya. Impactos da crise de energia elétrica: 2001 e 2002. *Texto para discussão n°816 - IPEA*. Rio de Janeiro, ago. 2001. Disponível em: <<http://www.provedor.nuca.ie.ufrj.br/eletrobras/>>. Acesso em: 10 jun. 2008.
- [31] ALVAREZ, André Luiz Montero. *Uso racional e eficiente de energia elétrica: metodologia para a determinação dos potenciais de conservação dos usos finais em instalações de ensino e similares*. 1998. 159p. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Potência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br>>. Acesso em: 18 jul. 2008.
- [32] MAGALHÃES, Luiz Carlos. *Orientações gerais para conservação de energia elétrica em prédios públicos*. Rio de Janeiro: PROCEL, 2001. 53p. Disponível em: <<http://www.eletrobras.gov.br/elb/procel>>. Acesso em: 20 fev. 2009.

- [33] RODRIGUES, Pierre. *Manual de iluminação eficiente*. Rio de Janeiro: PROCEL, 2002. 36p. Disponível em: <<http://www.eletrabras.gov.br/elb/procel>>. Acesso em: 20 fev. 2009.
- [34] BORG, N. T5 lamps boost fluorescent lighting efficiency. *IAEEL Newsletter*. v.6, n.17, p.4-6, 1997. Disponível em: <<http://www.iaeel.org>>. Acesso em: 25 fev. 2009.
- [35] ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (UNITED STATES). *Lighting upgrade manual*. Washington, DC: EPA, 1995. Disponível em: <<http://www.epa.gov>>. Acesso em: 25 fev. 2009.
- [36] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5413: Iluminância de Interiores*. Rio de Janeiro: ABNT, 1992. 13p.
- [37] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (BRASIL). Resolução nº456, de 29 de novembro de 2000. Estabelece, de forma atualizada e consolidada, as condições gerais de fornecimento de energia elétrica. Brasília: ANEEL, 2000. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 10 jun. 2008.
- [38] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (BRASIL). *Tarifas de fornecimento de energia elétrica*. Brasília: ANEEL, 2005. 30p. (Cadernos Temáticos ANEEL, 4). Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 18 jun. 2008.
- [39] CPFL BRASIL. *Manual de orientação ao cliente*. Disponível em: <<http://www.cpfl.com.br>>. Acesso em: 18 jun. 2008.
- [40] CPFL ENERGIA. *Serviços online: taxas e tarifas*. Disponível em: <http://agencia.cpfl.com.br/portal-servicos/paulista/taxas_tarifas.asp>. Acesso em: 15 out. 2007.
- [41] MAIOLLA, Rafael Bocaletto; SESTE, Rafael Seraphin; BARBIERI, Raphael Oliveira. Avaliação do desperdício de energia pelos computadores ociosos da FEEC/UNICAMP. *Revista Ciências do Ambiente On-Line*. v.3, n.1, p.46-51, fev. 2007. Disponível em: <<http://sistemas.ib.unicamp.br/be310>>. Acesso em: 18 mar. 2009.
- [42] SIMONETTI, D. S. L. . Qualidade de Energia: Cargas Eletrônicas e Harmônicos. In: Cerqueira, A. S.; Duque, C. A.; Braga, H. A. C.; Ribeiro, M. V.; Barbosa, P. G. (Org.). *Tutoriais do XVII Congresso Brasileiro de Automática*. Campinas: Book, 2008, p.61-93.
- [43] EDP. *Manual da qualidade da energia eléctrica*. Coimbra: EDP, 2005. 138p. Disponível em: <<http://www.edp.pt>>. Acesso em: 10 jan. 2009.
- [44] SANKARAN, C. *Power quality*. Boca Raton: CRC Press, 2002.

- [45] WARD, Daniel J. Power quality and the security of electricity supply. *Proceedings of the IEEE*. v.89, n.12, p.1830-1836, Dec. 2001. Disponível em: <<http://www.ieee.org>>. Acesso em: 5 nov. 2007.
- [46] CHAPMAN, David. Voltage dips: introduction. In: Copper Development Association (Org.). *Power quality application guide*. United Kingdom: Copper Development Association, 2001. 11p. Disponível em: <<http://www.cda.org.uk>>. Acesso em: 10 mar. 2008.
- [47] MCGRANAGHAN, Mark F.; MUELLER, David R.; SAMOTYJ, Marek J. Voltage sags in industrial systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*. v.29, n.2, p.397-403, Mar./Apr. 1993. Disponível em: <<http://www.ieee.org>>. Acesso em: 10 mar. 2008.
- [48] SATO, Fujio. *Proteção de sistemas de energia elétrica*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, 2007. 146p.
- [49] MAULE, Derek. Voltage dips: voltage dip mitigation. In: Copper Development Association (Org.). *Power quality application guide*. United Kingdom: Copper Development Association, 2001. 8p. Disponível em: <<http://www.cda.org.uk>>. Acesso em: 10 mar. 2008.
- [50] MARKIEWICZ, Henryk; KLAJN, Antoni. Resilience: improving reliability with standby power supplies. In: Copper Development Association (Org.). *Power quality application guide*. United Kingdom: Copper Development Association, 2003. 16p. Disponível em: <<http://www.cda.org.uk>>. Acesso em: 10 mar. 2008.
- [51] KYEI, John; AYYANAR, Raja; HEYDT, Gerald; THALLAM, Rao; BLEVINS, John. The design of power acceptability curves. *IEEE Transactions on Power Delivery*. v.17, n.3, p.828-833, Jul. 2002. Disponível em: <<http://www.ieee.org>>. Acesso em: 9 nov. 2007.
- [52] INFORMATION TECHNOLOGY INDUSTRY COUNCIL. *ITI (CBEMA) curve application note*. Washington, DC: ITI, 2000. 3p. Disponível em: <<http://www.itic.org>>. Acesso em: 11 set. 2007.
- [53] ARRILLAGA, Jos; BOLLEN, Math H. J.; WATSON, Neville R. Power quality following deregulation. *Proceedings of the IEEE*. v.88, n.2, p.246-261, Feb. 2000. Disponível em: <<http://www.ieee.org>>. Acesso em: 5 nov. 2007.
- [54] GRADY, W. Mack; SANTOSO, Surya. Understand power system harmonics. *IEEE Power Engineering Review*. v.21, n.11, p.8-11, Nov. 2001. Disponível em: <<http://www.ieee.org>>. Acesso em: 25 abr. 2008.

- [55] CHAPMAN, David. Harmonics: causes and effects. In: Copper Development Association (Org.). *Power quality application guide*. United Kingdom: Copper Development Association, 2001. 6p. Disponível em: <<http://www.cda.org.uk>>. Acesso em: 10 mar. 2008.
- [56] POMILIO, José Antenor. Efeitos e causas de harmônicas no sistema de energia elétrica - parte 1. *Revista O Setor Elétrico*. São Paulo, v.1, n.10, p.22-24, nov. 2006. Disponível em: <<http://www.osetoreletrico.com.br>>. Acesso em: 8 maio 2008.
- [57] DESMET, Jan; BAGGINI, Angelo. Harmonics: neutral sizing in harmonic rich installations. In: Copper Development Association (Org.). *Power quality application guide*. United Kingdom: Copper Development Association, 2003. 8p. Disponível em: <<http://www.cda.org.uk>>. Acesso em: 10 mar. 2008.
- [58] VOLUT, Serge; SCHONEK, Jacques (Org.). *Electrical Installation Guide According to IEC International Standards*. France: Schneider Electric, 2007. Disponível em: <<http://theguide.schneider-electric.com>>. Acesso em: 10 mar. 2008.
- [59] ROSA, Francisco de la. *Harmonics and power systems*. Boca Raton: CRC Press, 2006. 179p.
- [60] POMILIO, José Antenor. Compensação capacitiva e filtros passivos em redes secundárias - parte 2. *Revista O Setor Elétrico*. São Paulo, v.2, n.13, p.18-20, fev. 2007. Disponível em: <<http://www.osetoreletrico.com.br>>. Acesso em: 8 maio 2008.
- [61] POMILIO, José Antenor. Normas relativas a fator de potência e distorção harmônica. *Revista O Setor Elétrico*. São Paulo, v.1, n.3, p.18-23, abr. 2006. Disponível em: <<http://www.osetoreletrico.com.br>>. Acesso em: 8 maio 2008.
- [62] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (BRASIL). Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional (PRODIST) - Módulo 8: Qualidade da energia elétrica. Brasília: ANEEL, 2007. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 1 jun. 2009.
- [63] AKAGI, Hirofumi. Trends in active power line conditioners. *IEEE Transactions on Power Electronics*. v.9, n.3, p.263-268, May 1994. Disponível em: <<http://www.ieee.org>>. Acesso em: 14 set. 2007.
- [64] KARVE, Shri. Harmonics: Active harmonic conditioners. In: Copper Development Association (Org.). *Power quality application guide*. United Kingdom: Copper Development Association, 2001. 8p. Disponível em: <<http://www.cda.org.uk>>. Acesso em: 10 mar. 2008.

- [65] AKAGI, Hirofumi; WATANABE, Edson Hirokazu; AREDES, Mauricio. *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007. 379p.
- [66] VILLALVA, Marcelo Gradella. *Estudo e aplicação de filtros ativos paralelos para sistemas trifásicos com quatro frios*. 2005. 182p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005. Disponível em: <<http://libdigi.unicamp.br>>. Acesso em: 24 ago. 2008.
- [67] WATANABE, Edson H.; STEPHAN, Richard M.; AREDES, Maurício. New concepts of instantaneous active and reactive powers in electrical systems with generic loads. *IEEE Transactions on Power Delivery*. v.8, n.2, p.697-703, Apr. 1993. Disponível em: <<http://www.ieee.org>>. Acesso em: 17 out. 2007.

Apêndice A

Planta da FEEC

Para uma melhor visualização da área abrangida pelos três medidores instalados nos blocos A, B, E, F, G1 e G2 da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Unicamp e das suas localizações, segue a figura A.1.

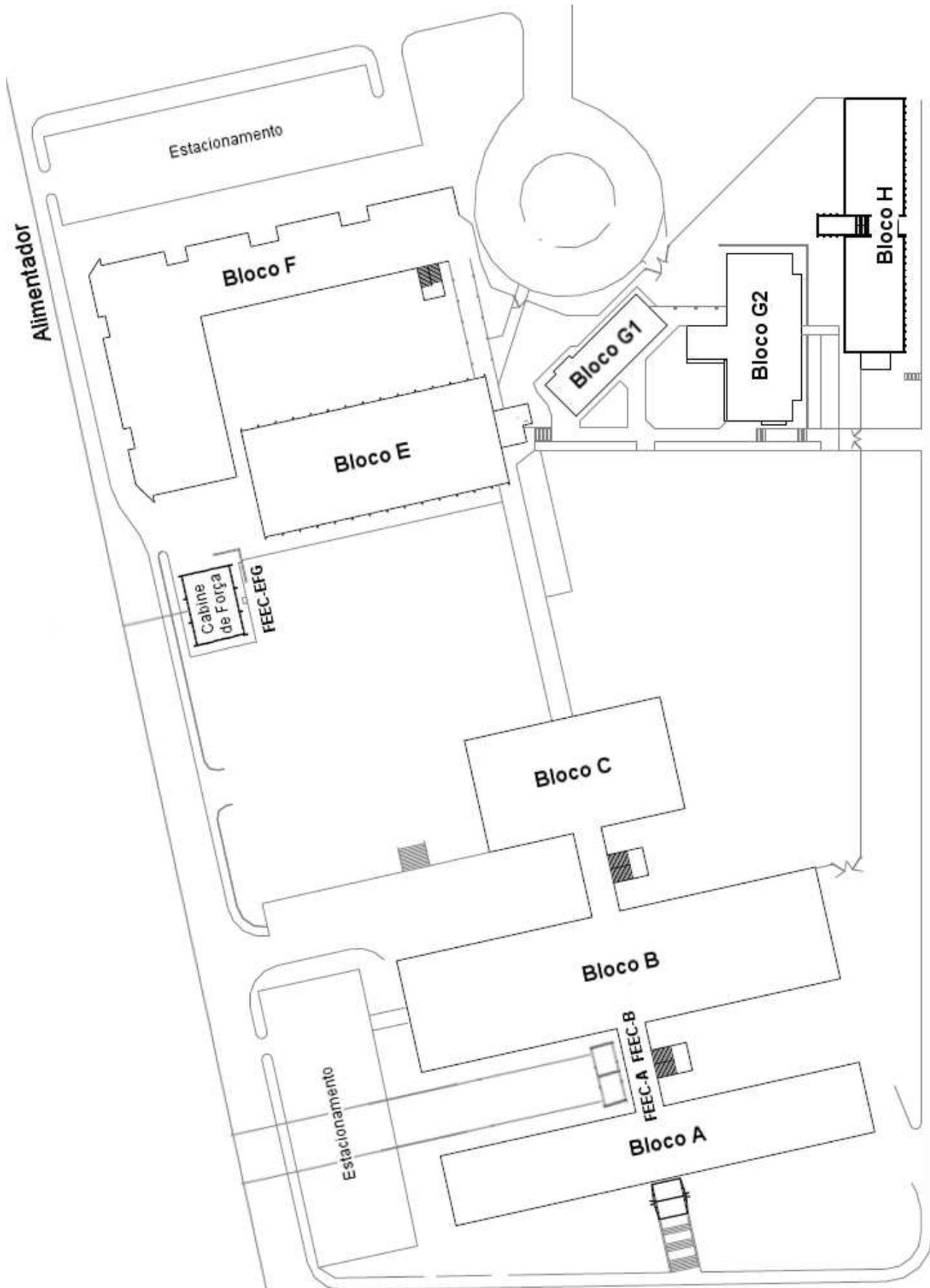


Figura A.1: Planta da FEEC, mostrando os medidores instalados.

Apêndice B

Programa implementado em MatLab

Abaixo é apresentado o programa desenvolvido no MatLab, para a simulação da aplicação de um filtro ativo paralelo nas cargas vistas pelos medidores, com compensação da potência real harmônica e das potências imaginárias.

```
% Caio Gomes de Oliveira Julho/2009
% Programa para simulação de Filtro Ativo Paralelo filtro_ativo.m
% Compensação da potência real harmônica e das potências imaginárias

clear all;
clc;

% Carregamento dos dados
load tensoes.txt;
load correntes.txt;

num = length(tensoes); % número de linhas
tempo = (tensoes(1:num,1));

% Tensões e correntes da carga
va = (tensoes(1:num,2));
vb = (tensoes(1:num,3));
vc = (tensoes(1:num,4));

ia = (correntes(1:num,2));
ib = (correntes(1:num,3));
ic = (correntes(1:num,4));
in = ia+ib+ic;
```

```
% Aplicação da Transformada de Clarke
for i=1:1:num
vclarke = sqrt(2/3) *
    [1 -1/2 -1/2;
    0 sqrt(3)/2 -sqrt(3)/2;
    1/sqrt(2) 1/sqrt(2) 1/sqrt(2)] *
    [va(i); vb(i); vc(i)];
valfa(i) = vclarke(1);
vbeta(i) = vclarke(2);
vzero(i) = vclarke(3);
end

for i=1:1:num
iclarke = sqrt(2/3) *
    [1 -1/2 -1/2;
    0 sqrt(3)/2 -sqrt(3)/2;
    1/sqrt(2) 1/sqrt(2) 1/sqrt(2)] *
    [ia(i); ib(i); ic(i)];
ialfa(i) = iclarke(1);
ibeta(i) = iclarke(2);
izero(i) = iclarke(3);
end

% Cálculo da Potências Instantâneas (potências na carga)
for i=1:1:num
pqT = [valfa(i) vbeta(i) vzero(i);
    0 -vzero(i) vbeta(i);
    vzero(i) 0 -valfa(i);
    -vbeta(i) valfa(i) 0] *
    [ialfa(i); ibeta(i); izero(i)];
p(i) = pqT(1);
qalfa(i) = pqT(2);
qbeta(i) = pqT(3);
qzero(i) = pqT(4);
q(i) = sqrt(qalfa(i)^2+qbeta(i)^2+qzero(i)^2);
end
```

```

% Definição das Potências a serem Compensadas
  (potências no filtro ativo)
pmedio = sum(p)/num;

for i=1:1:num
posc(i) = p(i) - pmedio;
q(i) = sqrt(qalfa(i)^2+qbeta(i)^2+qzero(i)^2);
end

pCAST = posc;
qCASTalfa = qalfa;
qCASTbeta = qbeta;
qCASTzero = qzero;

% Cálculo das correntes-alfa/beta/zero
for i=1:1:num
iAST = 1/(valfa(i)^2+vbeta(i)^2+vzero(i)^2) *
    [valfa(i) 0 vzero(i) -vbeta(i);
    vbeta(i) -vzero(i) 0 valfa(i);
    vzero(i) vbeta(i) -valfa(i) 0] *
    [pCAST(i); qCASTalfa(i); qCASTbeta(i); qCASTzero(i)];
ialfaAST(i) = iAST(1);
ibetaAST(i) = iAST(2);
izeroAST(i) = iAST(3);
end

% Aplicação da Transformada Inversa de Clarke:
  correntes a serem compensadas
for i=1:1:num
iCAST = sqrt(2/3) *      [1 0 1/sqrt(2);
    -1/2 sqrt(3)/2 1/sqrt(2);
    -1/2 -sqrt(3)/2 1/sqrt(2)] *
    [ialfaAST(i); ibetaAST(i); izeroAST(i)];
iCaAST(i) = iCAST(1);
iCbAST(i) = iCAST(2);
iCcAST(i) = iCAST(3);
end

iCnAST = iCaAST+iCbAST+iCcAST;

```

```

% Cálculo da corrente na fonte
for i=1:1:num
iSa(i) = ia(i) - iCaAST(i);
iSb(i) = ib(i) - iCbAST(i);
iSc(i) = ic(i) - iCcAST(i);
end

iSn = iSa+iSb+iSc;

% Cálculo da Potência trifásica na Fonte
for i=1:1:num
iSclarke = sqrt(2/3) *
    [1 -1/2 -1/2;
    0 sqrt(3)/2 -sqrt(3)/2;
    1/sqrt(2) 1/sqrt(2) 1/sqrt(2)] *
    [iSa(i); iSb(i); iSc(i)];
iSalfa(i) = iSclarke(1);
iSbeta(i) = iSclarke(2);
iSzero(i) = iSclarke(3);
end

for i=1:1:num
pqTS = [valfa(i) vbeta(i) vzero(i);
    0 -vzero(i) vbeta(i);
    vzero(i) 0 -valfa(i);
    -vbeta(i) valfa(i) 0] *
    [iSalfa(i); iSbeta(i); iSzero(i)];
pS(i) = pqTS(1);
qSalfa(i) = pqTS(2);
qSbeta(i) = pqTS(3);
qSzero(i) = pqTS(4);
qS(i) = sqrt(qSalfa(i)^2+qSbeta(i)^2+qSzero(i)^2);
end

% Cálculo do espectro harmônico
dT = tempo(2)-tempo(1);
freq = (0:num-1)/(num*dT);
n = freq/60;

```

```
fftia = fft(ia);  
espectroia = abs(fftia)/(sqrt(num));  
magia = espectroia*100/max(espectroia);  
  
fftiSa = fft(iSa);  
espectroiSa = abs(fftiSa)/(sqrt(num));  
magiSa = espectroiSa*100/max(espectroiSa);
```

Apêndice C

Trabalho publicado na INDUSCON 2008

Segue anexo o trabalho publicado:

- OLIVEIRA, Caio Gomes de; SATO, Fujio; RUPPERT FILHO, Ernesto; KUBO, Marcio Masakiti. Estudo de caso de eficiência energética e qualidade de energia elétrica. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE APLICAÇÕES INDUSTRIAIS, 8. (Induscon 2008), 2008, Poços de Caldas. *Anais...* Poços de Caldas: UNIFEI, 2008. Pen-drive.



ESTUDO DE CASO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

Caio Gomes de Oliveira, Fujio Sato, Ernesto Ruppert Filho, Marcio Massakiti Kubo
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC)
Av. Albert Einstein, 400 – Campinas, SP, Brasil
caio@dsee.fee.unicamp.br, sato@dsee.fee.unicamp.br, ruppert@dsce.fee.unicamp.br, massakit@dsce.fee.unicamp.br

Resumo – Este trabalho descreve os resultados da análise da eficiência energética e da qualidade de energia elétrica na Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Unicamp, inserido em um projeto piloto denominado Projeto Ecogera. A análise é baseada em dados de grandezas elétricas coletados por instrumentos de medição e gerenciamento de energia nos blocos de salas de aulas da faculdade. Em termos de eficiência energética a substituição do sistema de iluminação antigo constituído de luminárias não refletoras com lâmpadas fluorescentes tubulares de 40 W por novas luminárias com refletor espelhado possibilitou uma redução significativa do consumo de energia elétrica e da demanda. Quanto à qualidade de energia as medições permitiram a caracterização das distorções harmônicas e de perturbações que afetam a amplitude da tensão.

Palavras-chaves - Eficiência Energética, Medições, Qualidade de Energia Elétrica.

Abstract – This paper describes the results of the electrical energy efficiency and power quality evaluation done in the Electrical and Computer Engineering School of the Campinas State University (Unicamp) in São Paulo State, Brazil through the Project named Ecogera. The analysis was based on the electrical signals acquired in the switchgear of the Students Classroom Building using measurement and energy management instruments. The replacement of the old lightning system using 40 W old fashion fluorescent bulbs mounted on non reflective fixtures by new energy save fluorescent bulbs mounted on reflective fixtures reduced expressively the electrical energy consumption and the installation electrical power demand. The measurements allowed to know the details of harmonic distortions and disturbances that affect the voltage magnitude.

Keywords - Energy Efficiency, Measurements, Power Quality.

I. INTRODUÇÃO

Em 2001, devido à crise de energia elétrica, o governo federal criou a Câmara de Gestão da Crise de Energia Elétrica (CGCE), que teve a finalidade de administrar a oferta de eletricidade mediante racionamento de 20%, entre junho de 2001 e fevereiro de 2002, especialmente nas regiões Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste.

Após a crise, ficou patente a necessidade do uso racional da energia elétrica pelos vários segmentos da sociedade. Assim, na Unicamp iniciou-se a implementação de um projeto piloto para avaliar a eficiência energética através de um programa de uso racional de energia elétrica e de exploração de fontes alternativas de energia elétrica.

A Unicamp é considerada um dos grandes consumidores da Região Metropolitana de Campinas, com consumo mensal variando entre 4.700 e 6.100 MWh e demanda em torno de 18 MW. É atendida em 11,95 kV por uma subestação de 138/11,95 kV da Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL) com um transformador de potência exclusivo de 25 MVA e a distribuição da energia elétrica é feita através de cinco alimentadores.

II. PROJETO ECOGERA

O Projeto Ecogera, financiado pela FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos) e administrado pela FEEC (Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação) e pelo NIPE (Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético da Unicamp), contempla dois módulos: conservação de energia e geração de energia elétrica através de fontes alternativas de energia (neste caso, especificamente, o gás natural).

Este trabalho descreve somente o primeiro módulo, que tem por objetivo realizar a avaliação da eficiência energética da Unicamp a partir de uma célula inicial de trabalho, composta de quatro unidades de consumo de energia elétrica características da universidade em relação ao tipo de atividade realizada em cada uma delas, focado na redução do consumo de energia elétrica em iluminação.

A. Unidades de consumo

A célula inicial de trabalho é subdividida em: uma unidade administrativa, um prédio utilizado apenas por salas de aulas, uma instituição de ensino e uma unidade hospitalar.

Em geral, cada uma das unidades é alimentada por mais de um transformador. Pelo fato de não haver medidores em quantidade suficiente para serem instalados em todos os quadros de distribuição existentes em cada uma delas, escolheu-se quadros de distribuição significativos do ponto de vista do consumo de energia elétrica das cargas a eles ligadas.

As unidades de consumo avaliadas foram: DGA (Diretoria Geral da Administração), uma unidade de natureza puramente administrativa; PB (Ciclo Básico II), um prédio somente com salas de aulas; FEEC (Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação), uma instituição de ensino, pesquisa e extensão completa; e CAISM (Centro de Atenção Integral à Saúde da Mulher), uma unidade hospitalar, com dois medidores: um na Diretoria Administrativa (RH) e outro na Central de Materiais e Esterilização (CME).

B. Estudo preliminar

Antes da aquisição das novas luminárias fez-se um breve estudo no bloco de salas de aula da FEEC usando os critérios da ABNT presentes na NBR 5413 (Iluminância de Interiores).

Com base nesse estudo e na necessidade de economia de energia optou-se pela substituição das luminárias de dois reatores eletromagnéticos com quatro lâmpadas de 40 W por luminárias com refletor espelhado, duas lâmpadas de 32 W e um reator eletrônico. Os resultados dos ensaios em laboratório são mostrados na Tabela I.

TABELA I
Ensaio dos reatores

Reator Eletromagnético (4 lâmpadas de 40 W)	Reator Eletrônico (2 lâmpadas de 32 W)
U: 220,03 V	U: 220,93 V
I: 0,9842 A	I: 0,2862 A
P: 162,13 W	P: 60,30 W
fp: 0,7486	fp: 0,9535
U_{fund} : 219,98 V	U_{fund} : 220,83 V
I_{fund} : 0,9736 A	I_{fund} : 0,2747 A
THDu: 2,20%	THDu: 3,00%
THDi: 14,81%	THDi: 14,27%

C. Impactos previstos

A partir dos resultados, comparando os dois tipos de luminárias, estimou-se uma redução do consumo de energia elétrica na ordem de 30% com as substituições e a instalação de sensores de presença nas salas de aulas, além de melhora do fator de potência. Foram realizadas medições de intensidade luminosa em diversos pontos importantes das salas de aulas verificando-se que o nível de iluminação dessas, com o uso das luminárias novas, estavam de acordo com as tabelas constantes da norma NBR 5413. Os sensores de presença diminuem o consumo de energia elétrica, porque evitam que as lâmpadas das salas permaneçam acesas quando não há pessoas no ambiente.

III. DESCRIÇÃO DOS MEDIDORES UTILIZADOS

Para a aquisição dos dados foram adquiridos seis medidores ION 7600 da *Power Measurement*, os quais possuem medição *true RMS* de tensão, corrente, potência e energia e têm a capacidade de registro de eventos e medições para o monitoramento da qualidade de energia elétrica [1]. Estes medidores são gerenciados pelo *software ION Enterprise*, o qual processa, analisa, armazena e compartilha as informações coletadas da rede, e que é composto por dois programas principais: *ION Vista* e *ION Reporter*.

O primeiro é um aplicativo de visualização, análise e controle, que fornece uma visão gráfica do sistema, possibilitando a observação de dados instantâneos dos medidores de energia ou de dados históricos do banco de dados. São registradas grandezas como tensão, corrente, potência, fator de potência, frequência e índices de qualidade de energia, e eventos do tipo *sag*, *swell* e transitórios.

O segundo permite a definição e a criação de relatórios baseados nas informações do banco de dados provenientes do monitoramento da rede. Há alguns relatórios pré-configurados como Qualidade de Energia, Perfil de Carga e Energia e Demanda, que podem ser emitidos sob pedido do usuário, mas também é possível gerar relatórios personalizados com os dados armazenados.

IV. MEDIÇÕES E RESULTADOS

Este trabalho apresenta as medições e resultados obtidos somente da FEEC, visto que é a única unidade consumidora, até o momento, na qual todas as medições antes e após a troca das luminárias foram efetuadas. Nas outras unidades as instalações estão em fase de conclusão.

A. Conservação de energia

Os perfis anuais das cargas antes e após a substituição das luminárias e a instalação dos sensores de presença são mostrados nas Figuras 1 a 3. Em 2006, por problemas operacionais o medidor ficou inativo. A troca das luminárias ocorreu entre abril e maio de 2005, a qual pode ser verificada pela Figura 2. Nota-se, comparando os anos de 2004 e 2007, que houve uma queda da demanda da ordem de 26,4 kW para 18,1 kW, alcançando 31,8% de redução. Percebe-se também a melhora do fator de potência, dada pela queda da potência reativa envolvida.

Baseando-se nas medições e aplicando a tarifa da CPFL vigente, conforme a Tabela II [2], estimou-se que a FEEC, só nos blocos de salas de aulas, teria um gasto anual com energia elétrica em torno de R\$ 22.000,00 antes e de R\$ 15.000,00 após a troca das luminárias, significando uma redução de gastos de 32%.

TABELA II
Tarifa verde A4 para o fornecimento de energia elétrica

Demanda (R\$/kW)	Consumo (R\$/MWh)			
	Período Seco		Período Úmido	
7,68	Ponta	Fora de Ponta	Ponta	Fora de Ponta
		772,36	185,03	742,53

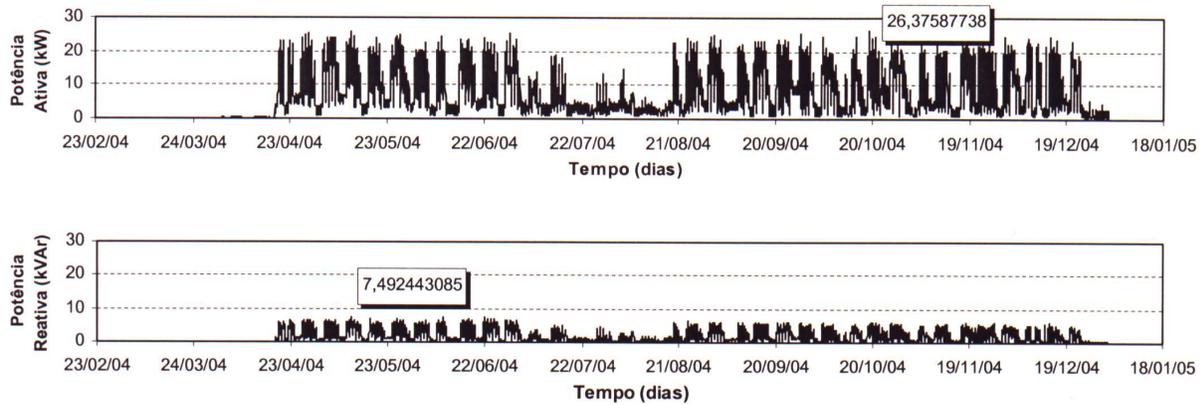


Fig. 1. Perfil da Carga em 2004.

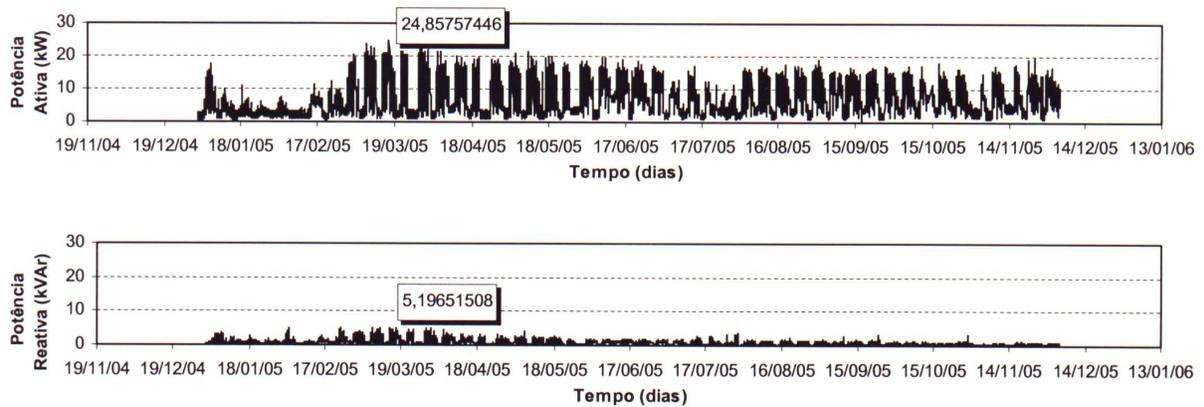


Fig. 2. Perfil da Carga em 2005.

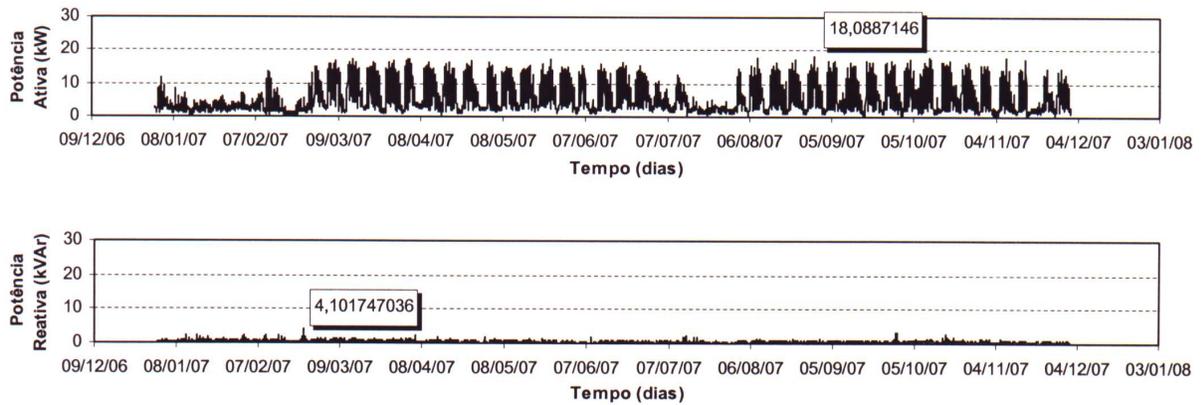


Fig. 3. Perfil da Carga em 2007.

As Tabelas III e IV mostram as comparações de energia e demanda de 4 meses de atividades intensas na FEEC.

TABELA III
Energia total (kWh)

	2004	2007	Redução
Maio	7388,08	4825,73	34,7%
Junho	6868,99	4228,18	38,4%
Setembro	7164,60	4225,04	41,0%
Outubro	6648,04	4738,70	28,7%

TABELA IV
Demanda máxima (kW)

	2004	2007	Redução
Maio	25,79	17,31	32,9%
Junho	25,17	16,27	35,4%
Setembro	25,38	17,09	32,7%
Outubro	26,38	17,77	32,6%

B. Qualidade de energia elétrica

A Qualidade de Energia Elétrica está relacionada às alterações que podem ocorrer no sistema elétrico. De acordo com [3], a definição de problemas relacionados à QEE é: “Qualquer problema de energia manifestado na tensão, corrente ou nas variações de frequência que resulte na falha ou má operação de equipamentos dos consumidores”.

Estes problemas vêm se agravando ao longo dos anos devido principalmente às seguintes razões:

- Aumento do número de cargas não-lineares, que elevam o nível de harmônicas na rede;
- Maior sensibilidade dos equipamentos, cada vez mais baseados em microprocessadores e componentes de eletrônica de potência;
- Grande interconexão da rede elétrica, na qual a falha de um componente gera conseqüências maiores e mais graves.

Há, portanto, um crescente interesse no estudo de fenômenos relacionados à qualidade de energia, já que seus conseqüentes problemas geram impactos econômicos tanto para as concessionárias de energia elétrica como para os consumidores finais [3], [4].

O foco desta parte do trabalho está na análise dos distúrbios relacionados a harmônicas e a perturbações na amplitude da tensão.

1) Análise das harmônicas

- Espectro Harmônico

As lâmpadas fluorescentes com reator eletrônico, por serem mais econômicas, tornaram-se populares recentemente, entretanto têm como grande desvantagem o fato de produzirem harmônicas na corrente [5]. As Figuras 4 e 5 mostram, respectivamente, as formas de ondas das correntes trifásicas e seu espectro harmônico observados no ponto de medição da FEEC no dia 27/02/2008 às 10:40 h. A ordenada foi limitada em 20% para melhorar a visualização do espectro harmônico. A presença das lâmpadas fluorescentes com reatores eletrônicos fica evidenciada nas formas de onda das correntes e na predominância de harmônicas ímpares.

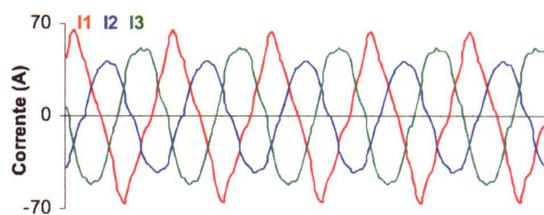


Fig. 4. Forma de onda da corrente no dia 27/02/08 às 10:40.

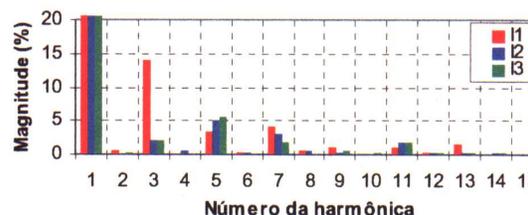


Fig. 5. Espectro harmônico da corrente no dia 27/02/08 às 10:40.

É importante lembrar que a distorção na corrente é provocada pela carga, ao passo que a distorção na tensão é conseqüência da primeira [6]. Nas Figuras 6 e 7 são vistas as formas de onda das tensões trifásicas e seu espectro harmônico.

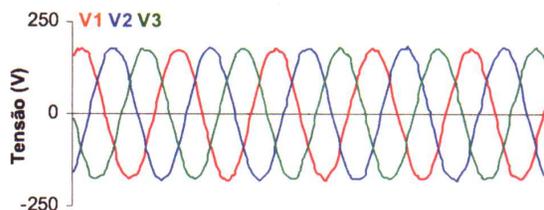


Fig. 6. Forma de onda da tensão no dia 27/02/08 às 10:40.

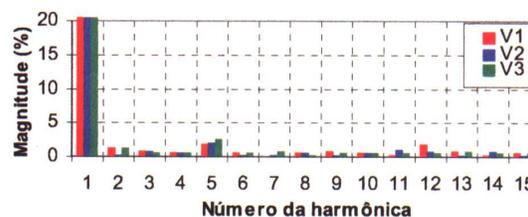


Fig. 7. Espectro harmônico da tensão no dia 27/02/08 às 10:40.

- Taxa de distorção harmônica total

A taxa de distorção harmônica total, THD (“Total Harmonic Distortion”) é um índice de desempenho amplamente utilizado para quantificar o conteúdo harmônico de um sinal distorcido. Para um sinal Y , a THD é definida em (1):

$$THD_Y = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} Y_n^2}}{Y_1} \quad (1)$$

Em que:

- THD_Y - Distorção harmônica total de Y.
- Y_n - Magnitude da n-ésima harmônica.
- Y₁ - Magnitude da fundamental.

Esta definição está de acordo com a Norma IEC 61000-2-2, a qual também especifica que *n* (ordem da harmônica) pode ser limitada a 50. Esta taxa permite avaliar, através de um único número, a distorção que afeta a corrente ou a tensão num determinado ponto da rede.

A Figura 8 mostra a taxa de distorção harmônica da tensão durante os dias de uma semana de agosto de 2007. Observa-se nas três fases, que seu valor é adequado, pois permanece abaixo de 5%.

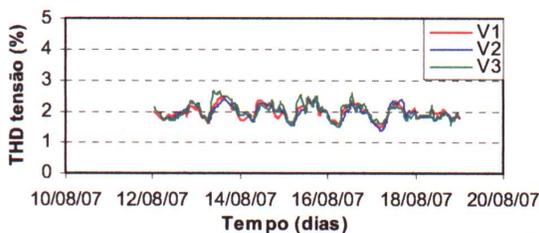


Fig. 8. THD da tensão em uma semana de agosto de 2007.

Já no caso das correntes (Figura 9) nota-se um nível considerável de poluição harmônica na fase 1 que chega a superar 50%, e uma poluição harmônica significativa nas fases 2 e 3, visto que elas se mantêm entre 10 e 50% [7].

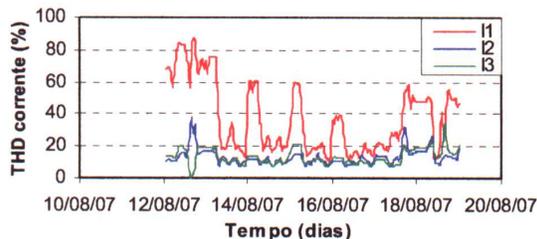


Fig. 9. THD da corrente em uma semana de agosto de 2007.

2) Análise das perturbações na amplitude da tensão

A curva ITI (CBEMA) descreve uma envoltória para a tensão CA de entrada tolerada pela maioria dos equipamentos de tecnologia de informação sem perda de função de trabalho, podendo ser empregada tanto para regime permanente como para condições transitórias. Esta curva é aplicada para tensão nominal de 120 V e frequência de 60 Hz [8].

A Figura 10 mostra esta curva, que pode ser usada para avaliar a qualidade da tensão em um sistema de energia elétrica quanto a afundamentos (*sags*) e elevações (*swells*) de tensão, interrupções e transitórios. Na abscissa tem-se a duração do evento e na ordenada sua magnitude. Na região entre as curvas, *No Interruption in Function Region*, espera-se que o equipamento opere normalmente. Abaixo da envoltória, *No Damage Region*, pode ocorrer falha na operação ou mau funcionamento. Acima da envoltória, *Prohibited Region*, o equipamento pode ser danificado [9].

Todas as ocorrências registradas no período de 3 anos, nas instalações da FECC, foram marcadas na curva ITI (CBEMA), como ilustrado na Figura 11, constatando-se que os seguintes incidentes excederam a tolerância: 10 *sags*, 3 *swells*, 3 interrupções e 52 transitórios.

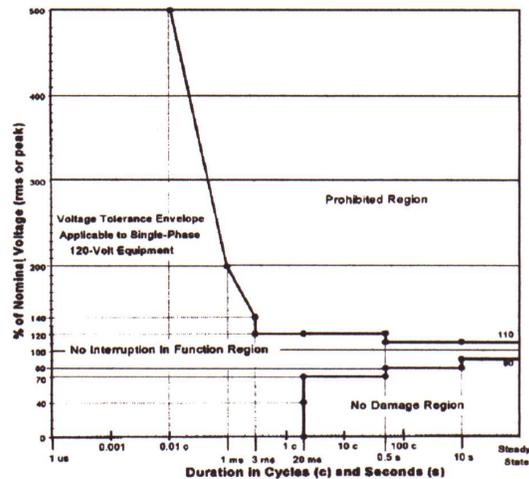


Fig. 10. Curva ITI (CBEMA).

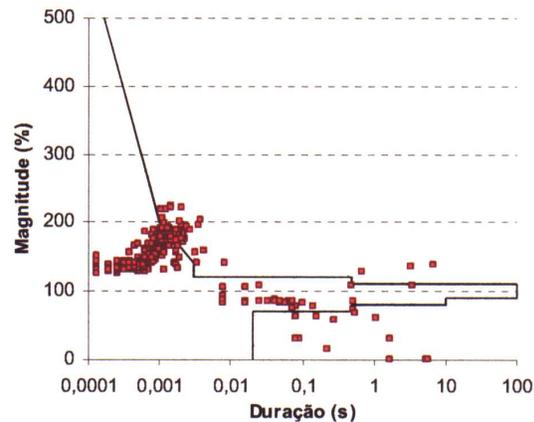


Fig. 11. Curva ITI (CBEMA) dos distúrbios ocorridos entre 2004 e 2007.

V. CONCLUSÕES

Ao longo deste trabalho pode-se constatar que o sistema de iluminação através de lâmpadas fluorescentes de 32 W com reator eletrônico e luminárias refletoras é comprovadamente eficiente quanto à conservação de energia, entretanto a distorção que ele provoca nas correntes pode se tornar preocupante.

Para grandes consumidores tornou-se quase imprescindível equiparem-se com um sistema de medição para monitorar a rede elétrica. Os registros de tipos de ocorrências são extremamente importantes para a identificação dos possíveis problemas causados em equipamentos elétricos e para se tomar ações corretivas/preditivas eficientes.

Constata-se que as ocorrências de *swell* que excedem a tolerância são bem inferiores às de *sags*, corroborando com as descrições da literatura.

Este projeto piloto poderá servir de base para a implantação de um sistema geral de medição e monitoramento no campus da universidade, providência essa que já se encontra parcialmente prevista no Plano Diretor da Unicamp com a implantação de 10 Centros de Medições (CM) e 1 Centro de Operação e Monitoramento (COM).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FINEP e ao CNPq pelo suporte financeiro e ao Engenheiro Vicente José Costa Vale, da Coordenadoria de Infra-estrutura da Unicamp, pelo apoio técnico.

REFERÊNCIAS

- [1] *ION 7600: User's Guide*, Power Measurement, Canada, May 2003.
- [2] CPFL Energia, *Serviços Online: Taxas e tarifas*. Disponível em: <http://agencia.cpfl.com.br/portal-servicos/paulista/taxas_tarifas.asp>. Acesso em: 15 de Outubro de 2007.
- [3] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, McGraw-Hill, 2nd Edition, New York, USA, 2002.
- [4] J. L. Afonso, J. S. Martins, "Qualidade da Energia Elétrica", *Revista o Electricista*, ano 3, no. 9, pp. 66-71, 3^o trimestre de 2004.
- [5] D. Chapman, *Power Quality Application Guide – Harmonics: Causes and Effects*, Copper Development Association, United Kingdom, November 2001.
- [6] H. Moreno, *Harmônicas nas Instalações Elétricas: Causas, Efeitos e Soluções*, Procobre – Instituto Brasileiro do Cobre, 1^a edição, São Paulo, SP, Brasil, Novembro de 2001.
- [7] S. Volut, J. Schonek, *Electrical Installation Guide According to IEC International Standards*, Schneider Electric, France, September 2007.
- [8] Information Technology Industry Council (ITI), *ITI (CBEMA) Curve Application Note*, Washington DC, USA, 2000. Disponível em: <<http://www.itic.org/archives/iticurv.pdf>>. Acesso em: 11 de Setembro de 2007.
- [9] J. Arrillaga, M. H. J. Bollen, N. R. Watson, "Power Quality Following Deregulation", *Proceedings of the IEEE*, vol. 88, no. 2, pp. 246-261, February 2000.

BIOGRAFIAS

Caio Gomes de Oliveira. Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (2006). Atualmente realiza Mestrado na Universidade Estadual de Campinas. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência, atuando principalmente no seguinte tema: Qualidade de Energia Elétrica.

Fujio Sato. Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (1995). Atualmente é Professor Assistente Doutor MS3 da Universidade Estadual de Campinas. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência, atuando principalmente nos seguintes temas: Proteção de Sistemas de Energia Elétrica e Análise de Curto-Circuito Probabilístico.

Ernesto Ruppert Filho. Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (1983) e Pós-doutor pela Canadian General Electric (1988). Atualmente é Professor Titular MS-6 da Universidade Estadual de Campinas. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Eletrônica Industrial, Sistemas e Controles Eletrônicos, atuando principalmente nos seguintes temas: Geradores Coerentes, Equivalentes Dinâmicos, Estabilidade e Geradores.

Marcio Massakiti Kubo. Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (2000). Atualmente é Doutorando da Universidade Estadual de Campinas. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Eletrônica Industrial, Sistemas e Controles Eletrônicos, atuando principalmente nos seguintes temas: Máquinas Elétricas, Modelo Matemático Dinâmico, Determinação de Parâmetros e Conjugado Oscilante.

Apêndice D

Trabalho publicado no CBA 2008

Segue anexo o trabalho publicado:

- OLIVEIRA, Caio Gomes de; SATO, Fujio; RUPPERT FILHO, Ernesto; KUBO, Marcio Masakiti. Análise da eficiência energética e da qualidade de energia elétrica na Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Unicamp. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 17. (CBA 2008), 2008, Juiz de Fora. *Anais...* Juiz de Fora: UFJF, 2008. 1 CD-ROM.

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA NA FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO DA UNICAMP

CAIO GOMES DE OLIVEIRA*, FUJIO SATO*, ERNESTO RUPPERT FILHO*, MARCIO MASSAKITI KUBO*

* *Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)*
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC)
Av. Albert Einstein, 400 - Campinas, SP, Brasil

Emails: caio@dsee.fee.unicamp.br, sato@dsee.fee.unicamp.br,
ruppert@dsce.fee.unicamp.br, massakit@dsce.fee.unicamp.br

Abstract— This paper describes the results of the electrical energy efficiency and power quality evaluation done in the Electrical and Computer Engineering School of the Campinas State University (Unicamp) in São Paulo State, Brazil through the Project named Ecogera. The analysis was based on the electrical signals acquired in the switchgear of the Students Classroom Building using measurement and energy management instruments. The replacement of the old lightning system using 40 W old fashion fluorescent bulbs mounted on non reflective fixtures by new energy save fluorescent bulbs mounted on reflective fixtures reduced expressively the electrical energy consumption and the installation electrical power demand. The measurements allowed to know the details of harmonic distortions and disturbances that affect the voltage magnitude as sags, swells and transients.

Keywords— Energy Efficiency, Measurements, Power Quality.

Resumo— Este trabalho descreve os resultados da análise da eficiência energética e da qualidade de energia elétrica na Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Unicamp, inserido em um projeto piloto denominado Projeto Ecogera. A análise é baseada em dados de grandezas elétricas coletados por instrumentos de medição e gerenciamento de energia nos blocos de salas de aulas da faculdade. Em termos de eficiência energética a substituição do sistema de iluminação antigo constituído de luminárias não refletoras com lâmpadas fluorescentes tubulares de 40 W por novas luminárias com refletor espelhado possibilitou uma redução significativa do consumo de energia elétrica e da demanda. Quanto à qualidade de energia as medições permitiram a caracterização das distorções harmônicas e das perturbações que afetam a amplitude da tensão, como afundamentos e elevações (*sags e swells*) e transitórios.

Palavras-chave— Eficiência Energética, Medições, Qualidade de Energia Elétrica.

1 Introdução

A Unicamp é considerada um dos grandes consumidores da Região Metropolitana de Campinas, com consumo mensal variando entre 4.700 e 6.100 MWh e demanda em torno de 18 MW. É atendida em 11,95 kV por uma subestação de 138/11,95 kV da Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL) com um transformador de potência exclusivo de 25 MVA e a distribuição da energia elétrica é feita através de cinco alimentadores.

Como qualquer outro grande consumidor, a Unicamp apresenta alguns problemas pertinentes a um sistema elétrico de grande porte. Com isso, iniciou-se a implementação de um projeto piloto para avaliar a eficiência energética através de um programa de uso racional de energia elétrica e de exploração de fontes alternativas de energia elétrica.

2 Projeto Ecogera

O Projeto Ecogera, financiado pela FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos) e administrado pela FEEC (Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação) e pelo NIPE (Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético da Unicamp), contempla dois módulos: conservação de energia

e geração de energia elétrica através de fontes alternativas de energia (neste caso, especificamente, o gás natural).

Este trabalho descreve somente o primeiro módulo, que tem por objetivo realizar a avaliação da eficiência energética da Unicamp a partir de uma célula inicial de trabalho, composta de quatro unidades de consumo de energia elétrica características da universidade em relação ao tipo de atividade realizada em cada uma delas, focado na redução do consumo de energia elétrica em iluminação.

2.1 Unidades de consumo

A célula inicial de trabalho é subdividida em: uma unidade administrativa, um prédio utilizado apenas por salas de aulas, uma instituição de ensino e uma unidade hospitalar.

Em geral, cada uma das unidades é alimentada por mais de um transformador. Pelo fato de não haver medidores em quantidade suficiente para serem instalados em todos os quadros de distribuição existentes em cada uma delas, escolheu-se quadros de distribuição significativos do ponto de vista do consumo de energia elétrica das cargas a eles ligadas.

As unidades de consumo avaliadas foram: DGA (Diretoria Geral da Administração), uma unidade de natureza puramente administrativa; PB (Ciclo Básico II), um prédio somente com salas de aulas; FEEC (Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação), uma instituição de ensino, pesquisa e extensão completa; e CAISM (Centro de Atenção Integral à Saúde da Mulher), uma unidade hospitalar, com dois medidores: um na Diretoria Administrativa (RH) e outro na Central de Materiais e Esterilização (CME).

2.2 Estudo preliminar

Antes da aquisição das novas luminárias fez-se um breve estudo no bloco de sala de aula da FEEC usando os critérios da ABNT presentes na NBR 5413 (Iluminância de Interiores).

Com base nesse estudo e na necessidade de economia de energia optou-se pela substituição das luminárias de dois reatores eletromagnéticos com quatro lâmpadas de 40 W por luminárias com refletor espelhado, duas lâmpadas de 32 W e um reator eletrônico. Os resultados dos ensaios em laboratório são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1: Ensaio dos reatores.

Reator Eletromagnético (4 lâmpadas de 40 W)	Reator Eletrônico (2 lâmpadas de 32 W)
U : 220,03 V	U : 220,93 V
I : 0,9842 A	I : 0,2862 A
P : 162,13 W	P : 60,30 W
fp : 0,7486	fp : 0,9535
U_{fund} : 219,98 V	U_{fund} : 220,83 V
I_{fund} : 0,9736 A	I_{fund} : 0,2747 A
$THDu$: 2,20%	$THDu$: 3,00%
$THDi$: 14,81%	$THDi$: 14,27%

2.3 Impactos previstos

A partir dos resultados, comparando os dois tipos de luminárias, estimou-se uma redução do consumo de energia elétrica na ordem de 30% com as substituições e a instalação de sensores de presença nas salas de aulas, além de melhora do fator de potência. Foram realizadas medições de intensidade luminosa em diversos pontos importantes das salas de aulas verificando-se que o nível de iluminância dessas, com o uso das luminárias novas, estavam de acordo com as tabelas constantes da norma NBR 5413. Os sensores de presença diminuem o consumo de energia elétrica, porque evitam que as lâmpadas das salas permaneçam acesas quando não há pessoas no ambiente.

3 Descrição dos medidores utilizados

Para a aquisição dos dados foram adquiridos seis medidores *ION 7600* da *Power Measurement*, os

quais possuem medição *true RMS* de tensão, corrente, potência e energia e têm a capacidade de registro de eventos e medições para o monitoramento da qualidade de energia elétrica (*ION 7600: User's Guide*, 2003). Estes medidores são gerenciados pelo *software ION Enterprise*, o qual processa, analisa, armazena e compartilha as informações coletadas da rede, e que é composto por dois programas principais: *ION Vista* e *ION Reporter*.

O primeiro é um aplicativo de visualização, análise e controle, que fornece uma visão gráfica do sistema, possibilitando a observação de dados instantâneos dos medidores de energia ou de dados históricos do banco de dados. São registradas grandezas como tensão, corrente, potência, fator de potência, frequência e índices de qualidade de energia, e eventos do tipo *sag*, *swell* e transitórios.

O segundo permite a definição e a criação de relatórios baseados nas informações do banco de dados provenientes do monitoramento da rede. Há alguns relatórios pré-configurados como Qualidade de Energia, Perfil de Carga e Energia e Demanda, que podem ser emitidos sob pedido do usuário, mas também é possível gerar relatórios personalizados com os dados armazenados.

4 Medições e resultados

Este trabalho apresenta as medições e resultados obtidos somente da FEEC, visto que é a única unidade consumidora, até o momento, na qual todas as medições antes e após a troca das luminárias foram efetuadas. Nas outras unidades as instalações estão em fase de conclusão.

4.1 Conservação de energia

Os perfis anuais das cargas antes e após a substituição das luminárias e a instalação dos sensores de presença são mostrados nas Figuras 1 a 3. Em 2006, por problemas operacionais o medidor ficou inativo. A troca das luminárias ocorreu entre abril e maio de 2005, a qual pode ser verificada pela Figura 2. Nota-se, comparando os anos de 2004 e 2007, que houve uma queda da demanda da ordem de 26,4 kW para 18,1 kW, alcançando 31,8% de redução. Percebe-se também a melhora do fator de potência, dada pela queda da potência reativa envolvida.

As Tabelas 2 e 3 mostram as comparações de energia e demanda de 4 meses de atividades intensas na FEEC.

Baseando-se nas medições e utilizando a tarifa verde A4 da CPFL (*CPFL Energia: Taxas e tarifas*, 2007) estimou-se que a FEEC, só nos blocos de salas de aulas, teria um gasto anual com energia elétrica em torno de R\$ 22.000,00 antes e de R\$ 15.000,00 após a troca das luminárias, significando uma redução de gastos de 32%.

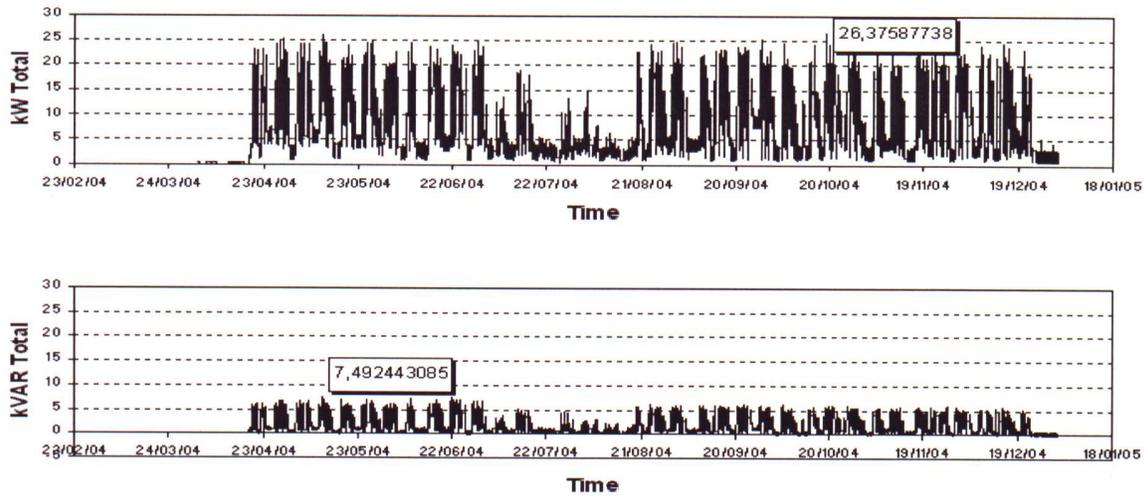


Figura 1: Perfil da Carga em 2004.

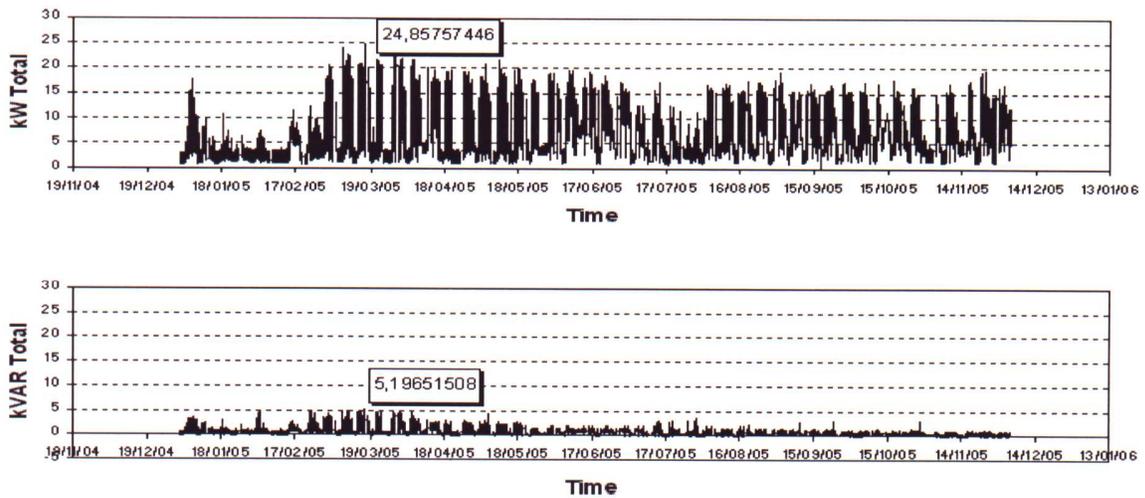


Figura 2: Perfil da Carga em 2005.

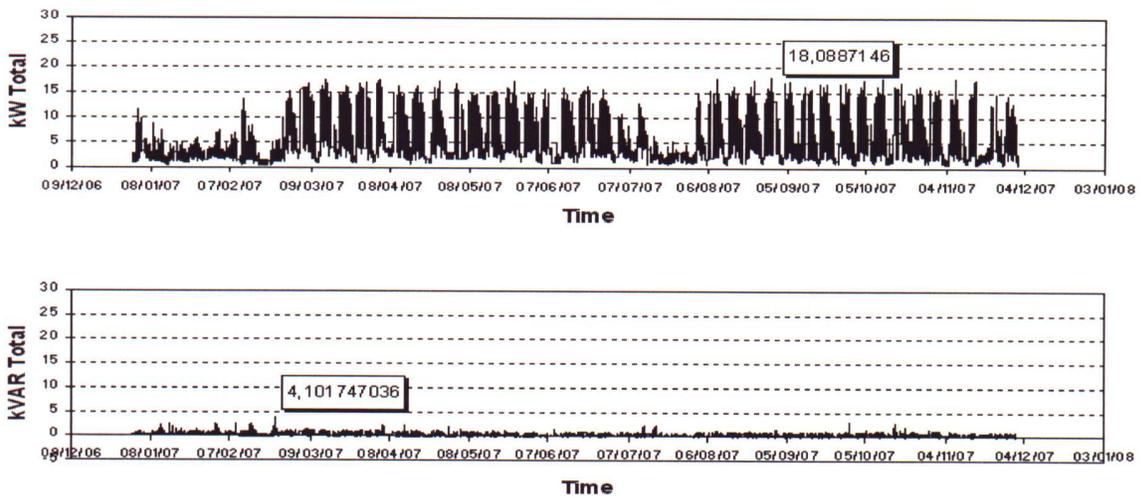


Figura 3: Perfil da Carga em 2007.

Tabela 2: Energia total (kWh).

	2004	2007	Redução
Maio	7388,08	4825,73	34,7%
Junho	6868,99	4228,18	38,4%
Setembro	7164,60	4225,04	41,0%
Outubro	6648,04	4738,70	28,7%

Tabela 3: Demanda máxima (kW).

	2004	2007	Redução
Maio	25,79	17,31	32,9%
Junho	25,17	16,27	35,4%
Setembro	25,38	17,09	32,7%
Outubro	26,38	17,77	32,6%

4.2 Qualidade de energia elétrica

A Qualidade de Energia Elétrica está relacionada às alterações que podem ocorrer no sistema elétrico. De acordo com Dugan et al. (2002), a definição de problemas relacionados à QEE é: “Qualquer problema de energia manifestado na tensão, corrente ou nas variações de frequência que resulte na falha ou má operação de equipamentos dos consumidores”.

Estes problemas vêm se agravando ao longo dos anos devido principalmente às seguintes razões:

- Aumento do número de cargas não-lineares, que elevam o nível de harmônicas na rede;
- Maior sensibilidade dos equipamentos, cada vez mais baseados em microprocessadores e componentes de eletrônica de potência;
- Grande interconexão da rede elétrica, na qual a falha de um componente gera consequências maiores e mais graves.

Há, portanto, um crescente interesse no estudo de fenômenos relacionados à qualidade de energia, já que seus conseqüentes problemas geram impactos econômicos tanto para as concessionárias de energia elétrica como para os consumidores finais (Dugan et al., 2002; Afonso and Martins, 2004).

O foco desta parte do trabalho está na análise dos seguintes distúrbios: harmônicas e perturbações na amplitude da tensão.

4.2.1 Análise das harmônicas

- Espectro harmônico

As lâmpadas fluorescentes com reator eletrônico, por serem mais econômicas, tornaram-se populares recentemente, entretanto têm como grande desvantagem o fato de produzirem harmônicas na corrente (Chapman, 2001). As Figuras 4 e 5 mostram, respectivamente, as formas de ondas das correntes trifásicas e seu espectro harmônico observados no ponto de medição da FEEC no dia

27/02/2008 às 10:40 h. A ordenada foi limitada em 20% para melhorar a visualização do espectro harmônico. A presença das lâmpadas fluorescentes com reatores eletrônicos fica evidenciada nas formas de onda das correntes e na predominância de harmônicas ímpares.

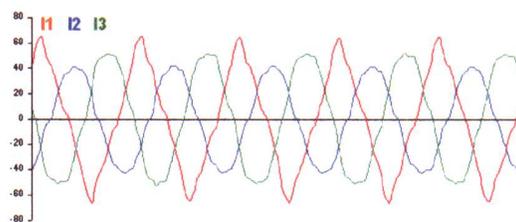


Figura 4: Forma de onda da corrente no dia 27/02/08 às 10:40.

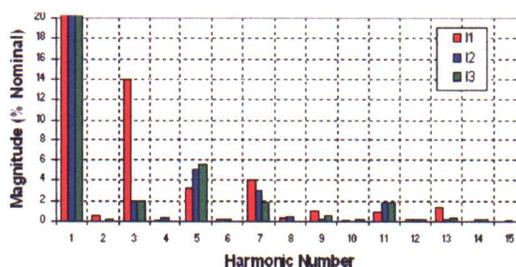


Figura 5: Espectro harmônico da corrente no dia 27/02/08 às 10:40.

É importante lembrar que a distorção na corrente é provocada pela carga, ao passo que a distorção na tensão é consequência da primeira (Moreno, 2001). Nas Figuras 6 e 7 são vistas as formas de onda das tensões trifásicas e seu espectro harmônico.

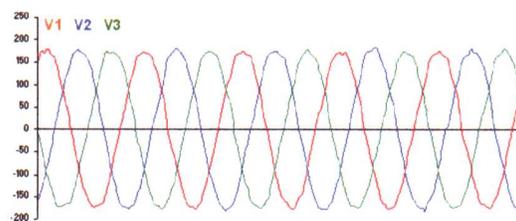


Figura 6: Forma de onda da tensão no dia 27/02/08 às 10:40.

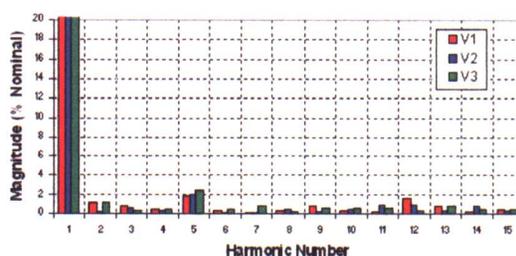


Figura 7: Espectro harmônico da tensão no dia 27/02/08 às 10:40.

- Taxa de distorção harmônica total

A taxa de distorção harmônica total, THD (“Total Harmonic Distortion”) é um índice de desempenho amplamente utilizado para quantificar o conteúdo harmônico de um sinal distorcido. Para um sinal Y , a THD é definida como:

$$THD_Y = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} Y_h^2}}{Y_1} \quad (1)$$

Esta definição está de acordo com a Norma IEC 61000-2-2, a qual também especifica que h (ordem da harmônica) pode ser limitada a 50. Esta taxa permite avaliar, através de um único número, a distorção que afeta a corrente ou a tensão num determinado ponto da rede.

A Figura 8 mostra a taxa de distorção harmônica da tensão durante os dias de uma semana de agosto de 2007. Observa-se nas três fases, que seu valor é adequado, pois permanece abaixo de 5%.

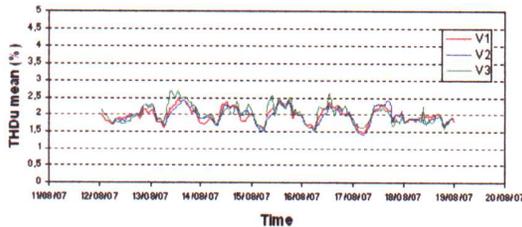


Figura 8: THDu em uma semana de agosto de 2007.

Já no caso das correntes (Figura 9) nota-se um nível considerável de poluição harmônica na fase 1 que chega a superar 50%, e uma poluição harmônica significativa nas fases 2 e 3, visto que elas se mantêm entre 10 e 50% (Volut and Schonek, 2007).

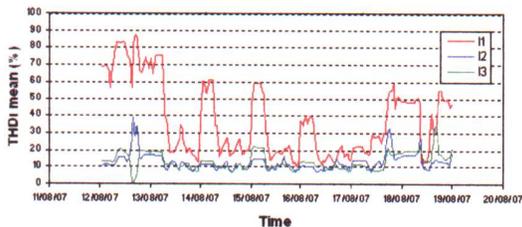


Figura 9: THDi em uma semana de agosto de 2007.

4.2.2 Análise das perturbações na amplitude da tensão

São feitas análises das características do afundamento (*sag*) e da elevação (*swell*) de tensão e da sobretensão transitória.

Um *sag* é uma queda da tensão eficaz entre 0,1 e 0,9 pu, na frequência do sistema, com duração entre 0,5 ciclo e 1 minuto, que tem como

principais causas um curto-circuito no sistema de potência e a partida de cargas de potência elevada. Este tipo de perturbação pode causar grandes transtornos às plantas industriais modernas face à intensa utilização de equipamentos eletrônicos sensíveis à variação de tensão, tais como: dispositivos de eletrônica de potência, computadores, CLPs, robôs, dispositivos de proteção e controle e outros (McGranaghan et al., 1993). A Figura 10 mostra um *sag* de 68% com duração aproximada de 33 ciclos, provocado por um curto-circuito trifásico na rede de 11,95 kV.

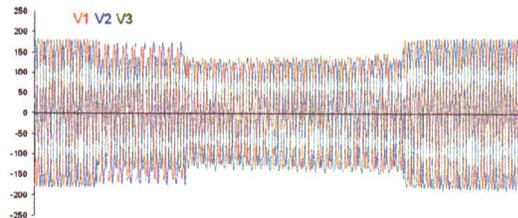


Figura 10: *Sag* ocorrido em 08/01/2006 às 18:25:37.

Um *swell* é um aumento da tensão eficaz entre 1,1 e 1,8 pu, na frequência do sistema, com duração entre 0,5 ciclo e 1 minuto. Embora não tão comuns quanto os *sags*, os *swells* são geralmente associados às ocorrências de curtos-circuitos no sistema, como em faltas monofásicas, nas quais as fases não envolvidas estão sujeitas a elevações de tensão (Dugan et al., 2002). A Figura 11 apresenta um *swell* de 137% com duração aproximada de 6,8 segundos, provocado por um curto-circuito monofásico na rede de 11,95 kV.

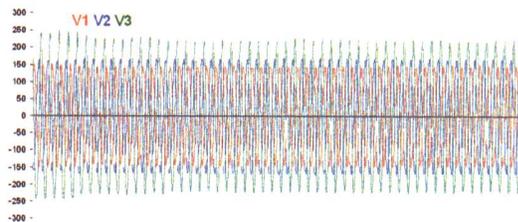


Figura 11: *Swell* ocorrido em 23/04/2004 às 13:36:26.

A sobretensão transitória, também chamada de transitório ou impulso transitório, é um fenômeno eletromagnético oriundo de alterações súbitas nas condições de operação do sistema elétrico, e pode ser classificado como impulsivo (descarga atmosférica) ou oscilatório (chaveamento de capacitores) (Afonso et al., 2005). A Figura 12 mostra um transitório de 190% da tensão nominal de pico (este valor não é visível no gráfico, porém é uma informação registrada no relatório analítico) com duração aproximada de 1,37 ms, devido, provavelmente, ao chaveamento de banco de capacitores na rede de 11,95 kV.

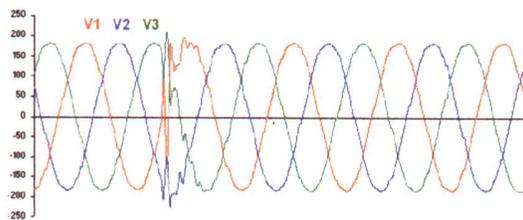


Figura 12: Transitório ocorrido em 07/02/2005 às 08:58:44.

A curva ITI (CBEMA) descreve uma envoltória para a tensão CA de entrada tolerada pela maioria dos equipamentos de tecnologia de informação sem perda de função de trabalho (*ITI (CBEMA) Curve Application Note*, 2000). Todas as ocorrências relativas a *sags*, *swells*, interrupções e transitórios no período de 3 anos, nas instalações da FEEC, foram marcadas nela, como ilustrado na Figura 13, constatando-se que os seguintes incidentes excederam a tolerância: 10 *sags*, 3 *swells*, 3 interrupções e 52 transitórios.

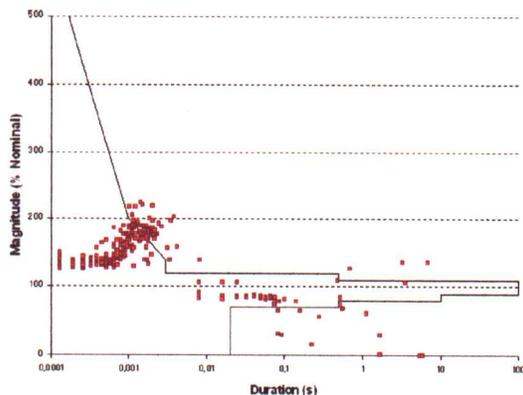


Figura 13: Curva ITI (CBEMA) dos distúrbios ocorridos entre 2004 e 2007.

5 Conclusões

Ao longo deste trabalho pode-se constatar que o sistema de iluminação através de lâmpadas fluorescentes de 32 W com reator eletrônico e luminárias refletoras é comprovadamente eficiente quanto à conservação de energia, entretanto a distorção que ele provoca nas correntes pode se tornar preocupante.

Para grandes consumidores tornou-se quase imprescindível equiparem-se com um sistema de medição para monitorar a rede elétrica. Os registros de tipos de ocorrências são extremamente importantes para a identificação dos possíveis problemas causados em equipamentos elétricos e para se tomar ações corretivas/preventivas eficientes.

Constata-se que as ocorrências de *swell* que excedem a tolerância são bem inferiores às de *sags*, corroborando com as descrições da literatura.

Este projeto piloto poderá servir de base para a implantação de um sistema geral de medição e monitoramento no campus da universidade, providência essa que já se encontra parcialmente prevista no Plano Diretor da Unicamp com a implantação de 10 Centros de Medições (CM) e 1 Centro de Operação e Monitoramento (COM).

Agradecimentos

Os autores agradecem à FINEP e ao CNPq pelo suporte financeiro e ao Engenheiro Vicente José Costa Vale, da Coordenadoria de Infra-estrutura da Unicamp, pelo apoio técnico.

Referências

- Afonso, J. L. and Martins, J. S. (2004). Qualidade da energia eléctrica, *Revista o Electricista* . no. 9, pp. 66-71.
- Afonso, J. L., Sousa, T. A., Pregitzer, R. L. and Martins, J. S. (2005). Qualidade da energia eléctrica: Casos reais, *Revista o Electricista* . no. 12, pp. 20-23.
- Chapman, D. (2001). *Power Quality Application Guide - Harmonics: Causes and effects*, Copper Development Association, United Kingdom.
- CPFL Energia: *Taxas e tarifas* (2007). CPFL Energia, viewed 15 October 2007, <http://agencia.cpfl.com.br/portal-servicos/paulista/taxas_tarifas.asp>.
- Dugan, R. C., McGranaghan, M. F., Santoso, S. and Beaty, H. W. (2002). *Electrical Power Systems Quality*, 2nd edn, McGraw-Hill, New York.
- ION 7600: *User's Guide* (2003). Power Measurement, Canada.
- ITI (CBEMA) *Curve Application Note* (2000). Information Technology Industry Council (ITI), Washington DC, viewed 11 September 2007, <<http://www.itic.org/archives/iticurv.pdf>>.
- McGranaghan, M. F., Mueller, D. R. and Samotyj, M. J. (1993). Voltage sags in industrial systems, *IEEE Transactions on Industry Applications* . vol. 29, no. 2, pp. 397-403.
- Moreno, H. (2001). *Harmônicas nas Instalações Elétricas: Causas, Efeitos e Soluções*, 1st edn, Procobre - Instituto Brasileiro do Cobre, São Paulo, SP, Brazil.
- Volut, S. and Schonek, J. (2007). *Electrical Installation Guide According to IEC International Standards*, september edn, Schneider Electric, France.

Apêndice E

Trabalho publicado no AGRENER GD 2008

Segue anexo o trabalho publicado:

- OLIVEIRA, Caio Gomes de; SATO, Fujio; RUPPERT FILHO, Ernesto; KUBO, Marcio Masakiti. Implantação de um programa de conservação e qualidade de energia elétrica na Unicamp. In: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E ENERGIA NO MEIO RURAL, 7. (AGRENER GD 2008), 2008, Fortaleza. *Anais...* Fortaleza: UNIFOR, 2008. 1 CD-ROM.

IMPLANTAÇÃO DE UM PROGRAMA DE CONSERVAÇÃO E QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA NA UNICAMP

CAIO GOMES DE OLIVEIRA
FUJIO SATO
ERNESTO RUPPERT FILHO
MARCIO MASSAKITI KUBO

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação / Caixa Postal nº6101
Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético – NIPE
Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP
13083-970, Campinas, SP, Brasil
E-mail: caio@dsee.fee.unicamp.br, sato@dsee.fee.unicamp.br,
ruppert@dsce.fee.unicamp.br, massakit@dsce.fee.unicamp.br

Resumo

Este trabalho descreve os resultados da análise da conservação e da qualidade de energia elétrica na Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), inserido em um projeto piloto denominado Projeto Ecogera. A análise é baseada em dados de grandezas elétricas coletados por instrumentos de medição, monitoração e gerenciamento de energia. Em termos de eficiência energética a substituição do sistema de iluminação antigo constituído de luminárias não refletoras com lâmpadas fluorescentes tubulares de 40 W por novas luminárias com refletor espelhado possibilitou uma redução significativa do consumo de energia elétrica e da demanda. Quanto à qualidade de energia as medições permitiram a caracterização das distorções harmônicas e de perturbações que afetam a amplitude da tensão.

Abstract

This paper describes the results of the electrical energy conservation and power quality evaluation done in the University of Campinas (Unicamp) in São Paulo State, Brazil through the Project named Ecogera. The analysis was based on the electrical signals acquired using measurement and energy management instruments. The replacement of the old lightning system using 40 W old fashion fluorescent bulbs mounted on non reflective fixtures by new energy save fluorescent bulbs mounted on reflective fixtures reduced expressively the electrical energy consumption and the installation electrical power demand. The measurements allowed to know the details of harmonic distortions and disturbances that affect the voltage magnitude.

1. Introdução

Em 2001, devido à crise de energia elétrica, o governo federal criou a Câmara de Gestão da Crise de Energia Elétrica (CGCE), que teve a finalidade de administrar a oferta de eletricidade mediante racionamento de 20%, entre junho de 2001 e fevereiro de 2002, especialmente nas regiões Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste (PÊGO FILHO *et al.*, 2001).

Após a crise, ficou patente a necessidade do uso racional da energia elétrica pelos vários segmentos da sociedade. Assim, na Unicamp iniciou-se a implementação de um projeto piloto para avaliar a eficiência energética através de um programa de uso racional de energia elétrica e de exploração de fontes alternativas de energia elétrica.

A Unicamp é considerada um dos grandes consumidores da Região Metropolitana de Campinas, com consumo mensal variando entre 4.700 e 6.100 MWh e demanda em torno de 18 MW. É atendida em 11,95 kV por uma subestação de 138-11,95 kV da Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL) com um transformador de potência exclusivo de 25 MVA e a distribuição da energia elétrica é feita através de cinco alimentadores.

2. Projeto Ecogera

O Projeto Ecogera, financiado pela FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos) e administrado pela FEEC (Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação) e pelo NIPE (Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético da Unicamp), contempla dois módulos: conservação de energia e geração de energia elétrica através de fontes alternativas de energia (neste caso, especificamente, o gás natural).

Este trabalho descreve somente o primeiro módulo, que tem por objetivo realizar a avaliação da eficiência energética da Unicamp a partir de uma célula inicial de trabalho, composta de quatro unidades de consumo de energia elétrica características da universidade em relação ao tipo de atividade realizada em cada uma delas, focado na redução do consumo de energia elétrica em iluminação.

2.1 Unidades de consumo

A célula inicial de trabalho é subdividida em: uma instituição de ensino, um prédio utilizado apenas por salas de aulas e uma unidade hospitalar, contemplando também uma unidade administrativa.

Em geral, cada uma das unidades é alimentada por mais de um transformador. Pelo fato de não haver medidores em quantidade suficiente para serem instalados em todos os quadros de distribuição existentes em cada uma delas, escolheu-se quadros de distribuição significativos do ponto de vista do consumo de energia elétrica das cargas a eles ligadas.

As unidades de consumo avaliadas são: FEEC (Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação), uma instituição de ensino, pesquisa e extensão completa; PB (Ciclo Básico II), um prédio somente com salas de aulas; e CAISM (Centro de Atenção Integral à Saúde da Mulher), uma unidade hospitalar, com dois medidores: um na Central de Materiais e Esterilização (CME) e outro na Diretoria Administrativa (RH).

3. Monitoração e gerenciamento de energia elétrica

Para atender um crescente consumo de energia elétrica é preciso um grande esforço para manter um equilíbrio entre a demanda e a oferta. Isso implica na construção de mais usinas, subestações e linhas de transmissão, que além de um elevado custo, traz elevados impactos ambientais. Uma das atitudes para se minorar estes problemas é, sem dúvida, a adoção de programas de eficiência energética pelos consumidores.

A implantação de um programa dessa natureza requer uma infra-estrutura de sistemas de medição, instalando os equipamentos em cada área de interesse e interligando-os através de uma rede de comunicação, para a monitoração e o gerenciamento da energia elétrica. Isto permite efetuar ajustes quanto à energia e demanda, visualizar eventos de variação de tensão, avaliar a presença de harmônicas na rede, podendo, assim, realizar adequações no sistema (VENCESLAU, 2007).

Para o estudo proposto, faz-se, então, necessária a utilização de equipamentos que monitoram e gerenciam a energia elétrica da rede.

3.1 Descrição dos medidores utilizados

Neste projeto, optou-se pela aquisição de medidores *ION 7600* da *Power Measurement*, os quais possuem medição *true RMS* de tensão, corrente, potência e energia e têm a capacidade de registro de eventos e medições para o monitoramento da qualidade de energia elétrica (POWER MEASUREMENT, 2003). Estes medidores são gerenciados pelo *software ION Enterprise*, o qual processa, analisa, armazena e compartilha as informações coletadas da rede, e que é composto por dois programas principais: *ION Vista* e *ION Reporter*.

O primeiro é um aplicativo de visualização, análise e controle, que fornece uma visão gráfica do sistema, possibilitando a observação de dados instantâneos dos medidores de energia ou de dados históricos do banco de dados. São registradas grandezas como tensão, corrente, potência, fator de potência, frequência e índices de qualidade de energia, e eventos do tipo afundamento (*sag*) e elevação (*swell*) de tensão, e transitórios.

O segundo permite a definição e a criação de relatórios baseados nas informações do banco de dados provenientes da monitoração da rede. Há alguns relatórios pré-configurados como Qualidade de Energia, Perfil de Carga e Energia e Demanda, que podem ser emitidos sob pedido do usuário, mas também é possível gerar relatórios personalizados a partir dos dados armazenados.

4. Medições e resultados

As medições e os resultados deste trabalho estão divididos em duas partes, a primeira englobando a conservação de energia e a segunda tratando da qualidade de energia elétrica.

4.1 Conservação de energia

Esta parte do trabalho apresenta as medições e resultados obtidos somente da FEEC, visto que é a única unidade consumidora, até o momento, na qual todas as medições antes e após a troca das luminárias foram efetuadas. Nas outras unidades as instalações estão em fase de conclusão.

4.1.1 Estudo preliminar

Antes da aquisição das novas luminárias fez-se um breve estudo no bloco de salas de aula da FEEC usando os critérios da ABNT presentes na NBR 5413 (Iluminância de Interiores).

Com base nesse estudo e na necessidade de economia de energia optou-se pela substituição das luminárias de dois reatores eletromagnéticos com quatro lâmpadas de 40 W por luminárias com refletor espelhado, duas lâmpadas de 32 W e um reator eletrônico. Os resultados dos ensaios em laboratório são mostrados na tabela 1.

Tabela 1. Ensaio dos reatores.

Reator Eletromagnético (4 lâmpadas de 40 W)	Reator Eletrônico (2 lâmpadas de 32 W)
U: 220,03 V	U: 220,93 V
I: 0,9842 A	I: 0,2862 A
P: 162,13 W	P: 60,30 W
fp: 0,7486	fp: 0,9535
U_{fund} : 219,98 V	U_{fund} : 220,83 V
I_{fund} : 0,9736 A	I_{fund} : 0,2747 A
THDu: 2,20%	THDu: 3,00%
THDi: 14,81%	THDi: 14,27%

4.1.2 Impactos previstos

A partir dos resultados, comparando os dois tipos de luminárias, estimou-se uma redução do consumo de energia elétrica na ordem de 30% com as substituições e a instalação de sensores de presença nas salas de aulas, além de melhora do fator de potência. Foram realizadas medições de intensidade luminosa em diversos pontos importantes das salas de aulas verificando-se que o nível de iluminância dessas, com o uso das luminárias novas, estavam de acordo com as tabelas constantes da norma NBR 5413. Os sensores de presença diminuem o consumo de energia elétrica, pois evitam que as lâmpadas das salas permaneçam acesas quando não há pessoas no ambiente.

4.1.3 Estrutura tarifária

A Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, por meio da Resolução nº456, de 29 de novembro de 2000, estabeleceu as condições de fornecimento de energia elétrica que devem ser seguidas pelas concessionárias e pelos consumidores.

Definiu-se o Grupo A, caracterizado pela estruturação tarifária binômia, como as unidades consumidoras com fornecimento de tensão igual ou superior a 2,3 kV, ou as atendidas por sistema subterrâneo de distribuição, mesmo abaixo de 2,3 kV. Também se definiu o Grupo B com estruturação tarifária monômia, compreendendo as unidades consumidoras de tensão inferiores a 2,3 kV e algumas superiores a este valor especificadas na própria resolução. Ambos os grupos são subdivididos, o primeiro de acordo com a tensão de fornecimento e o segundo conforme o tipo de consumidor.

Nomearam-se duas estruturas tarifárias: a convencional, cujas tarifas de consumo de energia e demanda de potência são independentes da hora de utilização e do período do ano; e a horo-sazonal, na qual as tarifas de consumo de energia variam de acordo com as horas de utilização no dia e o período do ano, e cujo custo de demanda varia de acordo com as horas de utilização no dia (Tarifa Azul) ou é único (Tarifa Verde).

Quanto ao período de utilização distingue-se o Horário de Ponta, intervalo de três horas diárias consecutivas, exceto para fins de semana e feriados nacionais, e o Horário Fora de Ponta, complementar ao anterior. Determinou-se o Período Seco, compreendendo os meses de maio a novembro, e o Período Úmido, abrangendo os outros meses.

Com base nessas definições, a Unicamp integra o Grupo A4, que engloba os consumidores atendidos com tensão de fornecimento entre 2,3 e 25 kV. Nos resultados a seguir aplicou-se a Tarifa Verde. A tabela 2 mostra os valores da Tarifa Verde A4 da CPFL, vigente em 2007. Na CPFL o horário de ponta abrange das 18 às 21h.

Tabela 2. Tarifa Verde A4 para o fornecimento de energia elétrica.

Demanda (R\$/kW)	Consumo (R\$/MWh)			
	Período Seco		Período Úmido	
	Ponta	Fora de Ponta	Ponta	Fora de Ponta
7,68	772,36	185,03	742,53	167,72

Fonte: CPFL Energia, 2007.

4.1.4 Efeito da substituição das luminárias

Os perfis anuais das cargas antes e após a substituição das luminárias e a instalação dos sensores de presença são mostrados nas figuras 1 a 3. Em 2006, por problemas operacionais o medidor ficou inativo. A troca das luminárias ocorreu entre abril e maio de 2005, a qual pode ser verificada pela figura 2. Nota-se, comparando os anos de 2004 e 2007, que houve uma queda da demanda da ordem de 26,4 kW para 18,1 kW, alcançando 31,8% de redução. Percebe-se também a melhora do fator de potência, dada pela queda da potência reativa envolvida.

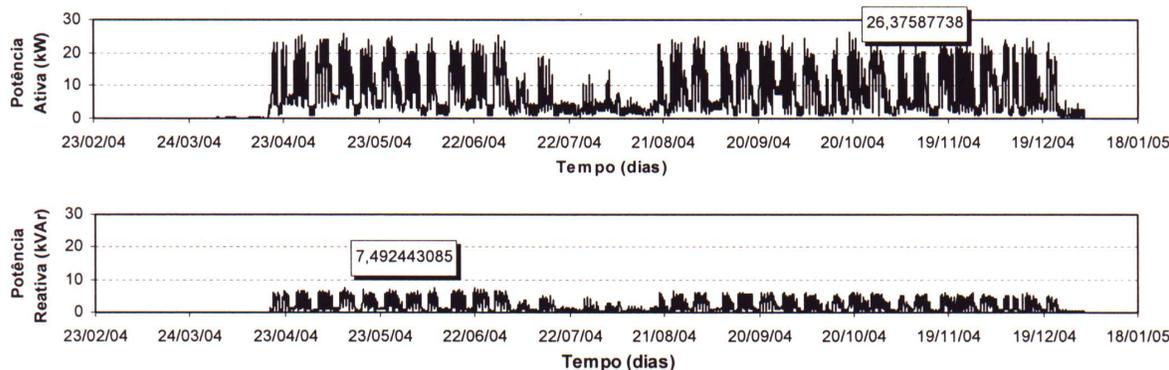


Figura 1. Perfil da Carga da FEEC em 2004.

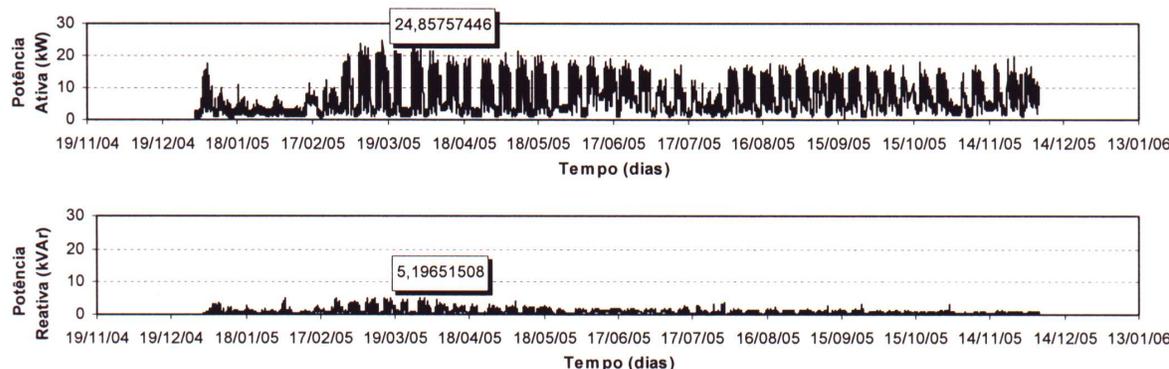


Figura 2. Perfil da Carga da FEEC em 2005.

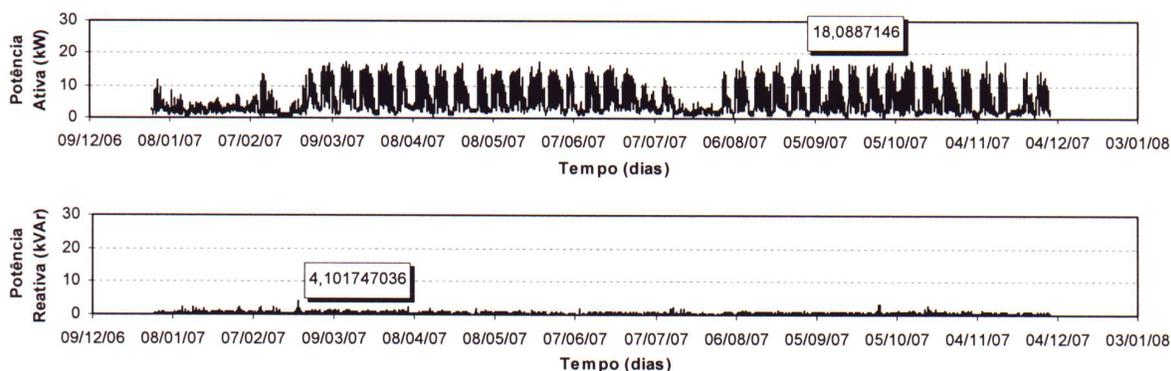


Figura 3. Perfil da Carga da FEEC em 2007.

Baseando-se nas medições e aplicando a tarifa da CPFL conforme a tabela 2, estimou-se que a FEEC, só nos blocos de salas de aulas, teria um gasto anual com energia elétrica em torno de R\$ 22.000,00 antes e de R\$ 15.000,00 após a troca das luminárias, significando uma redução de gastos de 32%.

As tabelas 3 e 4 mostram as comparações de energia e demanda de 4 meses de atividades intensas na FEEC.

Tabela 3. Energia total (kWh) na FEEC.

	2004	2007	Redução
Maio	7388,08	4825,73	34,7%
Junho	6868,99	4228,18	38,4%
Setembro	7164,60	4225,04	41,0%
Outubro	6648,04	4738,70	28,7%

Tabela 4. Demanda máxima (kW) na FEEC.

	2004	2007	Redução
Maio	25,79	17,31	32,9%
Junho	25,17	16,27	35,4%
Setembro	25,38	17,09	32,7%
Outubro	26,38	17,77	32,6%

4.2 Qualidade de energia elétrica

A Qualidade de Energia Elétrica está relacionada às alterações que podem ocorrer no sistema elétrico. De acordo com Dugan *et al.* (2002), a definição de problemas relacionados à QEE é: "Qualquer problema de energia manifestado na tensão, corrente ou nas variações de frequência que resulte na falha ou má operação de equipamentos dos consumidores".

Estes problemas vêm se agravando ao longo dos anos devido principalmente às seguintes razões:

- Aumento do número de cargas não-lineares, que elevam o nível de harmônicas na rede;
- Maior sensibilidade dos equipamentos, cada vez mais baseados em microprocessadores e componentes de eletrônica de potência;
- Grande interconexão da rede elétrica, na qual a falha de um componente gera conseqüências maiores e mais graves.

Há, portanto, um crescente interesse no estudo de fenômenos relacionados à qualidade de energia, já que seus conseqüentes problemas geram impactos econômicos tanto para as concessionárias de energia elétrica como para os consumidores finais (DUGAN *et al.*, 2002; AFONSO e MARTINS, 2004).

O foco desta parte do trabalho está na análise dos distúrbios relacionados a harmônicas e a perturbações na amplitude da tensão, nas diversas unidades estudadas.

4.2.1 Análise das harmônicas

As cargas presentes nas unidades de consumo analisadas podem ser divididas basicamente em três categorias: resistivas, indutivas e eletrônicas. No estudo de harmônicas as duas últimas são consideradas. Como carga indutiva tem-se os refrigeradores (aparelhos de ar condicionado, ventiladores e outros), que implicam em demanda de potência reativa e na produção de harmônicos pela distorção da corrente. As cargas eletrônicas (equipamentos computacionais, lâmpadas eletrônicas e outras) possuem um estágio retificador a diodos, com filtro capacitivo na saída, resultando em corrente de entrada distorcida e baixo fator de potência (POMILIO, 2007a).

- Espectro harmônico

Como a distorção na corrente é provocada pela carga, e a distorção na tensão é consequência da primeira (MORENO, 2001), torna-se mais relevante a análise harmônica das correntes. A figura 4 mostra as formas de onda e os espectros harmônicos das correntes nos pontos de medição no dia 28 de maio de 2008 às 16h. As ordenadas dos espectros harmônicos foram limitadas para se obter uma melhor visualização, sendo que a harmônica 1 trata-se da fundamental e tem valor 100%.

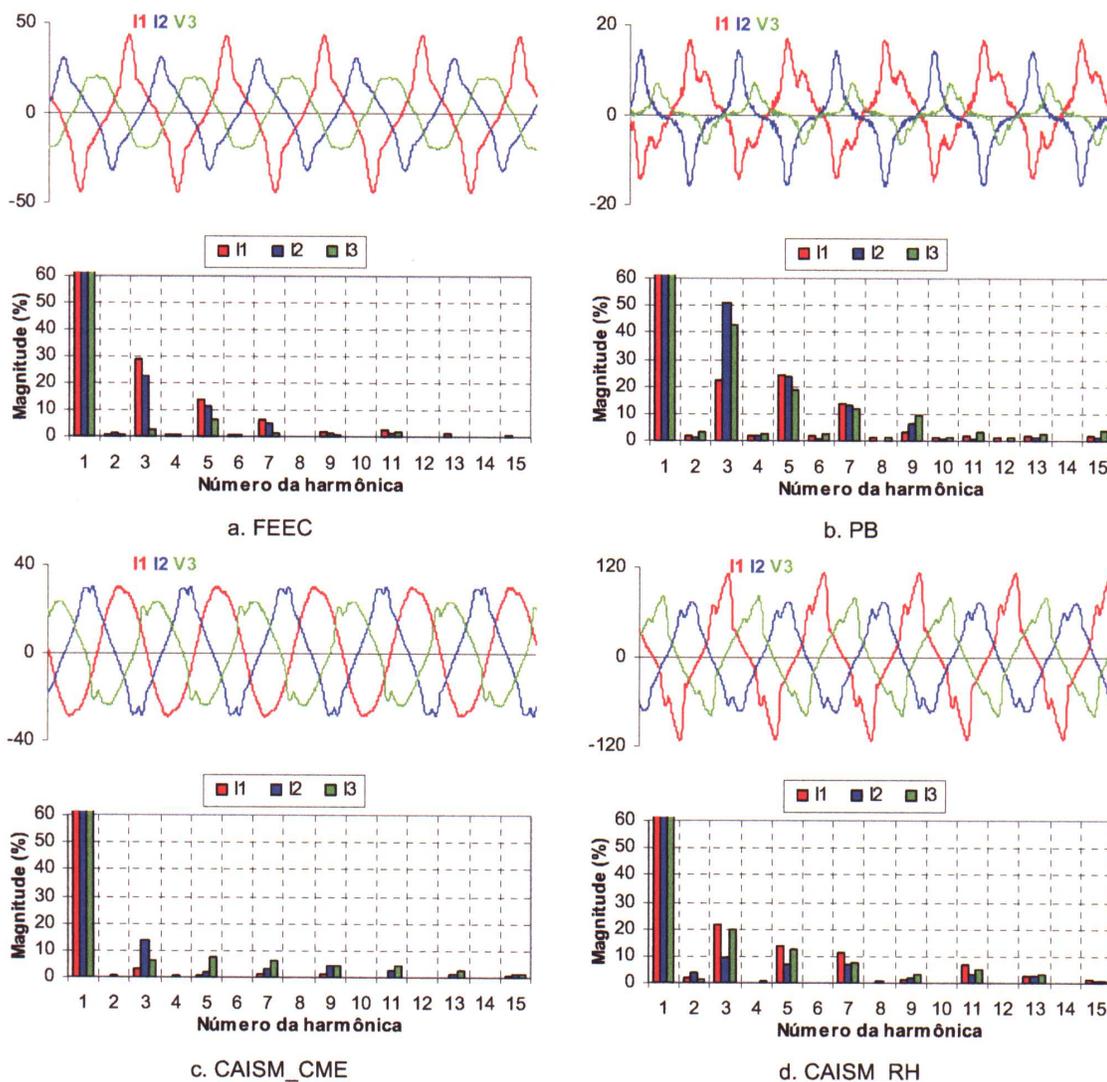


Figura 4. Formas de onda e espectros harmônicos das correntes no dia 28/05/08 às 16h.

As formas de onda das correntes têm um aspecto bem similar em todas as unidades, caracterizadas pela presença de cargas eletrônicas e cargas indutivas (POMILIO, 2007b). O espectro harmônico também revela o grande número destes tipos de carga, já que há a predominância das harmônicas ímpares. De fato, na FEEC as cargas presentes são lâmpadas, cujas luminárias têm reatores eletrônicos, equipamentos computacionais e aparelhos de ar-condicionado; o PB possui lâmpadas eletrônicas; no CAISM_CME há luminárias com reatores eletrônicos, equipamentos computacionais, aparelhos de ar-condicionado e equipamentos hospitalares tipicamente indutivos; e o CAISM_RH tem grande quantidade de luminárias com reator eletrônico, equipamentos computacionais e aparelhos de ar-condicionado.

- Taxa de distorção harmônica total

A taxa de distorção harmônica total, THD (*Total Harmonic Distortion*) é um índice de desempenho amplamente utilizado para quantificar o conteúdo harmônico de um sinal distorcido. Para um sinal Y , a THD é definida em (1):

$$THD_Y = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} Y_n^2}}{Y_1} \quad (1)$$

Em que:

THD_Y - Distorção harmônica total de Y .

Y_n - Magnitude da n -ésima harmônica.

Y_1 - Magnitude da fundamental.

Esta definição está de acordo com a Norma IEC 61000-2-2, a qual também especifica que n (ordem da harmônica) pode ser limitada a 50. Esta taxa permite avaliar, através de um único número, a distorção que afeta a corrente ou a tensão num determinado ponto da rede (VOLUT e SCHONEK, 2007).

A THD é freqüentemente utilizada para descrever a distorção harmônica da tensão, pois como a fundamental sofre pouca variação e as harmônicas são referenciadas a esta, a THD da tensão tende a não alterar significativamente. Não é comum analisar a THD da corrente, visto que é relevante para esta a magnitude e não necessariamente sua distorção. Um exemplo disto é a corrente de entrada de variadores de velocidade, bastante distorcida, mas de baixa magnitude. Avaliar a variação da THD ao longo de um período de tempo é importante para representar a atuação de cargas não-lineares no sistema. A observação por um período de uma semana já é suficiente para se obter resultados significativos em um ciclo (DUGAN *et al.*, 2002).

No Brasil ainda não há uma regulamentação sobre valores tolerados de THD, mas a ANEEL propõe que esta seja de no máximo 10% para tensões abaixo de 1 kV (POMILIO, 2006). A figura 5 mostra as taxas de distorção harmônica das tensões durante os dias de uma semana de maio de 2008.

Pela figura 5a nota-se que a distorção da tensão na FEEC permanece abaixo de 4%, estando dentro da recomendação. A distorção no PB, figura 5b, permite avaliar o período de maior carga não-linear, que corresponde aos horários das aulas (manhã, tarde e noite), e é condicionada às lâmpadas eletrônicas. A situação mais crítica ocorre no CAISM_CME, figura 5c, cuja THD_u , durante os dias da semana em seu horário de funcionamento (manhãs e tardes), supera a recomendação, chegando a quase 14% e indicando a grande presença de cargas não-lineares, como lâmpadas de reatores, aparelhos de ar-condicionado e equipamentos hospitalares. No CAISM_RH há um número considerável de cargas não-lineares, que injetam harmônicos na rede, provocando a distorção na tensão, notada na figura 5d, e bem delineada pelos picos entre segunda e sexta-feira das 8 às 18h.

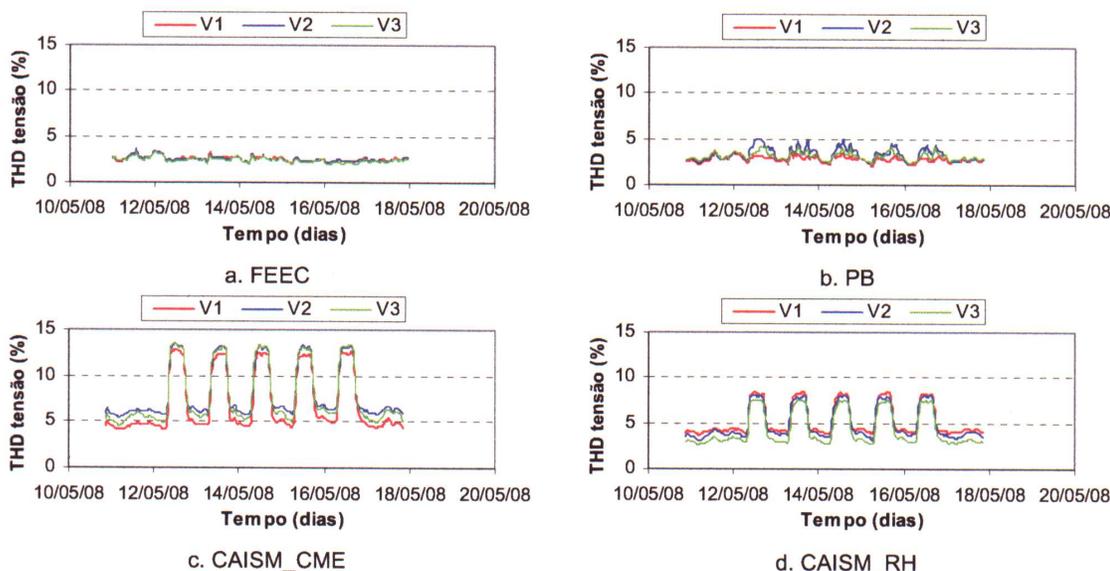


Figura 5. THDs das tensões em uma semana de maio de 2008.

4.2.2 Análise das perturbações na amplitude da tensão

A curva ITI (CBEMA) descreve uma envoltória para a tensão CA de entrada tolerada pela maioria dos equipamentos de tecnologia de informação sem perda de função de trabalho, podendo ser empregada tanto para regime permanente como para condições transitórias. Esta curva é aplicada para tensão nominal de 120 V e frequência de 60 Hz (INFORMATION TECHNOLOGY INDUSTRY COUNCIL (ITI), 2000).

A figura 6 mostra esta curva, que pode ser usada para avaliar a qualidade da tensão em um sistema de energia elétrica quanto a afundamentos (*sags*) e elevações (*swells*) de tensão, interrupções e transitórios. Na abscissa tem-se a duração do evento e na ordenada sua magnitude. Na região entre as curvas, *No Interruption in Function Region*, espera-se que o equipamento opere normalmente. Abaixo da envoltória, *No Damage Region*, pode ocorrer falha na operação ou mau funcionamento. Acima da envoltória, *Prohibited Region*, o equipamento pode ser danificado (ARRILLAGA *et al.*, 2000).

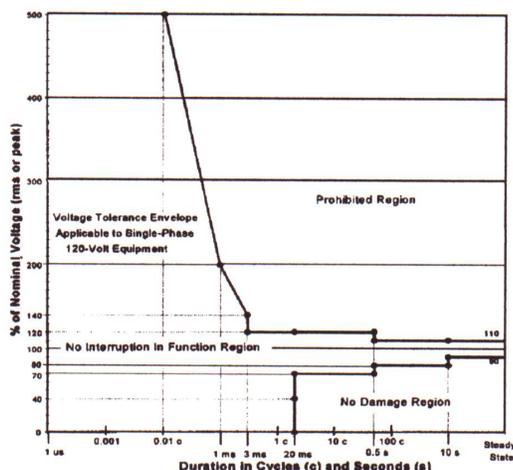


Figura 6. Curva ITI (CBEMA).

Fonte: INFORMATION TECHNOLOGY INDUSTRY COUNCIL (ITI), 2000.

As principais ocorrências registradas no mês de maio de 2008 foram marcadas na curva ITI (CBEMA), como ilustrado na figura 7. A tabela 5 mostra o número e a natureza dos distúrbios ocorridos em cada medidor.

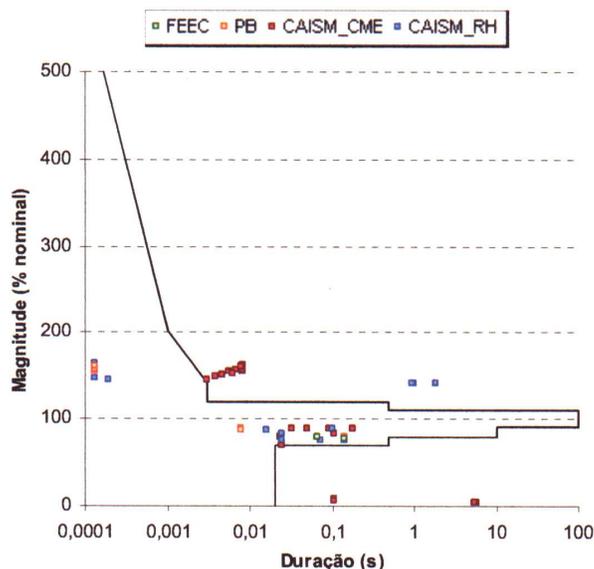


Figura 7. Curva ITI (CBEMA) dos distúrbios ocorridos no mês de maio de 2008.

Tabela 5. Distúrbios no mês de maio.

	FEEC	PB	CAISM_CME	CAISM_RH
Afundamento (<i>sag</i>)	3	5	52	10
Elevação (<i>swell</i>)	0	0	0	3
Interrupção	0	0	4	0
Transitório	34	145	122	38
Total de Distúrbios	37	150	178	51

É interessante ressaltar que na FEEC as perturbações ocorridas não foram de grande gravidade, permanecendo todas no interior da envoltória da curva ITI (CBEMA); o mesmo ocorrendo no PB, mesmo este tendo um número elevado de transitórios. Casos mais graves aconteceram no CAISM_CME, já que um afundamento de tensão e as quatro interrupções excederam a tolerância, provavelmente causando o desligamento de equipamentos, e 11 dos 122 transitórios ficaram acima da envoltória superior, o que pode ter levado a danos nos equipamentos. Quanto ao CAISM_RH os três casos de elevação de tensão ocorridos excederam a tolerância da curva ITI, o que talvez tenha provocado danos a equipamentos ligados à rede, e as outras perturbações permaneceram na região de tolerância. Visto isto, é importante salientar que, tratando-se de uma unidade hospitalar, o CAISM necessita de dispositivos de proteção adequados para que não haja nenhum problema aos equipamentos ligados aos seus quadros de distribuição.

Pela tabela 5, nota-se que é mais comum a ocorrência de afundamentos de tensão em relação a elevações, o que está de acordo com a literatura. O *sag* está associado principalmente a curtos-circuitos no sistema, à energização de cargas pesadas ou à partida de grandes motores. Já o *swell* acontece devido ao desligamento de grandes cargas, à energização de grandes bancos de capacitores, e também a faltas no sistema, dando-se nas fases não envolvidas de um curto-circuito monofásico, sendo, assim, menos comuns (DUGAN *et al.*, 2002).

5. Conclusões

Para grandes consumidores tornou-se quase imprescindível equiparem-se com um sistema de medição para monitorar a rede elétrica. Os registros dos tipos de ocorrências são extremamente importantes para a identificação dos possíveis problemas causados em equipamentos elétricos e para se tomar ações corretivas/preditivas eficientes.

Ao longo deste trabalho pode-se constatar que o sistema de iluminação através de lâmpadas fluorescentes de 32 W com reator eletrônico e luminárias refletoras é comprovadamente eficiente quanto à conservação de energia, entretanto a distorção que ele provoca nas correntes pode se tornar preocupante.

A utilização de cargas com comportamento não-linear comprovadamente provoca a distorção das formas de onda das correntes, e conseqüentemente das tensões, pela injeção de harmônicas na rede, o que é observado tanto no espectro harmônico como no índice de taxa de distorção harmônica total.

Constata-se que as ocorrências de elevações de tensão (*swell*) são bem inferiores aos afundamentos (*sags*), corroborando com as descrições da literatura.

Este projeto piloto poderá servir de base para a implantação de um sistema geral de medição e monitoramento no campus da universidade, providência essa que já se encontra parcialmente prevista no Plano Diretor da Unicamp com a implantação de 10 Centros de Medições (CM) e 1 Centro de Operação e Monitoramento (COM).

Palavras-chave

Conservação de Energia Elétrica, Eficiência Energética, Medições, Qualidade de Energia Elétrica.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FINEP e ao CNPq pelo suporte financeiro e ao Engenheiro Vicente José Costa Vale, da Coordenadoria de Infra-estrutura da Unicamp, pelo apoio técnico.

Referências

- [1] AFONSO, J. L.; MARTINS, J. S.; **Qualidade da energia eléctrica**; Revista o Electricista; v.3; n.9; p.66-71; Julho-Setembro; 2004.
- [2] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL; **Resolução nº456, de 29 de novembro de 2000**.
- [3] ARRILLAGA, J.; BOLLEN, M. H. J.; WATSON, N. R.; **Power quality following deregulation**; Proceedings of the IEEE; v.88; n.2; p.246-261; February; 2000.
- [4] CPFL Energia, **Serviços online: taxas e tarifas**. Disponível em: <http://agencia.cpfl.com.br/portal-servicos/paulista/taxas_tarifas.asp>. Acesso em: 15 de Outubro de 2007.
- [5] DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; SANTOSO, S.; BEATY, H. W.; **Electrical power systems quality**; 2nd Edition; McGraw-Hill; New York; 2002.
- [6] INFORMATION TECHNOLOGY INDUSTRY COUNCIL (ITI); **ITI (CBEMA) curve application note**; Washington DC; 2000. Disponível em: <<http://www.itic.org/archives/iticurv.pdf>>. Acesso em: 11 de Setembro de 2007.
- [7] MORENO, H.; **Harmônicas nas instalações elétricas: causas, efeitos e soluções**; 1.ed.; Procobre – Instituto Brasileiro do Cobre; São Paulo; Novembro; 2001.
- [8] PÊGO FILHO, B.; MOTA, J. A.; CARVALHO, J. C. J. de; PINHEIRO, M. M. S.; **Impactos da crise de energia elétrica: 2001 e 2002**; Texto para discussão nº816 – IPEA; Rio de Janeiro; Agosto; 2001.
- [9] POMILIO, J. A.; **Normas relativas a fator de potência e distorção harmônica**; Revista O Setor Elétrico; v.1; n.3; p.18-23; Abril; 2006.
- [10] POMILIO, J. A.; **Compensação capacitiva e filtros passivos em redes secundárias – parte 2**; Revista O Setor Elétrico; v.2; n.13; p.18-20; Fevereiro; 2007a.
- [11] POMILIO, J. A.; **Compensação capacitiva e filtros passivos em redes secundárias – parte 3**; Revista O Setor Elétrico; v.2; n.14; p.38-45; Março; 2007b.
- [12] POWER MEASUREMENT; **ION 7600: user's guide**; Canada; May; 2003.
- [13] VENCESLAU, C.; **Monitoramento e gerenciamento de energia**; Revista O Setor Elétrico; v.2; n.23; p.44-45; Dezembro; 2007.
- [14] VOLUT, S.; SCHONEK, J.; **Electrical installation guide according to IEC International Standards**; Schneider Electric; France; September; 2007.