

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA**

**INVESTIGAÇÃO CRÍTICA DA QUALIDADE DA
ENERGIA ELÉTRICA DISPONÍVEL NA SUBESTAÇÃO
DO CENTRO DE LANÇAMENTO DE ALCÂNTARA**

HARNOLDO CASTRO CRUZ

SÃO LUÍS

2012

**INVESTIGAÇÃO CRÍTICA DA QUALIDADE DA
ENERGIA ELÉTRICA DISPONÍVEL NA SUBESTAÇÃO
DO CENTRO DE LANÇAMENTO DE ALCÂNTARA**

**Dissertação de Mestrado submetida à coordenação do Programa de
Pós-Graduação em Engenharia de Eletricidade da UFMA como parte dos
requisitos para obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica.**

HARNOLDO CASTRO CRUZ

SÃO LUÍS

2012

Cruz, Harnoldo Castro.

Investigação crítica da qualidade da energia elétrica disponível na subestação do Centro de Lançamento de Alcântara/ Harnoldo Castro Cruz – São Luís, 2012.

103 f.

Impresso por computador (fotocópia).

Orientador: José Eduardo Onoda Pessanha.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Maranhão, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Eletricidade, 2012.

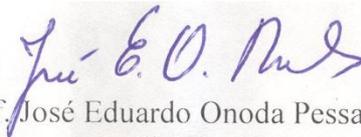
1. Qualidade da energia elétrica. 2. Sistemas de monitoramento. 3. Lançamento de foguete. I. Título.

CDU 621.3.095.2:006.015.5

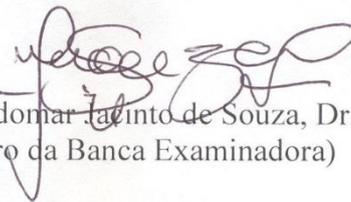
**INVESTIGAÇÃO CRÍTICA DA QUALIDADE DA ENERGIA
ELÉTRICA DISPONÍVEL NA SUBESTAÇÃO DO CENTRO DE
LANÇAMENTO DE ALCÂNTARA**

Harnoldo Castro Cruz

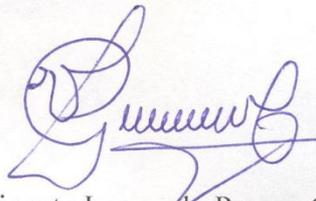
Dissertação aprovada em 14 de dezembro de 2012.



Prof. José Eduardo Onoda Pessanha, Dr.
(Orientador)



Prof. Lindomar Jalinto de Souza, Dr.
(Membro da Banca Examinadora)



Prof. Vicente Leonardo Paucar Casas, Dr.
(Membro da Banca Examinadora)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus, origem de todas as existências e sempre generoso conosco.

Ao professor Dr. José Eduardo Onoda Pessanha, pela orientação, compreensão, paciência e dedicação dispensados no decorrer deste trabalho.

Ao Tenente Coronel César Demétrio Santos e ao Coronel Ricardo Rodrigues Rangel, pela liberação e apoio ao monitoramento no Centro de Lançamento de Alcântara, fundamental para esta Dissertação.

Ao Corpo de Engenheiros e Técnicos do CLA, em especial ao Sargento Jean Nycson Praseres Pereira pelo suporte técnico dispensado.

Aos Professores Vicente Leonardo Paucar Casas, Maria da Guia da Silva, Osvaldo Ronald Saavedra Méndez e José Eduardo Onoda Pessanha, pelas boas horas de convivência e de aprendizado.

Ao colega Demerval Pinheiro Braga Junior pelo apoio e troca de experiências no decorrer das pesquisas de campo.

À minha companheira e revisora Abidiran Maria Ribeiro Costa pela dedicação e revisão textual.

E a todos aqueles a quem não tenha mencionado, mas cujas contribuições foram importantes para o desenvolvimento deste trabalho.

Dedico este trabalho às futuras gerações,
em especial à dos meus filhos:
Amy Iuiry, Cecy Enny, Dae Jung e Yara Yhwhy Cruz.

Meça sempre aquilo que foi feito com aquilo que poderia ser feito.

Lao Tse

RESUMO

O presente trabalho investiga distúrbios eletromagnéticos que afetam a qualidade da energia elétrica do Centro de Lançamento de Alcântara, suprido pela companhia elétrica local e pela autogeração do próprio Centro, enfatizando os distúrbios críticos para a sensibilidade elétrica dos equipamentos de apoio em solo, as variações de tensão de curta duração e os transitórios. A partir de um estudo bibliográfico, são apresentados os principais fenômenos eletromagnéticos relacionados à qualidade da energia elétrica, mostrando as causas, consequências e sugestões para mitigar tais eventos, com destaque para a redução da corrente de energização, com base nas normas internacionais relacionadas ao tema. O monitoramento foi realizado utilizando-se um equipamento de precisão durante a campanha de lançamento de dois foguetes, para melhor contextualizar as variações de tensão de curta duração e os transitórios. A partir dos registros e dados coletados foram analisados os eventos críticos e os indicadores de tensão da distribuidora local de energia elétrica, e da autogeração de energia do Centro, bem como as graves perturbações caracterizadas com a curva CBEMA. Os resultados obtidos forneceram subsídios para reduzir os efeitos dos eventos da variação de tensão de curta duração e transitórios. Assim propõe-se um procedimento operacional para processos especiais, que poderá ser usado tanto no setor aeroespacial quanto nas organizações que tenham seus processos atrelados à qualidade da energia elétrica.

Palavras-chave: Qualidade da energia elétrica; afundamento de tensão; sistemas de monitoramento; sistemas de distribuição de energia elétrica; lançamento de foguete.

ABSTRACT

This work investigates electromagnetic disturbances that affect the power quality of the Alcântara Launch Center (CLA), supplied by the local power distribution utility company and the self-generation of the Center, emphasizing disturbances for sensitivity of electrical ground support equipment, variations in voltage and short-term transients. From a bibliographical study, the main electromagnetic phenomena presented are related to the power quality, showing the causes, consequences and suggestions for mitigation of these events, including the reduction of inrush current, based on standard norms related to the subject. The monitoring was performed using an accurate monitoring equipment during a two-rocket launch campaign, for a better contextualization of voltage variations associated to short-term transients. From the records and gathered data, critical events and power quality indices associated to the distribution utility and to the generation set were analyzed, as well as the severe disturbances characterized by CBEMA curve. The results provided subsidies to improve and reduce the effects of voltage short-term and transient events. Thus an operating procedure for special processes is proposed, which can be used both in the aerospace sector as in organizations that have their processes associated to power quality.

Key words: Power quality; voltage sag; monitoring systems; distribution systems; rocket launch.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	xii
LISTA DE FIGURAS.....	xiv
LISTA DE TABELAS.....	xvi
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1 A Qualidade da Energia Elétrica.....	1
1.2 A Missão Espacial Completa Brasileira.....	1
1.3 Conceitos Associados ao Setor Aeroespacial.....	2
1.3.1 Equipamentos de Apoio Em Solo	2
1.3.2 Segurança de Voo.....	3
1.3.3 Processos Especiais.....	4
1.4 Motivação da Pesquisa.....	4
1.5 Organização da Dissertação.....	5
CAPÍTULO 2 – QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA.....	7
2.1 Considerações Iniciais.....	7
2.2 Relevâncias do Assunto.....	7
2.3 Normatização no Brasil.....	8
2.4 Normas Internacionais.....	10
2.5 Fenômenos Eletromagnéticos.....	11
2.5.1 Fenômenos Transitórios.....	12
2.5.1.1 Transitório Impulsivo.....	13
2.5.1.2 Transitório Oscilatório.....	14
2.5.2 Variações de Tensão de Curta Duração.....	16
2.5.2.1 Interrupção.....	16
2.5.2.2 Afundamento de Tensão (<i>Sag</i>).....	17
2.5.2.3 Elevação de Tensão (<i>Swell</i>).....	19
2.5.3 Variações de Tensão de Longa Duração.....	19
2.5.3.1 Interrupções Sustentadas.....	20
2.5.3.2 Subtensão.....	20
2.5.3.3 Sobretensão.....	21
2.5.4 Desequilíbrio de Tensão.....	21

2.5.5 Distorção da Forma de Onda.....	22
2.5.5.1 Desvio no Nível CC.....	22
2.5.5.2 Harmônicos.....	22
2.5.5.3 Inter-Harmônicos.....	24
2.5.5.4 Corte (<i>Notch</i>).....	25
2.5.5.5 Ruído.....	25
2.5.6 Flutuação de Tensão.....	26
2.5.7 Variações de Frequência.....	26
2.5.8 Causas, Efeitos e Soluções.....	27
2.6 Associação da Qualidade de Energia com o CLA.....	28
2.6.1 Curva CBEMA.....	29
2.6.2 Transitórios no Contexto do CLA.....	31
CAPÍTULO 3 – FENÔMENOS TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS	
QUE SE MANIFESTAM NO CLA.....	34
3.1 Considerações Iniciais.....	34
3.2 Classificações de Transitórios.....	34
3.3 Sobretensões Transitórias em Transformadores.....	36
3.4 Energização de Transformador.....	37
3.4.1 Definição de Transformador.....	37
3.4.2 Corrente de Energização <i>Inrush</i>	38
3.4.3 Fatores que Influenciam a Corrente de Energização.....	39
3.5 Transitórios e Ferro-ressonância em Transformadores.....	46
3.6 Harmônicas Devido à Energização de Transformadores.....	47
CAPÍTULO 4 – MONITORAMENTO E ANÁLISE DA QEE NO CLA.....	50
4.1 Considerações Iniciais.....	50
4.2 Descrição do Sistema Elétrico Analisado.....	50
4.2.1 Descrição da Subestação CT-CLA.....	51
4.2.1.1 Transformadores.....	52
4.2.1.2 Banco de Capacitores.....	53
4.2.1.3 Sistema de Autogeração.....	54
4.2.2 Cargas Críticas do Centro Tecnológico.....	55
4.3 Critérios Para Monitoramento da Subestação CT-CLA.....	55
4.4 Breve Histórico dos Equipamentos Usados para Monitoramento de QEE...	57

4.5 Equipamentos Usados no Monitoramento da Subestação CT-CLA.....	57
4.6 Análises das VTCD do Monitoramento da SE CT-CLA.....	58
4.6.1 Análise Do Perfil De Tensão RMS.....	59
4.6.2 Análise com o Indicador de VTCD.....	63
4.6.3 Análise com a Curva CBEMA.....	66
4.6.3.1 Análise com a Curva CBEMA Suprimento da Concessionária Local.....	67
4.6.3.2 Análise com a Curva CBEMA Autogeração CLA.....	69
4.7 Análise com o Indicador de Desvio Padrão.....	71
4.8 Registros de Outros Distúrbios Significativos que Afetam a QEE no CLA....	75
4.8.1 Registro de Transitórios.....	75
4.8.2 Registro de Harmônicas.....	78
4.9 Sugestões para a Mitigação dos Eventos de QEE Encontrados no CT- CLA.....	80
4.9.1 Procedimento Operacional de Verificação de QEE.....	81
4.9.2 Melhorias nos Equipamentos e no Sistema de Autogeração do CLA.....	82
4.9.3 Solicitação de Melhorias na Tensão de Atendimento.....	84
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	85
5.1 Conclusões.....	85
5.2 Trabalhos Futuros.....	86
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88
ANEXOS.....	92

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

- \bar{X}_{medido} – Média ponderada pela duração
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AEB – Agência Espacial Brasileira
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
- ANSI – *American National Standards Institute*
- B - Densidade fluxo magnético
- Br – Densidade fluxo magnético residual
- CA – Corrente alternada
- CBEMA – *Computer Business Equipment Manufacturers Association*
- CC – Corrente Contínua
- CIGRÉ – *International Council on Large Electric Systems*
- CLA – Centro de Lançamento de Alcântara
- CT-CLA – Centro Técnico do Centro de Lançamento de Alcântara
- DFT – *Discrete Fourier Transform*
- DHI_T – Distorção Harmônica Total de Corrente
- DHT – Distorção Harmônica Total
- D_n – Período de tempo associado a cada uma das amostras individuais
- D_{total} – Duração de todas as amostras
- $e(t)$ – Tensão no tempo
- ELETRONORTE – Centrais Elétricas do Norte S. A.
- EMC – *Electromagnetic Compatibility*
- FNC – Ficha de Não Conformidade
- FTB – Foguete de Treinamento Básico
- FTI – Foguete de Treinamento Intermediário
- GSE – *Ground Support Equipment*
- H – Campo magnético
- i - Corrente
- I₁ – Valor eficaz da corrente fundamental;
- IEC – *International Electrotechnical Commission*
- IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

I_n – Valor eficaz da corrente de ordem n ;
L – Indutância
 n - ordem da componente harmônica.
ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico
QEE – Qualidade da Energia Elétrica
QTA – Quadro de Transferência Automático
R – Resistência
RMS – Root mean square
Rnas – Redes neurais artificiais
SE – Subestação
 t – Tempo
TF – Transformada de Fourier
THD - *Total Harmonic Distortion*
TW – Transformada *Wavelete*
UPS – *Uninterruptible Power Supply*
V – Tensão
VTCD – Variação de Tensão de Curta Duração
 X_{ac} – Reatância da região saturada
 X_m – Reatância da região linear
 X_n – Magnitude da amostra
 α – Ângulo de chaveamento
 Δ/Y – Configuração triângulo estrela
 φ – Fluxo magnético

LISTA DE FIGURAS

1: Foto da Torre Móvel de Integração do CLA.....	3
2.1: Fenômenos eletromagnéticos que afetam a QEE.....	11
2.2: Corrente transitória impulsiva.....	13
2.3: Transitório oscilatório da ferro-ressonância.....	15
2.4: Interrupção.....	17
2.5: Afundamento de tensão.....	18
2.6: Elevação de tensão.....	19
2.7: Distorção harmônica na corrente.....	24
2.8: Curva CBEMA atualizada.....	30
2.9: Árvore de falhas.....	31
3.1: Corrente de energização de um transformador real.....	39
3.2: Representação de um transformador.....	40
3.3: Curva de magnetização.....	41
3.4: Interpretação da saturação.....	41
3.5: Curva de histerese.....	42
3.6: Relação tensão fluxo e corrente de magnetização.....	43
3.7: Harmônicas de ordens de 1 a 8 da tensão.....	48
4.1: Barramentos do SIN no Maranhão.....	51
4.2: Diagrama unifilar da subestação CT–CLA.....	52
4.3: Foto do Transformador SE CT–CLA.....	53
4.4: Foto do Banco de Capacitores SE CT-CLA.....	53
4.5: Foto do grupo gerador SE CT-CLA.....	54
4.6: Foto do QTA SE CT–CLA.....	54
4.7: Centro de Controle Operacional do CT-CLA.....	55
4.8: Foto do <i>Power Platform</i> 4300.....	58
4.9: Gráfico da tensão (RMS) suprida pela concessionária local.....	60
4.10: Gráfico da tensão (RMS) suprida pela autogeração.....	60
4.11: Perfil de tensão concessionária local.....	61
4.12: Perfil de tensão autogeração CLA.....	61
4.13: Tensão de Atendimento da concessionária local.....	63

4.14: Ocorrência de VTCD na SE CT-CLA.....	64
4.15: Eventos ocorridos no suprimento da concessionária local.....	65
4.16: Eventos ocorridos na autogeração CLA.....	66
4.17: CBEMA suprimento pela concessionária local.....	67
4.18: CBEMA suprimento pela concessionária local.....	68
4.19: Oscilograma de subtensão.....	69
4.20: CBEMA autogeração CLA.....	70
4.21: CBEMA autogeração CLA.....	70
4.22: CBEMA autogeração CLA.....	71
4.23: Desvios padrão autogeração CLA.....	72
4.24: Desvios padrão da concessionária local.....	73
4.25: Gráfico da tensão RMS do melhor caso.....	74
4.26: Pouca variabilidade na tensão.....	74
4.27: Oscilograma do início da comutação.....	75
4.28: Oscilograma do fim da comutação.....	76
4.29: Transitórios de corrente e de tensão.....	77
4.30: Harmônicos de tensão SE CT-CLA.....	78
4.31: Harmônicos de corrente SE CT-CLA.....	79
4.32: Fluxograma do procedimento operacional.....	81
4.33: Função dos "PowerChips".....	83
4.34: Microturbina da Capstone.....	83

LISTA DE TABELAS

2.1: Normas internacionais de QEE.....	10
2.2: Classificação geral dos distúrbios da QEE.....	12
2.3: Resumo de causas, efeitos e soluções.....	27
2.4: Densidade de descargas para Alcântara.....	32
3.1: Classificação por faixas de frequência.....	36
3.2: Fatores que influenciam as correntes de energização.....	45
4.1: Características dos transformadores.....	52
4.2: Classificação da tensão de atendimento.....	62
4.3: Valores dos eventos de VTCD contabilizados.....	64
4.4: Valores de THD conforme norma IEC 61000-2-2.....	78

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 A Qualidade da Energia Elétrica

O tema Qualidade da Energia Elétrica (QEE) agrega vários fenômenos eletromagnéticos que causam problemas aos consumidores de energia elétrica. A preocupação com QEE é antiga, mas foi a partir de 1995 que houve um crescente interesse pelo tema e um dos principais motivos para este aumento deveu-se às privatizações feitas na indústria da eletricidade, que levaram ao aumento da necessidade de indicadores de qualidade [1].

A qualidade da Energia Elétrica é importante para todos os seus usuários, mas para as organizações que trabalham no setor aeroespacial, com equipamentos sensíveis à magnitude e à duração de eventos na tensão, é um item crítico de gestão para atingir a eficácia.

1.2 A Missão Espacial Completa Brasileira

A história espacial Brasileira [2] teve início em 1946 com a criação do Centro Técnico da Aeronáutica, hoje Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial. Em 1979 foi aprovada a Missão Espacial Completa Brasileira – MECB, com o objetivo de desenvolver no Brasil: satélites; veículos lançadores; e o centro de lançamento.

Em 1983 foi inaugurado o Centro de Lançamento de Alcântara - CLA, atualmente um dos mais bem posicionados para realizar lançamentos de satélites [2]. As vantagens que o CLA oferece decorrem de uma combinação de diversos fatores geográficos, estando localizado a 2 graus e 18 minutos ao sul da linha do Equador. Esta posição possibilita aproveitar ao máximo a rotação da Terra para impulsionar lançamentos em todos os tipos de órbita, desde as equatoriais às polares. Sua localização próxima ao mar permite lançamentos seguros de foguetes

de grande potência. Além disso, proporciona uma economia de até 30% em combustível, se comparado a outros sítios de lançamento. Atualmente as missões de lançamento utilizam os seguintes foguetes: VSB 30 (com experimentos científicos sub-orbitais); FTI (com carga útil tecnológica); e FTB (para treinamento operacional). Ressalte-se ainda o fato do CLA possuir convênios com várias universidades no Brasil e com a Agência Espacial Alemã (DLR).

O CLA está conectado eletricamente a um barramento periférico do Sistema Integrado Nacional – SIN; e por ser um usuário que demanda energia elétrica com elevada qualidade de tensão, dado à sensibilidade elétrica dos seus equipamentos, fazem-se necessários o monitoramento e a análise da QEE.

1.3 Conceitos Associados ao Setor Aeroespacial

Para uma melhor compreensão dos assuntos abordados neste trabalho, faz-se necessária a apresentação de alguns conceitos básicos e definições usadas no setor aeroespacial.

1.3.1 Equipamentos de Apoio em Solo

Equipamentos de Apoio em Solo, ou GSE (*Ground Support Equipment*), são todos os equipamentos e sistemas usados em solo pelo centro de lançamento para apoiar as atividades de preparação, lançamento e rastreamento de foguetes. São equipamentos que demandam elevado nível de QEE, dado à sensibilidade elétrica dos controles eletromecânicos e eletrônicos, e ao elevado grau de segurança e confiabilidade que são requeridos.

A Torre Móvel de Integração – TMI é um exemplo de GSE do CLA. A Figura 1 mostra uma foto da TMI [2], recuada após dar apoio à montagem do Veículo Lançador de Satélite – VLS. Observam-se ainda, nesta foto, as quatro torres de estrutura metálica do sistema de proteção contra descargas atmosféricas.



Figura 1: Foto da Torre Móvel de Integração do CLA

1.3.2 Segurança de Voo

A segurança de voo visa proteger pessoas e bens, envolvidos ou não, na operação durante todas as fases [2]. A equipe de segurança de voo avalia continuamente o comportamento do veículo e decide se e quando o voo deve ser interrompido. A segurança é responsável por garantir que as informações utilizadas para a tomada de decisão sejam precisas e confiáveis.

Os dados de trajetografia e de telemidas, disponíveis para a tomada de decisão da segurança de voo, devem obedecer aos mais elevados padrões de precisão e de confiabilidade. Os principais GSE usados pela equipe de segurança de voo se localizam no prédio do Centro Tecnológico (CT). Por isso foi escolhida a SE CT-CLA como local de monitoramento de parâmetros elétricos, principalmente a tensão.

1.3.3 Processos Especiais

Processo Especial, pela definição da ISO [3], é um processo em que a conformidade do produto resultante não pode ser prontamente ou economicamente verificada.

Em um processo trivial, como por exemplo, a fabricação de um parafuso, o produto final pode ser medido, e avaliada a sua conformidade. Se não conforme, o aço pode ser retrabalhado. Mas em um processo especial, como o lançamento de um foguete, a conformidade em uso de cada componente não pode ser de fato medida, e a não conformidade não pode ser retrabalhada, pois o foguete queima.

Portanto todos os sistemas e meios relacionados ao foguete e aos seus GSE, conforme a Norma ABNT [4], devem cumprir requisitos de confiabilidade, segurança e qualidade. Também são estabelecidos rígidos requisitos para o suprimento de energia elétrica e para o sistema de aterramento. Por ser o setor aeroespacial fortemente normalizado, esta investigação crítica da QEE na SE CT-CLA tem como parâmetros as normas nacionais e internacionais de QEE.

1.4 Motivação da Pesquisa

A motivação para esta pesquisa foram os diversos relatos sobre as “oscilações da energia elétrica”, fornecidos pela distribuidora local de energia elétrica; e os registros de equipamentos e sistemas que foram danificados por estes distúrbios.

Os principais problemas relacionados à QEE enfrentados pelo CLA são: as variações de tensão de curta duração – VTCD; e os transitórios eletromagnéticos. Estes distúrbios causam como consequências para o Centro: mau funcionamento dos GSE sensíveis; distorções em equipamentos de medição; e a redução da confiabilidade e da segurança nas operações de lançamento.

Para reduzir estes problemas o CLA fez as seguintes melhorias: ampliou o sistema de proteção contra descargas atmosféricas; modernizou as linhas de transmissão internas; substituiu as malhas de aterramento; e aumentou o uso de fontes externas de energia (*no-breaks*, UPS).

Trata-se de uma pesquisa estratégica, dado à importância das cargas supridas. Outra motivação para este estudo é a necessidade do CLA atender aos requisitos operacionais internacionais normatizados de QEE. Este trabalho poderá ainda servir como referência para organizações que atuam no segmento aeroespacial e outras com demandas semelhantes.

1.5 Organização da Dissertação

Na atual conjuntura do sistema elétrico brasileiro, os problemas associados à ocorrência de distúrbios que afetam a QEE, em especial as VTCD, tendem a se agravar, sobretudo nos barramentos periféricos do SIN. Em consequência, os prejuízos associados podem ser maiores. Nesse sentido, pesquisas devem ser realizadas com o objetivo de se conhecer os distúrbios da QEE, e assim, tentar mitigá-los através da adoção de medidas, principalmente as de caráter preventivo.

É dentro deste contexto que se insere esta dissertação, uma vez que possui como principal objetivo, fazer uma investigação da QEE do CLA, enfatizando as VTCD e transitórios, distúrbios críticos para os GSE, partindo de um estudo geral destes fenômenos, e fazendo uma análise detalhada dos eventos ocorridos na SE CT-CLA. Visando atingir estes objetivos esta dissertação é assim estruturada:

Capítulo 1- faz uma introdução sobre QEE, contextualiza o CLA no programa espacial brasileiro, explica conceitos associados ao setor espacial, apresenta os objetivos e a organização da dissertação;

Capítulo 2 - apresenta os principais fenômenos eletromagnéticos relacionados a QEE, mostrando as causas, consequências e sugestões para mitigação. Inicialmente é enfocada a relevância do assunto e são apresentados: definições; conceitos gerais; e a normatização relacionada ao tema. A partir daí faz a associação da QEE com o CLA;

Capítulo 3- apresenta, de forma didática, as principais causas e fatores que influenciam os transitórios, dando ênfase aos transitórios devido à corrente de energização ou corrente de *inrush*. Devido à severidade deste distúrbio para os SGE, enumeram-se os principais fatores que influenciam em suas características, e apresentam-se sugestões para a redução da corrente de energização;

Capítulo 4 - mostra inicialmente uma descrição do sistema elétrico estudado, aborda os critérios usados no monitoramento da SE do CT-CLA. Com os dados coletados faz uma análise dos eventos críticos que afetam a QEE no CLA. Avalia indicadores de VTCD; caracteriza eventos com a CBEMA; e registra o perfil de tensão suprida no CLA. A partir destas análises propõe melhorias para mitigar os eventos de VTCD e transitórios, dentre estas um procedimento operacional para processos especiais.

Capítulo 5 - contém as principais conclusões desta dissertação, sintetizando e evidenciando os resultados obtidos a partir do monitoramento e análise da SE CT-CLA, além de apresentar propostas para o desenvolvimento de estudos futuros.

CAPÍTULO 2

QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

2.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentados os principais fenômenos eletromagnéticos relacionados à QEE, mostrando as causas, as consequências e as sugestões para mitigação. Para isso é necessário que os conceitos e as definições da QEE estejam bem consolidados. Portanto este capítulo visa a apresentar uma abordagem geral sobre QEE e divulgar a normatização existente, bem como contextualizar a realidade regional e operacional do CLA, enfocando os seguintes tópicos:

- Relevância do assunto;
- Normatização sobre QEE;
- Fenômenos Eletromagnéticos que afetam a QEE;
- Associação da Qualidade de Energia com o CLA.

2.2 Relevâncias do Assunto

O termo qualidade é conceituado pela ISO [3] como o grau no qual um conjunto de características inerentes satisfaz os requisitos. Relacionado a este termo está a satisfação do cliente, descrito como a percepção do cliente do grau no qual os seus requisitos foram atendidos.

Seguindo o mesmo foco, em [5] afirma-se que Qualidade da Energia Elétrica é, em última análise, uma questão voltada ao consumidor, e define o problema da qualidade de energia como: "Qualquer problema de energia manifestada na tensão, corrente ou nas variações de frequência que resulte em falha ou má operação de equipamentos de consumidores". Um conceito mais contextualizado pode ser o argumento dado em [6]: do ponto de vista teórico, pode-se conceituar a QEE como

sendo a disponibilidade de energia elétrica com tensões de suprimento equilibradas, senoidais, com amplitude e frequência constantes. Já do ponto de vista prático define-se que “um serviço de fornecimento de energia elétrica é de boa qualidade quando o mesmo garante, a custos viáveis, o funcionamento adequado, seguro e confiável de equipamentos e processos, sem afetar o meio ambiente e o bem estar das pessoas”.

De acordo com [5] e [1], as principais razões para o crescente interesse pela QEE são:

- Os modernos equipamentos dos usuários finais são na maioria controlados por dispositivos eletrônicos microprocessados, são mais sensíveis às variações de QEE do que eram os equipamentos utilizados no passado.
- O crescente interesse pela racionalização e eficiência global da energia, tanto por parte das concessionárias como dos consumidores, tem resultado no crescimento contínuo da aplicação de dispositivos, que proporcionam economia e maior eficiência energética, mas causam perdas na QEE.
- Atualmente os consumidores têm uma consciência maior das questões de QEE, se tornaram mais bem informados sobre questões como interrupções, quedas, e transitórios de chaveamento, passando a exigir das concessionárias a melhoria na QEE fornecida.
- Os sistemas produtivos estão na maioria interligados em rede, em processos integrados, o que faz com que a falha de qualquer componente tenha consequências mais graves.
- As consequências resultantes de variações nas formas de onda sobre a vida útil dos componentes elétricos.

2.3 Normatização no Brasil

Devido ao processo de reestruturação pelo que passa o setor elétrico nacional, em [7] afirma-se que o tema QEE é muito estudado atualmente no Brasil, pois são levadas em consideração as responsabilidades de cada agente em relação à qualidade de energia fornecida ou consumida. Sabemos que esta preocupação é

antiga no Brasil, já contemplada no Código de Águas. No Decreto nº 24.643, de 10 de Julho de 1934 foi feita a primeira citação sobre QEE, informando que o suprimento de energia deveria ser entregue de forma adequada.

A regulamentação atual apresentada pela ANEEL em Janeiro de 2000 [7], a Resolução nº 024/2000, cabe acrescentar que regulamento, diferente de norma tem caráter obrigatório, estabeleceu disposições referentes à continuidade da distribuição de energia elétrica. Nesta resolução foram apresentados novos índices de avaliação das interrupções individuais das unidades consumidoras e descritos cálculos dos índices de continuidade individuais e coletivos, as metas de continuidade e a forma de cálculo das penalidades por variações fora do estabelecido. Houve um avanço com a Resolução ANEEL nº 505/2001, onde são apresentadas as disposições relativas à conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente. Entretanto, a legislação brasileira, conforme [7], ainda não apresenta um acervo legal suficiente para as necessidades do setor. O principal objetivo das resoluções nacionais vigentes é somente a continuidade do serviço, referente à continuidade do fornecimento de energia e duração das interrupções e variações de tensão.

As normas brasileiras são desenvolvidas e utilizadas voluntariamente, tornando-se obrigatórias somente quando explicitadas em um documento de Poder Público (lei, decreto, portaria etc.) ou quando citadas em contratos [7]. Mesmo não sendo obrigatórias, as normas são sistematicamente adotadas em questões judiciais por conta do inciso VIII do Artigo 39 do Código de Defesa do Consumidor (Lei nº 8.078 de 11 de setembro de 1990). A ABNT, através do Comitê Técnico de Normatização CB – 03, é responsável pela elaboração e manutenção das normas relativas à área de eletricidade.

A ABNT publicou recentemente [8] a norma NBR IEC 61000-4-30: 2011. Compatibilidade Eletromagnética, Parte 4-30: Técnicas de medição e ensaio - Métodos de medição de qualidade da energia. Com base na norma IEC 61000-4-30 – *Electromagnetic compatibility (EMC) Part 4-30: Testing and measurements techniques - Power quality measurement methods*. A norma define os métodos para medição, incerteza e faixa de valores dos parâmetros medidos, e para a interpretação dos resultados de parâmetros da qualidade da energia elétrica em sistemas de alimentação em corrente alternada a 50/60 Hz.

2.4 Normas Internacionais

No contexto internacional, a preocupação com os problemas causados pelos fenômenos eletromagnéticos indesejáveis é antiga [7]. Em meados de 1960, harmônicos nos sistemas de transmissão começaram a preocupar seus usuários. Em meados da década de 1980, o IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) publicou algumas normas para auxiliar os projetos de sistemas elétricos com a finalidade de mitigar os impactos dos problemas de QEE [7]. Em 1984, o IEEE organizou a primeira Conferência Internacional de Harmônicos em Sistemas de Potência (*International Conference on Harmonics in Power Systems*). A IEC (Comissão Electrotécnica Internacional), na década de 1990, publicou muitas normas, as quais vêm sofrendo constante atualização, que caracterizam e conceituam os fenômenos eletromagnéticos referentes à QEE.

Normas são necessárias para que os usuários finais (industrial, comercial e residencial), transmissão, distribuição e fornecedores usem os mesmos termos quando se abordam problemas de QEE [9]. Normas também definem limites recomendados para os eventos que degradam a QEE. A Tabela 2.1 destaca as principais normas internacionais que referenciam este trabalho.

Tabela 2.1: Normas internacionais de QEE

Entidade	Norma	Descrição	Aplicação
IEEE	1159	Práticas recomendadas para o monitoramento da qualidade da energia elétrica	Monitoramento da subestação
IEC	60364-6	Instalações elétricas de baixa tensão	Requisitos das instalações e inspeção do GSE
IEC	60038	Tensões padronizadas	Requisitos do suprimento de tensão dos GSE
IEEE	446	Recomendações para emergência em sistemas de energia de pronto atendimento para aplicações industriais e comerciais	Análise com a curva CBEMA
IEEE	1100	Distúrbios do subciclo	Análise dos transitórios
ISO	50001	Gerenciamento de sistemas de energia	Melhoria dos Procedimentos Operacionais

A norma IEEE [10] descreve métodos recomendados para a medição de eventos que afetam a QEE. Existem muitos tipos diferentes de equipamentos de medição de QEE, e é imperativo que os operadores em diferentes áreas do sistema de energia elétrica usem a mesma linguagem e técnicas de medição. Esta norma, além de ser uma referência mundial em monitoramento, destaca-se neste trabalho devido ao *software* do equipamento usado no monitoramento da subestação de interesse, que utiliza os parâmetros desta norma.

Existe uma tendência mundial em discutir as normas de âmbito nacional para chegar a um consenso internacional. As iniciativas neste sentido partiram justamente dos órgãos que historicamente têm suportado a maior parte da documentação normativa, como o IEEE nos Estados Unidos e o CIGRÉ na Europa.

2.5 Fenômenos Eletromagnéticos

Os fenômenos eletromagnéticos que ocorrem em um sistema elétrico e que afetam a QEE podem ser agrupados em categorias de acordo com seu conteúdo espectral, o tempo de duração, bem como a magnitude típica da tensão (Figura 2.1).

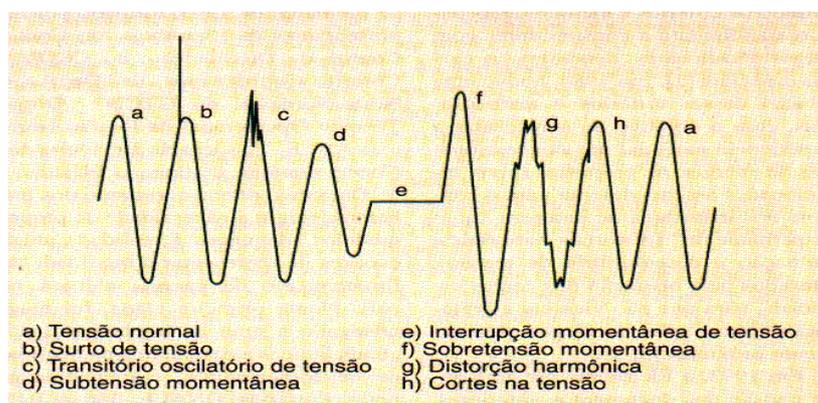


Figura 2.1: Fenômenos eletromagnéticos que afetam a QEE

A Tabela 2.2 [5] apresenta a caracterização desses fenômenos e um resumo dos principais tipos de distúrbios presentes no sistema elétrico seguindo a ordem da tabela, se descreve esses fenômenos mostrando suas características, causas, os efeitos e as sugestões para mitigação. Sintetizando a literatura especializada [1; 5; 6; 9], com especial interesse nos que afetam a operação correta dos GSE.

Tabela 2.2: Classificação geral dos distúrbios da QEE

Fenômeno	Conteúdo espectral típico	Duração típica	Amplitude de tensão típica
Transitórios Impulsivos	ns 1 µs 0,1 ms	< 50 ns 50 ns – 1 ms > 1 ms	
Oscilatórios			
Baixa Frequência	<5 kHz	3 – 50 ms	0,4 p.u.
Média Frequência	5 – 500kHz	20 µs	0,4 p.u.
Alta Frequência	0,5 – 5 MHz	5 µs	0,4 p.u.
Variação de Curta Duração Instantânea			
Afundamento		0,5 – 30 ciclos	0,1 – 0,9 p.u.
Elevação		0,5 – 30 ciclos	1,1 – 1,8 p.u.
Momentânea			
Interrupção		0,5 ciclos -3 s	<0,1 p.u.
Afundamento		30 ciclos -3 s	0,1 – 0,9 p.u.
Elevação		30 ciclos -3 s	1,1 – 1,4 p.u.
Temporária			
Interrupção		3 s – 1 min	< 0,1 p.u.
Afundamento		3 s – 1 min	0,1 – 0,9 p.u.
Elevação		3 s – 1 min	1,1 – 1,2 p.u.
Variações de longa duração			
Interrupção Sustentada		> 1 min	0,0 p.u.
Subtensão Sustentada		> 1 min	0,8 – 0,9 p.u.
Sobretensão Sustentada		> 1 min	1,1 – 1,2 p.u.
Desequilíbrio de Tensão		RP	0,5 – 2%
Distorção da Forma de Onda			
Nível CC		RP	0 - 0,1%
Harmônios	de ordem 0- 100	RP	0 - 20%
Inter-Harmônicos	0 – 6 kHz	RP	0 - 2%
“Notching”		RP	
Ruído	faixa ampla	RP	0 - 1%
Flutuação de Tensão	< 25 Hz	intermitente	0,1 – 7%
Variação da Frequência do Sistema		<10 s	

2.5.1 Fenômenos Transitórios

O termo “transitório” tem sido aplicado para denotar um evento que é indesejável, mas de natureza momentânea. Este termo tem origem na teoria de circuitos elétricos que denota a componente de tensão e corrente que ocorre na transição entre dois estados de uma condição de equilíbrio para outra. Também chamada de componente transitória, na linguagem matemática, sendo a solução da forma homogênea da equação diferencial linear que descreve o sistema.

Transitórios eletromagnéticos são manifestações ou respostas elétricas locais ou nas adjacências, causadas por alterações súbitas nas condições de regime permanente de um sistema de energia elétrica. Geralmente de curta duração, mas de extrema importância, pois é durante esses períodos que os equipamentos do sistema são submetidos aos maiores estresses elétricos devido as tensões e/ou as correntes excessivas. Uma análise clara do evento é essencial para o entendimento do comportamento do sistema elétrico durante o período transitório [1, 5, 6]. Os

fenômenos transitórios podem ser classificados em duas categorias: os transitórios impulsivos e os transitórios oscilatórios.

2.5.1.1 Transitório Impulsivo

Transitório impulsivo, também chamado de impulsos atmosféricos, é uma súbita alteração não desejável no sistema elétrico, que se encontra em condição de regime permanente, refletido nas formas de ondas da tensão ou corrente, ou em ambas, sendo de polaridade unidirecional, primeiramente positivo ou negativo. Geralmente é causado por descargas atmosféricas com frequências bastante diferentes das da rede elétrica.

A corrente do raio normalmente se caracteriza por um rápido e acentuado aumento seguido por uma queda lenta e gradual. A Figura 2.2 ilustra corrente transitória impulsiva proveniente de descarga atmosférica [5]. A forma real tem significativas variações, entretanto, uma forma padronizada de raio tem sido definida como uma curva, com um tempo de subida de $1,2 \mu$ para um tempo de decaimento de 50μ s (a chamada onda 1.2/50). Esta curva é bastante usada para testes de equipamentos de prevenção contra tensões e correntes induzidas por descargas atmosféricas.

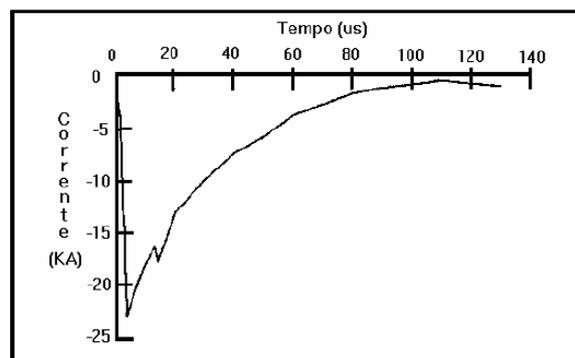


Figura 2.2: Corrente transitória impulsiva

Os transitórios impulsivos são normalmente caracterizados pelos seus tempos de aumento e decaimento, os quais podem ser revelados pelo conteúdo espectral do sinal em análise. Como principal efeito, este distúrbio pode causar a degradação ou falha imediata dos isolamentos de equipamentos e fontes eletrônicas.

Devido à alta frequência do sinal resultante da interação entre as frequências do sistema e o da descarga atmosférica, a forma dos transitórios impulsivos pode ser alterada rapidamente pelos componentes do circuito e apresentar características significativas quando observadas de diferentes partes do sistema de energia.

Devido à origem dos transitórios (descargas atmosféricas), é de fundamental importância se ressaltar o nível da tensão no ponto de ocorrência da descarga. Em sistemas de distribuição, a passagem mais provável para as descargas atmosféricas é por meio de um condutor fase, causando elevadas sobretensões no sistema. Uma descarga direta na fase normalmente causa “*flashover*” na linha próxima ao ponto de incidência e pode gerar além de um transitório impulsivo, uma falta (curto-circuito) acompanhada de afundamentos de curta duração e interrupções.

Elevadas sobretensões transitórias podem também ser geradas por descargas que fluem ao longo do condutor terra. Existem numerosas passagens por meio das quais as correntes de descarga podem fluir pelo sistema de aterramento, tais como o aterramento do primário e do secundário e as estruturas metálicas do sistema de distribuição [1; 5; 6]. Os principais problemas de QEE causados por essas correntes no sistema de aterramento são:

- Elevação do potencial do terra local em vários kV, em relação a outros terras. Equipamentos eletrônicos sensíveis que são conectados entre duas referências de terra, por exemplo, um computador conectado a linha telefônica por meio de um modem, pode falhar;
- Indução de altas tensões nos condutores fase, quando as correntes atravessam os cabos a caminho do terra.

2.5.1.2 Transitório Oscilatório

Transitório oscilatório também é uma súbita alteração não desejável da condição de regime permanente da tensão, corrente, ou em ambas, cujos valores instantâneos mudam de polaridade rapidamente. A Tabela 2.2 [5] apresenta os valores de sua caracterização. Normalmente, é o resultado de modificações na configuração elétrica do sistema como, por exemplo, manobras em linhas de transmissão, chaveamento de bancos de capacitores e transformadores, corte de corrente indutiva, eliminação de faltas, etc.

Um transitório caracterizado por uma componente de frequência primária menor do que 5 kHz, e uma duração de 0,3 a 50 ms, é considerado um transitório oscilatório de baixa frequência. Estes transitórios são frequentemente encontrados nos sistemas de subtransmissão e de distribuição das concessionárias e são causados por vários tipos de eventos. O mais comum está associado a energização de banco de capacitores, que normalmente resulta em uma tensão transitória oscilatória com uma frequência primária entre 300 e 900 Hz. O pico da magnitude pode alcançar 2,0 p.u., estando tipicamente entre 1,3 e 1,5 pu com uma duração entre 0,5 e 3 ciclos dependendo do amortecimento do sistema [1; 5].

Transitórios oscilatórios podem se manifestar em sistemas de distribuição com frequências primárias menores do que 300 Hz. Estes são normalmente associados com o fenômeno da ferro-ressonância e a energização de transformadores. Estes ocorrem quando o sistema responde pela ressonância com componentes de baixa frequência na corrente de magnetização do transformador, segunda e terceira harmônica, ou quando se estabelecem condições que resultam em ferro-ressonância [1; 5]. A Figura 2.3 ilustra um transitório oscilatório causado pelo fenômeno da ferro-ressonância em um transformador a vazio [5].

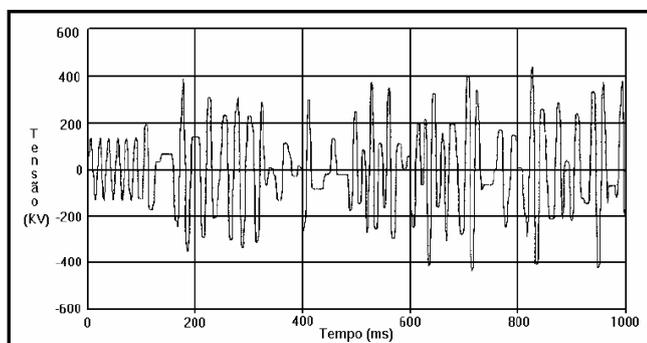


Figura 2.3: Transitório oscilatório da ferro-ressonância

As frequências presentes em transitórios de sobretensões de manobras, que se enquadram no caso de sobretensões com frentes de onda lentas, são da ordem de centenas de Hz até poucas dezenas de Hz [1; 5]. Como o transitório impulsivo, o transitório oscilatório também pode causar danos em equipamentos eletroeletrônicos.

Um procedimento trivial para restringir a magnitude da tensão transitória é transformar os bancos de capacitores do usuário, empregado para corrigir o fator de potência, em filtros de harmônicos. Uma indutância em série com o capacitor irá

amortecer a tensão transitória no barramento do consumidor em níveis toleráveis. Já para a operação de energização de bancos de capacitores podem ser usados resistores de pré-inserção [1; 5]. Com a entrada deste resistor no circuito, o primeiro impulso do transitório, o qual causa maiores prejuízos, é significativamente amortecido.

Algumas técnicas podem ser empregadas para amortecer os impulsos dos transitórios. Contudo, os transitórios oscilatórios oriundos de surtos de chaveamento em redes de distribuição podem ter seu grau de incidência e intensidade reduzidas através de uma reavaliação das filosofias de proteção e investimentos para o aumento da capacidade da rede, evitando o uso de bancos de capacitores [1; 5].

2.5.2 Variações de Tensão de Curta Duração

Variações de tensão de curta duração (VTCD) são normalmente causadas por condições de faltas no sistema elétrico, energização de grandes blocos de cargas que requerem altas correntes de partida, ou conexões defeituosas dos cabos de energia. Dependendo da localização da falta e das condições operacionais do sistema, a falta pode causar elevação de tensão (*swell*), uma queda de tensão (*sag*), ou uma completa perda de tensão, resultando em interrupção no fornecimento de energia elétrica. A condição de falta pode estar próxima ou afastada do ponto de interesse. Nestes casos, o impacto da tensão durante a condição de falta, é uma variação de curta duração até que a falta seja eliminada pelos dispositivos de proteção [1; 5].

As variações de tensão dependendo da duração podem ser classificadas como instantâneas (afundamentos e elevações), momentâneas (interrupções, afundamentos e elevações), ou temporárias (interrupções, afundamentos e elevações), caracterizadas na Tabela 2.2 [5].

2.5.2.1 Interrupção

Uma interrupção ocorre quando o fornecimento de tensão ou de corrente para a carga cai abaixo de 0,1 pu por um período de tempo de 0,5 ciclos a 1 minuto. As

causas mais prováveis de interrupções resultam de faltas no sistema (curto-circuito); falhas de equipamento; ou mau funcionamento dos sistemas de controle. As interrupções são medidas pelas suas durações sendo determinadas pelo evento que gerou a falta. A duração depende também da capacidade de restabelecimento do dispositivo de proteção. Restabelecimentos instantâneos irão limitar a falta não permanente para menos de 30 ciclos. Atrasos no restabelecimento do dispositivo de proteção podem causar interrupção momentânea ou temporária [5; 9].

Normalmente, as interrupções causam o desligamento ou mau funcionamento dos equipamentos eletroeletrônicos, podendo até causar defeitos em chaves estáticas (*Soft-starter*). Dependendo da duração da interrupção, poderá haver o desligamento de todos os equipamentos, com exceção dos que possuem fornecimento alternativo de energia. A Figura 2.4 ilustra uma interrupção de aproximadamente 0,17 segundos na tensão RMS [9].

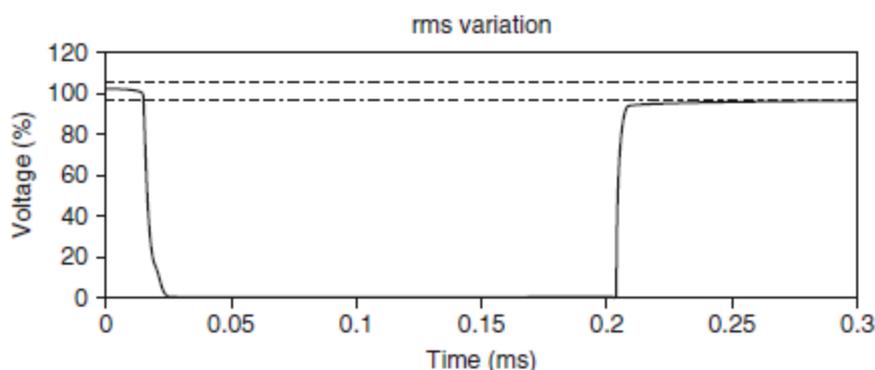


Figura 2.4: Interrupção

2.5.2.2 Afundamento de Tensão

Afundamento de tensão são reduções de curta duração no valor eficaz da tensão da ordem de 0,1 a 0,9 pu, na frequência da rede, com duração entre 0,5 ciclos a 1 minuto [1; 5; 6]. Geralmente, está associada à faltas no sistema (curtos-circuitos ocorridos nas redes de distribuição), mas também pode ocorrer em função da entrada de cargas, partida de grandes motores, e pela corrente de magnetização de um transformador. A Figura 2.5 ilustra um afundamento de tensão causado por uma falta [5].

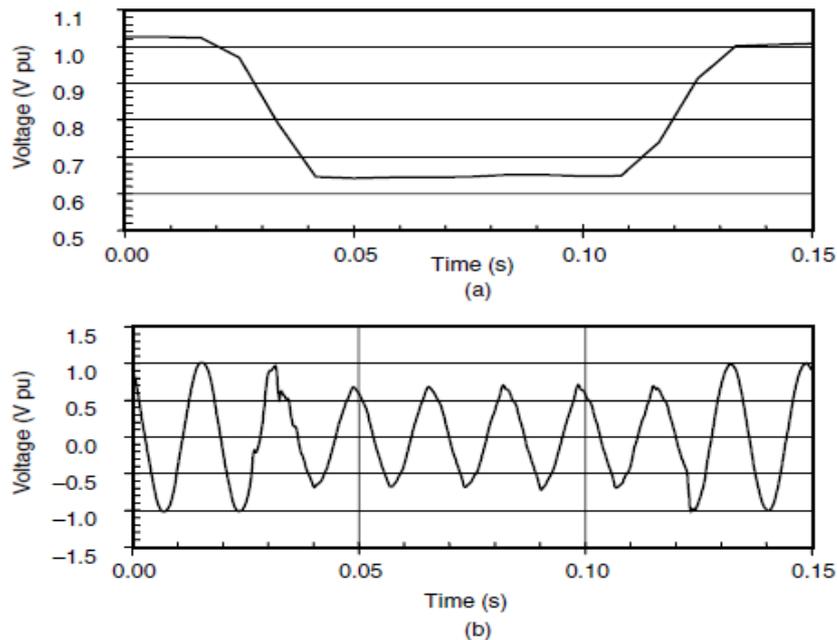


Figura 2.5: Afundamento de tensão

Pode acontecer uma situação em que o curto-circuito ocorra no interior de uma instalação industrial ou comercial e venha causar subtensões em consumidores localizados em outros pontos da rede. Neste caso, as quedas de tensão são de níveis menores, devido à impedância do transformador de entrada que limita a corrente de curto-circuito.

A análise do afundamento envolve diversos fatores que influenciam em suas características, tais como: frequência, magnitude e a duração. Os principais fatores são o tipo de falta, a localização da falta, a impedância de falta, influência da conexão do transformador, a tensão pré-falta e o desempenho do sistema de proteção.

Na análise e no cálculo da queda de tensão, o tipo de conexão dos transformadores existentes entre o ponto de falta e a carga irá influenciar significativamente a magnitude do afundamento de tensão no barramento dos consumidores. O afundamento de tensão pode provocar a parada de equipamentos eletroeletrônicos e interrupções de processos produtivos causando perdas econômicas de grandes proporções.

2.5.2.3 Elevação de Tensão

A elevação de tensão é caracterizada por um aumento do valor eficaz da tensão na faixa de 1,1 a 1,8 pu, na frequência da rede, e com duração entre 0,5 ciclos a 1 minuto, caracterizado na Tabela 2.2 [5]. Ocorre frequentemente nas fases de um circuito trifásico, quando da ocorrência de um curto-circuito em uma única fase, mas também pode estar associada à saída de grandes blocos de carga e entrada de bancos de capacitores [1; 5]. A Figura 2.6 ilustra uma elevação de tensão causada por um curto-circuito fase-terra [9].

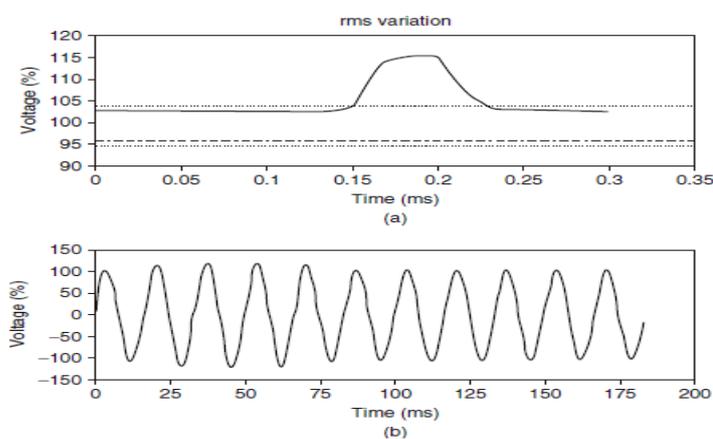


Figura 2.6: Elevação de tensão

A severidade deste distúrbio durante uma condição de falta é uma função da localização da falta, da impedância do sistema e do aterramento. A elevação de tensão pode causar a degradação ou falha imediata dos isolamentos de equipamentos e fontes eletrônicas, queima de varistores e de diodos zener.

2.5.3 Variações de Tensão de Longa Duração

As variações de tensão de longa duração englobam variações do valor eficaz da tensão por um período superior a 1 minuto e que podem ser caracterizadas também como desvios que ocorrem na frequência elétrica do sistema, sendo, portanto, consideradas como distúrbios de regime permanente.

Estas variações são classificadas como sobretensões, subtensões ou interrupções sustentadas. No caso de sobretensões e ou subtensões, geralmente,

não resultam de falhas do sistema, mas são causadas por variações na carga e/ou operações de chaveamento. Tais variações são normalmente analisadas como gráficos do sinal de tensão (RMS – *root mean square*) no tempo [5].

2.5.3.1 Interrupções Sustentadas

Interrupções sustentadas ocorrem quando a tensão de suprimento tem valor nulo por um período de tempo superior a 1 minuto. São de naturezas permanentes e requerem intervenção manual para restabelecimento da energia elétrica. Este termo no contexto da QEE não tem nenhuma relação com a confiabilidade ou outras estatísticas de continuidade de serviço [1; 5].

Estas interrupções podem ser planejadas ou não planejadas. A maioria delas ocorre de forma inesperada e normalmente são causadas por falhas nos disjuntores, queima de fusíveis, falha de componentes de circuito alimentador, etc. Já as interrupções planejadas são feitas geralmente para executar uma manutenção no sistema.

O sistema elétrico deve ser projetado e operado de maneira a garantir o número mínimo de interrupções, as quais durem o mínimo possível e que afetem o menor número de consumidores.

2.5.3.2 Subtensão

É definida como uma redução no valor eficaz da tensão abaixo de 90% e com duração superior a 1 minuto, na frequência do sistema e pode ser causada por carregamento excessivo de circuitos alimentadores. Outros fatores que contribuem para a subtensão são a conexão de cargas à rede elétrica, o desligamento de bancos de capacitores e, conseqüentemente, o excesso de potência reativa fluindo pelos circuitos de distribuição, o que limita a capacidade do sistema no fornecimento de potência ativa e ao mesmo tempo eleva a queda de tensão. Além disso, as subtensões causam o aumento das perdas por aquecimento em motores de indução, parada de operação de dispositivos eletrônicos e desligamento de sistemas de comando de motores [1; 5].

2.5.3.3 Sobretensão

É caracterizada pelo aumento do valor eficaz da tensão acima de 110%, com valores típicos entre 1,1 e 1,2 pu, na frequência do sistema, durante um tempo superior a 1 minuto. Normalmente, resulta do desligamento de grandes cargas ou energização de um banco de capacitores. Operação incorreta de transformadores de tape variável também pode resultar em sobretensões no sistema [1; 5]. As sobretensões podem resultar em falhas de equipamentos e danos nos dispositivos eletrônicos. Se ocorrerem com certa frequência, podem reduzir a vida útil de equipamentos e causar falhas de operação de relés de proteção.

2.5.4 Desequilíbrio de Tensão

É definido como a razão entre a componente de sequência negativa, ou de sequência zero, pela componente de sequência positiva. A tensão de sequência negativa, ou zero, em sistemas de potência, geralmente, é o resultado de desequilíbrio de carga, o qual causa o fluxo de corrente de sequência zero ou negativa. O desequilíbrio de tensão pode ser estimado como o máximo desvio da média das tensões das três fases, dividido pela média das tensões, expresso em porcentagem do desequilíbrio [5; 9].

As principais fontes destes desequilíbrios estão geralmente nos sistemas de distribuição, os quais possuem cargas monofásicas distribuídas inadequadamente, fazendo surgir no circuito tensões de sequência negativa. Podendo se agravar quando consumidores trifásicos possuem uma má distribuição de carga em seus circuitos internos, impondo correntes desequilibradas no circuito da concessionária. Também pode ser o resultado da queima de fusíveis em uma fase de um banco trifásico de capacitores.

Desequilíbrio de tensão se manifesta sob três formas distintas: amplitudes diferentes; assimetria nas fases; e assimetria conjunta de amplitudes e fases. A instalação elétrica sujeita a desequilíbrios de tensão pode apresentar problemas indesejáveis na operação de equipamentos.

2.5.5 Distorção da Forma de Onda

Distorção da forma de onda é definida como o desvio, em regime permanente, da forma de onda da corrente ou tensão em relação ao sinal senoidal puro na frequência fundamental. Caracterizado pelo seu conteúdo espectral, são cinco os tipos principais de distorção de forma de onda [5; 9]:

- Desvio no nível CC;
- Harmônicos;
- Inter-harmônicas;
- Corte (*Notching*) e
- Ruídos.

2.5.5.1 Desvio no Nível CC

A presença de tensão CC ou corrente CC em sistemas de energia CA é denominada de desvio no nível CC. Este fenômeno pode ocorrer como resultado de um distúrbio, ou devido ao efeito da retificação de meia onda. O desvio no nível CC em redes de corrente alternada provoca a saturação de transformadores, resultando em perdas adicionais e na redução da vida útil dos mesmos, além de causar a corrosão eletrolítica dos eletrodos de aterramento e de outros conectores [5; 9]. Pode também gerar estresse adicional da isolação e outros efeitos diversos.

2.5.5.2 Harmônicos

Harmônicos são tensões ou correntes senoidais, que têm frequências múltiplas inteiras da frequência na qual o sistema foi projetado para operar, ou seja, a frequência fundamental (60 Hz). São fenômenos contínuos e não devem ser confundidos com fenômenos de curta duração, os quais duram apenas alguns ciclos. Os harmônicos se somam aos componentes fundamentais de tensão e corrente, causando distorção na forma de onda. A distorção harmônica ocorre devido à operação de cargas não lineares no sistema elétrico, tais como: fornos a arco, fornos de indução, conversores estáticos, fontes chaveadas, máquinas de

solda, lâmpadas fluorescentes, e outros dispositivos eletrônicos nas plantas industriais [1; 5; 9].

Os níveis de distorção harmônica podem ser caracterizados pelo espectro harmônico incluindo magnitudes e ângulos de fase de cada componente harmônico individual. É também comum usar uma única quantidade, a Distorção Harmônica Total, como uma medida da magnitude da distorção harmônica. A Figura 2.7 ilustra a distorção harmônica na corrente, na qual se evidencia as deformações na forma de onda, e a caracterização pelo valor do THD [5].

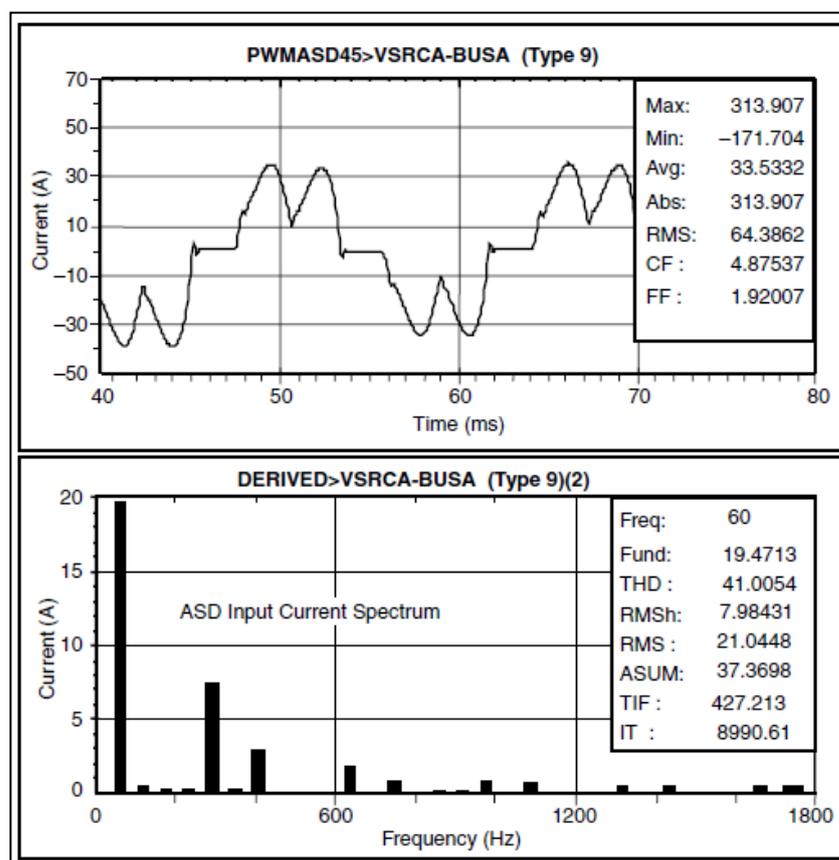


Figura 2.7: Distorção harmônica na corrente

A natureza e a magnitude das distorções harmônicas geradas por cargas não lineares dependem de cada carga especificamente, mas duas generalizações podem ser assumidas: os harmônicos que causam problemas geralmente são os componentes de números ímpares; e a magnitude da corrente harmônica diminui com o aumento da frequência. Altos níveis de distorções harmônicas em uma instalação elétrica podem causar problemas para as redes de distribuição das

concessionárias, para a própria instalação e para os equipamentos ali instalados. A corrente harmônica e a distorção da tensão provocam no sistema [1;5; 9]:

- Sobreaquecimento em máquinas rotativas e transformadores, com conseqüente redução da vida útil destes equipamentos;
- Sobretensões harmônicas resultam no aumento das solicitações do isolamento dos dispositivos, o que, pode até causar a ruptura do dielétrico;
- Operação indevida dos sistemas de proteção, medição e controle de equipamentos elétricos;
- Operação incorreta de diversos equipamentos, tais como microcomputadores, medidores de energia elétrica e controles microprocessados.

Estas perturbações no sistema podem normalmente ser eliminadas com a aplicação de filtros de linha ou supressores de transitórios. Um filtro de harmônicos simples é basicamente um capacitor para correção do fator de potência, combinado em série com um reator.

2.5.5.3 Inter-Harmônicos

Inter-harmônicos são componentes de frequência que não são múltiplos inteiros da frequência fundamental, e ocorrem nas formas de onda da tensão e da corrente. Estas inter-harmônicas podem aparecer como frequências discretas ou como uma larga faixa espectral. Podem ser encontradas em redes de diferentes classes de tensão. São produzidos principalmente por ciclo conversores, conversores estáticos de frequência, motores de indução, fornos e solda a arco. A sua propagação pode causar efeitos de aquecimento, oscilações torcionais, cintilação (*flicker*), sobrecarga de filtros convencionais, interferências em equipamentos eletrônicos, ondulação em receptores de controle e em sistemas de telecomunicações.

Um dos efeitos mais significativos dos inter-harmônicos é a cintilação das lâmpadas. Devido às frequências inter-harmônicas não estarem sincronizadas com a componente fundamental do sistema de energia, estas afetam os valores de pico e

RMS da tensão. Essas flutuações de tensão podem produzir cintilação em lâmpadas se o nível de inter-harmônicas ultrapassarem os níveis de imunidade [5, 9].

2.5.5.4 Corte

Corte é um distúrbio periódico da tensão causado pela má operação dos equipamentos que utilizam eletrônica de potência, quando a corrente é comutada de uma fase para a outra. Durante esse período ocorre um curto-circuito momentâneo entre as duas fases, levando a tensão próxima a zero, tanto quanto é permitido pelas impedâncias do sistema.

Este distúrbio representa um caso especial que se enquadra entre transitórios e distorção harmônica. Desde que ocorra continuamente (regime permanente), pode ser caracterizado pelo espectro harmônico da tensão afetada. Os componentes de frequência associados com o fenômeno *notching* podem ser altos e podem não ser prontamente caracterizados pelos equipamentos de medidas normalmente usados para análise de harmônicos. A principal fonte causadora de corte de tensão são os conversores trifásicos [5; 9].

2.5.5.5 Ruído

O fenômeno conhecido como ruído é um sinal elétrico indesejável, com um amplo conteúdo do espectro de frequência, inferior a 200 kHz, de baixa intensidade, superposto à corrente ou tensão nos condutores de fase, ou encontrado nos condutores de neutro, ou ainda nos sinais da linha. Normalmente, podem ocorrer em sistemas de energia controlados por equipamentos eletrônicos, operações defeituosas de equipamentos, circuitos de controle, equipamentos a arco, cargas com retificadores de estado sólido e fontes chaveadas e, via de regra, estão relacionados com aterramentos inadequados. Podem se propagar até atingir cargas susceptíveis em algum ponto do sistema, tais como: microcomputadores e controladores programáveis. O problema pode ser atenuado pelo uso de filtros, isolamento dos transformadores e condicionadores de linha [5, 9].

2.5.6 Flutuação de Tensão

Flutuações de tensão são variações sistemáticas dos valores eficazes de tensão ou uma série de variações aleatórias da magnitude da tensão, as quais, normalmente, não excedem as faixas de valores pré-estabelecidos (0,95 a 1,05 pu), caracterizadas na Tabela 2.2 [5]. Qualquer carga que apresenta variação de corrente, principalmente da componente reativa, pode causar flutuação de tensão; fornos a arco, laminadores e máquinas de solda são as cargas mais comuns que geram este distúrbio em sistemas de distribuição e transmissão.

Para diferenciar corretamente e evitar equívocos, flutuação de tensão é um fenômeno eletromagnético enquanto que cintilação é o resultado indesejável da flutuação de tensão em algumas cargas [5; 9].

2.5.7 Variações de Frequência

São definidas como o desvio no valor da frequência fundamental, de seus valores nominais especificados de 50 ou 60 Hz. Em sistemas elétricos, a frequência está diretamente relacionada com a rotação dos geradores do sistema. Há estreitas variações na frequência com o balanço dinâmico entre cargas e mudanças na geração. A amplitude da variação e sua duração dependem das características da carga e da resposta do sistema de controle de geração às alterações na carga.

Variação de frequência que ultrapassa os valores limite das condições normais de regime permanente é, normalmente, causada por faltas no sistema de transmissão, desconexão de grandes blocos de carga e saída de grandes parques de geração. As variações de frequência podem afetar a operação normal de máquinas rotativas, mas devido a interconexão dos sistemas elétricos modernos, esses distúrbios são raros de ocorrer. São mais prováveis de acontecer em sistemas de consumidores que possuam geração própria, quando passem a operar na configuração isolada [5].

2.5.8 Causas, Efeitos e Soluções

Na Tabela 2.3 é apresentado um resumo das causas, efeitos e soluções para os principais fenômenos eletromagnéticos que afetam a QEE [9].

Tabela 2.3: Resumo de causas, efeitos e soluções

Tipo de Distúrbio	Causas	Efeitos	Soluções
Transitórios Impulsivos	-Descargas atmosféricas; -Chaveamentos de cargas.	-Excitação de circuitos ressonantes; -Redução da vida útil de motores, geradores, transformadores, etc.	-Filtros; -Supressores de surto; Transformadores isoladores.
Oscilações Transitórias	-Descargas atmosféricas -Chaveamentos de: capacitores, linhas, cabos, cargas e transformadores.	-Mau funcionamento de equipamentos controlados eletronicamente, conversores de potência, etc.; -Redução da vida útil de motores, geradores, transformadores, etc.	-Filtros; -Supressores de surto; -Transformadores isoladores.
Sub e Sobretensões	-Partidas de motores; -Variação de cargas; -Chaveamento de banco capacitores.	-Pequena redução na velocidade dos motores de indução e no reativo dos bancos de capacitores; -Falhas em equipamentos eletrônicos; -Redução da vida útil de máquinas rotativas, transformadores, cabos, disjuntores, TP's e TC's; -Operação indevida de relés de proteção.	-Reguladores de tensão; -Fontes de energia de reserva; -Chaves estáticas; -Geradores de energia.
Interrupções	-Curto-circuito; -Operação de disjuntores; -Manutenção.	-Falha de equipamentos eletrônicos e de iluminação; -Desligamento de equipamentos; -Interrupção do processo produtivo (altos custos)	-Fontes de energia sobressalentes; -Sistemas no-break; -Geradores de energia.
Desequilíbrios	-Fornos a arco; -Cargas monofásicas e bifásicas; -Assimetrias entre as impedâncias.	-Redução da vida útil demotores de indução e máquinas síncronas; -Geração, pelos retificadores, de 3º harmônica e seus múltiplos.	-Operação simétrica; -Dispositivos de compensação.
Nível CC	-Operação ideal de retificadores de meia onda, etc.	-Saturação de transformadores; -Corrosão eletrolítica de eletrodos de aterramento e de outros conectores.	
Harmônicos	-Cargas não-lineares.	-Sobreaquecimento de cabos, transformadores e motores de indução; -Danificação de capacitores, etc.	-Filtros; -Transformadores isoladores.
Inter-harmônicos	-Conversores estáticos de potência; -Cicloconversores; -Motores de indução; -Equipamentos a arco, etc.	-Interferência na transmissão de sinais carrier; -Indução de flicker visual no display de equipamentos.	
Corte	-Equipamentos de eletrônica de potência.		
Ruídos	-Chaveamento de equip. eletrônicos de potência; -Radiações eletromagnéticas.	-Distúrbios em equipamentos eletrônicos (computadores e controladores programáveis).	-Aterramento das instalações; -Filtros.
Oscilações de Tensão	-Cargas intermitentes -Fornos a arco; -Partidas de motores.	-Flicker; -Oscilação de potência e torque nas máquinas elétricas; -Queda de rendimento de equipamentos elétricos; -Interferência nos sistemas de proteção.	-Sistemas estáticos de compensação de reativos; -Capacitores série.
Variações na Frequência do Sistema Elétrico	-Perda de geração, perda de linhas de transmissão, etc.	-Pode causar danos severos nos geradores e nas palhetas das turbinas, etc.	

A responsabilidade do fornecimento e manutenção da energia elétrica, considerada dentro dos parâmetros de utilização dos diversos equipamentos elétricos de acordo com [7], depende da consciência de todos os setores que fazem parte do sistema elétrico e necessitam de uma análise constante e detalhada dos eventos eletromagnéticos que possam ocorrer. Observa-se ainda que as soluções para uma boa QEE somente serão alcançadas quando as concessionárias, fabricantes de equipamentos e consumidores conscientizarem-se da necessidade do entendimento mútuo para este fim. Considera ainda como dois pontos mais importantes para uma boa QEE: um suprimento dentro dos padrões exigidos; e um bom sistema de aterramento.

Para que o CLA, enquanto consumidor, cumpra a sua responsabilidade seguindo as considerações de [7], conforme descrito no parágrafo anterior, faz-se necessário: contextualizar os conceitos de QEE apresentados no item 2.5; fazer um breve histórico dos problemas relacionados à QEE; e explanar sobre a sensibilidade elétrica das cargas críticas do CLA, o que é feito de forma sucinta no próximo item, e de maneira detalhada no Capítulo 4.

2.6 Associação da Qualidade de Energia com o CLA

Os Equipamentos de Apoio em Solo (GSE) do CLA são: Lançadores de Porte Médio, Torre Móvel de Integração, Telemedidas, Radars etc. São equipamentos que demandam elevado nível de QEE, dado a sensibilidade elétrica dos controles eletromecânicos e eletrônicos, e o elevado grau de segurança e confiabilidade que lhes são requeridos. Os GSE são cargas elétricas de missão crítica, ou seja, são equipamentos cuja interrupção, ou mau funcionamento de qualquer um deles, pode resultar em prejuízos para os usuários e/ou beneficiários dos serviços aos quais se destinam. Portanto, necessitam de energia segura e de boa qualidade.

O segmento aeroespacial por necessitar de elevados índices de segurança, confiabilidade e disponibilidade, é extremamente normalizado. A norma brasileira que define os requisitos do GSE é a ABNT NBR 14881:2002 Sistemas espaciais - Equipamentos de apoio no solo para uso em lançamento, aterrissagem ou locais de resgate - Requisitos gerais [4], a qual deriva da norma IEC *Space systems - Ground support equipment for use at launch, landing, or retrieval sites - General*

requirements. Esta Norma especifica os requisitos gerais, desempenho, projeto, ensaio, segurança, confiabilidade, manutenibilidade e requisitos de qualidade para GSE e sistemas voltados para uso em lançamento, aterrissagem ou instalação de locais de resgate ou outros locais que são da responsabilidade destes.

O item 13.3.5 da norma NBR 14881 [4] estabelece que o projeto de eletricidade para os sistemas e equipamentos deve estar conforme a IEC 60364 *Low-voltage electrical installations*. O mesmo item define que o padrão das tensões deve estar em conformidade ao IEC 60038 *Standard voltages*. Descreve ainda que possam ser requeridos adaptadores ou outros dispositivos elétricos para assegurar a compatibilidade do GSE entre diferentes sistemas.

Os Equipamentos de Apoio em Solo na sua maioria são constituídos de duas partes: uma com sistemas eletromecânicos e servomecanismos robustos, e a outra com sistemas de controle que incluem *hardware* e *software* bastante sensíveis a QEE. Este último possibilita e valida o uso da curva CBEMA para avaliar a severidade dos distúrbios de QEE.

2.6.1 Curva CBEMA

Na Década de 1970, a *Computer Business Equipment Manufacturers Association* - CBEMA desenvolveu uma curva a partir de histórico de dados de operação de computadores de grande porte, que mostra a faixa aceitável de tensões de suprimento de energia elétrica para equipamentos de informática [9]. Esta curva, denominada CBEMA, caracteriza a sensibilidade de equipamentos de informática para quedas e elevações de tensão, mapeando os pontos de afundamento com amplitude aceitável, relacionando-os com a duração do evento.

Assim, foi estabelecido pela ANSI/IEEE (*American National Standards Institute/IEEE*), limites de tolerância para computadores relativos a distúrbios no sistema elétrico, onde os níveis de tensão abaixo do nominal representam os limites, dentro dos quais, um computador típico pode resistir sem apresentar falhas. Destaca-se que a suportabilidade de um computador é bastante dependente do período de duração do distúrbio.

A maioria dos distúrbios presentes nos sistemas elétricos pode ser representada na curva CBEMA. Vale ressaltar que esta curva foi atualizada (Figura 2.8) e está apresentada na Norma IEEE 446 [11].

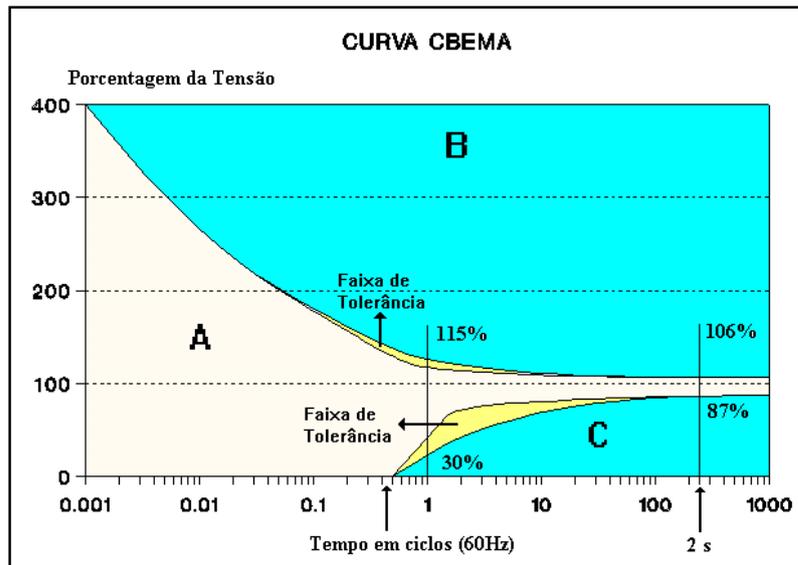


Figura 2.8: Curva CBEMA atualizada

A curva da Figura 2.8 [11] apresenta no eixo horizontal a duração do evento em ciclos, e no eixo vertical a variação percentual da tensão do ponto de suprimento. Mostra ainda três regiões distintas de operação, as quais representam:

- **A** - região normal de operação que é a envoltória da tensão de tolerância do computador;
- **B** - região perigosa de operação que abrange o nível de tensão passível de ruptura da isolação dos equipamentos, com possibilidade de danos ao *hardware*;
- **C** - região perigosa de operação que abrange falta de energia de armazenamento, com possibilidade de paralisação de alguns equipamentos e possíveis disfunções.

A análise da curva CBEMA enfatiza dois pontos principais. O primeiro é de 0,5 ciclos a 8,3 ms. Neste ponto, qualquer equipamento tem que ser capaz de suportar uma interrupção de energia por este período. O segundo é o ponto de 2 s, a

partir do qual todos os equipamentos têm que suportar continuamente quedas de até 13% ou acréscimos de até 6% do valor da tensão nominal.

Esta curva é frequentemente utilizada para analisar os dados de monitoramento de QEE. Também foi utilizada neste trabalho para definir a suportabilidade das cargas de diversos dispositivos dos Equipamentos de Apoio em Solovisando à proteção contra as variações da QEE.

2.6.2 Transitórios no Contexto do CLA

A preocupação com QEE no CLA ficou mais acentuada a partir do resultado das investigações para o acidente ocorrido com o Veículo Lançador de Satélite - VLS-1 Voo 3 em 22 de agosto de 2003. A referência [12] apresenta como conclusões parciais, que o acidente teve início com o funcionamento intempestivo do propulsor **A** do primeiro estágio. Uma das possíveis causas deste evento está ilustrada na árvore de falhas da Figura 2.9[12].

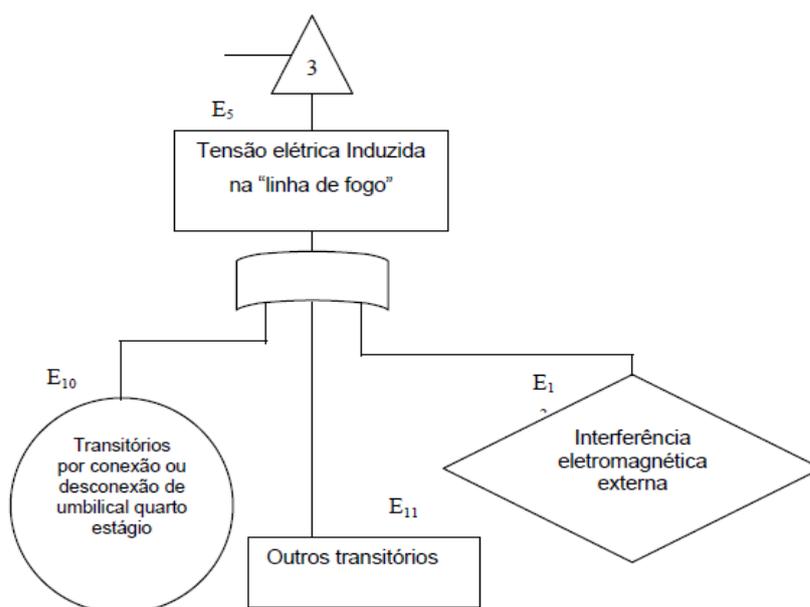


Figura 2.9: Árvore de falhas

Analisando o evento 3 E5 referido por tensão elétrica induzida na “linha de fogo”, verificam-se três possibilidades, sendo estas:

- E₁ - Poderia ocorrer em decorrência de uma interferência eletromagnética externa;
- E₁₀ - A indução de uma tensão elétrica poderia ocorrer em virtude de transitórios de corrente, no momento de ligar ou desligar algum circuito;
- E₁₁ - A partir de outros transitórios.

A mesma referência relata sobre as oscilações da energia elétrica fornecida pela concessionária local.

Durante a cronologia de lançamento de foguetes, varias operações são realizadas, em cuja execução os riscos da ocorrência de descargas atmosféricas devem ser reduzidos ao mínimo possível. Por isso, instalou-se um sistema de monitoramento do campo elétrico e detecção de relâmpagos no CLA, com o Sensor TSS 928. Em [13] abordou-se esse monitoramento, destacando a maior ocorrência de relâmpagos e trovoadas está relacionada com o período chuvoso, uma vez que os relâmpagos ocorrem associados a nuvens cumulonimbus, apresentando maior frequência em março e maio. Em termos horários a maior atividade de descargas ocorre no final da tarde e início da noite, sendo o período das 07:00 às 10:00 horas o menos ativo.

A partir dos dados do sensor e de outras fontes, foi elaborada a Tabela 2.5 [13], que apresenta um resumo da densidade de descargas nuvem-solo na região de Alcântara.

Tabela 2.4: Densidade de descargas para Alcântara

Fonte	Densidade de Descargas N _g [relâmpago/km ² ano]
NBR 5419	2,8
ACA/IAE	1,9
TSS 928	2,1

Observa-se que o nível de densidade de descarga para o solo na região de Alcântara é elevado, mas devido às sugestões feitas por [12, 13] de melhorias no sistema de proteção contra descargas atmosféricas no CLA, as quais já estão operacionais e possuem varias redundâncias, a probabilidade de ocorrência de transitório impulsivo em campanha de lançamento é muito baixa. Portanto, este trabalho enfatiza os transitórios oscilatórios, principalmente os internos que dependem de ações e controles do próprio centro, pois estes podem ser gerados pela energização de GSE no decorrer da cronologia de lançamento (Anexo I). No Capítulo 3 estes eventos são estudados em detalhes, apresentando sugestões viáveis para mitigar estes transitórios.

CAPÍTULO 3

FENÔMENOS TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS QUE SE MANIFESTAM NO CLA

3.1 Considerações Iniciais

No decorrer da cronologia de lançamento, conforme anexo I, muitos GSE são energizados, por exemplo: início da preparação dos meios operacionais; energizar lançador; conectar e ligar unidade de comando etc. Dando suporte aos circuitos de praticamente todos estes GSE, existem transformadores nos sistemas de proteção, abaixadores de tensão, além dos transformadores principais das seis subestações do CLA. Ressalta-se ainda que a maioria dos GSE são cargas indutivas. Para melhor compreender os eventos transitórios do CLA, neste capítulo se fez um estudo dos transitórios internos, enfatizando-se um dos mais críticos, a corrente de energização de transformadores.

3.2 Classificações de Transitórios

Além da classificação usual de transitórios impulsivos e transitórios oscilatórios, já descritos no Capítulo 2 e caracterizados na Tabela 2.2, que seguem a nomenclatura da Norma IEEE [10], tem-se que os transitórios podem também ser classificados quanto à localização das suas origens. De acordo com [14] os transitórios podem ser externos e internos como segue:

- **Transitórios externos** são aqueles gerados fora das instalações elétricas e propagados para o interior das instalações pelos condutores da rede. São tipicamente mais severos, porém menos frequentes que os internos. Normalmente resultam de raios, operações de fusíveis, e chaveamentos no sistema;

- **Transitórios internos** são gerados dentro das instalações pelo próprio equipamento do usuário. Normalmente resultam do chaveamento de cargas indutivas ou capacitivas, mas também da abertura de fusíveis ou relés em um circuito indutivo. A abertura de dispositivos de proteção pode também contribuir para originar transitórios eletromagnéticos.

Outra classificação está relacionada à origem do evento, conforme as referências [1; 15] as quais classificam os transitórios em normais e anormais:

- **Transitórios normais** ocorrem quando a tensão ou a corrente de pico de restabelecimento pode atingir duas vezes o valor da corrente ou tensão de pico do sistema em regime permanente (2,0 pu). Normalmente, são causados por abertura de um disjuntor ou quando um circuito indutivo é energizado. Estes transitórios têm sua amplitude reduzida por causado amortecimento sempre presente, geralmente de característica resistiva. Se um circuito não tem energia armazenada quando se inicia um transitário, este será normal.
- **Transitórios anormais** ocorrem quando a tensão ou a corrente de pico de restabelecimento pode exceder duas vezes o valor da corrente ou tensão de pico do sistema em regime permanente (2,0 pu). Tais transitórios têm causa comum, envolvem o armazenamento de energia em algum lugar do circuito e sua consequente liberação. As condições iniciais de tensão nos capacitores e corrente nos indutores influenciam nos transitórios, essas condições descrevem a energia armazenada no sistema antes do transitário. Quando uma destas condições iniciais for diferente de zero, existe a possibilidade de se desenvolver um transitário anormal.

A classificação quanto à faixa de frequência, proposta pelo *CIGRÉ (International Council on Large Electric Systems) Working Group 33-02* [16], sugere classificar os eventos transitórios em quatro grupos, com alguma superposição, conforme apresentado na Tabela 3.1 - Classificação por faixas de frequência [16].

Tabela 3.1: Classificação por faixas de frequência

Grupo	Faixa de frequência	Característica no domínio do tempo	Representação válida para
I	0,1 Hz a 3 kHz	Oscilação de baixa frequência	Sobretensões temporárias
II	50 Hz a 20 kHz	Surtos de frente lenta	Sobretensões de manobras
II	10 kHz a 3 MHz	Surtos de frente rápida	Sobretensões devido a surtos atmosféricos
IV	100 kHz a 50 MHz	Surtos de frente muito rápidos	Sobretensões por reascendimento

Seguindo a classificação por faixa de frequência, os eventos transitórios de maior interesse neste estudo são as sobretensões e sobrecorrentes de manobras, classificadas no grupo II na Tabela 3.1. Enfatizando-se os transitórios oscilatórios internos normais na classificação apresentada, os quais foram selecionados e analisados com oscilogramas (Capítulo 4).

A análise destes eventos causa recomendações operativas, que evitem a superação da suportabilidade dos GSE envolvidos, as quais servem de base para a revisão dos procedimentos operacionais.

3.3 Sobretensões Transitórias em Transformadores

Sobretensões transitórias causadas por raios ou operações de comutação podem resultar em degradação ou falha dielétrica imediata em todas as classes de equipamento. A Norma IEEE 1159 [10] explica que a magnitude elevada, e o rápido tempo de elevação das sobretensões transitórias, contribui para a quebra do isolamento em equipamentos elétricos como: máquinas rotativas; transformadores; condensadores; cabos; transformadores de corrente; transformadores de potencial; e comutadores. Do mesmo modo, os dispositivos semicondutores, tais como os circuitos integrados, podem ser facilmente danificados se o transitório passar através da fonte de alimentação.

A Norma IEEE 1159 [10] alerta que transitórios impulsivos também podem passar pelos transformadores abaixadores, através das capacitâncias se deslocando para o lado secundário de baixa tensão, não sendo reduzidos pela relação de espiras. Danos provocados por tais transitórios podem também ocorrer no equipamento ligado no secundário de baixa tensão do transformador.

Devido à relação da QEE e transformadores, sobretudo eventos transitórios, é que segue um estudo sobre energização de transformador. E um dos motivos para a escolha da subestação do CLA como ponto de monitoramento.

3.4 Energização de Transformador

Observa-se na literatura especializada que muitos dos eventos da QEE estão associados com situações típicas da proteção de transformadores. Em[17] busca-se identificar, dispendo da TW (Transformada Wavelete) e das Rnas (redes neurais artificiais), a causa de um afundamento de tensão, indicando como uma possível causa a energização do transformador. A mesma referência mostra também a utilização de um sistema *fuzzy* (lógica difusa), com dados de entrada processados pela TW e pela TF (Transformada de Fourier), capazes de caracterizar distúrbios relacionados à qualidade da energia referentes a três tipos de eventos distintos: energização de transformadores; operações de manobras; e operações de banco de capacitores.

Outro exemplo de associação entre fenômenos de proteção de transformadores e QEE é a sobreexcitação do transformador, que pode ocorrer em virtude de condições de sobretensão e ou subfrequência do sistema. Isso é abordado em [17], onde mostra-se que os eventos e manobras no transformador são importantes na análise de fenômenos eletromagnéticos que afetam a QEE, principalmente os transitórios eletromagnéticos.

3.4.1 Definição de Transformador

Um transformador é um equipamento estático que consiste de um, dois ou mais enrolamentos acoplados, com ou sem núcleo magnético, para indução mútua entre os circuitos [18]. Existem diversos tipos de transformadores, mas este trabalho se limita à transformadores de potência de dois enrolamentos, com núcleo de chapa de material ferromagnético do tipo Fe-Si, usados em aplicações na frequência da rede, em subestações de consumidores de médio porte. A Figura 4.3 - Foto do transformador externo 02 SE CT-CLA, ilustra este modelo.

Em estudos de energização de transformadores de potência, usando programas de simulações, afirma-se em [19] que se devem quantificar as sobretensões e sobrecorrentes decorrentes das manobras sobre o equipamento específico e instalações adjacentes. Nestes estudos o modelo computacional do transformador é determinante e depende da faixa de frequência associada ao evento transitório em análise. Entretanto, neste trabalho se faz uma análise simplificada dos fenômenos e variáveis envolvidas na energização de transformadores, concentrando-se nos transitórios de maior amplitude como as correntes de *inrush*, e na mitigação deste evento.

3.4.2 Corrente de Energização *Inrush*

Quando um transformador é energizado, surge um fenômeno conhecido como corrente de energização ou corrente de *inrush*. Em um curto período de tempo surge uma corrente de grande amplitude no enrolamento [1]. Devido à natureza rápida da corrente de magnetização de alguns ciclos, o transformador não é danificado, mas tal fenômeno tem significativa influência nos ajustes das proteções do transformador e nos sistemas associados a este. O valor máximo da corrente de *inrush* varia em média de 4 a 20 vezes a corrente nominal, com tempo de duração em torno de 0,1 s.

A corrente de *inrush* foi observada por Fleming em 1892 e a Figura 3.1 [1] ilustra uma medição real feita dos primeiros sete ciclos da corrente de energização de um transformador, e de acordo com [1] estas são difíceis de medir devido à sua componente CC.

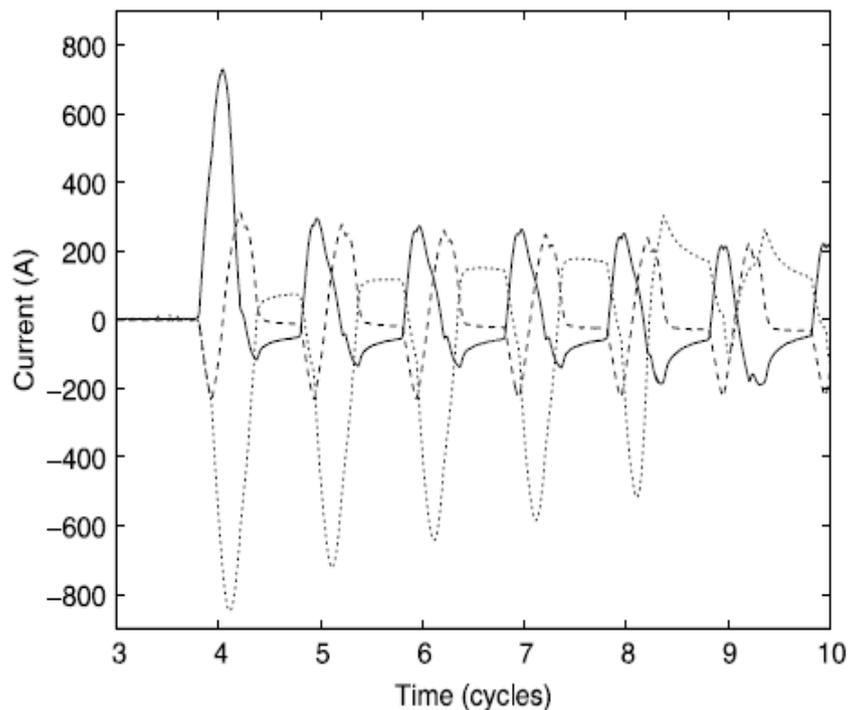


Figura 3.1: Corrente de energização de um transformador real

A corrente de *inrush* ocorre no transformador quando a polaridade e a amplitude do fluxo magnético residual não se alinham com a polaridade e amplitude do valor instantâneo do fluxo magnético. Conseqüentemente, se a forma de onda da tensão correspondesse exatamente à do fluxo no núcleo do equipamento no instante do chaveamento, não haveria transitório [20].

É importante esclarecer que embora a energização do transformador seja a principal causa das correntes de *inrush*, quaisquer transitórios no seu circuito podem gerar essas correntes [20], tendo-se como exemplos a recuperação da tensão após a eliminação de uma falta externa; ou após a energização de um transformador operando em paralelo com outro em serviço.

3.4.3 Fatores que Influenciam a Corrente de Energização

O modelo matemático da corrente de *inrush* é tratado em [1;15;18; e 21], mas é na última que se descrevem mais detalhadamente os fatores que influenciam a corrente de *inrush*. Estes esclarecem que o equacionamento trifásico desta corrente durante a energização de um transformador é relativamente complexo devido às não

linearidades envolvidas. Conforme [18], a saturação é a característica predominante que gera a não linearidade dos núcleos ferromagnéticos dos transformadores de potência, mas há outras como o efeito pelicular e de proximidade; capacitâncias parasitas entre espiras e entre enrolamentos e terra; perdas por corrente de Foucault e por histerese.

Como se observa em [15; 21], também é feito o tratamento simplificado usual, a partir do caso monofásico estende-se às conclusões ao caso trifásico. Energizando um transformador monofásico pelo primário a vazio, pode-se desprezar o enrolamento secundário, pelo fato das correntes deste lado serem nulas, pois não há corrente no secundário sem carga. Para exemplificar esta simplificação, um circuito não linear é ilustrado na Figura 3.2, representando um transformador com secundário em vazio [22], com o indutor L sendo representado em negrito no circuito.

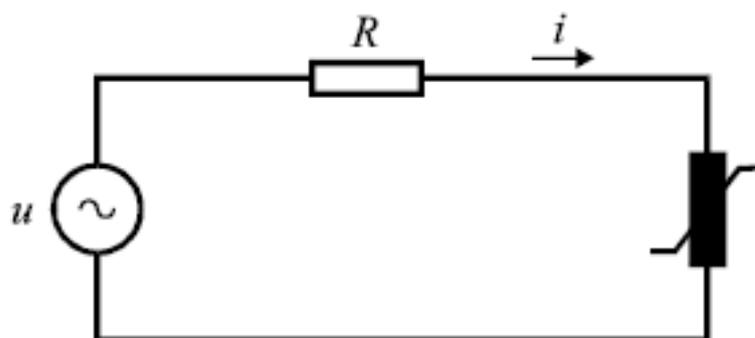


Figura 3.2: Representação de um transformador

No tratamento matemático dado por [15;21], a energização de um transformador é inicialmente interpretada como a energização de um circuito RL como mostrado no circuito da Figura 3.2. Devido ao indutor L não ser de fato linear, deve-se introduzir no modelo a curva de magnetização do transformador energizado em estudo. O ramo de magnetização do transformador é determinado por uma curva de magnetização $V \times I$, com duas regiões bem definidas. A Figura 3.3 ilustra a curva de magnetização [21], a qual é obtida com ensaios e medições de valores eficazes de tensões e correntes.

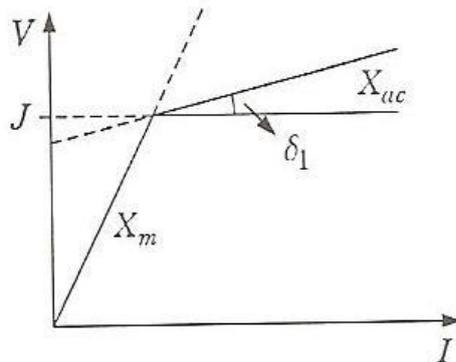


Figura 3.3: Curva de magnetização

Na curva de magnetização, a primeira linha sólida representa a reatância X_m correspondendo à região linear do ramo da magnetização para uma condição não saturada. Normalmente o transformador opera nessa região [21]. A segunda linha sólida representa a reatância X_{ac} que define uma região em que os níveis de fluxo saturam o núcleo, obrigando o fluxo a se fechar pelo ar. Nessa região saturada, as correntes contêm muitas harmônicas.

Por conveniência é feita uma interpretação das correntes saturadas, por um modelo de indutância, usando uma curva ϕi a partir de valores instantâneos de fluxo e corrente.

Na Figura 3.4 tem-se uma fonte ideal de tensão alimentando uma bobina não linear [21]. O fluxo na bobina é a integral da tensão aplicada, portanto temos o fluxo ϕ atrasado em 90° em relação à tensão $e(t)$.

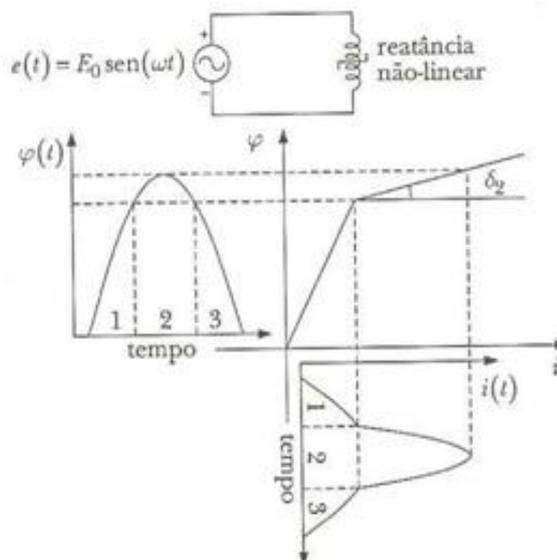


Figura 3.4: Interpretação da saturação

As regiões 1 e 3 do gráfico da Figura 3.4 apresentam, para um semi ciclo do fluxo, as regiões não saturadas da corrente. Considerando que a fonte de alimentação é ideal, o fluxo tem um comportamento senoidal. Uma condição de saturação é mostrada na região 2 da mesma figura, em que as correntes podem atingir picos elevados.

Para considerar o fluxo residual que permanece no enrolamento, mesmo com o transformador desligado, deve-se introduzir no modelo a curva de histerese do transformador energizado.

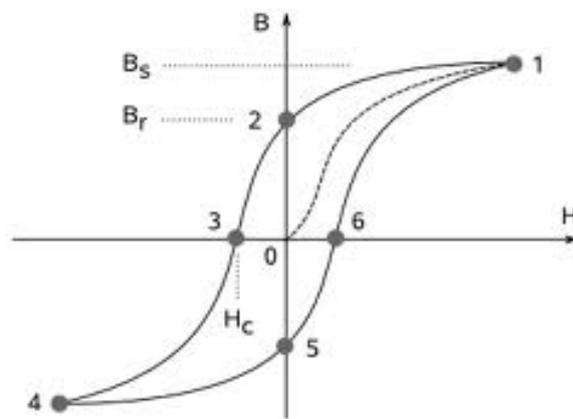


Figura 3.5: Curva de histerese

Na Figura 3.5 está ilustrada a curva de histerese [21], onde se pode observar no eixo horizontal o campo magnético H , e no eixo vertical a densidade fluxo magnético B . Partindo da origem (zero), o campo magnético aumenta progressivamente até o valor de saturação, produzindo a curva inicial 0-1. No ponto 2, não há nenhuma corrente de magnetização ($H = 0$) e o valor da densidade de fluxo magnético não é nulo, significando uma magnetização residual B_r . Para anular a magnetização residual, é necessário um valor negativo de intensidade H_c , caracterizado pelo ponto 3. O aumento do valor negativo de H atinge o ponto de saturação 4, de sentido inverso ao 1 e o caminho de retorno até o ponto 1 inicial é dado pela curva 4-5-6-1, com B_r e H_c de sinais contrários aos sinais anteriores.

Os fenômenos das perdas no núcleo do transformador são tratados conforme [15], onde se explica que uma fração da energia armazenada é perdida no ciclo de histerese. Uma quantidade de energia proporcional à área do ciclo de histerese é perdida por ciclo. Considerando o ciclo de histerese, a curva ϕ_{xi} da Figura 3.4 se

altera, obtendo um formato semelhante ao da curva de histerese e como consequência o formato da onda da corrente de *inrush* ixt também sofre alteração.

Simplificando ainda mais o circuito ilustrado na Figura 3.2, excluindo-se a resistência [21] a energização de um transformador, no seu aspecto fundamental, pode ser inicialmente interpretada pela excitação de uma bobina linear, expressa em 3.1 e 3.2 [21].

$$I_{(t)} = \frac{1}{L} \int_0^t E_0 \text{sen}(wt) dt \quad (3.1)$$

$$I_{(t)} = \frac{E_0}{wL} [1 - \cos(wt)]. \quad (3.2)$$

O oscilograma da correlação tensão $v(t)$ fluxo magnético $\varphi(t)$ e corrente de magnetização $i(t)$ é ilustrado na Figura 3.6 [21]. Nesta, observa-se a importância do momento em que é feita a energização. Se a energização é feita no instante t_a em que o fluxo passa por zero, não há variação instantânea de fluxo e, portanto não aparece componente transitória de fluxo ou corrente. Por outro lado, se a energização é feita no instante t_b , momento em que fluxo passa pelo seu máximo, a componente transitória também é máxima.

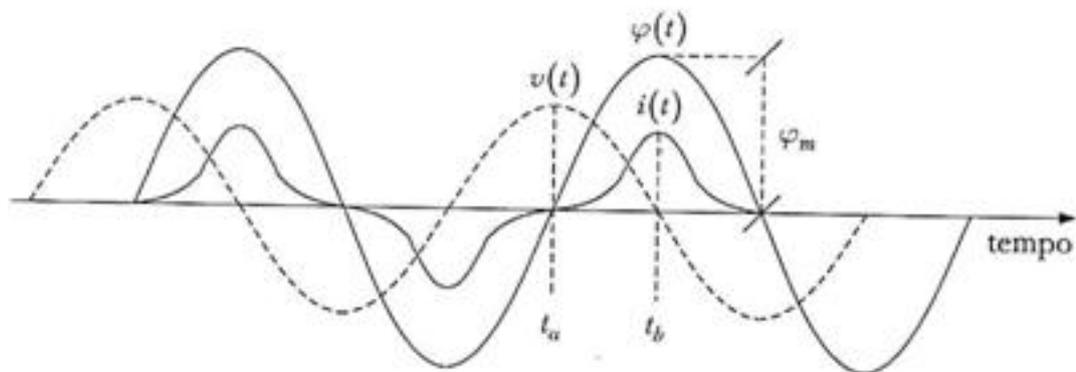


Figura 3.6: Relação tensão fluxo e corrente de magnetização

Diversos fatores influenciam a amplitude, a forma e a duração das correntes de energização, o que torna difícil a sua predição. Os principais fatores foram listados em [20] como sendo:

- Ângulo de chaveamento (α) - A amplitude da corrente de magnetização é proporcional ao ângulo de chaveamento do transformador, de modo que a corrente é máxima quando o transformador é ligado no ponto de tensão zero ($\alpha = 0^\circ$). Se o transformador for conectado no ponto de tensão máxima, a corrente de energização será mínima ($\alpha = 90^\circ$).
- Densidade do fluxo residual - A corrente de energização é significativamente agravada pela densidade do fluxo residual. Deste modo, verifica-se que quanto maior for o fluxo residual, maior será a corrente de energização, principalmente se o fluxo residual possuir a mesma polaridade do fluxo principal.
- Nível de tensão da rede - É factível verificar que quanto maior for a tensão à qual o transformador está submetido, maior será o fluxo e, conseqüentemente, a corrente de magnetização, uma vez que o fluxo (ϕ) é diretamente proporcional à tensão máxima (V_{max}).
- Resistência série - A resistência do sistema ao qual o transformador está inserido tem efeito predominantemente na corrente de energização, devido principalmente ao amortecimento fornecido, o que proporciona uma redução na amplitude da corrente inicial de magnetização. Esta característica explica, por exemplo, por que os transformadores próximos às unidades geradoras possuem, geralmente, uma corrente de energização mais longa e com maior amplitude.
- Nível de saturação do núcleo - É importante lembrar que a corrente de energização inicial é diretamente proporcional ao fluxo que circula fora do núcleo magnético, como por exemplo, pelo ar. Desta forma, quanto mais saturada estiver o ferro presente no núcleo do transformador, maior será a

porção do fluxo total que se fechará através do ar, tornando a corrente de energização mais proeminente.

- Modo de energização do transformador - Quando um transformador for energizado no modo monofásico, a corrente de magnetização será inferior quando comparada à da sua conexão através de um disjuntor trifásico. Além disso, a corrente de energização por unidade do lado de tensão mais baixa é menor que um lado de tensão mais alta.
- Energização em carga - Se o transformador for conectado em carga, os picos da corrente de magnetização serão afetados até certo ponto pelo fator de potência da carga. Quando esta é energizada com uma elevada corrente e fator de potência próximo ao unitário, o pico de corrente tende a ser menor, mas se o fator de potência for reduzido, o pico de corrente será maior.

Estes fatores foram resumidos e apresentados na Tabela 3.2, com o acréscimo da coluna dos tipos de melhorias (quando aplicáveis) que podem ser implementadas, com o objetivo de minimizar a corrente de *inrush* nos transformadores do CLA.

Tabela 3.2:Fatores que influenciam as correntes de energização

Item	Fatores	Efeito	Tipo de Melhoria
1	Ângulo de chaveamento	A corrente de energização será mínima ($\alpha = 90^\circ$)	Melhoria no equipamento
2	Densidade do fluxo residual	Quanto maior for o fluxo maior a corrente de energização	Não aplicável
3	Nível de tensão da rede	O fluxo (φ) é diretamente proporcional a tensão máxima (V_{max})	Não aplicável
4	Resistência série	Amortecimento na corrente de energização	Melhoria no equipamento
5	Nível de saturação do núcleo	A corrente de energização inicial é diretamente proporcional ao fluxo que circula fora do núcleo	Melhoria no equipamento
6	Modo de energização do transformador	Se um transformador for energizado monofasicamente, a corrente de magnetização será menor	Melhoria no procedimento e equipamento
7	Energização sob carga	Os picos da corrente de magnetização serão afetados pelo fator de potência da carga	Melhoria no procedimento

Outro ponto relevante segundo [20] trata da energização solidária, ou *sympathetic inrush*, pois apesar das correntes de energização serem elevadas, estas são calculadas assumindo-se que o transformador está isolado do sistema, não possuindo outros equipamentos similares conectados. Na prática, porém, os equipamentos são energizados em paralelo com os demais dispositivos, o que pode provocar transitórios e sobretensões apreciáveis nos transformadores próximos, mesmo que estes estejam em operação normal. É importante ressaltar que esta condição operativa pode provocar funcionamento inadequado da proteção associada ao transformador, já que correntes diferenciais indesejadas podem ser geradas.

3.5 Transitórios e Ferro-ressonância em Transformadores

O termo ferro-ressonância surgiu na década de 1920 [21;23], apesar do interesse despertado ainda não ter sido totalmente compreendido até os dias de hoje. Refere-se a todos os fenômenos oscilatórios que ocorrem num circuito elétrico composto por uma indutância não linear (ferromagnética e saturável), uma capacitância, uma fonte de tensão e uma resistência de baixo valor em série ou paralelo. Entretanto, nem todos os circuitos estão sujeitos a este fenômeno, uma vez que os valores de capacitância e de indutância têm que formar condições particulares de operação no sistema.

Ferro-ressonância refere-se a um tipo especial de ressonância que, no caso particular de redes elétricas de energia, envolve elementos não lineares, como é o caso de uma indutância de um transformador, a capacitância das linhas e/ou cabos e a capacitância dos bancos de capacitores. O termo ferro-ressonância segundo [15], deriva do fato das indutâncias envolvidas geralmente serem provenientes do núcleo de ferro do transformador, e o seu caráter não linear também apresenta alguns efeitos peculiares.

A ferro-ressonância pode ser causada por sobretensões transitórias [23], devido a descargas atmosféricas, manobras de disjuntores, energização ou desenergização de transformadores ou cargas, ocorrência ou remoção de faltas, entre outros. Pode ser causada também devido à forma de ligação dos transformadores, onde a ligação com enrolamento em triângulo permite a ocorrência do fenômeno para cabos com comprimentos superiores a 30 metros.

Outras condições para o estabelecimento da ferro-ressonância em circuitos trifásicos com transformadores são citados em [21], como exemplos: transformadores de potencial em abertura trifásica; abertura monofásica de transformador de potencial indutivo; abertura monofásica de circuitos de média e baixa tensão com transformadores não aterrados. Observa-se também que a presença de uma pequena carga no secundário do transformador, por exemplo, de 2% a 5% da potência nominal, muitas vezes já é suficiente para eliminar as condições ferro-ressonantes.

Durante o projeto de uma instalação de média ou de alta tensão devem ser tomadas medidas para evitar este fenômeno, uma vez que danos materiais irreversíveis nos equipamentos da instalação podem ser causados. Estes danos, conforme [23], são causados por sobretensões que podem atingir valores na ordem de 4 a 5 pu e podem surgir no regime permanente ou transitório.

3.6 Harmônicas Devido à Energização de Transformadores

A corrente de energização de transformadores pode originar outro tipo de transitório interno, que é o aparecimento de harmônicas pares de corrente, especialmente a 2^a e a 4^a, de acordo com [20]. A razão disso é a assimetria de meia onda que ocorre durante a magnetização não linear do núcleo, já ilustrada na Figura 3.4. O magnetismo residual faz com que o laço de histerese, Figura 3.5, resulte em uma saturação desigual dos semi ciclos positivos e negativos, e após alguns ciclos o laço se torna simétrico e o transformador passa a operar da forma esperada. A assimetria pode ocorrer também pela presença da componente CC.

O conteúdo harmônico de um sinal é usualmente quantificado pela Distorção Harmônica Total (DHT), que relaciona os valores eficazes dos componentes de frequências superiores, e a da fundamental conforme 3.3 [1]. A DHT é um indicador usado na análise para avaliar a QEE na SE CT-CLA sendo explorada no Capítulo 4.

$$DHI_t = \sqrt{\frac{\sum_{n>1}^{n_{\max}} I_n^2}{I_1^2}} \times 100(\%) \quad (3.3)$$

Onde:

DHI_T = distorção harmônica total de corrente;

I_n = valor eficaz da corrente de ordem n ;

I_1 = valor eficaz da corrente fundamental;

n = ordem da componente harmônica.

A energização de transformador geralmente apresenta uma queda de tensão repentina seguida por uma lenta recuperação, semelhante à partida de um motor [1]. No entanto, a queda é diferente nas três fases e é caracterizada por intensas distorções harmônicas, devidas principalmente ao severo nível do equilíbrio harmônico no componente da tensão. A Figura 3.7 mostra harmônicas de ordens de 1 a 8 para a tensão [1], devido à energização de um transformador. Estes espectros harmônicos foram obtidos através da aplicação de um algoritmo de DFT (*Discrete Fourier Transform*) para um período de um ciclo e atualizando o resultado a cada ciclo.

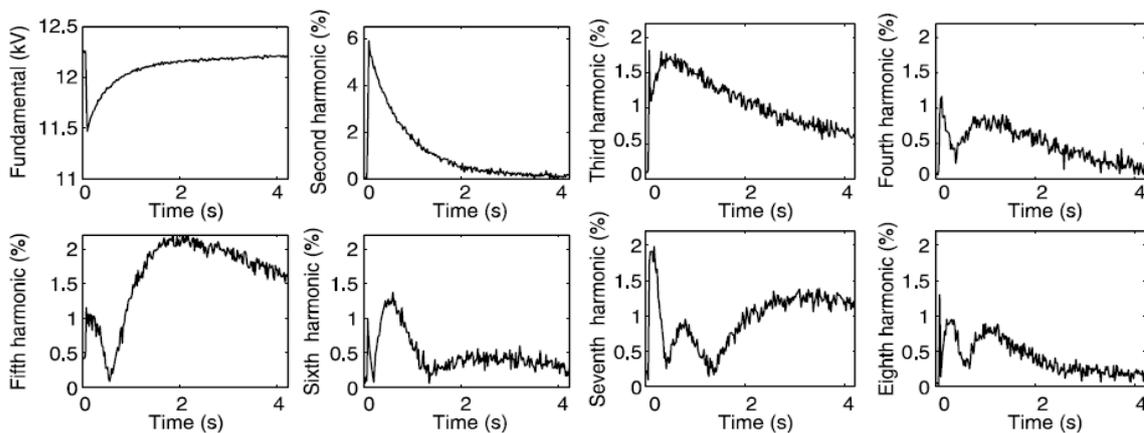


Figura 3.7: Harmônicas de ordens de 1 a 8 da tensão

Nesta figura observa-se que a tensão da segunda harmônica tem seu valor mais alto no início do transitório, amplificado por um fenômeno chamado ressonância harmônica [1]. Devido à presença de bancos de capacitores ou cabos

subterrâneos, a impedância da fonte torna-se muito grande para determinadas frequências.

Um dos métodos utilizados para prover a proteção diferencial, da habilidade de distinção entre uma condição de energização e a de falta, segundo [24], é baseado na restrição por componentes harmônicos. A corrente de *inrush* é abundante em componentes harmônicos de 2ª ordem, com valores característicos acima de 16% do componente da frequência fundamental, podendo atingir até 70% da mesma. Entretanto, no caso de uma falta, com exceção de um possível decaimento do componente CC, os componentes harmônicos estarão limitados à frequência do sistema. Portanto, a corrente diferencial pode ser analisada pelo conteúdo da segunda harmônica para restringir o disparo do relé durante a magnetização.

As harmônicas podem aumentar as perdas de magnetização por histerese, no núcleo de ferro do transformador, e causam ainda a distorção das formas de onda de tensão e corrente, como demonstra [25]. As componentes harmônicas da corrente aumentam as perdas de fluxo no cobre, enquanto que o componente harmônico da tensão afeta as perdas no núcleo de ferro. Essas combinações afetarão o desempenho do transformador, porque irão conduzir ao aumento da temperatura e diminuir a vida útil de seu isolamento.

Para minimizar esse distúrbio em [20] sugere-se a solução usual de colocar um contato com resistor de pré-inserção. A função desse resistor é limitar a corrente de *inrush*, permitindo a energização controlada do transformador. Uma segunda função do resistor é proporcionar o amortecimento de eventuais oscilações de corrente por excitação de frequências ressonantes. Há a precaução de curto-circuito do resistor durante o fechamento completo através de uma chave *by-pass*. Ao abrir os contatos, o resistor pode novamente exercer a função de atenuar o impacto do desligamento do transformador e evitar o arco da corrente indutiva.

CAPÍTULO 4

MONITORAMENTO E ANÁLISE DA QEE NO CLA

4.1 Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta uma breve descrição do sistema elétrico estudado, aborda os critérios e os procedimentos usados no monitoramento da SE do CT-CLA, e a partir dos dados coletados são feitas análises dos eventos críticos que afetam a QEE no CLA. São também avaliados os indicadores de QEE e o perfil de tensão suprida no CLA, além de propor melhorias no Procedimento Operacional para Processos Especiais.

4.2 Descrição do Sistema Elétrico Analisado

Para este estudo utilizou-se uma subestação abaixadora de 13.8 kV, localizada em Alcântara-MA e pertencente ao CLA. A Figura 4.1 [26] mostra os barramentos do SIN no Maranhão. A partir da Barra da Rede de Operação do SIN em Miranda-MA, com tensão de 230 kV e frequência de operação de 60 Hz. Na subestação inicia-se uma linha de transmissão com a tensão de 138 kV indo até a subestação de Três Marias, próximo à cidade de Pinheiro-MA, onde a tensão é novamente abaixada, saindo uma linha de transmissão de 69 kV a qual vai até a subestação da distribuidora local, que fornece energia para o CLA e para a cidade de Alcântara. Desta subestação sai uma linha de transmissão de 6,4 km que alimenta as seis subestações do CLA, entre elas a de interesse (SE CT-CLA).

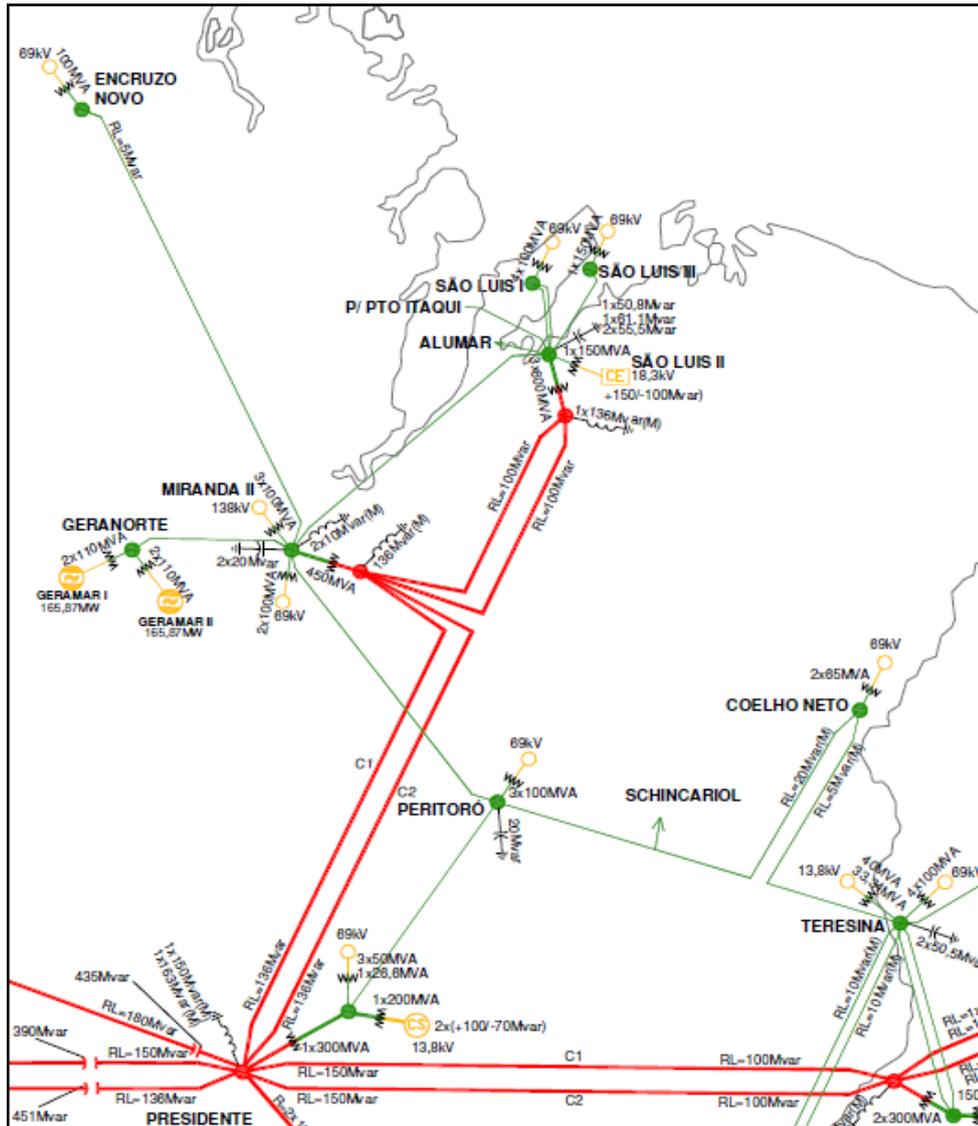


Figura 4.1: Barramentos do SIN no Maranhão

A linha de transmissão que conecta a subestação da distribuidora ao CLA, bem como as linhas de transmissão internas, utilizam cabos ACSR 2/0 AWG, que admitem corrente elétrica de 270 A. A resistência a 25⁰ C para correntes com 25% da corrente nominal é de 0,44 Ω/km, com indutância de 0,46 Ω/km.

4.2.1 Descrição da Subestação CT-CLA

Entre as seis subestações do CLA, a do Centro Técnico é a principal, suprindo cargas críticas como às da Sala de Comando e Controle e das antenas de teledestruição. Estas últimas são usadas pela equipe de segurança de voo para

acompanhar o lançamento e destruir o foguete, caso haja desvio da trajetória nominal, por questão de segurança, minimizando os riscos. O mesmo estudo pode ser estendido/adaptado para as demais subestações devido às similaridades dos equipamentos existentes, e descritos a seguir. A Figura 4.2 ilustra o diagrama unifilar atualizado e simplificado da subestação de interesse (CT-CLA).

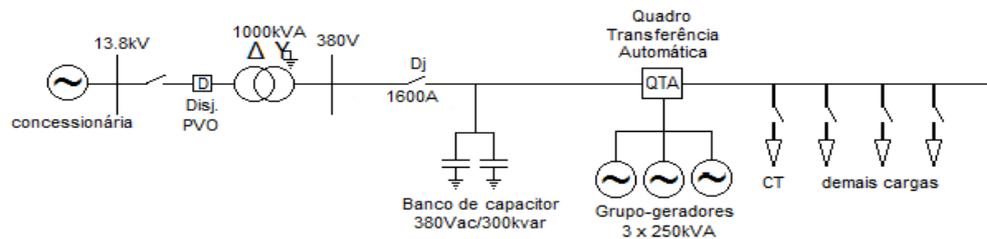


Figura 4.2: Diagrama unifilar da subestação CT-CLA

4.2.1.1 Transformadores

Estão presentes dois transformadores trifásicos (abaixadores na configuração Δ/Y aterrada com entrada de 13.800 V e saída de 380 V) operando em paralelo em regime contínuo, um por vez, e descritos na Tabela 4.1.

Ao longo do monitoramento o que operava era o externo 02, cuja foto está ilustrada na Figura 4.3.

Tabela 4.1: Características dos transformadores

Subestação	Referência do Equipamento
SE CT	EXTERNO 01 TRAFO 500 VA; 13.800V;60HZ IMPEDÂNCIA 4,07 %; ELEV. COBRE 55°C ELEV. ÓLEO55° C; ÓLEO TIPO B; NIV. ISOL. AT-BT 34/110 –10 KV MARCA UNIÃO.
	EXTERNO 02 TRAFO 1000VA; 13.800V;60HZ IMPEDÂNCIA 6,14%; ELEV. COBRE 55°C ELEV. ÓLEO50° C; ÓLEO TIPO B RESFR. ONAN; NIV. ISOL. AT-BT 34/110 –10KV MARCA UNIÃO.



Figura 4.3: Foto do Transformador SE CT-CLA

4.2.1.2 Banco de Capacitores

O banco de capacitores é um controlador de fator de potência trifásico de 380 V com 300 kVAr, da marca SIEMENS, modelo EL-2005-2j. A Figura 4.4 apresenta uma foto deste controlador.



Figura 4.4: Foto do Banco de Capacitores SE CT-CLA

4.2.1.3 Sistema de Autogeração

O sistema de autogeração é formado por três grupos geradores que operam em paralelo, na configuração de dois por vez, conforme os horários previstos na cronologia de lançamento (Anexo I), apresentando as seguintes características: motor diesel; gerador trifásico 380V; potência nominal de 250 kVA cada. A Figura 4.5 mostra uma foto do grupo gerador.



Figura 4.5: Foto do grupo gerador SE CT-CLA

Faz parte do sistema o quadro de transferência automático – QTA (Figura 4.6), responsável pelo controle e a comutação da energia da concessionária para o grupo gerador, incluindo chaves contadoras, relés de comando e vários instrumentos de medição.



Figura 4.6: Foto do QTA SE CT-CLA

4.2.2 Cargas Críticas do Centro Tecnológico

As principais cargas críticas do prédio do Centro Tecnológico são: Rede de Computadores Operacionais, Sistema de Sinalização Operacional, Sistema de Teledestruição, Sistema de Comunicação Operacional, Sistema Fechado de Televisão, Sistema de Telecomunicação com Estações Remotas e Sistema de Segurança de Superfície e de Voo. Mais detalhes técnicos sobre as cargas foram considerados nas análises, mas não puderam ser publicados por questão de sigilo organizacional. A Figura 4.7 mostra uma foto dos bastidores do Centro de Controle Operacional, AEB [2].



Figura 4.7: Centro de Controle Operacional do CT-CLA

4.3 Critérios Para Monitoramento da Subestação CT-CLA

Monitoramento da QEE, segundo [5], é o processo de coleta, análise e interpretação dos dados de medição brutos e sua conversão em informações úteis, uma vez que o processo de coleta de dados é normalmente realizado por medição contínua de tensão e corrente durante um período prolongado.

A definição precisa dos objetivos do monitoramento é fundamental, de acordo com as referências [5;10], pois os objetivos para um projeto específico vão determinar a escolha dos equipamentos de monitoramento, o método de coleta de dados e a técnica de análise a ser empregada.

Dados os fatos históricos, entre os quais os descritos no Capítulo 2, e aos registros recentes feitos em fichas de não conformidades – FNC, preenchidas por usuários de diversos setores do CLA, relatando distúrbios elétricos e consequentes danos em equipamentos elétricos e em GSE, definiu-se como objetivo específico do monitoramento, caracterizar os principais fenômenos eletromagnéticos que afetam a QEE do CLA, enfatizando VTCD e os transitórios por serem mais severos para a sensibilidade elétrica dos GSE. Ainda, registrando os dados que servem de base para acompanhamento avaliativo, diagnóstico preditivo e estudos de soluções eficazes.

O período escolhido para monitoração foi durante a operação FOGTREIN III, com início em 23 de maio de 2012 e término em 29 de maio de 2012. Esta operação treinou o pessoal envolvido e utilizou quase todos os GSE do CLA, objetivando manter a operacionalidade do Centro e lançar os foguetes FTB e FTI de fabricação nacional pela AVIBRAS, sendo uma típica operação de foguete de porte médio. No Anexo I tem-se a cronologia de lançamento com o resumo cronológico dos testes, detalhes do funcionamento dos GSE e procedimentos operacionais executados até o lançamento e rastreamento do foguete.

De acordo com [5], é muito importante que o local da monitoração seja selecionado cuidadosamente com base nos objetivos desejados. Como o escopo da monitoração envolve a caracterização e problemas específicos da QEE enfrentados pelo centro, foi seguida a sugestão de [5] de que o local escolhido para o monitoramento fosse o barramento de entrada das cargas na subestação, pois incluiria o efeito do transformador abaixador. Os dados coletados também podem caracterizar as variações da carga e os níveis de distorção harmônica dos equipamentos do CT. Além destas vantagens, estes dados podem fornecer indicações da origem das perturbações.

O mesmo autor informa ser importante que o monitoramento deva registrar as mesmas variações que afetam os equipamentos sensíveis. Transitórios de alta frequência, em particular, podem ser significativamente diferentes se houver uma distância significativa entre o equipamento de monitoração e o equipamento afetado.

Por isso o local escolhido foi a Subestação do Centro Técnico - CLA, principal prédio onde se localiza a Sala de Comando e Controle com as interfaces dos principais sistemas e controles dos GSM, além das antenas de telecomunicações e

teledestruição. Na subestação o monitoramento se concentrou no barramento de entrada das cargas prioritárias.

4.4 Breve Histórico dos Equipamentos Usados para Monitoramento de QEE

A norma IEEE 1159 [10] relata a história do desenvolvimento dos equipamentos de monitoramento de QEE. Resume a melhoria tecnológica dos equipamentos em quatro gerações:

- A primeira geração começou em meados da década de 1970. A saída desses monitores era baseada principalmente em texto, indicando uma perturbação, o tipo de evento e a magnitude;
- A segunda geração incluía saídas gráficas das formas de onda, que eram capturadas como parte do evento;
- Em meados dos anos de 1980 surgiu a terceira geração de instrumentos, com taxas de amostragem da frequência em megahertz para fornecer informações detalhadas sobre transitórios de média e alta-frequência.
- A quarta geração é a atual, que associa vários componentes em um sistema computacional com interfaces baseadas em normas da QEE, o que permite uma maior flexibilidade, sofisticação e ao mesmo tempo redução de custos.

4.5 Equipamentos Usados no Monitoramento da Subestação CT-CLA

Os instrumentos utilizados para monitorar fenômenos eletromagnéticos que afetam a QEE podem variar desde um simples voltímetro analógico até equipamentos sofisticados de múltiplos canais permanentemente instalados no sistema de energia para monitoração contínua [10]. A seleção e uso do tipo correto de equipamento requer que o usuário entenda as capacidades e limitações do instrumento, suas respostas às variações de energia do sistema e os objetivos específicos da análise [10].

Baseado nestas considerações foi usado na monitoração o equipamento conhecido como *Power Platform 4300*, da DRANETZ – BMI, disponível no laboratório de qualidade de energia da UFMA, e que satisfaz os requisitos para atingir os objetivos do monitoramento. Entre as características que levaram a sua escolha destacam-se [27]: ser portátil; possuir oito canais de medição de QEE; possibilidade de armazenamento e transmissão dos dados para um computador; exibição de texto telas de ajuda; e *software* utilitário com interface amigável. A Figura 4.8 mostra uma foto do equipamento.



Figura 4.8: Foto do *Power Platform 4300*

Para o início do monitoramento foi feita a comprovação metrológica e verificado que o instrumento se encontrava calibrado e que as condições de temperatura do local onde se instalou o instrumento estavam dentro do limite especificado no manual [27]. Seguindo os procedimentos iniciais de monitoramento do manual foi configurado o intervalo de tempo, editado os limites dos parâmetros, definido a forma de onda a ser capturada e sincronizada a frequência.

As primeiras medidas foram comparadas com outros instrumentos e com instrumentos da própria SE CT – CLA, verificando-se que as medições estavam corretas.

4.6 Análises das VTCD do Monitoramento da SE CT-CLA

Após o monitoramento os dados foram armazenados no cartão de memória do equipamento e posteriormente transferidos para o computador do Laboratório de Qualidade de Energia da UFMA.

O processamento dos sinais se constitui em parte importante do monitoramento da QEE, e as técnicas de processamento de sinais se fazem necessárias para caracterização de variações e eventos [1]. Neste trabalho, para analisar, interpretar e transformar os dados brutos em informações de medições úteis utilizou-se as seguintes técnicas de processamento:

- Na primeira etapa foram trabalhados no formato original DRAN VIEW Datafile, usando as ferramentas de extração de informações do *software* utilitário do *Power Platform* 4300. O relatório de eventos apresentado pelo equipamento tem como referência para classificação a norma IEEE 1159;
- Na segunda etapa foram transformados em arquivo no formato XLS, para uso no *software* Excel, no qual foram reagrupados e selecionados por horário para separar os dados do suprimento de energia elétrica pela concessionária local, dos dados do suprimento pela autogeração elétrica do CLA preparando-os para serem examinados minuciosamente com uso de ferramentas matemáticas e gráficas.

Existem outros métodos para estimar o conteúdo espectral de um sinal, tais como [1]: filtros de Kalman, música e ESPRIT. Nesta análise dos eventos de VTCD ocorridos na SE CT-CLA, no período analisado optou-se pelos indicadores que seguem.

4.6.1 Análise do Perfil de Tensão RMS

Para quantificar sinais com formas de ondas estacionárias, são necessárias ferramentas de processamento de sinais, que tenham recursos para incluir as

variáveis estatísticas do tempo. Os dois métodos mais comumente usados são o RMS e o DFT. Neste estudo optou-se pelo RMS [1].

A Figura 4.9 mostra o gráfico da tensão RMS no dia 28 de maio, das 16:30 às 18:45 horas, para o suprimento da concessionária local de energia elétrica. Observa-se a constante variação da tensão nas três fases em relação aos períodos de tempo.

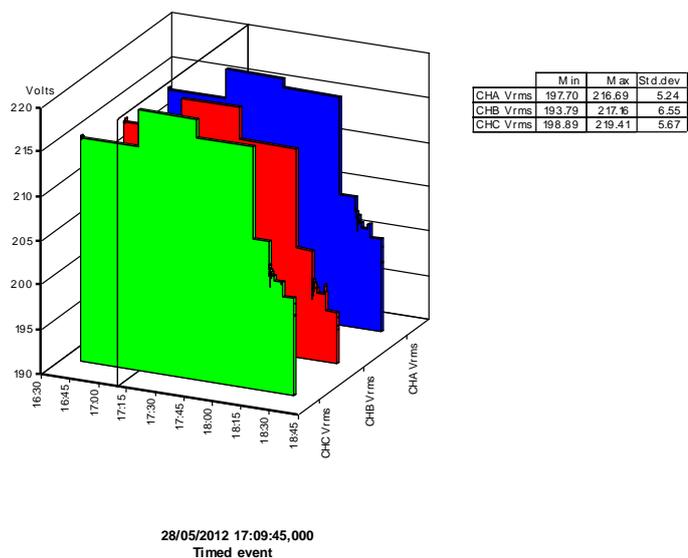


Figura 4.9: Gráfico da tensão (RMS) suprida pela concessionária local

A Figura 4.10 mostra o gráfico da tensão RMS no dia 28 de maio, das 14:15 às 16:45 horas, para a autogeração CLA. Observa-se que a tensão nas três fases em relação aos períodos de tempo tem poucas variações mantendo-se praticamente constante.

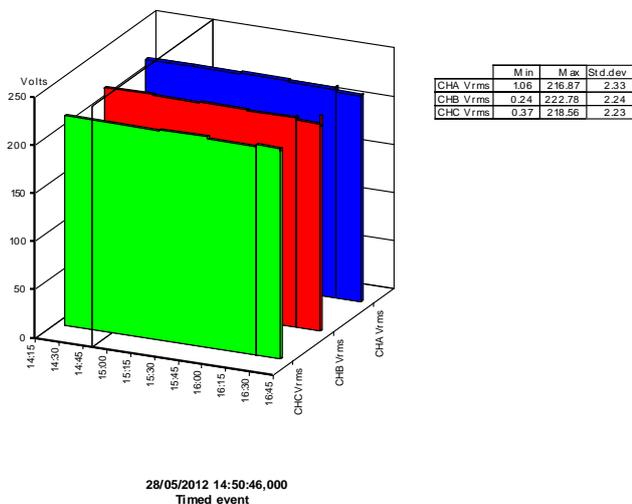


Figura 4.10: Gráfico da tensão (RMS) suprida pela autogeração

A partir dos dados de RMS dos diversos arquivos gravados no monitoramento, reagrupando com o *software* Excel, traçou-se o perfil de tensão: de suprimento pela concessionária local de energia elétrica (Figura 4.11); e para a autogeração CLA (Figura 4.12). Os valores para afundamento e elevação correspondem aos limites pré-estabelecidos, estando de acordo com a norma IEEE 1159 [10].

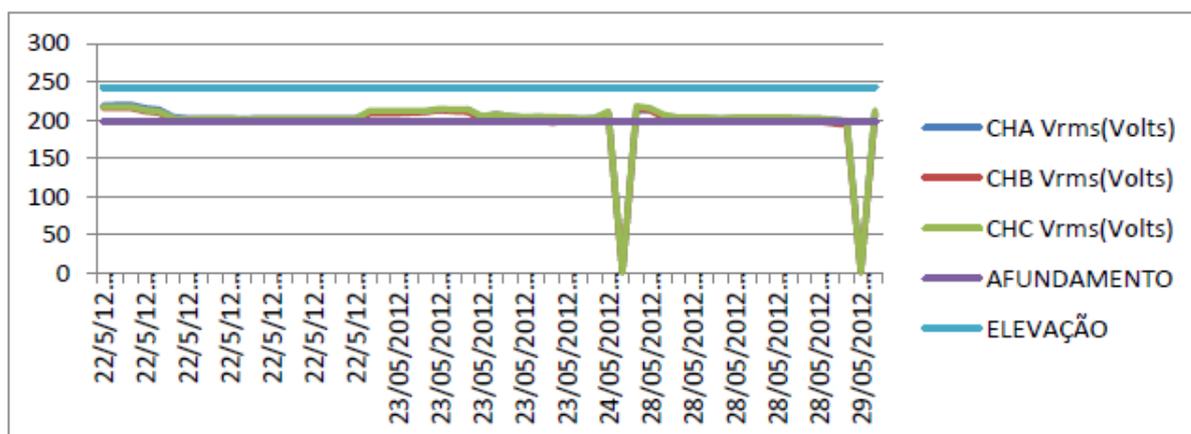


Figura 4.11: Perfil de tensão concessionária local

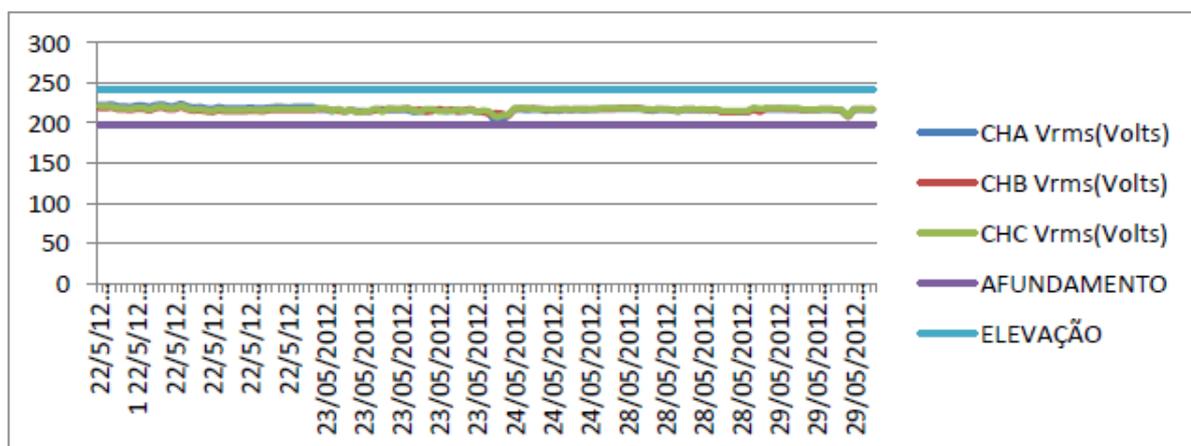


Figura 4.12: Perfil de tensão autogeração CLA

Usando os parâmetros da norma IEEE 1159 [10] com valores que caracterizam a elevação e afundamento de tensão, já descritos na Tabela 2.2, foram feitas as seguintes análises:

- Para o suprimento pela concessionária local, apresentado no gráfico da Figura 4.11, observa-se que os valores de tensão RMS se aproximam muito da reta que define afundamento de tensão, por várias vezes, mesmo por um

período curto com valores abaixo do padronizado, caracterizando diversos VTCD, os quais serão analisados com os indicadores de VTCD e os críticos com a CBEMA.

- Para a autogeração CLA, mostrada no gráfico da Figura 4.12, observa-se que a mesma se mantém, na maioria do tempo, dentro da média entre os limites de elevação e afundamento, mas ocorreram eventos que foram registrados e os críticos analisados com a CBEMA.

Outro Parâmetro para análise da tensão RMS é o da Resolução ANEEL N° 505 [28], que estabelece de forma atualizada e consolidada as disposições relativas à conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente. Esta resolução define o valor eficaz de tensão como:

- Tensão de Atendimento (TA): no ponto de entrega ou de conexão, obtido por meio de medição, podendo ser classificada em adequada, precária ou crítica, de acordo com a leitura efetuada, expressa em volts ou kV;
- Tensão Contratada (TC): tensão que deverá ser informada ao consumidor por escrito, ou conforme estabelecido em contrato, expressa em volts ou kV;
- Tensão de Leitura (TL): valor eficaz de tensão, integralizado a cada 10 (dez) minutos, obtido de medição por meio de equipamentos apropriados, expresso em volts ou kV.

A Resolução ANEEL N° 505 apresenta uma tabela com a Classificação da Tensão de Atendimento, Tabela 4.2 [28]. A partir destes valores de referência foi gerado o gráfico da Figura 4.13 para a classificação da Tensão de Atendimento da concessionária local de energia elétrica.

Tabela 4.2: Classificação da tensão de atendimento

Classificação da Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de variação da Tensão de Leitura (TL) em relação à Tensão Contratada (TC)
Adequada	$0,95 TC \leq TL \leq 1,05 TC$
Precária	$0,93 TC \leq TL < 0,95 TC$ ou $1,05 TC < TL \leq 1,07 TC$
Crítica	$TL < 0,93 TC$ ou $TL > 1,07 TC$

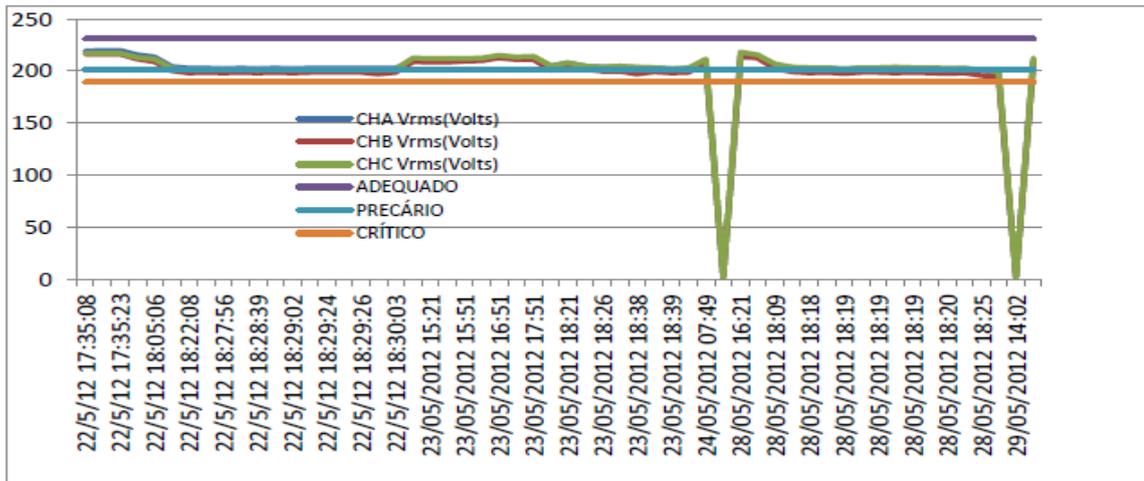


Figura 4.13: Tensão de Atendimento da concessionária local

Analisando os critérios da Resolução ANEEL N° 505, observa-se que a Tensão de Atendimento da concessionária local de energia elétrica, possui menos da metade das amostras na faixa de tensão adequada. Mais da metade das amostras foi classificada como precária, sendo algumas amostras classificadas como críticas. Observou-se ainda que a Fase B é a mais precária, e a fase C teve mais amostras críticas. Portanto, o nível do fornecimento estava muito abaixo do esperado ou aceitável.

4.6.2 Análise com o Indicador de VTCD

Além dos parâmetros duração e amplitude, a severidade da VTCD em cada fase é também caracterizada pela frequência de ocorrência que corresponde à quantidade de vezes, duração e amplitude que cada combinação dos parâmetros ocorre por unidade de tempo. Num ponto de monitoração, uma VTCD é caracterizada a partir da agregação dos parâmetros amplitude e duração de cada evento.

Um método para obtenção de estatísticas a partir de dados monitorados, deve incluir a agregação pelo tempo de duração do evento e pela faixa de magnitude[1]. O ONS [29] explica melhor a contabilização das combinações de amplitude e duração de afundamentos, e apresenta uma tabela com os intervalos discretizados padronizada para contabilização, na qual a amplitude é quantificada em pu da tensão nominal.

Seguindo os intervalos discretizados e padronizados pelo ONS, foi montada a Tabela 4.3 com os valores dos eventos de VTCD contabilizados para o suprimento da concessionária local de energia elétrica, e a partir desta, foi gerado o gráfico da Figura 4.14 de ocorrência de VTCD no monitoramento SE CT-CLA.

Tabela 4.3: Valores dos eventos de VTCD contabilizados

Magnitude	Duração				
	(16,67ms - 300ms)	(300 ms - 600ms)	(600 ms - 1s)	(1s - 3s)	(3s - 1min)
0,85 - 0,90	9	3	3	0	1
0,80 - 0,85	0	0	0	0	0
0,70 - 0,80	0	0	0	0	0
0,60 - 0,70	0	0	0	0	0
0,50 - 0,60	0	0	0	0	0
0,40 - 0,50	0	0	0	0	0
0,30 - 0,40	0	0	0	0	0
0,20 - 0,30	0	0	0	0	0
0,10 - 0,20	0	0	0	0	0
< 0,10	0	0	1	0	0

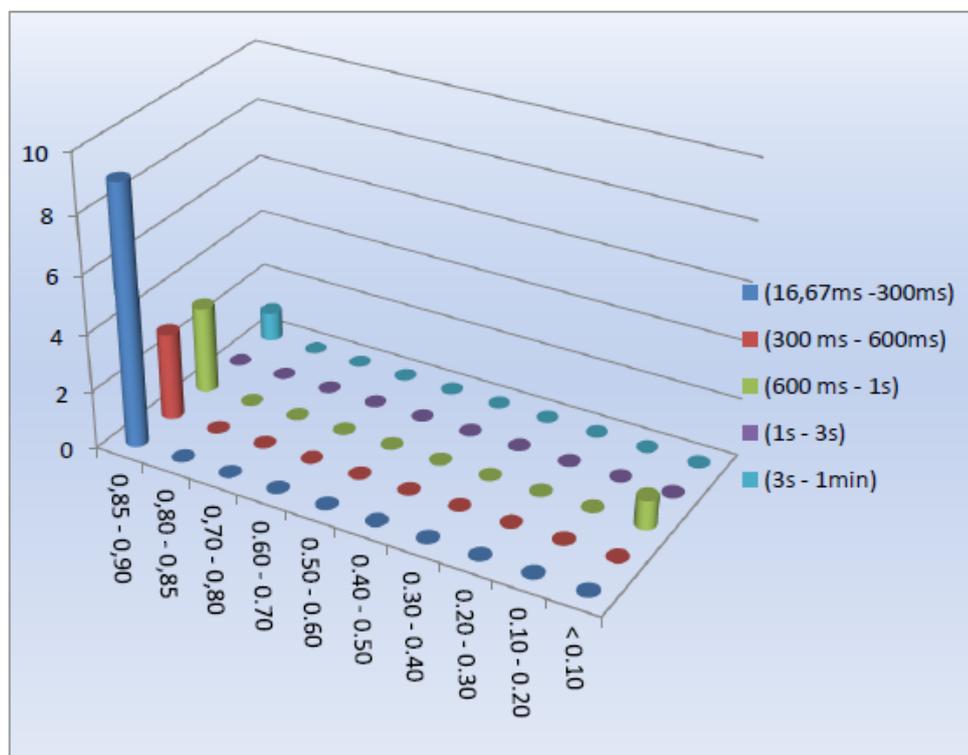


Figura 4.14: Ocorrência de VTCD na SE CT-CLA

Analisando o gráfico da Figura 4.14 observa-se que a maioria dos eventos ocorreu na magnitude 0,85 - 0,90 pu, num período de tempo de 16,67 a 300ms. Portanto, este deve ser o foco principal na busca de melhorias e soluções para os problemas de QEE do CLA.

O total de eventos ocorridos durante o monitoramento do suprimento pela concessionária local de energia elétrica foram dezessete, distribuídos conforme mostra o gráfico de eventos da Figura 4.15.

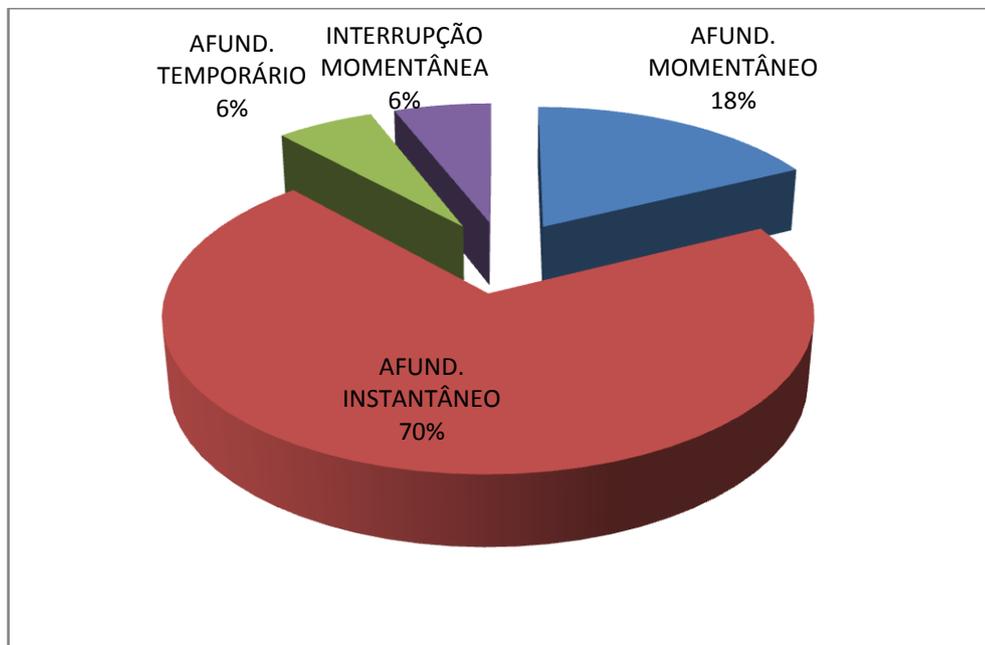


Figura 4.15: Eventos ocorridos no suprimento da concessionária local

O total de eventos ocorridos durante o monitoramento da autogeração CLA foram onze, distribuídos conforme mostra o gráfico de eventos da Figura 4.16. As interrupções momentâneas foram devido à comutação de energia elétrica quando sai à concessionária local de energia elétrica e entra a autogeração do CLA.

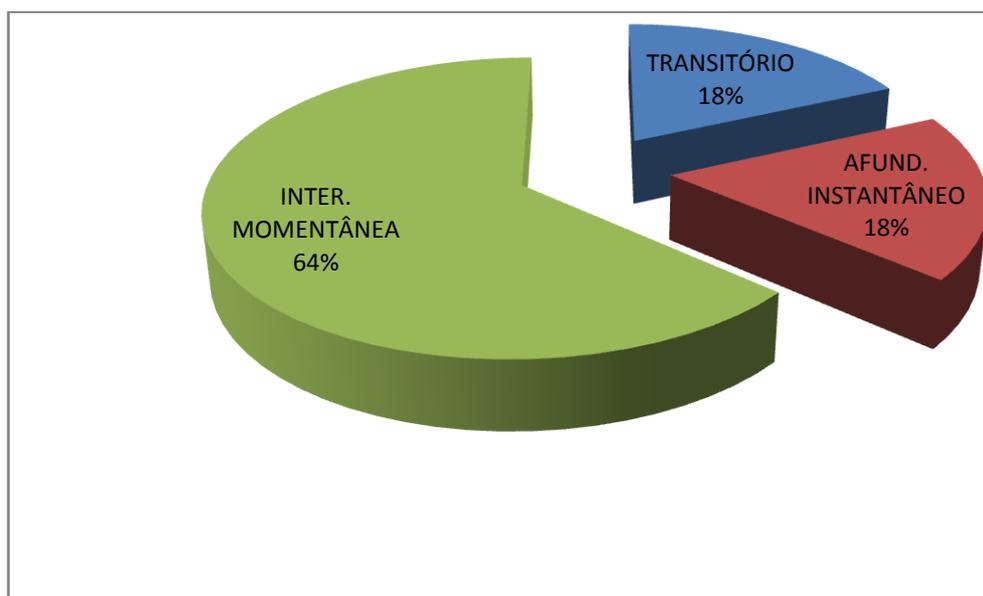


Figura 4.16: Eventos ocorridos na autogeração CLA

4.6.3 Análise com a Curva CBEMA

Entre os equipamentos sensíveis às VTCD, está o grupo dos equipamentos sensíveis à magnitude e a duração do evento [5]. Este grupo inclui praticamente todos os equipamentos que usam fontes eletrônicas de suprimento. Existem equipamentos sensíveis apenas à magnitude do evento (relés de subtensão, controle de processos, reguladores de velocidade de motores e muitos tipos de máquinas automatizadas) e equipamentos sensíveis a outras características do evento que não sejam a duração ou magnitude [5]. Ainda, alguns dispositivos são sensíveis a outras características, tais como: desbalanceamento de fases ou outros transitórios que ocorrem durante o evento.

Para identificar o grau da severidade das VTCD nos limites de suportabilidade destes equipamentos utilizou-se a curva CBEMA. Esta análise difere das demais por abordar um tratamento por evento. Com este método se identificou rapidamente se os eventos foram graves o suficiente para danificar ou provocar o mau funcionamento de alguns equipamentos sensíveis a este tipo de distúrbio.

4.6.3.1 Análise com a Curva CBEMA - Suprimento pela Concessionária Local

Na Curva CBEMA, associada ao dia 28 de maio de 2012 às 18:18 horas, durante o suprimento pela concessionária local de energia elétrica, a tensão ultrapassou o limite de 198 V, e foi caracterizada como afundamento instantâneo com magnitude de 196,8 V e duração de 0,3 segundos (Figura 4.17). Observa-se que está dentro da região de imunidade, ou seja, na área de tolerância do equipamento, mas próximo da região de sensibilidade.

Os afundamentos instantâneos foram os eventos de maior ocorrência, como se verifica na Tabela 4.3, na linha 1 e coluna 1 dos valores dos eventos de VTCD contabilizados. Portanto, embora a severidade do distúrbio não tenha sido avaliada como crítica pela duração e magnitude, pode ser grave devido à repetição do evento ou devido à sensibilidade às outras características do evento, não avaliadas pela CBEMA.

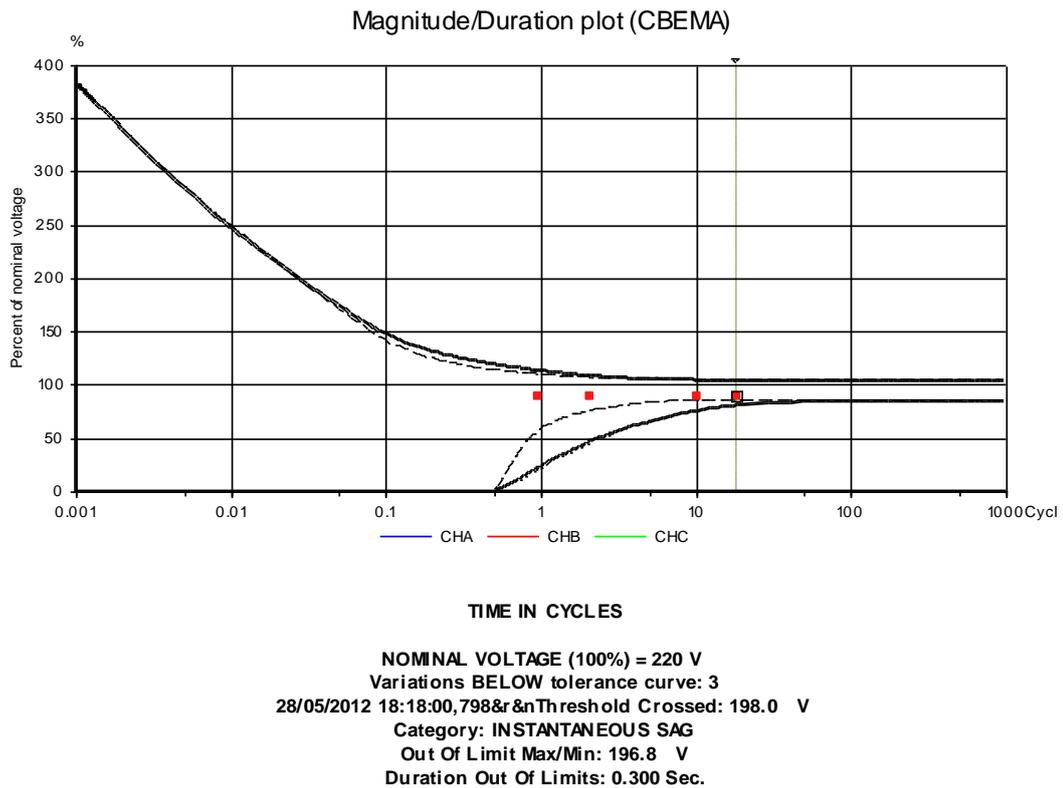


Figura 4.17: CBEMA suprimido pela concessionária local

Outra curva CBEMA de destaque foi a obtida no mesmo dia 28 de maio de 2012 às 18:19:48 horas, durante o suprimento pela concessionária local de energia elétrica, a tensão ultrapassou o limite de 198 V (0,9 pu), e foi caracterizado como afundamento temporário com magnitude de 197 V e duração de 23,712 segundos (Figura 4.18). Observa-se que está dentro da região de imunidade, ou seja, na área de tolerância do equipamento. O destaque é devido à sequência dos eventos: começando com o afundamento instantâneo da Figura 4.16; em seguida pelo afundamento temporário da Figura 4.17 e, finalizando com uma subtensão registrada no oscilograma da Figura 4.19. Embora este último não seja uma VTCD, evidencia que o nível do fornecimento da concessionária local de energia elétrica, durante a campanha de lançamento estava abaixo do admissível.

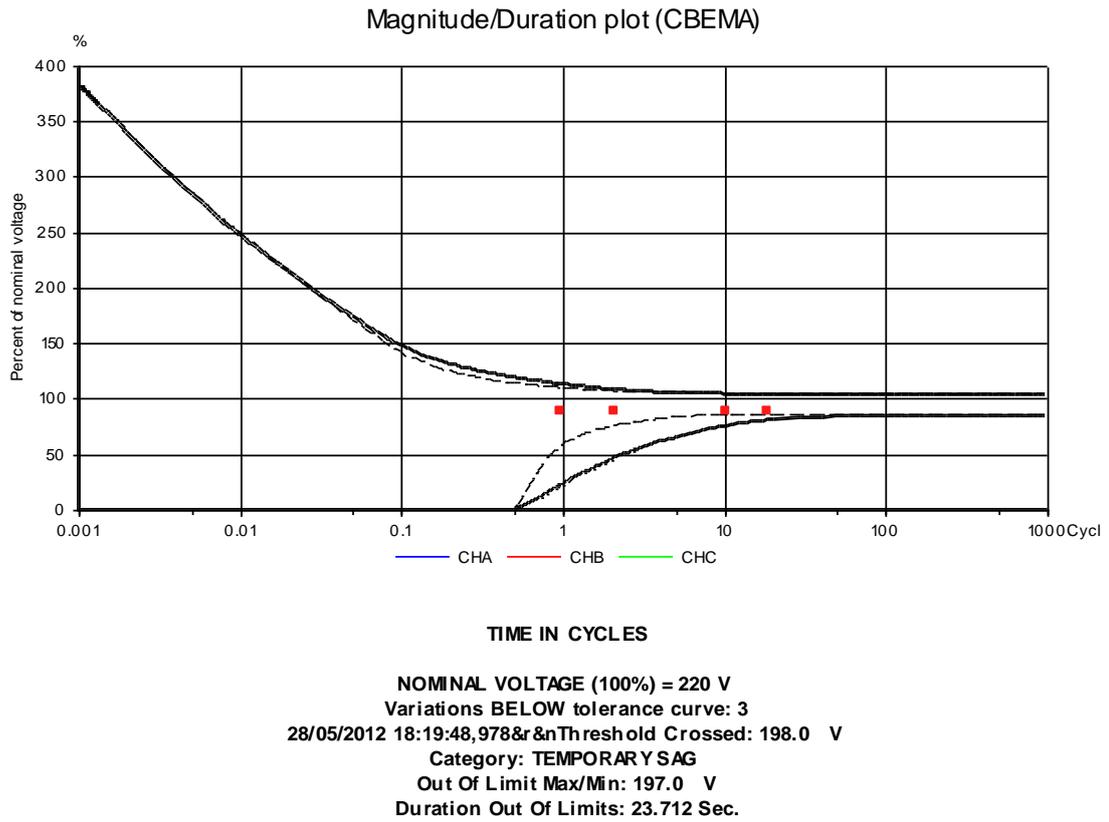


Figura 4.18: CBEMA suprimento pela concessionária local

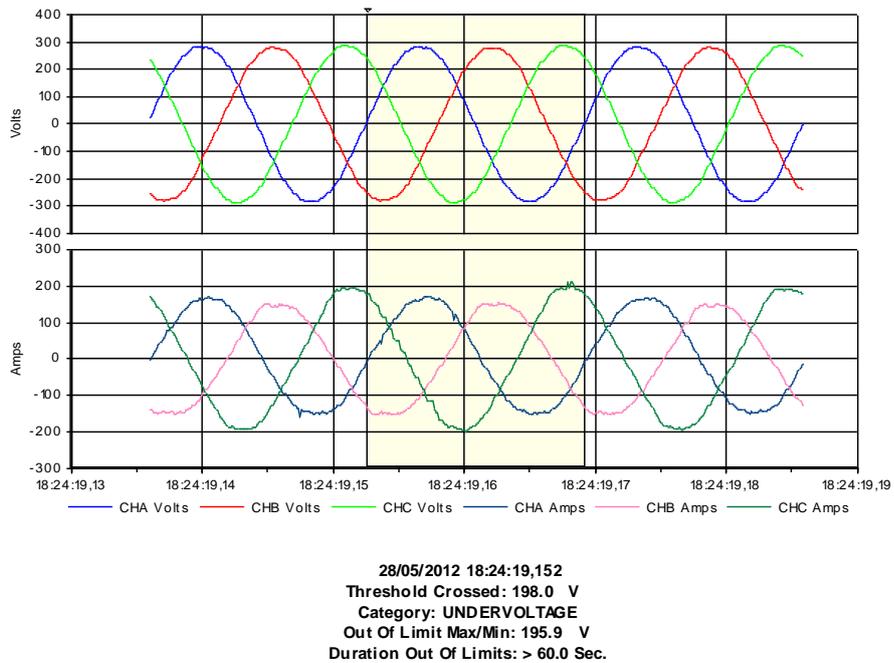


Figura 4.19: Oscilograma de subtensão

4.6.3.2 Análise com a Curva CBEMA -Autogeração CLA

Na Curva CBEMA, do dia 24 de maio de 2012 às 09:07:36 horas, durante a comutação do suprimento da concessionária local de energia elétrica para a autogeração CLA, a tensão ultrapassou o limite de 198 V, e foi caracterizado como afundamento instantâneo com magnitude de 167,1 V (0,75 pu) e duração de 0,2 segundos. Observa-se que o ponto verde que representa o evento está dentro da região de sensibilidade, com possibilidade de parada de operação dos equipamentos, em virtude da ocorrência de afundamentos de tensão registrados na Figura 4.20, juntamente com as interrupções momentâneas registrados na Figura 4.21.

Essa caracterização é importante porque a comutação de energia é uma operação que se repete, pelo menos duas vezes por dia, durante as campanhas de lançamento.

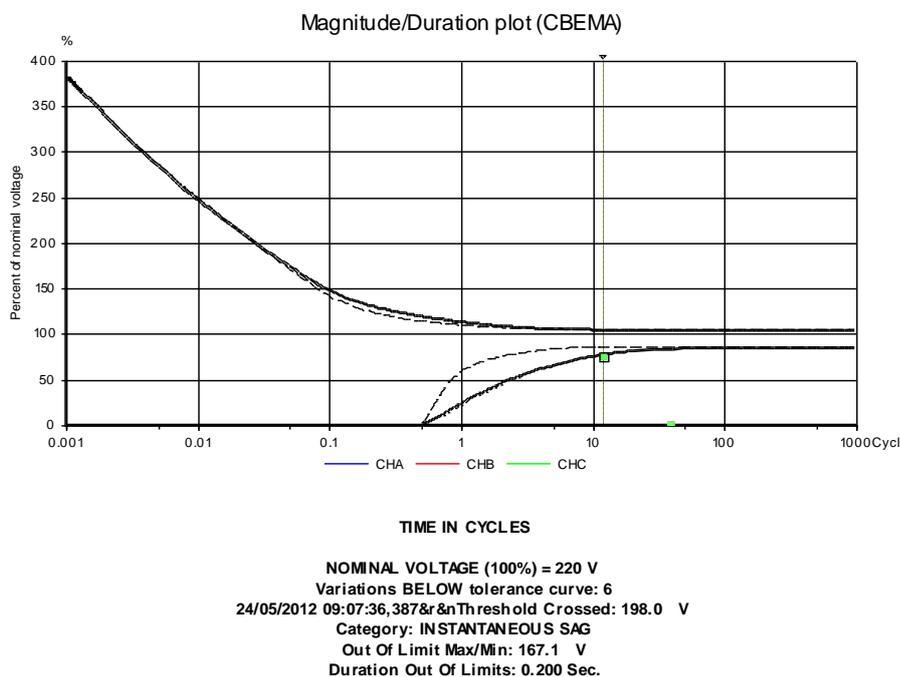


Figura 4.20: CBEMA autogeração CLA

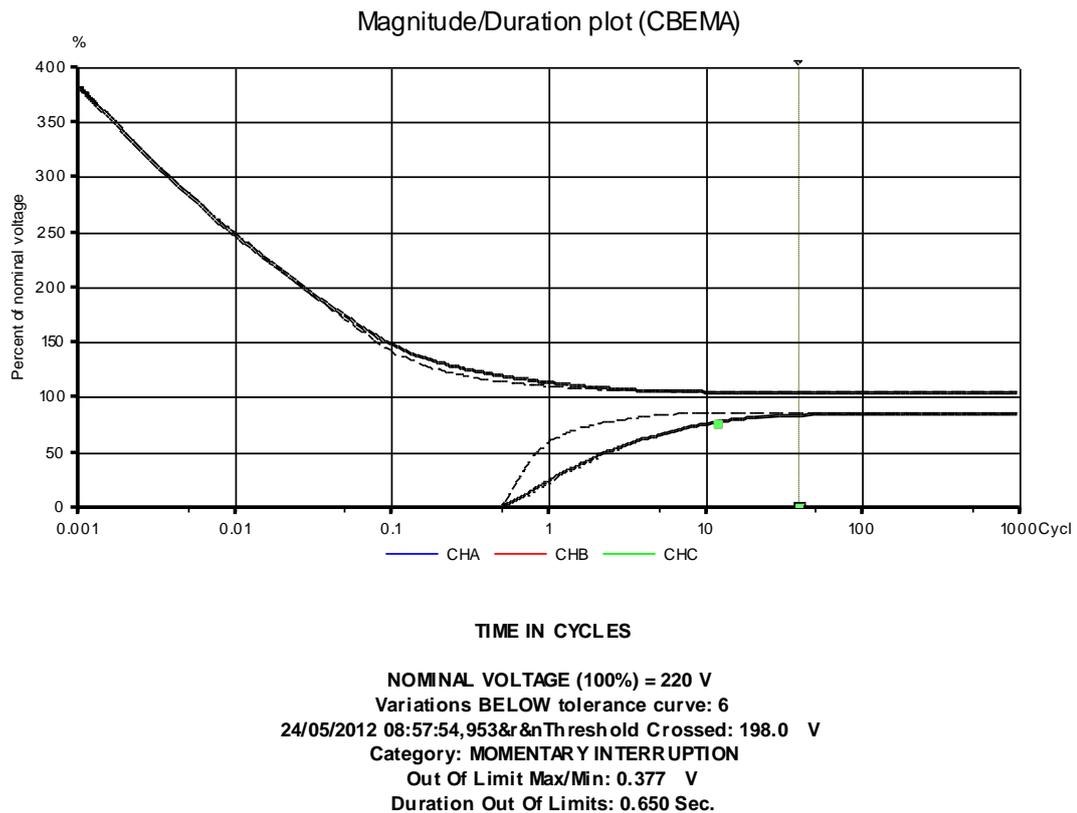


Figura 4.21: CBEMA autogeração CLA

Outro registro importante foi o feito com a curva CBEMA, no dia 28 de maio às 16:21:32 horas, mostrado na Figura 4.22. A tensão ultrapassou o limite de 198 V, e foi caracterizado como interrupção momentânea com magnitude de 0,251 V e duração de 0,824 segundos. Observa-se que o ponto em destaque (abaixo da linha tracejada), que representa o evento, está dentro da região de sensibilidade. Este evento se destacou porque ocorreu quando a autogeração CLA operava normalmente. Como se observa no gráfico da tensão RMS da Figura 4.9, o que evidencia que a confiabilidade do sistema de autogeração CLA necessita de melhorias.

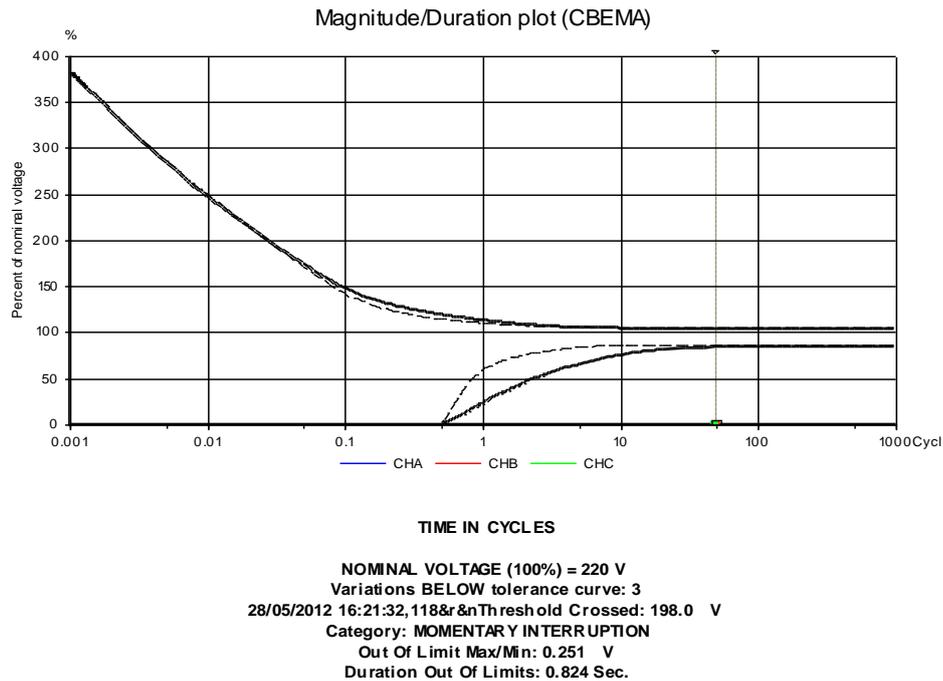


Figura 4.22: CBEMA autogeração CLA

4.7 Análise com o Indicador de Desvio Padrão

É importante fazer o tratamento estatístico dos dados monitorados, e o algoritmo utilizado deve incluir a duração do evento [1]. Em [30] é feita uma análise com o desvio padrão dos dados monitorados no período de tempo, para garantir uma combinação sensível na variação dos dados, adotando um procedimento de normalização.

Utilizando o algoritmo do *software* do equipamento [27], o qual trabalha com as equações 4.1, 4.2 e 4.3, se obtém o desvio padrão ponderado pela duração.

$$D_{total} = \sum_{n=1}^N D_n \quad (4.1)$$

$$\bar{X}_{medido} = \frac{\sum_{n=1}^N D_n \times X_n}{D_{total}} \quad (4.2)$$

Onde:

D_{total} - é a duração de todas as amostras;

D_n – é o período de tempo associado a cada uma das amostras individuais.

X_n - indica a magnitude da amostra;

\bar{X}_{medido} - A média ponderada pela duração.

A partir da média ponderada obtém-se a fórmula para o desvio padrão.

$$\text{Desvio padrão (pela duração)} = \sqrt{\frac{\sum D_n \times (X_n - \bar{X}_{medido})^2}{D_{total}}} \quad (4.3)$$

Na configuração inicial do *software* do equipamento, foram ativados os índices de estatísticas e selecionados: o valor máximo de tensão RMS do período; o valor mínimo de tensão RMS do período e o desvio padrão dos valores de tensão monitorados no período de tempo de cada arquivo gravado.

Estes valores foram registrados como mostram as tabelas no canto superior das Figuras 4.8 e 4.9. Na coluna 4 destas tabelas, abaixo da descrição **std. Dev** estão os desvios padrão de tensão RMS por fase para cada arquivo.

Transportando estes valores para o Excel, e seguindo as seguintes etapas: agregando por dia; separando por tipo de suprimento, concessionária local de energia elétrica e autogeração CLA; excluindo os arquivos que gravaram a comutação de energia, foram montados os gráficos das Figuras 4.23 e 4.24.

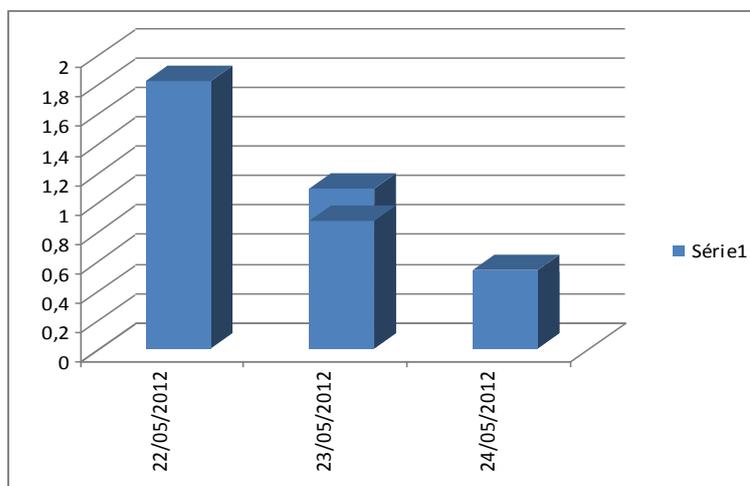


Figura 4.23: Desvios padrão autogeração CLA

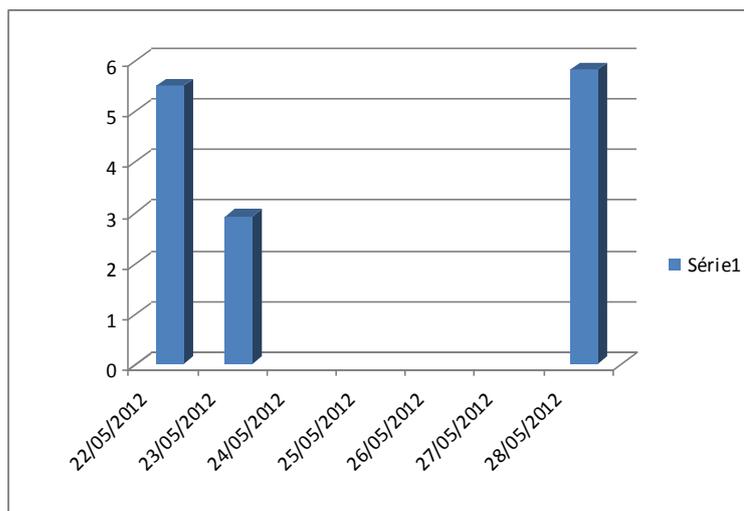


Figura 4.24: Desvios padrão da concessionária local

Para facilitar a análise, a Figura 4.25 mostra o gráfico da tensão RMS do melhor caso, que foi durante a autogeração do CLA no dia 24 de maio, em um período em que não houve eventos. Observa-se na tabela da figura os seguintes valores estatísticos: pouca variação entre os valores mínimos e máximos da tensão; desvio padrão σ (Std. Dev) menores que 0,5; e 99% dos valores de tensão RMS próximo a média μ (Mediana). A Figura 4.26 ilustra esta pouca variabilidade na onda da tensão.

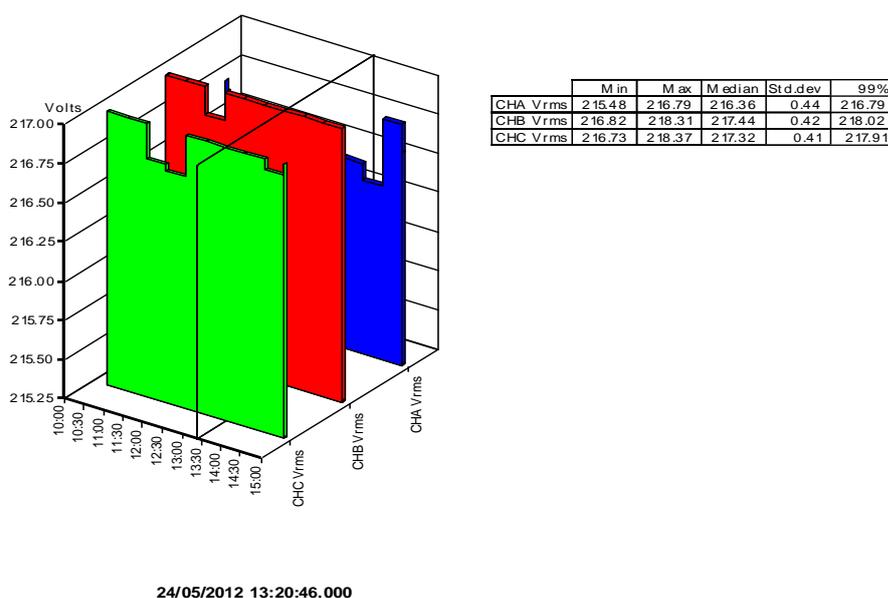


Figura 4.25: Gráfico da tensão RMS do melhor caso



Figura 4.26: Pouca variabilidade na tensão

A variabilidade é inerente a qualquer tipo de processo. Isso significa que todo processo, mesmo operando em condições desejadas de serviço, apresenta variabilidade nos itens que produz. De acordo com [31], a variabilidade sempre existirá e a sua eliminação completa não é o objetivo principal de uma organização. No entanto, deve haver uma preocupação em identificar as causas da variabilidade, com o objetivo de reduzi-la, facilitando os processos de gestão e minimizando os riscos de não conformidades.

Qualidade é o inverso da variabilidade de acordo com [31], indicando também a necessidade de conformidade com especificações. Uma condição fora de controle é a mudança ou deslocamento da média μ ou desvio padrão σ (ou ambos) para algum valor sensivelmente diferente.

Comparando o desvio padrão dos valores de tensão RMS monitorados no período de tempo pela média obtida (média dos desvios padrão da concessionária local de energia elétrica de 4,745 e média dos desvios padrão autogeração CLA de 0,950) concluiu-se que a variação dos valores de tensão suprida pela concessionária local é elevada, portanto não adequada para uso em cargas sensíveis. Observa-se também que a autogeração CLA necessita de melhorias para atingir um desvio padrão menor com pouca variabilidade, mais adequado ao segmento aeroespacial.

4.8 Registros de Outros Distúrbios Significativos que Afetam a QEE no CLA

Além das VTCD, ocorreram também outros distúrbios que afetaram significativamente a QEE no CLA. Foram registrados e selecionados por relevância para servirem de base para futuros estudos.

4.8.1 Registro de Transitórios

No decorrer da campanha ocorreram vários transitórios internos, devido à comutação da tensão de suprimento de concessionária local de energia elétrica para autogeração CLA e vice versa. A Figura 4.27 mostra o oscilograma do momento do início da comutação de suprimento da concessionária local para autogeração CLA, e a Figura 4.28 mostra o oscilograma do fim desta, no dia 24 de maio.

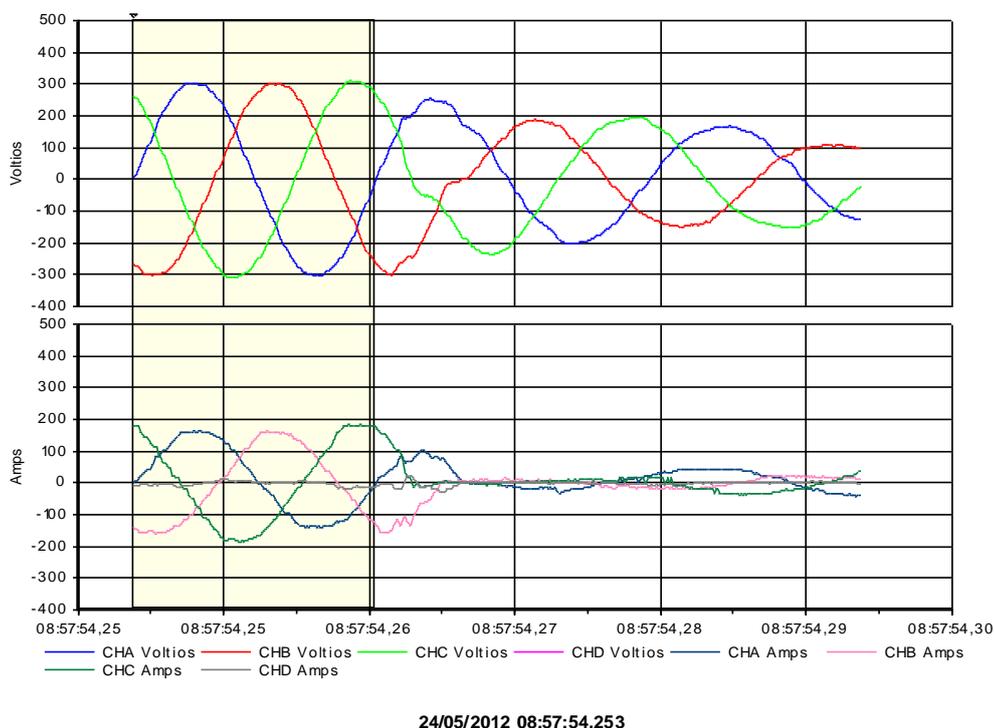


Figura 4.27: Oscilograma do início da comutação

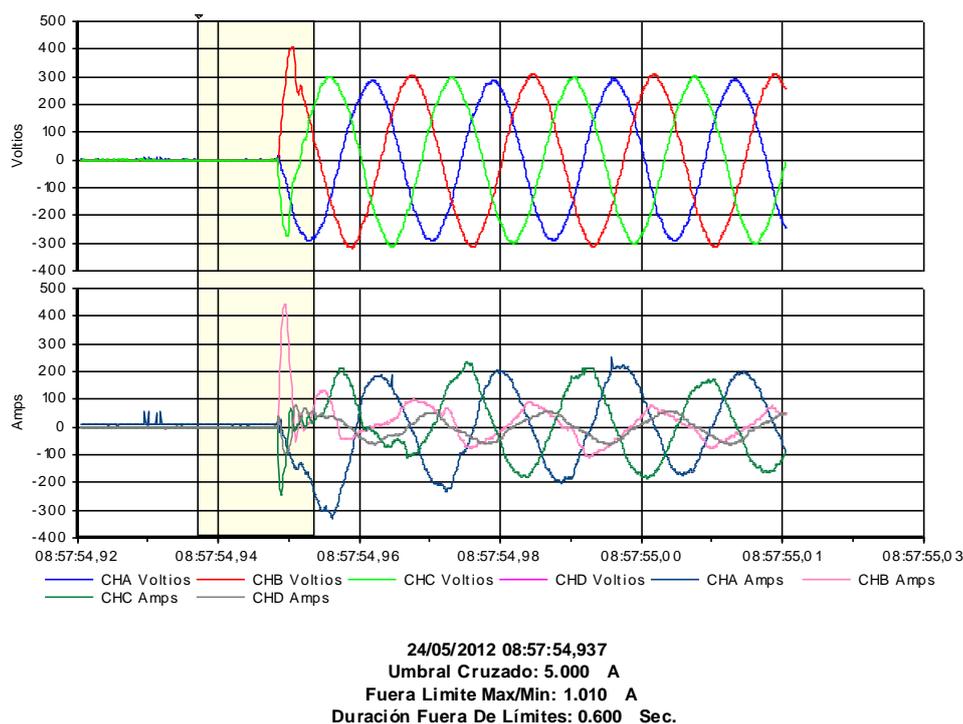
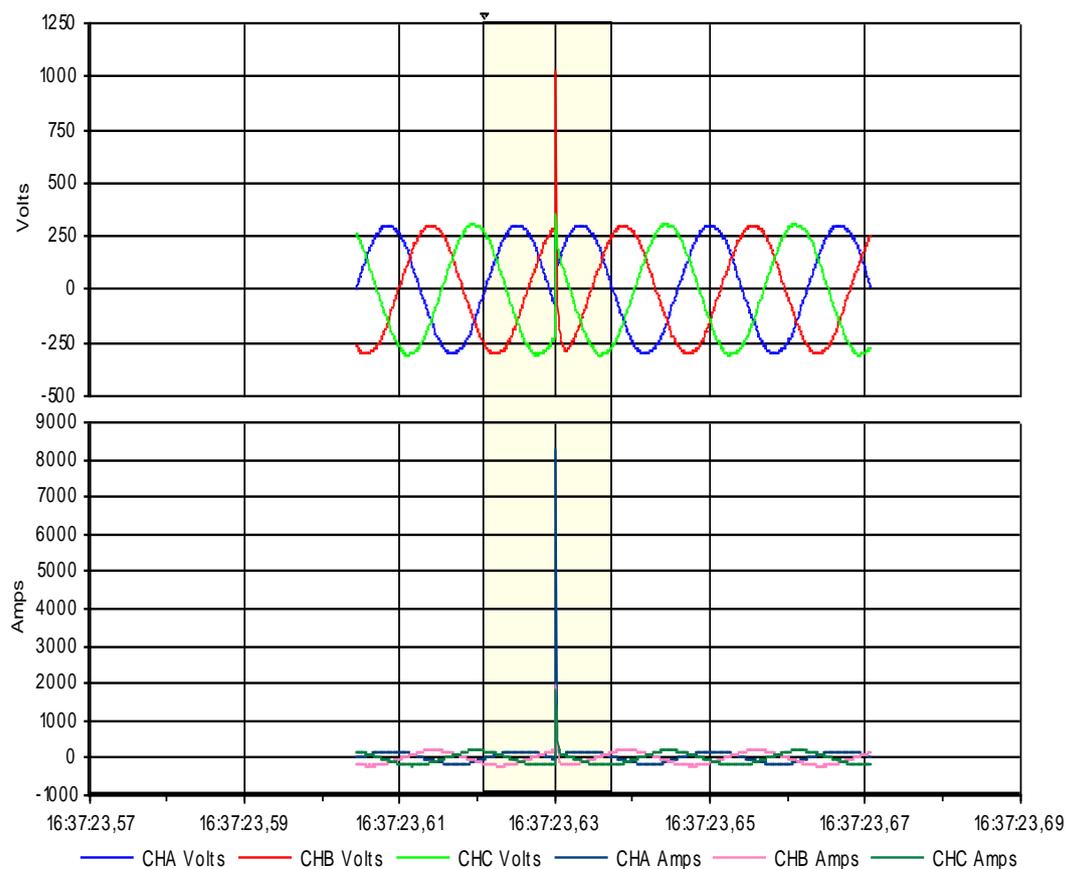


Figura 4.28: Oscilograma do fim da comutação

Neste curto período de tempo da comutação, aproximadamente 0,68 segundos observou-se, entre outros eventos já analisados pela CBEMA, o transitório de corrente ultrapassou 400 A durante um determinado período.

Outro transitório registrado ocorreu no dia 28 de maio às 16:37:23 horas na corrente e tensão, apresentado no oscilograma da Figura 4.29 onde se observa que o transitório de corrente ultrapassou o limite, atingindo 7,562 kA. Este evento não pode ser identificado, pois a auto-geração CLA operava normalmente, como se observa no gráfico da tensão RMS da Figura 4.9. Não foram causados danos devido ao curtíssimo período de tempo.



28/05/2012 16:37:23,650
Threshold Crossed: 450.0 A
Out Of Limit Max/Min: 7.562 k A
Phase (Relative To Sync. Channel): 201 deg.

Figura 4.29: Transitórios de corrente e de tensão

4.8.2 Registro de Harmônicas

No decorrer do monitoramento foram registrados, em todos os arquivos, a taxa de distorção harmônica global THD e outros parâmetros de harmônicos, seguindo a definição da norma IEC 61000-2-2. Foi escolhido um arquivo de dados de um período que não houve eventos, mas com as cargas dos GSE em pleno funcionamento para uma análise breve dos harmônicos utilizando os limites de harmônica descritos na norma citada.

A partir dos valores limites descritos na norma IEC 61000-2-2, citado por [32], foi montada a Tabela 4.4, com os valores de referência utilizados na análise dos harmônicos.

Frequentemente 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 tende a não alterar significativamente. O gráfico da Figura 4.30, dos harmônicos de tensão monitorados no dia 24 de maio às 11:50 horas, mostra o valor THD de 4,30 % para a tensão, revelando uma situação normal, sem risco de mau funcionamento dos equipamentos, mas já próxima do valor de referência de 5%, o que sugere a adoção de medidas preventivas.

Tabela 4.4: Valores de THD conforme norma IEC 61000-2-2

Harmônicas	DTH	Situação
Tensão	menor que 5%	Normal
	entre 5 e 8%	poluição harmônica significativa
	maior que 8%	grande poluição harmônica
Corrente	menor que 10%	Normal
	entre 10 e 50%	poluição harmônica significativa
	maior que 50%	grande poluição harmônica

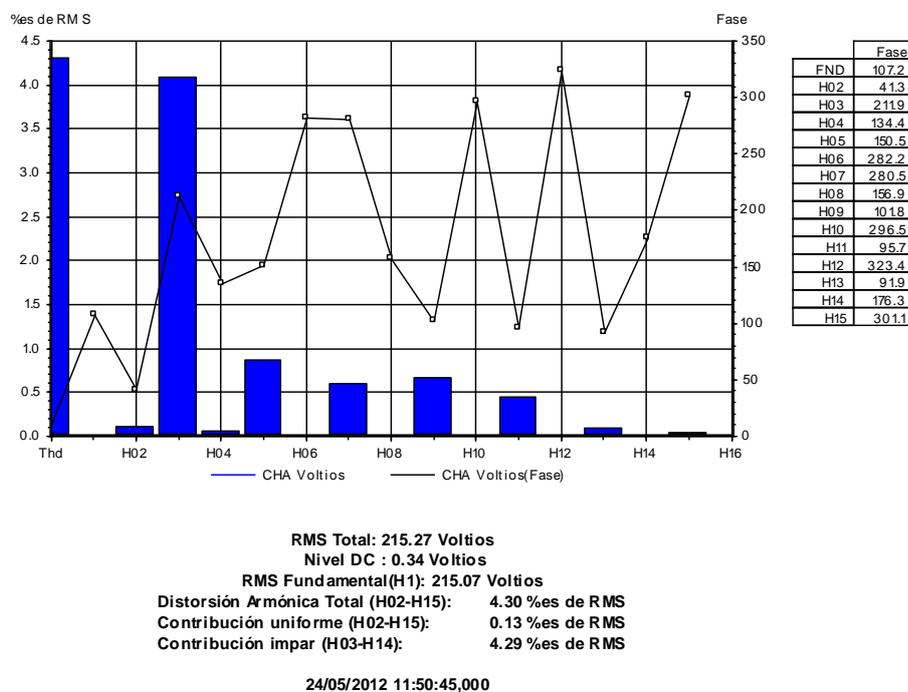


Figura 4.30: Harmônicos de tensão SE CT-CLA

O gráfico da Figura 4.31, dos harmônicos da corrente monitorados no dia 24 de maio às 11:50 horas, mostra o valor THD de 6,31% para a corrente. Uma situação normal, embora esta análise não seja conclusiva, pois outros parâmetros de harmônicas de corrente não foram avaliados.

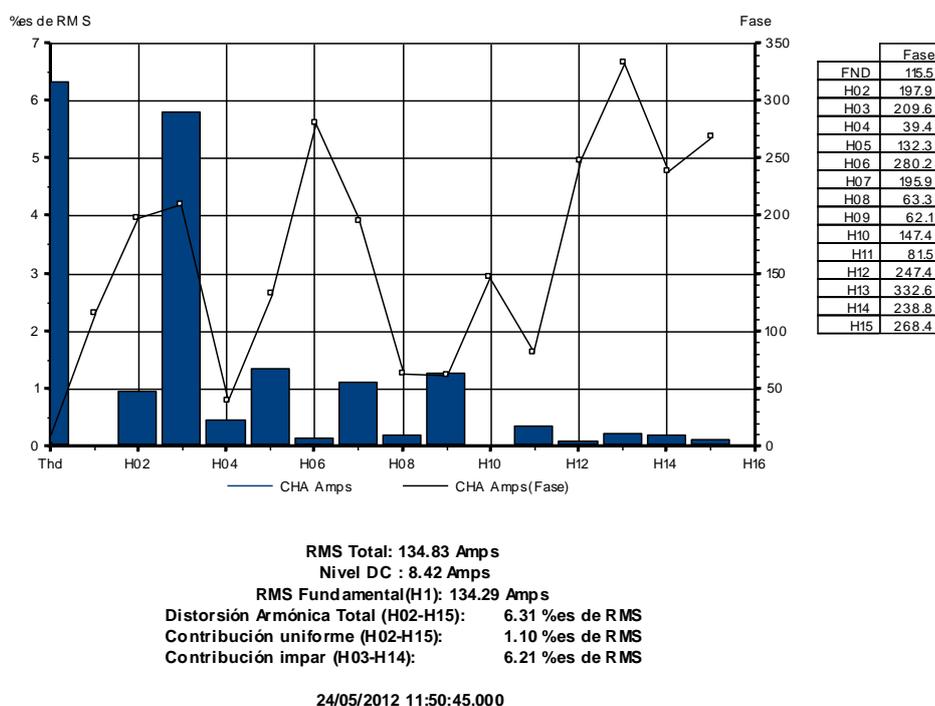


Figura 4.31: Harmônicos de corrente SE CT-CLA

4.9 Sugestões para a Mitigação dos Eventos de QEE Encontrados no CT- CLA

São evidências claras os registros dos diversos indicadores de QEE da tensão de atendimento concessionária local de energia elétrica. Do total de eventos, dezessete foram caracterizados como VTCD sendo 70% deles afundamentos instantâneos. Verificou-se também o elevado índice de desvio padrão dos valores da tensão e a classificação em período prolongado como tensão de atendimento precário. Nos registros dos indicadores da QEE da tensão da autogeração CLA destacaram-se: caracterização com a CBEMA de afundamento instantâneos e transitórios de comutação e de corrente.

Portanto ficou comprovado que as tensões sofrem variações significativas ao logo do período de uma campanha de lançamento, variações estas que muitas vezes ultrapassam os limites das normas de QEE aqui assumidas.

Os GSE do CLA, em sua maioria importados em processo de nacionalização, foram projetados para atender aos requisitos da Norma NBR 14881, entre eles o item 13.3.5 (energia elétrica). Esta norma estabelece que as tensões devam estar em conformidade com a IEC 60038 possuindo limites de tensão semelhantes à norma IEEE 1159, referência usada neste trabalho, a qual teve seus limites ultrapassados em campanha de lançamento, caracterizando uma não conformidade necessitando de medidas preventivas, embora tenha sido um sucesso os lançamentos do FTB e do FTI.

Como medida preventiva a estas variações de QEE, se propôs um procedimento operacional de verificação da QEE antes do início de processos especiais, no caso em análise, antes no segundo ponto de reinício a 10 minutos do lançamento, conforme Anexo I. A norma ISO [33] esclarece que a forma como se gerencia a energia pode trazer resultados muito melhores que a própria mudança tecnológica. Portanto, o procedimento proposto aumenta a eficiência do CLA, além de evidenciar o cumprimento das normas de QEE.

4.9.1 Procedimento Operacional de Verificação de QEE

Processos especiais têm um rígido controle dos seus insumos de entrada, das condições de temperatura e umidade relativa do ar, dos equipamentos metrológicos e dos procedimentos usados. Entretanto, atualmente desconsideram a interferência da QEE na eficácia do processo E para isso foi desenvolvido o procedimento ilustrado no fluxograma da Figura 4.32.

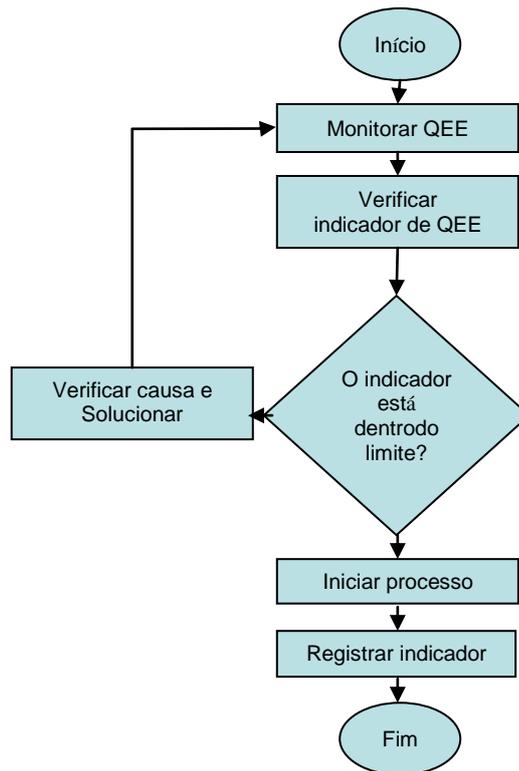


Figura 4.32: Fluxograma do procedimento operacional

A composição do indicador de QEE descrito no fluxograma pode ser um ou vários parâmetros mostrados neste capítulo. De fácil implementação, o procedimento operacional possui as seguintes etapas:

1. Monitorar a QEE no barramento de entrada dos equipamentos críticos;
2. Verificar o indicador de QEE 10 minutos antes do início do processo especial (o indicador para o CLA entre outros pode ser a ocorrência de VTCD);
3. Avaliar se o indicador violou a norma IEEE 1159 (tanto o *Power Platform* 4300 e diversos equipamentos similares alertam com efeitos sonoros ou luminosos a violação dos limites da norma). Se ocorrer violação, ir para o item 4; se não ocorrer violação, ir para o item 5;
4. Avaliar as causas, se possível corrigi-las, e voltar para o item 1;
5. Iniciar processo especial;
6. Registrar os valores do indicador de QEE para manter rastreabilidade e servir de evidência objetiva.

4.9.2 Melhorias nos Equipamentos e no Sistema de Autogeração do CLA

Como foi constatado na análise com a curva CBEMA durante o período de comutação, faz-se necessário melhorias no equipamento de comutação QTA. As tecnologias tradicionais nunca poderão atingir os índices de confiabilidade e qualidade hoje exigidos pelas aplicações digitais [34].

O mesmo autor aborda as tecnologias de comutação de potência que permitem "injetar" energia nos sistemas de alimentação das cargas críticas de um modo tão rápido e preciso que a forma de onda à sua saída não sofra, durante a fase de transição da alimentação da rede exterior para a alimentação a partir da fonte alternativa, qualquer deformação significativa. Este sistema envolve sistemas de monitoração e processamento de informação muito rápidos e eletrônica de potência com tempos de comutação muito curtos.

Em concordância com [34] propõe-se a substituição do tradicional QTA pelo "PowerChips", componentes de eletrônica de potência com tecnologia de silício, cuja função é a de "injetar" energia elétrica de forma muito precisa nos sistemas sob o seu controle. A Figura 4.33 [34] ilustra o funcionamento desta nova tecnologia de integração entre sistemas de geração, objetivando o fornecimento de energia elétrica com alta confiabilidade.

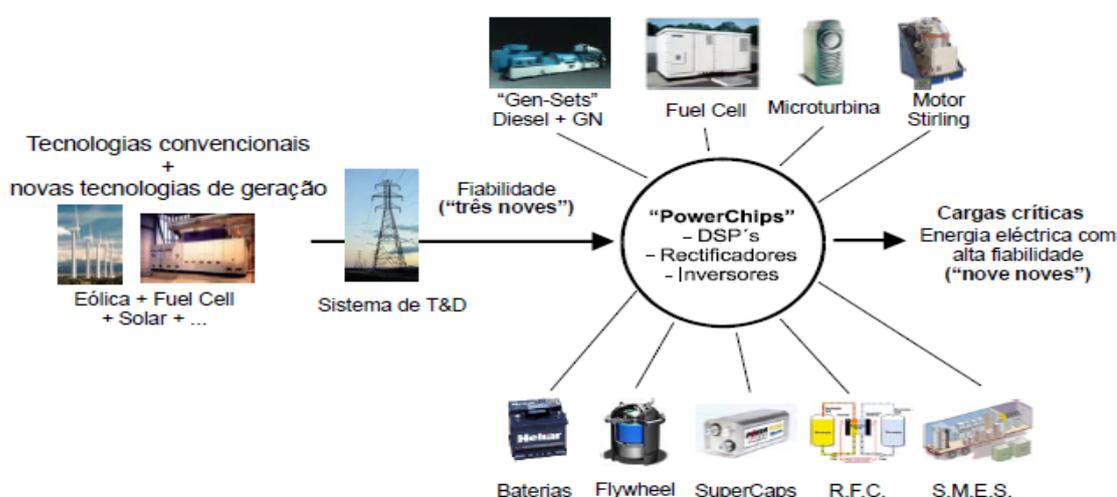


Figura 4.33: Função dos "PowerChips"

Outro equipamento de tecnologia convencional e de confiabilidade média são os três grupos geradores de 250 kVA, como operam dois por vez, gerando 500 kVA. Propõe-se substituí-los por duas microturbinas de 500 kVA, operando uma por vez, de forma redundante, portanto aumentando a confiabilidade. As microturbinas constituem uma tecnologia com um grande potencial para as aplicações em cargas críticas que exigem alta confiabilidade, explica [34]. O seu princípio de funcionamento baseia-se nas turbinas a gás, uma tecnologia há muito tempo utilizada na propulsão de aeronaves e em aplicações caracterizadas por uma alta criticidade, mas com emissões ambientais inferiores às dos sistemas térmicos convencionais.

Uma das principais inovações introduzidas, relativamente às turbinas convencionais, consiste na adoção de um conceito mecânico extremamente simples. Este se baseia num projeto com um eixo único, no qual estão integrados todos os elementos móveis do sistema. Numa das extremidades encontra-se o sistema da turbina, que produz o trabalho mecânico pela queima de gás natural, e no outro o gerador de energia elétrica.

Esta simplicidade construtiva suprime a presença da caixa redutora utilizada nas turbinas convencionais, dispensando desse modo a utilização de um órgão dispendioso, volumoso, que produz ruído e exige manutenção periódica, resultado na redução dos custos, aumento da confiabilidade dos sistemas mecânicos e redução dos intervalos entre manutenções. A Figura 4.34 [34] ilustra uma microturbina da Capstone (<http://www.capstone.com>).



Figura 4.34: Microturbina da Capstone

Ressalta-se, ainda, a necessidade de manter os sistemas de aterramento em boas condições operacionais, pois dá suporte a todos os sistemas citados sendo imprescindível para a QEE do CLA.

4.9.3 Solicitação de Melhorias na Tensão de Atendimento

A partir da legislação existente, nos termos da Resolução 505 da ANEEL, solicitar à concessionária local de energia elétrica a medição da tensão. Sendo constatados os problemas de QEE já descritos, a concessionária deverá adotar medidas para sanar esta questão, podendo ser pela regulação do sistema de 13,8 kV, pela regulação em carga feita nas subestações ou pela mudança de tape do transformador de distribuição, sem carga.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusões

No decorrer deste trabalho foi possível evidenciar a importância das ações para mitigar os distúrbios eletromagnéticos que afetam a QEE, principalmente para o usuário com cargas críticas, não só pelo benefício do próprio usuário, mas para o benefício comum de todos os agentes interligados ao sistema elétrico.

Entre estas ações se ressaltam as recomendações feitas a partir dos estudos bibliográficos, o uso de: unidade de alimentação sem interrupções; filtros de linha; supressores de surto; transformadores isoladores. Além disso, deve-se, sempre, manter uma alimentação elétrica dentro dos padrões normalizados; e um bom sistema de aterramento.

Merecem destaque, também, a severidade dos transitórios eletromagnéticos estudados e as ações apresentadas neste trabalho para minimizar os eventos transitórios associados à energização de transformadores. Entre estas ações estão a redução na amplitude da corrente inicial de magnetização, através do amortecimento por uma resistência em série com o transformador; energização monofásica do transformador; eliminação das condições ferro-ressonantes com a aplicação de uma pequena carga no secundário do transformador; e redução das harmônicas de energização com o uso de resistor de pré-inserção.

Os dados resultantes da monitoração feita na subestação CT-CLA foram precisos e satisfizeram os objetivos do monitoramento. Foram analisados, caracterizados e registrados os eventos de VTCD e os transitórios ocorridos. Esta base de dados gravada pode ser utilizada para efetuar melhoramentos no sistema elétrico estudado.

A análise feita na tensão de suprimento da concessionária local de energia apresentou menos que metade das amostras na faixa de tensão adequada, onde mais da metade das amostras foram classificadas como precárias, e outras como

críticas. O nível do fornecimento no período monitorado estava muito abaixo do esperado ou aceitável. Uma constatação importante foi que a maioria dos eventos de VTCD ocorreu na magnitude de 0,85 a 0,90 pu, em um período de tempo de 16,67 a 300 ms, o que direciona os esforços na busca de melhorias e soluções para os problemas de QEE do CLA.

Nas análises com a curva CBEMA, no período da comutação de energia elétrica, entre a concessionária local de energia e a entrada da autogeração CLA, caracterizaram-se eventos de interrupções momentâneas, os quais, devido à sua severidade, superaram a suportabilidade dos GSE envolvidos. A solução proposta para este problema foi a substituição do tradicional QTA pelo "*PowerChips*", nova tecnologia de integração entre sistemas de geração, objetivando o fornecimento de energia elétrica com alta qualidade e confiabilidade.

Portanto, ficou comprovado que as tensões podem sofrer variações significativas ao longo do período de uma campanha de lançamento de foguete. Estas variações ultrapassam muitas vezes os limites das normas de QEE aqui citadas. Como medida preventiva contra tais variações, foi proposto um procedimento operacional para verificação da QEE antes do início de processos especiais. Outra proposta foi à troca dos grupos geradores convencionais, por microturbinas a gás natural, mais eficiente e ambientalmente menos poluente.

Espera-se que este trabalho possa contribuir para o desenvolvimento de outros estudos na área de qualidade da energia elétrica envolvendo o CLA, ou outros consumidores com cargas similares em termos de sensibilidade e importância, bem como auxiliar na divulgação da normatização e das soluções apresentadas.

5.2 Trabalhos futuros

Ao longo do desenvolvimento deste estudo, várias questões foram sendo levantadas e algumas delas merecem investigação, o que sugere que sejam feitas as seguintes pesquisas complementares.

- Um monitoramento mais abrangente no CLA, por um período de doze a vinte e quatro meses, com mais pontos de coleta de dados, alguns deles sendo feitos

na saída do UPS, com sistema de coleta automática de dados, coletando informações sobre as condições da qualidade da energia e o uso da energia, objetivando análises de mais parâmetros.

- Modelagem e simulações em um programa computacional de transitórios eletromagnéticos para quantificar as melhorias apresentadas, visando minimizar os transitórios internos, principalmente a corrente de *inrush* nos transformadores. Pode-se, para isso, usar a base de dados do monitoramento.
- Por último, fazer uso de uma abordagem estatística específica para usuários finais, que permita predizer com boa margem de acerto, a probabilidade da tensão se manter dentro das tolerâncias normatizadas, de maneira que se possa melhorar o procedimento operacional para a verificação da QEE.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BOLLEN, Math H. J.; IRENE Yu–Hua Gu. **Signal processing of power quality disturbances**. IEEE press series on Power Engineering, Mohamed E. El–Hawary, series editor, IEEE Press, 2006. 861 p.
- [2] AEB. Disponível em: www.aeb.gov.br . Acesso em: 30 out. 2012.
- [3] NBR ISO 9000 – **Sistemas de gestão da qualidade – Fundamentos e vocabulário**. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2000.
- [4] ABNT, NBR 14881 – **Sistemas espaciais – Equipamentos de apoio no solo para uso em lançamento, aterrissagem ou locais de resgate – Requisitos gerais**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2002.
- [5] DUGAN, Roger C.; et al. **Electrical power systems quality**. Mc Graw–Hill, Second Edition, 2004. 521 p.
- [6] CARVALHO, Paulo Luciano de. **Uma contribuição ao estudo da depressão de tensão**. Dissertação de mestrado. Itajubá, EFEI, 1997. 123 p.
- [7] MATANA, G. M. **Proposta de equipamento para medição dos fenômenos relativos à qualidade da energia elétrica utilizando conceitos de instrumentos virtuais** . São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 2008. 210 p.
- [8] ABNT. Disponível em: www.abnt.catalogo.com.br. Acesso em: 30 Jul. 2012.
- [9] KUSKO, Alexander; THOMPSON, Marc T. **Power quality in electrical systems**. New York, Mc Graw–Hill, 2007. 225 p.

- [10] IEEE Std 1159. **Recommended for practice for monitoring electric power quality**. IEEE Transmission and Distribution Committee, 2009. 91 p.
- [11] IEEE Std 446. **Recommended for emergency and standby power systems for industrial and commercial applications**. IEEE Orange Book, 1995.
- [12] NASCIMENTO, M. A. Couto; et al. **Relatório da investigação do acidente ocorrido com o VLS-1 V03, em 22 de agosto de 2003, em Alcântara, Maranhão**. São José dos Campos, São Paulo, Comando da Aeronáutica, Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento, 2004. 118 p.
- [13] FERRO, Marco Antônio da Silva. **Monitoramento da atividade elétrica atmosférica do Centro de Lançamento de Alcântara**. Dissertação de mestrado. São José dos Campos, INPE, 2005. 140 p.
- [14] TOSTES, Maria Emília. **Qualidade da energia**. Apostila. Disponível em: www.4shared.com/doc217. Acesso em: 16 nov. 2012.
- [15] GREENWOOD, Allan. **Electrical transients in power systems**. Second Edition, John Wiley & Sons, 1971, 751 p.
- [16] FERNANDES, Alécio B.; LIMA, Antonio C. S. **Modelagem de transformadores para estudos de transitórios eletromagnéticos de altas frequências com base em medição de campo**. SBSE, anais 119. 2006. Disponível em: www.sbqee.com.br. Acesso em: 27 dez. 2011.
- [17] BRANCO, Hermes M. G. Castelo. **Uma estratégia para a detecção e classificação de transitórios em transformadores de potência pela utilização da transformada wavelete e da lógica fuzzy**. Dissertação de mestrado. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 2009. 100 p.
- [18] MONTEIRO, Thiago Costa. **Proposta de um modelo e método para determinação dos parâmetros de transformadores operando em saturação TC**. Dissertação de mestrado. São Paulo, USP, 2011, 110 p.

- [19] ANTUNES, R.; et al. **Sobretensões transitórias de alta frequência quando da energização de transformadores: estudo de casos da ELETROSUL**. Puerto Iguazú, XIII ERIAC/PI – C4–28, 2009.
- [20] BARBOSA, Daniel. **Sistema híbrido inteligente para monitoramento e proteção de transformadores de potência**. Tese de doutorado. São Paulo, USP, 2010.
- [21] ZANETTA Jr, L. C. **Transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003. 720 p.
- [22] GUERRA, Francisco das Chagas F.; ARAUJO, Leandro de Luna; MEDEIROS, Luydi Dandgelo C. de. **Correntes transitórias de magnetização em transformadores de potência**. Artigo. Campina Grande, UFCG – Universidade Federal de Campina Grande, 2008.
- [23] OLIVEIRA, Carlos M. Pinto. **Estudo das implicações da utilização de uma rede sem neutro num parque eólico com e sem bancos de baterias de condensadores para correção do fator de potência**. Dissertação de mestrado. Porto, Portugal, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009, 103 p.
- [24] BERNADES, Alexandre Paciência. **Esquema completo de proteção diferencial de transformadores para teste em um relé digital**. Dissertação de mestrado. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 2006. 114 p.
- [25] GUMILANG, Harry; SUSILO, Achmad. **Effect of power system harmonic on degradation process of transformer insulation system**. Proceedings of the 9th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. July 19–23, Harbin, China. IEEE 2009.
- [26] MAPA DO SIN DAS REGIÕES NORTE E NORDESTE. Disponível em: www.ons.org.br/mapasite. Acesso em: 25 out. 2012.

[27] DRANETZ – BMI. **User's guide–Power Platform 4300**. Rev. B, New Jersey, USA, 2002.

[28] ANEEL. **Resolução nº 505 de 26 de novembro de 2001. Agência Nacional de Energia Elétrica**. Disponível em: www.aneel.gov.br/cedoc/res2001505.pdf . Acesso em: 30 out. 2012.

[29] ONS. **Procedimento de rede do operador nacional do sistema elétrico**. Submódulo 2.8, Gerenciamento dos Indicadores de desempenho da rede básica e de seus componentes. Operador Nacional do Sistema Elétrico, jul. 2008.

[30] PARACHA, Zahir Javed. **Design and development of Intelligent computational techniques for power quality data monitoring and management**. Tese de doutorado. Melbourne, Australia, Victoria University, 2011. 136 p.

[31] VACCARO, Guilherme L. Roehle; et al. **Análise estatística da qualidade de níveis de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica**. Produção, SBQE, v. 21, n. 3, p. 539–552, jul./set. 2011.

[32] OLIVEIRA, Caio Gomes de. **Estudo sobre conservação de energia elétrica e qualidade de energia elétrica**. Dissertação de mestrado. Campinas, Universidade Estadual de Campinas, 2009.

[33] NBR ISO 50001:2011 – **Sistemas de Gestão da Energia**. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2011.

[34] DELGADO, Joaquim D. Barroca. **Gestão da qualidade total aplicada ao sector do fornecimento da energia eléctrica**. Tese de doutorado. Coimbra, Portugal, Universidade de Coimbra, 2002. 290 p.

ANEXO I

CRONOLOGIA DE LANÇAMENTO DO FTI

CLA		Operação Falcão I - 2012				Cronologia de Lançamento	14/03/12
Nº	✓	TU	H0		DUR.	Ações e Eventos	Responsáveis
		hh:mm:ss	- /+	hh:mm:ss	hh:mm	Actions & Events	Responsibles
1		9:30:00	-	5:00:00	00:05	1º. Guarnecer das Estações <i>Stations Manned – 1st. Phase</i>	COL, TLC, LOG, SSP
2		9:35:00	-	4:55:00	00:05	Comutação de Energia <i>Power Switch over Generators</i>	LOG
3		9:40:00	-	4:50:00	00:05	2º. Guarnecer das Estações <i>Stations Manned – 2nd. Phase</i>	LOC, TLM, SVO, CAV (VEI, BCO), CHMIS
4					00:10	Teste da Rede de Gerenciamento (Fonia, SCOD, Pannel de Disparo) <i>Management Net Test (Audio, SCOD, Trigger Pannel)</i>	COL/Estações
5		9:55:00		4:35:00		Confirmar baixa probabilidade de ocorrência de chuva e ausência de descargas atmosféricas <i>Management Net Test (Audio, SCOD, Trigger Pannel)</i>	SVO (MET)
6					00:30	Transportar e instalar o veículo no lançador <i>Transnd instalation of the vehicle in the launcher</i>	CAV (VEI), SSP
7					00:30	Instalar câmeras <i>Install cameras</i>	CAV
8					00:30	Início da Preparação dos Meios, Testes Internos e Designação <i>Starting of Stations Set Up & Interface Tests</i>	LOC, TLM, SVO
9					--:--	Verificar todos os bloqueios de seguranças KMT e Lançador (linha de fogo e alimentação elétrica) <i>Verify all safety blockades between Blockhouse and Launcher (Fire line & Launcher electrical power line)</i>	CAV
10		10:15:00	-	4:15:00	--:--	Checar linha de fogo com segurança visível via CFTV <i>Fire Line with visible safety</i>	SSP
11					--:--	Ausência de Emissão de RF na Área da Plataforma	COL / SSP, CAV
						<i>No RF Emission on Launch Pad</i>	

12				00:10	Conectar Umbilicais <i>Connect umbilical</i>	CAV (VEI)
13				00:05	Conectar e Ligar a Unidade de Gerenciamento <i>Connect and test management Unit</i>	CAV (VEI)
14				--:--	Plataforma evacuada <i>Launch Pad cleared</i>	SSP
15				00:05	Conectar e Ligar a Unidade de Controle <i>Connect and test Control Unit</i>	CAV (VEI)
16				00:05	Testar Umbilicais <i>Test umbilical</i>	CAV (VEI)
17		10:25:00	4:05:00		Término da Preparação dos Meios, Testes Internos e Designação <i>End of Stations Set Up & Interface Tests</i>	LOC, TLM, SVO
18				--:--	Início de Emissão de RF na Área da Plataforma <i>Radio Silence lifted</i>	COL / SSP, CAV
19		10:40:00	- 3:50:00	--:--	Carga Útil em Fonte Externa (Informar a frequência de Transmissão) <i>Payload in External Power (inform transmission frequency)</i>	CAV (VEI)
20				--:--	Carga Útil desligada <i>Switch off Payload</i>	CAV, TLM
21				--:--	Desligar a Unidade de Controle <i>Turn off Control Unit</i>	CAV (VEI)
22				00:10	Desligar a Unidade de Gerenciamento <i>Turn off Management Unit</i>	COL / SSP, CAV
23				--:--	Ausência de Emissão de RF na Área da Plataforma <i>No RF Emission on Launch Pad</i>	COL / SSP, CAV
24					1º Ponto de Reinício <i>First Restart Point</i>	
25		10:45:00	- 3:45:00	01:10	Sondagem de Grande Altitude – SGA – 20 km <i>Release Wind Weighting Balloon - 20 km</i>	SVO (MET)
26		10:50:00	- 3:40:00	--:--	Confirmar possibilidade de lançamento <i>Confirm possibility of launching</i>	COL / Geral All Stations
27				--:--	Confirmar a condição de LF interrompida com Segurança visível <i>Confirm fire line interrupted with visible safety</i>	CAV, SSP
28		11:05:00	- 3:25:00	00:25	Instalar, Testar e Bloquear Linha de Fogo <i>Install, Test and Block Fire Line</i>	CAV
29				--:--	Confirmar todos os itens “remove before flight” com o VEI <i>Confirm all “remove before flight” items with VEI</i>	CAV (VEI)
30		11:30:00	- 3:00:00	00:05	Evacuar Plataforma <i>Clear Launch Pad Area</i>	SSP

31	11:35:00	-	2:55:00	01:00	Desguarnecer das estações para almoço <i>Stations Unmanned for Lunch</i>	COL / Todas as estações
32					2º Ponto de Reinício <i>Second Restart Point</i>	
33	12:35:00	-	1:55:00	00:05	Guarnecer das Estações <i>Stations Manned</i>	COL / Todas as estações
34	12:45:00	-	1:45:00	00:10	Energizar Lançador <i>Energize Launcher</i>	CAV
35	12:55:00	-	1:35:00	--:--	Ligar Unidade de Gerenciamento <i>Turn on Management Unit</i>	CAV (VEI)
36				00:15	Posicionamento do Lançador após SGA <i>Launcher Setting after SGA</i>	SVO, CAV
37	13:05:00	-	1:25:00	00:10	Decolagem da aeronave para Missão de Esclarecimento <i>Aircraft Take off for surveillance mission</i>	SSP (Patrulha)
38				--:--	Ligar Unidade de Controle <i>Turn on Control Unit</i>	CAV (VEI)
39	13:10:00	-	1:20:00	--:--	Liberar radares de 180° e Início de Emissão de RF na Área da Plataforma <i>To libarate 180° radar and Radio Silence lifted</i>	COL / LOC, SSP, CAV
40				--:--	Carga Útil em Fonte Externa <i>Payload in External Power</i>	CAV (VEI)
41	13:15:00	-	1:15:00	00:40	Esclarecimento da Área de Impacto do Veículo <i>Surveillance of Vehicle Impact Area</i>	SSP (Patrulha)
42				--:--	Carga Útil desligada <i>Switch off Payload</i>	CAV, TLM
43				--:--	Ausência de Emissão de RF na Área da Plataforma <i>No RF Emission on Launch Pad</i>	COL / SSP, CAV
44				--:--	Informar Resultado da Análise da Segurança de Vôo: Verde ou Vermelho <i>Inform green or Red Status for launching</i>	SVO
45				--:--	Informar condições meteorológicas <i>Inform weather conditions</i>	SVO (MET)
46	13:30:00	-	1:00:00	-- --	Contagem <i>Countdown</i>	COL
47				00:20	Ajustar todas as Câmeras próximas do Lançador <i>Set up all cameras close to the Launcher</i>	CAV
48	13:45:00	-	0:45:00	00:20	Sondagem de Baixa Altitude – SBA <i>Release Wind Weighting Balloon - 5 km</i>	SVO (MET)
49				--:--	Acionamento da Sirene de Advertência <i>Warning siren</i>	CAV
50	13:50:00	-	0:40:00	00:30	Evacuação da Área de Preparação e Recuo da Guarda <i>Clear Preparation Area and Pull back the Guard</i>	COL / SSP

51		14:00:00	-	0:30:00	---	Contagem <i>Countdown</i>	COL
52						3º Ponto de Reinício em Espera para Condições de Lançamento <i>Third Restart Point – Wait for Launch Conditions</i>	
53		14:05:00	-	0:25:00	--:--	Informar Resultado da Análise da Segurança de Vôo: Verde ou Vermelho <i>Inform green or red status for launching</i>	SVO
54					--:--	Aeronave de Esclarecimento em Posição Segura <i>Surveillance Aircraft in Safety Position</i>	SSP
55					00:05	Posicionamento do Lançador após SBA <i>Launcher Setting after SBA</i>	SVO, CAV
56					--:--	Confirmar Trajetória de Vôo (Informar Índice de Refração) <i>Confirm Flight Trajectory</i>	SVO / LOC, TLM
57		14:20:00	-	0:10:00	---	Contagem <i>Countdown</i>	COL
58		14:20:00	-	0:10:00	--:--	4º Ponto de Reinício <i>Fourth Restart Point</i>	
59					--:--	Ligar câmeras de vídeo <i>Switch on Video Cameras</i>	CAV (VEI)
60		14:21:00	-	0:09:00	--:--	Confirmar Plataforma Evacuada e Operadores na Casamata <i>Confirm Launched Pad Cleared and all operators at Blockhouse</i>	CAV, SSP
61					--:--	Início de Emissão de RF na Área da Plataforma <i>Radio Silence lifted</i>	COL / SSP, CAV
62					--:--	Ligar Transmissor da Carga Útil <i>Turn on Payload Transmitter</i>	CAV
63					00:01	Ajuste da Tensão do Painel de Disparo (Informar Valores de Ajuste) <i>Fire system voltage setting</i>	CAV / COL
64		14:22:00	-	0:08:00	--:--	Decisão Operacional de Lançamento <i>GO / NO-GO (Operational Decision)</i>	COL
65		14:23:00	-	0:07:00	00:04	Ajuste e Travamento do Lançador <i>Launcher Setting and Locking</i>	SVO, CAV
66					--:--	Informar Lançamento ao Controle de Tráfego Aéreo <i>Report launching to Air Traffic Control</i>	SSP
67		14:25:00	-	0:05:00	---	Contagem <i>Countdown</i>	COL
68					--:--	Carga Útil com bateria interna e Transmissor ligado <i>Payload at internal battery mode and transmitter on</i>	CAV (BCO)
69					--:--	TOP DEC na Posição de Lançamento e Habilitado	CAV

						<i>TOP DEC Set to Launch Position</i>	
70					--:--	Linha de Fogo Conectada e Testada <i>Connect Fire Line</i>	CAV
71	14:27:00	-	0:03:00		--:--	Síntese Automática <i>Automatic Sequence</i>	COL / Todas estações <i>COL / All Stations</i>
72	14:28:00	-	0:02:00		-- --	Contagem <i>Countdown</i>	COL
73					--:--	Acionamento da Sirene de Advertência <i>Warning siren</i>	CAV
74	14:29:00	-	0:01:00		-- --	Contagem <i>Countdown</i>	COL
75					--:--	Painel de Disparo Ativado <i>Firing Console Enabled</i>	CAV
76	14:29:30	-	0:00:30		-- --	Contagem <i>Countdown</i>	COL
77	14:29:45	-	0:00:15		--:--	Painel de Disparo Pronto <i>Firing Console Ready</i>	CAV
78	14:29:50	-	0:00:10		--:--	Contagem Final <i>Final Countdown</i>	COL
79	14:30:00		0:00:00		--:--	H0 <i>Ignition & Lift Off</i>	COL / Geral <i>All Stations</i>
80	14:30:03	+	0:00:03		--:--	Monitoramento do vôo via SISGRAF <i>Flight Trajectory Plot using SISGRAF</i>	COL
81			0:00:04		--:--	Fim de queima <i>Burn out</i>	LOC
82	14:30:10	+	0:00:10		--:--	Rastreo Radar <i>Radar Tracking</i>	LOC
83					--:--	Rastreo Telemedidas <i>TM Tracking</i>	TLM
84	14:30:30	+	0:00:30		--:--	Contagem <i>Countdown</i>	COL
85	14:31:22	+	0:01:22		--:--	Apogeu <i>Apogee</i>	SVO
86	14:32:00	+	0:02:00		--:--	Contagem <i>Countdown</i>	COL
87	14:32:46		0:02:46			Impacto do Veículo <i>Vehicle Impact</i>	LOC
88		+			--:--	Retirar de síntese automática e retornar SCOD para vermelho <i>Automatic sequence off and return SCOD to red light</i>	COL/Estações <i>All Stations</i>
89	14:33:00	+	0:03:00		--:--	Autorizar Procedimentos de Final de Operação <i>End of Operation</i>	COL / Geral <i>All Stations</i>

ANEXO II

DADOS DE TENSÃO MONITORADOS

Tabela de dados suprimento CLA

SUPRIMENTO	TEMPO	CHA Vrms(Volts)	CHB Vrms(Volts)	CHC Vrms(Volts)
CLA	09:51:56	222,94	218,37	221
CLA	09:52:01	222,8	218,44	220,97
CLA	10:06:53	223,09	219,23	221,01
CLA	10:21:53	220,94	217,03	218,69
CLA	10:36:54	220,63	216,74	218,26
CLA	10:51:54	220,13	216,33	217,92
CLA	11:06:54	221,53	217,43	218,87
CLA	11:21:53	222,16	218,02	219,61
CLA	11:30:43	220,43	215,17	216,99
CLA	11:36:53	222,73	218,69	219,93
CLA	11:51:54	223,35	218,92	220,78
CLA	12:06:53	220,9	216,43	218,38
CLA	12:21:54	220,68	216,52	218,26
CLA	12:36:54	224,27	220,31	221,99
CLA	12:51:53	220,54	216,73	218,1
CLA	13:06:53	219,15	215,04	216,58
CLA	13:21:53	220,15	215,88	217,37
CLA	13:36:53	218,67	214,53	216,27
CLA	13:51:54	217,79	213,77	215,47
CLA	14:06:54	219,97	215,75	217,46
CLA	14:21:53	218,49	214,39	216,09
CLA	14:36:53	218,26	214,19	215,81
CLA	14:51:53	218,11	214,18	215,79
CLA	15:06:54	218,34	214,2	215,97
CLA	15:21:53	219,23	214,93	216,85
CLA	15:36:53	218,83	214,93	216,27
CLA	15:51:54	218,31	214,39	216,32
CLA	16:00:20	219,56	215,74	217,73
CLA	16:00:26	220,08	216,07	217,99
CLA	16:00:30	220	215,86	217,73
CLA	16:01:02	219,37	215,6	217,23
CLA	16:01:49	220,24	216,23	217,99
CLA	16:02:04	220,02	216,03	217,75
CLA	16:02:18	219,96	216,04	217,75

CLA	16:02:25	220,02	216,03	217,77
	23/05/2012			
CLA	11:02	216,98	217,36	218,43
	23/05/2012			
CLA	11:02	216,71	217,35	218,62
	23/05/2012			
CLA	11:04	214,34	216,11	215,53
	23/05/2012			
CLA	11:06	216,47	215,42	217,86
	23/05/2012			
CLA	11:17	214,54	214,22	214,6
	23/05/2012			
CLA	11:17	216,23	215,85	217,14
	23/05/2012			
CLA	11:24	214,97	213,66	213,09
	23/05/2012			
CLA	11:26	215,23	214,35	213,97
	23/05/2012			
CLA	11:27	214,59	214,1	215,04
	23/05/2012			
CLA	11:32	216,74	215,81	218,32
	23/05/2012			
CLA	11:36	217,23	215,73	213,59
	23/05/2012			
CLA	13:30	216,35	217,74	218,25
	23/05/2012			
CLA	13:30	216,1	217,57	217,86
	23/05/2012			
CLA	13:30	216,1	217,57	217,86
	23/05/2012			
CLA	13:31	215,98	218,25	218,05
	23/05/2012			
CLA	13:31	213,44	215,74	215,21
	23/05/2012			
CLA	13:32	214,28	216,48	214,66
	23/05/2012			
CLA	13:39	215,34	213,4	217,49
	23/05/2012			
CLA	13:39	215,53	214,91	217,67
	23/05/2012			
CLA	13:39	216,6	217,37	214,04
	23/05/2012			
CLA	13:39	214,4	215,86	215,36
	23/05/2012			
CLA	13:41	215,29	217,11	215,1
	23/05/2012			
CLA	13:45	215,98	213,79	216,79
	23/05/2012			
CLA	13:45	214,59	215,92	214,97
	23/05/2012			
CLA	13:46	215,78	217,29	216,54
	23/05/2012			
CLA	13:46	213,34	214,54	213,72
	24/05/2012			
CLA	24/05/2012	213,94	213,2	215,98

08:19				
CLA	24/05/2012 08:49	211,52	211,26	214,07
CLA	24/05/2012 08:57	199,27	212,84	207,82
CLA	24/05/2012 08:57	200,6	212,15	209,19
CLA	24/05/2012 09:07	209,82	208,43	210,2
CLA	24/05/2012 09:19	216,91	217,58	218,13
CLA		216,81	217,37	218,07
CLA	24/05/2012 10:20	216,54	218,25	218,37
CLA	24/05/2012 10:20	216,32	217,64	218,05
CLA	24/05/2012 10:20	216,66	218,31	217,99
CLA	24/05/2012 10:20	216,61	217,89	217,91
CLA	24/05/2012 10:50	215,54	217,18	217,64
CLA	24/05/2012 11:20	215,84	216,82	216,77
CLA	24/05/2012 11:50	215,48	217,33	216,73
CLA	24/05/2012 12:20	216,46	218,02	217,77
CLA	24/05/2012 12:50	216,16	217,2	217,6
CLA	24/05/2012 13:20	216,46	217,44	217,32
CLA	24/05/2012 13:50	216,36	217,98	217,29
CLA	24/05/2012 14:20	216,79	217,99	216,93
CLA	24/05/2012 14:50	216,61	217,58	217,56
CLA	28/05/2012 11:08	217,65	217,93	218,55
CLA	28/05/2012 11:08	217,8	217,74	218,75
CLA	28/05/2012 11:08	217,65	217,93	218,55
CLA	28/05/2012 11:10	217,86	218,94	218,36
CLA	28/05/2012 11:10	217,54	218,73	218,23
CLA	28/05/2012 11:11	217,73	218,88	218,24
CLA	28/05/2012 11:11	217,44	218,64	217,8
CLA	28/05/2012 11:41	215,88	216,82	217,41

CLA	28/05/2012	215,42	216,64	216,68
CLA	28/05/2012 12:41	216,76	218,02	217,4
CLA	28/05/2012 13:11	216,8	217,7	216,72
CLA	28/05/2012 13:41	215,59	216,67	216,52
CLA	28/05/2012 14:11	213,91	215,32	215,21
CLA	28/05/2012 14:20	216,79	217,49	217,8
CLA	28/05/2012 14:20	216,23	217,23	217,69
CLA	28/05/2012 14:50	216,11	216,69	217,17
CLA	28/05/2012 15:20	216,85	216,93	218,03
CLA	28/05/2012 15:50	215,45	215,97	216,12
CLA	28/05/2012 16:20	216,87	217,08	217,29
CLA	28/05/2012 16:39	213,59	213,46	215,42
CLA	28/05/2012 16:39	213,32	213,22	215,02
CLA	28/05/2012 16:39	213,32	213,22	215,02
CLA	28/05/2012 16:39	213,59	213,91	215,35
CLA	28/05/2012 16:39	213,52	213,48	215,2
CLA	28/05/2012 17:09	216,69	217,16	219,41
CLA	28/05/2012 17:39	215,66	213,46	217,32
CLA	29/05/2012 07:22	216,91	218,25	218,37
CLA	29/05/2012 07:22	217	217,92	218,2
CLA	29/05/2012 07:22	216,67	218,12	218,24
CLA	29/05/2012 07:22	216,87	217,76	218,12
CLA	29/05/2012 07:23	216,87	217,76	218,12
CLA	29/05/2012 07:52	217,11	217,21	218,08
CLA	29/05/2012 08:22	216,02	216,11	216,76
CLA	29/05/2012 08:52	215,72	216,84	216,92
CLA	29/05/2012 09:22	215,72	216,85	217,04
CLA	29/05/2012	216,9	217,49	217,6

09:52				
CLA	29/05/2012 10:22	216,88	217,59	217,27
CLA	29/05/2012 10:52	215,9	216,85	216,95
CLA	29/05/2012 11:22	215,45	215,81	217,13
CLA	29/05/2012 11:52	207,5	207,86	208,35
CLA	29/05/2012 12:22	216,43	217,52	217,48
CLA	29/05/2012 12:52	216,51	217,79	217,79
CLA	29/05/2012 13:22	216,6	217,77	217,17
CLA	29/05/2012 13:52	216,21	217,79	217,72

Tabela de dados suprimento pela concessionária local de energia elétrica

SUPRIMENTO	TEMPO	CHA Vrms(Volts)	CHB Vrms(Volts)	CHC Vrms(Volts)
CONCESSIONÁRIA	17:35:08	219,11	215,86	216,86
CONCESSIONÁRIA	17:35:14	219,81	215,8	216,9
CONCESSIONÁRIA	17:35:23	219,81	215,8	216,9
CONCESSIONÁRIA	17:50:06	215,37	211,3	212,88
CONCESSIONÁRIA	18:05:06	213,32	208,97	211,51
CONCESSIONÁRIA	18:20:07	204,06	200,03	202,75
CONCESSIONÁRIA	18:22:08	202,41	197,94	200,96
CONCESSIONÁRIA	18:22:26	202,73	198,45	201,4
CONCESSIONÁRIA	18:27:56	202,29	197,94	201,15
CONCESSIONÁRIA	18:27:59	202,73	198,51	201,72
CONCESSIONÁRIA	18:28:39	201,91	197,81	200,78
CONCESSIONÁRIA	18:28:46	202,54	198,56	201,65
CONCESSIONÁRIA	18:29:02	202,22	198,01	201,15
CONCESSIONÁRIA	18:29:08	202,54	198,51	201,46
CONCESSIONÁRIA	18:29:24	202,54	198,38	201,34
CONCESSIONÁRIA	18:29:24	202,54	198,38	201,28
CONCESSIONÁRIA	18:29:26	202,54	198,38	201,6
CONCESSIONÁRIA	18:29:39	202,54	196,93	201,21
CONCESSIONÁRIA	18:30:03	202,41	198,51	201,53
	23/05/2012			
CONCESSIONÁRIA	15:21	209,31	208,63	212,34
	23/05/2012			
CONCESSIONÁRIA	15:21	209,21	208,47	212,02
	23/05/2012			
CONCESSIONÁRIA	15:21	209,21	208,47	212,02
	23/05/2012			
CONCESSIONÁRIA	15:51	209,82	209,52	211,97
	23/05/2012			
CONCESSIONÁRIA	16:21	210,81	209,88	212,24
	23/05/2012			
CONCESSIONÁRIA	16:51	213,29	212,46	214,93
	23/05/2012			
CONCESSIONÁRIA	17:21	211,87	211,07	213,66
	23/05/2012			
CONCESSIONÁRIA	17:51	213,35	210,64	214,07
	23/05/2012			
CONCESSIONÁRIA	18:19	204,48	200,39	204,68
	23/05/2012			
CONCESSIONÁRIA	18:21	207,59	203,85	207,67
	23/05/2012			
CONCESSIONÁRIA	18:22	204,93	201,46	204,73
	23/05/2012			
CONCESSIONÁRIA	18:26	203,61	199,63	203,85
	23/05/2012			
CONCESSIONÁRIA	18:31	203,79	199,52	204,54
CONCESSIONÁRIA	23/05/2012	203,1	196,74	203,8

18:38				
CONCESSIONÁRIA	23/05/2012 18:38	202,92	199,14	203,28
CONCESSIONÁRIA	23/05/2012 18:39	201,79	197,75	202,34
CONCESSIONÁRIA	23/05/2012 18:39	202,41	198,7	202,79
CONCESSIONÁRIA	24/05/2012 07:49	208,86	208,09	211,15
CONCESSIONÁRIA	28/05/2012 16:21	2,13	1,56	1,63
CONCESSIONÁRIA	28/05/2012 16:21	213,08	214,54	218,31
CONCESSIONÁRIA	28/05/2012 16:37	213,21	212,46	215,48
CONCESSIONÁRIA	28/05/2012 18:09	204,79	202,22	206,85
CONCESSIONÁRIA	28/05/2012 18:18	203,04	199,02	203,42
CONCESSIONÁRIA	28/05/2012 18:18	202,54	198,01	203,28
CONCESSIONÁRIA	28/05/2012 18:18	202,41	198,63	203,35
CONCESSIONÁRIA	28/05/2012 18:19	201,29	197,5	202,23
CONCESSIONÁRIA	28/05/2012 18:19	202,59	198,7	203,28
CONCESSIONÁRIA	28/05/2012 18:19	202,34	198,51	203,16
CONCESSIONÁRIA	28/05/2012 18:19	202,66	197,88	203,42
CONCESSIONÁRIA	28/05/2012 18:19	201,91	198,57	203,16
CONCESSIONÁRIA	28/05/2012 18:19	201,84	198,06	203,03
CONCESSIONÁRIA	28/05/2012 18:20	201,29	197,5	202,47
CONCESSIONÁRIA	28/05/2012 18:24	201,91	197,88	202,47
CONCESSIONÁRIA	28/05/2012 18:25	200,4	195,68	200,9
CONCESSIONÁRIA	28/05/2012 18:31	197,7	193,79	198,89
CONCESSIONÁRIA	29/05/2012 14:02	1,88	2,01	1,31
CONCESSIONÁRIA	29/05/2012 14:02	208,81	209,45	212,52