

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA**  
**ELÉTRICA**

**MODELO COMPUTACIONAL ELETROMAGNÉTICO DE UM**  
**SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO PARA INVESTIGAÇÃO DE**  
**PROBLEMAS DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA**

**DEMerval PINHEIRO BRAGA JÚNIOR**

**SÃO LUÍS**

**2018**

**DEMerval PINHEIRO BRAGA JÚNIOR**

**MODELO COMPUTACIONAL ELETROMAGNÉTICO DE UM  
SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO PARA INVESTIGAÇÃO DE  
PROBLEMAS DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Eletricidade da Universidade Federal do Maranhão, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Sistemas de Energia.  
Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Onoda Pessanha.

**SÃO LUÍS**

**2018**

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
Núcleo Integrado de Bibliotecas/UFMA

Braga Júnior, Demerval Pinheiro.

Modelo Computacional Eletromagnético de um Sistema de Distribuição para Investigação de Problemas de Qualidade de Energia Elétrica / Demerval Pinheiro Braga Júnior. - 2018.

135 f.

Orientador(a): José Eduardo Onoda Pessanha.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Eletricidade/ccet, Universidade Federal do Maranhão, PPGEE /CCET-UFMA , São Luis, 2018.

1. Modelo computacional. 2. Monitoramento. 3. Qualidade da energia elétrica. 4. Variação de tensão de curta-duração. I. Pessanha, José Eduardo Onoda. II. Título.

**MODELO COMPUTACIONAL ELETROMAGNÉTICO DE UM SISTEMA  
DE DISTRIBUIÇÃO PARA INVESTIGAÇÃO DE PROBLEMAS DE  
QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA**

**Demerval Pinheiro Braga Junior**

Dissertação aprovada em 09 de março de 2018.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Eduardo Onoda Pessanha  
(Orientador)

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

Prof. Dr. José Gomes de Matos  
(Membro da Banca Examinadora)

A Deus, fonte de vida.

A minha esposa e filhos pelo  
incentivo.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, que iluminou o meu caminho e sustentou a minha fé durante esta jornada.

A minha esposa, Gleisse, aos meus filhos, Mariana e Matheus e minha sobrinha Mayna que com carinho e zelo não mediram esforços para que eu chegasse até aqui.

A minha mãe, Maria Jesus Martins Braga (*in memoriam*), pelos ensinamentos de vida e amor incondicional.

Ao meu orientador, José Eduardo Onoda Pessanha, pela paciência na orientação, incentivando-me a buscar mais conhecimentos.

Aos meus amigos da UFMA, pelo convívio, apoio.

E a todos os professores do curso de Pós- Graduação em Engenharia de Eletricidade da Universidade Federal do Maranhão que contribuíram para o meu desenvolvimento acadêmico e profissional.

“Se alguém quiser ser o primeiro, será o último, e servo de todos”

Marcos 9:33-35

## RESUMO

Esta pesquisa implementa através do programa ATPDraw uma rede de distribuição para simulação de fenômenos eletromagnéticos, identificada nesta pesquisa como modelo eletromagnético, a fim de se investigar problemas de qualidade de energia elétrica. A rede em questão é real, bem como os problemas de qualidade de energia que se deseja investigar. O desenvolvimento e a validação da implementação foram feitas com dados obtidos a partir de medições em campo, ou seja, dados reais. Desta forma, os parâmetros podem ser ajustados a fim de melhorar a precisão do sistema implementado e a versão final poderá ser usada para outras aplicações, inclusive para testes de medidas preventivas.

**Palavras-chave:** Qualidade da energia elétrica, variação de tensão de curta-duração, monitoramento, modelo computacional.



## **ABSTRACT**

This research implements through the ATPDraw program a distribution network for simulation of electromagnetic phenomena, identified in this research as electromagnetic model, in order to investigate power quality problems. The network in question is real, as well as the power quality problems investigated. The development and validation of implementation were made with data obtained from field measurements, i.e. actual data. In this way, the parameters can be adjusted in order to improve the accuracy of the implemented system and the final version may be used for other applications, including for preventive measures.

Keywords: Electric power quality, short-duration voltage variation, monitoring, computational model.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>13</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>16</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS .....</b>	<b>17</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>19</b>
1.1 O TEMA DA PESQUISA E A SUA RELEVÂNCIA .....	19
1.2 JUSTIFICATIVAS E OBJETIVOS .....	20
1.3 CONTRIBUIÇÕES .....	21
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	22
<b>2 ASPECTOS SOBRE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA .....</b>	<b>24</b>
2.1 HISTÓRICO NO BRASIL .....	24
2.2 DEFINIÇÃO DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA.....	25
2.3 CLASSIFICAÇÃO GERAL DOS FENÔMENOS .....	27
2.3.1 <i>Transitórios</i> .....	30
2.3.1.1 Transitórios impulsivos.....	31
2.3.1.2 Transitórios oscilatórios.....	32
2.3.2 <i>Variações de Tensão de Curta Duração</i> .....	32
2.3.2.1 Interrupção.....	32
2.3.2.2 Afundamento de tensão .....	34
2.3.2.3 Elevação de tensão.....	35
2.3.3 <i>Variação de Tensão de Longa Duração</i> .....	35
2.3.3.1 Interrupção sustentada.....	36
2.3.3.2 Sobretensão.....	36
2.3.3.3 Subtensão.....	36
2.3.4 <i>Distorção da Forma de Onda</i> .....	36
2.3.4.1 Distorção harmônica .....	37
2.3.4.2 Nível CC .....	37
2.3.4.3 Interharmônicas .....	37
2.3.4.4 Ruído .....	38
2.3.4.5 Cortes (Notching).....	39
2.3.5 <i>Desequilíbrio de Tensão</i> .....	39
2.3.6 <i>Variação de Frequência</i> .....	40
2.4 MONITORAMENTO DA QUALIDADE DE ENERGIA.....	40
2.4.1 <i>Processo de Detecção</i> .....	41
2.4.2 <i>Escolha de um Local de Monitoramento</i> .....	42

2.4.3	<i>Monitor de energia</i> .....	42
<b>3</b>	<b>AFUNDAMENTOS DE TENSÃO</b> .....	<b>43</b>
3.1	INTRODUÇÃO .....	43
3.2	DEFINIÇÕES DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO.....	43
3.3	PARÂMETROS DOS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO.....	44
3.3.1	<i>Magnitude</i> .....	44
3.3.2	<i>Duração</i> .....	45
3.3.3	<i>Frequência de Ocorrência</i> .....	46
3.3.4	<i>Diagrama Fasorial</i> .....	47
3.4	PRINCIPAIS CAUSAS DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO.....	48
3.4.1	<i>Faltas nos Sistemas de Distribuição e Transmissão</i> .....	49
3.4.1.1	Deslocamento do ângulo de fase.....	53
3.4.2	<i>Partida de Motor de Indução</i> .....	54
3.4.3	<i>Descargas Atmosféricas</i> .....	55
3.4.4	<i>Causas Diversas</i> .....	56
3.5	EFEITOS DOS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO.....	56
3.5.1	<i>Equipamentos de TI</i> .....	57
3.5.2	<i>Contatores</i> .....	58
3.6	POSSÍVEIS SOLUÇÕES PARA ATENUAR AFUNDAMENTOS DE TENSÃO.....	59
3.6.1	<i>Medidas Preventivas</i> .....	59
3.6.2	<i>Medidas Corretivas</i> .....	60
3.7	NORMAS OU RECOMENDAÇÕES NACIONAIS E INTERNACIONAIS .....	61
3.7.1	<i>ANEEL “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST)” Modulo 8 Qualidade da Energia Elétrica</i> .....	62
3.7.2	<i>ONS Sub-Módulo 2.8 “Procedimentos de Rede”</i> .....	62
3.7.3	<i>Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos – (do acrônimo em inglês IEEE - institute of electrical and electronics engineers)</i> .....	63
3.7.4	<i>Comissão Eletrotécnica Internacional (do acrônimo em inglês IEC - International Electrotechnical Commission)</i> .....	64
3.7.5	<i>Especificações para imunidade de equipamentos contra afundamentos de tensão (do acrônimo em inglês specifications for equipment voltage sag immunity – SEMI)</i> .....	65
3.7.6	<i>Curva CBEMA e ITIC</i> .....	66
<b>4</b>	<b>MONITORAMENTO DA QUALIDADE DE ENERGIA</b> .....	<b>69</b>
4.1	PRINCIPAIS CAUSAS DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO.....	69
4.2	DESCRIÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO DO CAMPUS UNIVERSITÁRIO DA UFMA.....	69
4.3	JUSTIFICATIVAS PARA MONITORAÇÃO .....	70
4.4	CARGAS SENSÍVEIS.....	70

4.5	DESCRIÇÃO DA SUBESTAÇÃO DE INTERESSE .....	74
4.5.1	<i>O Transformador</i> .....	74
4.5.2	<i>Sistema de Autogeração</i> .....	75
4.5.3	<i>Disjuntor a Pequeno Volume de Óleo (PVO)</i> .....	76
4.6	ANALISADOR DE QEE .....	77
4.7	O SOFTWARE PARA ANÁLISE DA MONITORAÇÃO .....	79
4.8	ESQUEMA DE MONITORAMENTO .....	80
4.9	PRINCIPAIS EVENTOS .....	81
4.9.1	<i>Perfil dos Afundamentos do CCET</i> .....	85
4.10	SUGESTÕES PARA A MITIGAÇÃO DOS EVENTOS DE QEE REGISTRADOS NO CCET .....	87
<b>5</b>	<b>MODELAGEM COMPUTACIONAL DO SISTEMA REAL DE DISTRIBUIÇÃO .....</b>	<b>88</b>
5.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	88
5.2	COMPONENTES DA REDE DE MÉDIA E BAIXA TENSÃO .....	89
5.2.1	<i>Rede da Concessionária</i> .....	89
5.2.2	<i>Chaves</i> .....	91
5.2.3	<i>Linhas de Distribuição e Cabos de Baixa Tensão</i> .....	91
5.2.4	<i>Medidores de Tensão e Corrente</i> .....	92
5.2.5	<i>Transformador</i> .....	93
5.2.6	<i>Cargas</i> .....	94
5.2.7	<i>Elementos de Representação de Falta</i> .....	95
5.3	IMPLEMENTAÇÃO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO .....	96
5.3.1	<i>Validação do Modelo da Rede de Distribuição</i> .....	98
5.3.2	<i>O Modelo da Rede de Distribuição sob Condição de Falta</i> .....	100
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>106</b>
6.1	CONCLUSÕES .....	106
6.2	TRABALHOS FUTUROS .....	107
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>108</b>
	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>113</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Transitório impulsivo simulado no ATPDraw.....	31
Figura 2.2 - Transitório oscilatório simulado no ATPDraw. ....	32
Figura 2.3 - Interrupção momentânea simulada no ATPDraw.....	33
Figura 2.4 - Afundamento de tensão simulado no ATPDraw.....	34
Figura 2.5 - Elevação de tensão simulado no ATPDraw. ....	35
Figura 2.6 - Formas de ondas com harmônicas.....	37
Figura 2.7 - Distorção devido a interharmônicas. ....	38
Figura 2.8 - Distorção devido a ruído. ....	38
Figura 2.9 - Distorção devido a Cortes (Notching). ....	39
Figura 2.10 - Desequilíbrio de tensão trifásica simulado no ATPDraw.....	40
Figura 3.1 - Exemplo de afundamento de tensão com $V_{Mag} = 0,26$ pu e $\Delta t = 12$ ciclos. ....	46
Figura 3.2 - Diagrama fasorial do tipo A.....	47
Figura 3.3 - Diagrama fasorial do tipo B.....	48
Figura 3.4 - Diagrama fasorial do tipo C.....	48
Figura 3.5 - Diagrama fasorial do tipo D.....	48
Figura 3.6 - (a) Formas da onda durante afundamento de tensão durante uma falta (b) A tensão RMS.....	50
Figura 3.7 - Diagrama unifilar do sistema teste. ....	50
Figura 3.8 - Sistema teste para análise de afundamento considerando a distância entre a barra de acoplamento A e o ponto de falta D.....	51
Figura 3.9 - Amplitude das tensões e $V_A$ RMS.....	52
Figura 3.10 - Amplitude das tensões e $V_A$ RMS.....	53
Figura 3.11 - Deslocamento de ângulo de fase $\Delta V\phi = - 22^\circ$ .....	54
Figura 3.12 - (a) -(c) Forma da onda durante afundamento de tensão durante a partida do motor e (d) A tensão RMS [27]. ....	55
Figura 3.13 - Fonte de alimentação CC regulada.....	57
Figura 3.14 - Curva CBEMA e ITIC [22].....	58
Figura 3.15 - Diagrama esquemático simplificado de um contator.....	59
Figura 3.16 - Curva de tolerância segundo a Norma SEMI F47-0200.....	66

Figura 3.17 - Curva CBEMA de tolerância de tensão para componentes eletroeletrônicos microprocessados [34].	67
Figura 3.18 - Curva ITIC de tolerância de tensão para componentes eletroeletrônicos microprocessados [34].	67
Figura 4.1 - Analisador de qualidade de energia Power Platform PP-4300	70
Figura 4.2 - Cromatógrafo a gás acoplado a um Espectrofotômetro de Massa	71
Figura 4.3 - Cromatógrafo Líquido de Alta Eficiência	72
Figura 4.4 - Potenciostato / Galvanostato	72
Figura 4.5 - Geladeiras com estoques de padrões de pesticidas e de enzimas.	73
Figura 4.6 - Subestação do CCET	74
Figura 4.7 - Aspecto físico do Transformador da subestação CCET	75
Figura 4.8 - Aspecto físico do grupo gerador subestação CCET	76
Figura 4.9 - Aspecto físico do disjuntor a PVO subestação CCET	77
Figura 4.10 - Modo de operação Scope	77
Figura 4.11 - Modo de operação Medição.	78
Figura 4.12 - Modo de operação Gravador de Eventos	78
Figura 4.13 - Modo de operação gráfica no tempo.	78
Figura 4.14 - Analisador de qualidade de energia Power Platform PP-4300	79
Figura 4.15 - Tela de abertura do software Dranetz-VIEW	80
Figura 4.16 - Ocorrências dos afundamentos de Tensão	82
Figura 4.17 - Curva ITIC período 30/05 a 26/11 de 2016.	83
Figura 4.18 - Eventos registrados	84
Figura 4.19 - Eventos registrados por fase	85
Figura 4.20 - Perfil de afundamentos de tensão do CCET	86
Figura 5.1 – Representação da rede elétrica da concessionária no ATPDraw.	89
Figura 5.2 - Interface de entrada dos parâmetros da fonte trifásica	90
Figura 5.3 - Interface de entrada dos parâmetros da impedância da fonte	90
Figura 5.4 - Representação de chave trifásica/monofásica no ATPDraw	91
Figura 5.5 - Interface de entrada dos parâmetros para controle da abertura e fechamento.	91
Figura 5.6 - Interface de entrada da Rede de distribuição.	92
Figura 5.7 - Medidores: a) tensão de pico, b) corrente de pico, c) tensão e corrente RMS	93
Figura 5.8 - Representação do transformador trifásico no ATPDraw	94

Figura 5.9 - Interface de entrada dos parâmetros do transformador de 500 kVA.....	94
Figura 5.10 - Representação da carga trifásica no ATPDraw .....	95
Figura 5.11 - Interface de entrada dos parâmetros da carga .....	95
Figura 5.12 - Representação de curto-circuito fase terra .....	96
Figura 5.13 - Modelo Eletromagnético no ATPDraw representando a Rede de Distribuição de media e baixa tensão.....	97
Figura 5.14 - Diagrama das correntes e grandezas elétricas registradas em t = 13h21min.....	98
Figura 5.15 - Parte do sistema modelado na interface do ATPDraw para simular o fluxo de potência .....	99
Figura 5.16 - Correntes de pico trifásicas em regime permanente do secundário do transformador da subestação do CCET .....	100
Figura 5.17 - Simulação de uma falta na Fase “C” no ramal de derivação para outras duas subestações .....	102
Figura 5.18 - Evento simulado no ATPDraw .....	102
Figura 5.19 - Evento registrado pelo analisador de qualidade de energia .....	103
Figura 5.20 - Simulação de uma falta na Fase “A” e “B” para terra no ramal de derivação para duas outras subestações .....	104
Figura 5.21 - Evento registrado pelo analisador de qualidade de energia .....	104
Figura 5.22 - Evento simulado no ATPDraw .....	105

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Principais fenômenos causadores de distúrbios eletromagnéticos classificados segundo a IEC .....	28
Tabela 2.2 - Categorias e Características típicas de fenômenos causados por distúrbios eletromagnéticos.....	30
Tabela 3.1 - Classificação dos tipos de afundamentos segundo IEEE 1159 .....	45
Tabela 4.1 - Ocorrências de afundamento de tensão .....	82
Tabela 4.2 - Eventos registrados no barramento do secundário transformador CCET .....	84
Tabela 4.3 - Eventos registrados por fase no barramento secundário do transformador CCET .....	84
Tabela 5.1 - Corrente de curto-circuito no PAC (Fonte: concessionária local) .....	90
Tabela 5.2 - Grandezas elétricas e impedâncias das cargas por fase .....	99
Tabela 5.3 - Comparação das correntes no barramento monitorado no CCET .....	100
Tabela 5.4 - Tensões remanescentes Caso 1 .....	101
Tabela 5.5 - Tensões remanescentes Caso 2.....	104



## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica  
ASD: Adjustable Speed Drivers  
ATPDraw: Alternative Transient Program  
CA: Corrente Alternada  
CBEMA: Computer and Business Equipment Manufacturers Association  
CC: Corrente Contínua  
CCET: Centro do Ciências Exatas e Tecnológica  
DNAE: Departamento Nacional de Águas e Energia  
DNAEE: Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica  
CNAEE: Conselho Nacional de Águas e Energia Elétrica  
CVT: Transformadores de Tensão Constante  
DEC: Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora  
DIC: Duração de Interrupção por Unidade Consumidora  
DMIC: Duração Máxima de Interrupção por Unidade Consumidora  
DVR: Dynamic Voltage Restorer  
FEC: Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora  
FIC: Frequência de Interrupção por Unidade Consumidora  
Hz: Unidade de frequência  
ITIC: Information Technology Institute Council  
IEEE: Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos  
IEC: International Electrotechnical Commission  
kHz: Unidade de frequência  
m: Ordem da componente interharmônica  
mH: Unidade de indutância  
min: Unidade de tempo  
ms: Unidade de tempo  
n: ordem da componente harmônica  
NR-10: Norma Regulamentadora 10  
ns: Unidade de tempo  
ONS: Operador Nacional do Sistema  
PAC: Ponto de Acoplamento Comum

PLC: Programmable Logic Controller

p.u: Sistema por unidade

QEE: Qualidade de Energia Elétrica

RMS: Root Mean Square

s: Unidade de tempo

SEMI: Semiconductor Equipment and Materials International

TI: Tecnologia da Informação

$t_f$ : instante de tempo final

$t_i$ : instante de tempo inicial

UPS: Uninterruptible Power Supply

V: Unidade Tensão

$V_a$  : Tensão na fase A

$V_b$  : Tensão na fase B

$V_c$  : Tensão na fase C

$V_{Mag}$  : Tensão de magnitude

$V_n$  : Tensão nominal

$V_{Reg}$  : Tensão residual ou remanescente

$V_{ref}$  : Tensão de referência

VTCD: Variação de Tensão de Curta Duração

X / R: Relação entre a parte real e a parte imaginária da impedância

$\mu s$ : Unidade de tempo

$\Omega$ : Unidade de Impedância

$\Delta t$ : Intervalo de tempo

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 O Tema da Pesquisa e a sua Relevância

O tema Qualidade da Energia Elétrica (QEE) agrega vários fenômenos eletromagnéticos que causam problemas aos consumidores de energia elétrica. A preocupação com a 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].

O termo qualidade é conceituado pela ISO [2] 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 grau no qual os seus requisitos foram atendidos.

Seguindo o mesmo foco, em [3] 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 [4]: 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".

Portanto, a descrição do tema apresentada de forma sucinta nesta introdução, ajuda a consolidar a importância da pesquisa desenvolvida, por se tratar de um fenômeno que pode causar prejuízos tanto aos consumidores quanto para as concessionárias de energia elétrica. Contribuições tecnológicas e/ou científicas na área de QEE visam beneficiar ambas as partes.

## 1.2 Justificativas e Objetivos

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 da tensão. Ocorrem num período muito rápido abrangendo uma área de investigação bastante conhecida e definida como Transitórios Eletromagnéticos, podendo causar efeitos destrutivos, mas de natureza momentânea. Entretanto, nem todos os fenômenos eletromagnéticos causadores de problemas na QEE são investigados nesta pesquisa, sendo, portanto, necessário delimitá-los. A principal razão para esta restrição está baseada na grande quantidade de fenômenos que podem se manifestar em uma rede de distribuição e causar problemas na QEE. Uma ampla investigação envolveria bastante esforço, extrapolando o tempo destinado ao desenvolvimento desta pesquisa. Portanto, a fim de abordar os fenômenos que mais se manifestam e causam maiores danos aos consumidores e as concessionárias, a seleção destes está baseada na frequência de ocorrência, sendo estes as Variações de Tensão de Curta e de Longa Duração [1; 3; 4].

A rede de distribuição de energia elétrica enfocada nesta dissertação é da Universidade Federal do Maranhão (Cidade Universitária) cujo nível de tensão de entrada é de 13.8 kV, sendo distribuída por linhas aéreas e convertida para uso final através de transformadores abaixadores espalhados pelas subestações abrigadas e de pequeno-porte localizadas nos principais prédios. Ao longo da última década, problemas de QEE local têm se manifestado aumentando o risco de danos aos equipamentos elétricos supridos pela rede. Pode-se destacar aqui o prédio do Centro de Tecnologia que abriga equipamentos muito sensíveis a variações na energia elétrica fornecida e, portanto, suscetíveis a danos temporários ou permanentes. Além dos prejuízos financeiros referentes aos bens materiais, existem os prejuízos referentes à perda de informações associadas as pesquisas em desenvolvimento. Portanto, ações são necessárias para investigar esses problemas e propor soluções que evitem prejuízos irremediáveis, como os descritos acima. Essas ações não são triviais exigindo investigações detalhadas das características da rede de distribuição e das cargas e, principalmente, dos distúrbios elétricos que afetam a QEE. Estas investigações, que envolvem tanto o aspecto prático (monitoramento de grandezas elétricas), quanto o teórico (consulta na literatura

especializada), forneceram informações que possibilitaram o desenvolvimento de um modelo computacional da rede de distribuição incluindo transformadores e cargas para estudos de transitórios eletromagnéticos, enfocando os problemas de QEE discriminados anteriormente. Para este fim, foi usada uma versão do programa computacional ATPDraw [5].

A elaboração do modelo computacional incluiu aspectos práticos e teóricos, conforme informado anteriormente. A parte prática englobou a monitoração de parâmetros elétricos no Centro de Tecnologia (escolhido por apresentar a maior carga bem como as mais complexas e mais sensíveis a variações na QEE na Cidade Universitária) e a teórica englobou consulta na literatura especializada. A parte prática teve como objetivos:

- Detectar e classificar os eventos registrados por um analisador de qualidade de energia;
- Quantificar o número de eventos;
- Desenvolver a curva característica representando o perfil dos afundamentos de tensão incidentes no ponto monitorado;
- Coletar dados práticos da monitoração e das medições para aprimoramento do modelo computacional a ser desenvolvido, com especial interesse na modelagem das cargas e dos transformadores.

A parte teórica teve como objetivo investigar o estado da arte sobre Qualidade de Energia em sistemas elétricos de potência, visando:

- Conhecer as recentes técnicas de investigação e de modelagem computacional aplicada ao problema e considerá-las, caso adequadas, à pesquisa proposta;
- Familiarização de aplicações práticas do programa computacional ATPDraw em investigações do problema da QEE;
- Conceitos de modelagem de carga e de transformadores para estudos de transitórios eletromagnéticos com especial interesse em problemas de QEE;
- Desenvolver os modelos de carga com base nas medições efetuadas.

### **1.3 Contribuições**

Os problemas de QEE são reais e geralmente se originam no próprio sistema elétrico, seja no lado do consumidor ou no lado da concessionária. Cargas

especiais, equipamentos defeituosos e faltas, são exemplos de fontes que causam problemas na QEE da rede elétrica podendo danificar ou causar mau-funcionamento dos equipamentos conectados à rede, bem como das cargas. Portanto, é necessário desenvolver, ou adaptar, métodos para investigar esses problemas e, também, implementar formas de mitigá-los. Uma rede de distribuição real e que experimenta problemas de QEE com certa frequência causa incômodos aos seus usuários, geralmente devido a desconexão das cargas. Este é o cenário observado atualmente na rede de distribuição de interesse, justificando, portanto, a necessidade de investigação. Em poucas palavras, o problema é real, existe, e pouco se conhece sobre ele especificamente. Se fez necessário iniciar uma investigação para conhecer o problema e que, a partir deste ponto, se desenvolveu uma forma de análise, sendo neste caso o desenvolvimento do modelo computacional para estudos de transitórios eletromagnéticos enfocando o problema de QEE. Deve-se realçar que tal modelo não existe para o sistema de distribuição em questão e as investigações práticas e teóricas contribuíram para o seu desenvolvimento. O modelo final é capaz de simular com certa precisão os fenômenos transitórios de interesse, permitindo assim testar métodos de mitigação a fim de reduzir os incômodos causados por problemas na QEE.

#### **1.4 Estrutura da Dissertação**

Para fins de orientação de leitura, os principais assuntos abordados nos Capítulos seguintes são apresentados abaixo:

Capítulo 2 – Aspectos sobre qualidade; definições e classificações dos fenômenos; técnicas de monitoramento.

Capítulo 3 – Afundamento de tensão; definições; parâmetros; principais causas; efeitos; possíveis soluções; normas nacionais e internacionais.

Capítulo 4 – Descrição do sistema elétrico da subestação na qual foi realizado o monitoramento da tensão, dos equipamentos e programa utilizado neste monitoramento; conhecer as características dos afundamentos de tensão que incidem sobre o barramento secundário do transformador do CCET; determinar o perfil dos afundamentos de tensão para análise de sensibilidade dos equipamentos instalados no CCET e sugestões para mitigação dos eventos registrados.

Capítulo 5 – Modelagem computacional de cada componente do sistema real de distribuição no programa ATPDraw, validar o modelo da rede de distribuição em regime permanente e sob condição de falta.

Capítulo 6 – Conclusões finais do trabalho, sendo feita uma análise de todos os resultados obtidos e em seguida serão formuladas algumas sugestões de trabalhos futuros a serem desenvolvidos, de forma a dar continuidade às pesquisas deste tema de grande importância.

## **2 ASPECTOS SOBRE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA**

### **2.1 Histórico no Brasil**

A qualidade de energia tem sido sinônimo de preocupação para os engenheiros eletricitistas. Em 1920, foi criado no Brasil o primeiro órgão com vistas a fiscalizar os serviços de energia elétrica no país, a Comissão de Estudos de Forças Hidráulicas vinculada ao Ministério da Agricultura, Indústria e Comércio. Com o Decreto Lei nº 6.402, surge em 1940, a Divisão de Águas do Departamento Nacional da Produção Mineral. Logo após 20 anos, exatamente em 1960, a Lei nº 3.782, de 22 de julho, cria o Ministério de Minas e Energia, transformando a Divisão de Águas, em 1965, no Departamento Nacional de Águas e Energia – DNAE tendo sido alterada essa denominação para Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – DNAEE em dezembro de 1968, pelo Decreto nº 63.951.

Dentre os diversos órgãos surgidos e já supracitados, é necessário destacar também o Conselho Nacional de Águas e Energia Elétrica – CNAEE criado em maio de 1939, sendo extinto somente em 1969 e substituído pelo então DNAEE. Ambos tinham como objetivo a supervisão, fiscalização e controle dos serviços de eletricidade. Com a Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, é instituída a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL que visa regular e fiscalizar a produção, transmissão e comercialização de energia elétrica, em conformidade com as políticas e diretrizes do Governo Federal. Constituída a Agência, com a publicação de seu regimento Interno, ficou então extinto o DNAEE [6].

Inicialmente, a preocupação das empresas fornecedoras de energia era apenas de “manter as luzes acesas”. Projetavam os sistemas para resistir à perda das linhas ou geração usando para-raios, disjuntores e religadores, além de evitar que a frequência do sistema apresentasse desvios da fundamental. Foi quando o DNAEE publicou as Portarias nº 046 e nº 047, de 17 de abril de 1978, e a Portaria nº 031, de 11 de abril de 1980, por considerar ser imprescindível a conceituação de serviço adequado de energia elétrica bem como o estabelecimento de um método uniforme para apuração dos índices de continuidade do suprimento elétrico [7].

O DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e o FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora), por exemplo, são indicadores específicos de continuidade que monitoram a qualidade de



energia fornecida pelas concessionárias. O primeiro fornece o número de horas que, em média, um consumidor fica sem energia elétrica durante um período, sendo geralmente mensal. Já o segundo indica quantas vezes, em média, houve interrupção na unidade consumidora. Atualmente, o processo de monitoração da qualidade do serviço oferecido pelas concessionárias está baseado, principalmente, na coleta e processamento dos dados de DEC e FEC, informados pelas empresas à ANEEL. Porém, foi implementado o Sistema ANEEL de Monitoração da Qualidade de Energia, que deu à Agência acesso direto e automático às informações sobre a qualidade do fornecimento, sem que dependesse de dados encaminhados pelas empresas [6].

Em 2000, a ANEEL implementou mais três indicadores destinados a aferir esta qualidade prestada diretamente ao consumidor: DIC, FIC e DMIC. O DIC (Duração de Interrupção por Unidade Consumidora) e FIC (Frequência de Interrupção por Unidade Consumidora) indicam quanto tempo e o número de vezes, respectivamente, que uma unidade consumidora ficou sem energia elétrica durante um determinado período. O DMIC (Duração Máxima de Interrupção por Unidade Consumidora) é um indicador que limita o tempo máximo de cada interrupção, impedindo que a concessionária deixe o consumidor sem energia elétrica durante um período muito longo [6]. As metas desses indicadores, - DIC e FIC - estão publicadas na Resolução ANEEL nº 024, de 27 de janeiro de 2000, e são informadas na conta de energia elétrica do consumidor.

De maneira geral, tanto os fabricantes de equipamentos como o consumidor final estão mais atentos no que diz respeito à qualidade de energia. Aos fabricantes cabe a preocupação no que se refere à operação dos seus equipamentos, enquanto que ao consumidor, o uso contínuo e eficiente do produto/serviço de energia elétrica. Cortes de energia, por exemplo, são responsáveis por causar grandes danos. Computadores, equipamentos eletrônicos e terminais de dados são vulneráveis a distúrbios transitórios e ou interrupções de curtíssima duração.

## **2.2 Definição de Qualidade de Energia Elétrica**

Diversas referências têm abordado a importância da qualidade de energia, no entanto, não há uma definição única acordada para o termo "qualidade

de energia", e várias fontes têm definições diferentes e por vezes inconsistentes. Além disso, "a qualidade de energia" é por vezes usado livremente para expressar significados diferentes: "confiabilidade de abastecimento", "Qualidade do Serviço", "qualidade da tensão" e "qualidade de corrente" [9]. Os múltiplos significados da qualidade de energia são o resultado da definição de qualidade de energia a partir de perspectivas diferentes. Qualidade de energia, na geração, refere-se à capacidade de gerar energia elétrica a uma frequência específica, 50 ou 60 Hz, com uma variação muito pequena, enquanto que a qualidade de energia na transmissão pode estar associada à qualidade de tensão. Ao nível da distribuição, a qualidade de energia pode ser uma combinação de qualidade de tensão e qualidade de corrente. Do ponto de vista comercial, a eletricidade é um produto e a qualidade de energia é o índice da qualidade do produto [10].

O Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) define qualidade de energia no padrão IEEE 1159-2009 como " A ideia de fornecimento de energia e aterramento para equipamentos sensíveis, seja adequado para o funcionamento desses equipamentos, dos seus alimentadores e outros equipamentos conectados " [11] . Essa é uma definição adequada da qualidade de energia para equipamentos eletrônicos, no entanto, não somente os dispositivos eletrônicos estão sujeitos a falhas devido à má qualidade. Há uma outra interpretação da qualidade da energia elétrica em [12]. Nesta referência a qualidade da energia elétrica, em geral, refere-se à manutenção de uma tensão senoidal na barra próximo a magnitude e frequência nominais. Dugan [3] propõe uma definição mais ampla de problemas de qualidade de energia, afirmando que é "Qualquer problema de energia manifestado em desvios de tensão, corrente, frequência ou que resultem em falha ou mau funcionamento do equipamento do consumidor". No entanto, não só equipamentos estão sujeitos a problemas de qualidade de energia, por exemplo, o aumento da corrente de terceira harmônica no neutro dos transformadores de distribuição ligado em delta-estrela tem motivado o redimensionamento dos condutores neutros para evitar superaquecimento, perdas e falhas potenciais. Alguns autores utilizam o termo qualidade de tensão e outros usam qualidade da fonte de alimentação para se referir ao mesmo conceito de qualidade de energia. O termo energia limpa é usualmente utilizado para se referir ao fornecimento que não contém perturbações intoleráveis. O que está claro é que todos estes termos se referem à interação entre a carga e a fonte. Nesta

dissertação, a seguinte definição é adotada por ser a mais completa e mais adequada para o novo cenário desregulamentado do setor de energia [13].

"Qualidade da energia é a combinação de qualidade de corrente e qualidade de tensão, envolvendo a interação entre o sistema e a carga. Qualidade da tensão refere-se ao desvio da forma de onda de tensão a partir da tensão senoidal ideal de magnitude constante e frequência constante. Qualidade de corrente é um termo complementar e que diz respeito ao desvio da forma de onda de corrente a partir da corrente senoidal ideal de magnitude constante e frequência constante. Qualidade da tensão envolve o desempenho do sistema de energia para a carga, enquanto que a qualidade da corrente envolve o comportamento da carga em direção ao sistema de energia" [13].

Conforme descrito acima e de acordo com o pensamento de alguns autores, é necessário lembrar também que para avaliar o quanto um sistema está operando fora de suas condições normais existem duas grandezas elétricas básicas, a tensão e a frequência, que podem ser empregadas. A frequência em um sistema interligado situa-se na faixa de  $60 \pm 0,5\text{Hz}$ . Por outro lado, com relação à tensão, três características principais devem ser observadas: a forma de onda, que deve ser o mais próximo possível da forma senoidal, a simetria do sistema elétrico e as magnitudes das tensões dentro de limites aceitáveis.

Entretanto, existem alguns fenômenos, aleatórios ou intrínsecos, que ocorrem no sistema elétrico causando alterações nos aspectos supracitados, deteriorando a qualidade do fornecimento de energia elétrica. Sendo assim, são utilizados métodos de análise de tais distúrbios, com o intuito de conhecê-los melhor, e também a sua causa.

O trabalho apresentado nesta dissertação enfoca um distúrbio específico: o afundamento de tensão. As causas e efeitos do afundamento serão analisados nas próximas seções, mas antes são apresentados aspectos gerais da qualidade de energia.

### **2.3 Classificação Geral dos Fenômenos**

A todo o momento ocorrem diversos tipos de fenômenos eletromagnéticos nos sistemas elétricos, como afundamentos de tensão e interrupções, flutuações de tensão, variações de frequência, entre outros. Diante dessa variedade de

fenômenos, surgiu a necessidade de desenvolver uma terminologia especial para descrevê-los. Entretanto, pode-se observar que, mesmo com essa iniciativa, ainda existe a presença de termos ambíguos para descrever o mesmo fenômeno. Um exemplo é o termo surto (glitch em inglês), usado para descrever uma larga variedade de distúrbios que causam falta ou má operação de equipamentos. Esse termo também recebe o nome de cintilação (flicker) e piscada (“blink”), que, apesar de não ter significado técnico, são usados no vocabulário de profissionais da área de energia elétrica.

O Institute of Electrical and Engineers Standard Coordinating Committee 22 (IEEP SCC22) tem buscado a padronização dos termos utilizados na área de QEE, bem como a definição de normas de qualidade de energia elétrica em conjunto com a Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC), que classifica os fenômenos em diversos grupos e aborda os parâmetros elétricos conduzidos como mostrados na Tabela 2.1 [14].

Tabela 2.1 - Principais fenômenos causadores de distúrbios eletromagnéticos classificados segundo a IEC

<p><b>1) Fenômenos Conduzidos de Baixa Frequência</b>  Harmônicos e interharmônicos;  Sinais portadores;  Flutuações de redes;  Afundamentos de tensão e interrupções;  Desbalanceamento de tensão;  Variações de frequências de rede elétrica; Componentes CC em redes CA;  Tensões induzidas em baixa frequência.</p>
<p><b>2) Fenômenos Irrradiados de Baixa Frequência</b>  Campos eletromagnéticos;  Campos elétricos.</p>
<p><b>3) Fenômenos Conduzidos de Alta Frequência</b>  Ondas contínuas conduzidas de tensão ou corrente;  Transitórios unidirecionais;  Transitórios oscilatórios.</p>
<p><b>4) Fenômenos Irrradiados de Alta Frequência</b>  Campos magnéticos;  Campos elétricos;  Campos eletromagnéticos;  Ondas contínuas;  Transitórios.</p>
<p><b>5) Fenômeno de Descarga Eletrostático</b></p>
<p><b>6) Pulso Eletromagnético Nuclear</b></p>

Além dessa classificação feita pelo IEC na Tabela 2.1, a Tabela 2.2, que foi extraída da norma IEEE Std. 1159-2009 [11] apresenta informações sobre conteúdo espectral típico, duração e magnitude quando apropriado para cada categoria de fenômenos eletromagnéticos [14;15;16].

Sendo assim, pode-se afirmar que as categorias e suas descrições são importantes na medida em que classificam os resultados de medição e identificam os fenômenos eletromagnéticos que podem causar problemas de qualidade de energia.

Vale ressaltar que para um melhor entendimento destes fenômenos, faz-se necessária a conceituação de algumas definições de acordo com as recomendações da norma IEEE Std. 1159-2009 [11].

Tabela 2.2 - Categorias e Características típicas de fenômenos causados por distúrbios eletromagnéticos

Categoria	Cont.Espectral	Duração	Amplitude
1 Transitório			
1.1 Impulsivo			
1.1.1 Nanossegundo	5ns	< 50 ns	
1.1.2 Microsegundo	1 $\mu$ s	5 ns a 1 ms	
1.1.3 Milissegundo	0,1 ms	>1 ms	
1.2 Oscilatório			
1.2.1 Baixa frequência	< 5 kHz	3 – 50 ms	4 p.u
1.2.2 Média frequência	5 – 500 kHz	20 $\mu$ s	4 p.u
1.2.3 Alta frequência	0,5 – 5 MHz	5 $\mu$ s	4 p.u
2 Variações de Curta Duração			
2.1 Instantânea			
2.1.1 Afundamento (Sag)		0,5 - 30 ciclos	0,1 - 0,9 pu
2.1.2 Elevação (Swell)		0,5 - 30 ciclos	1,1 - 1,8 pu
2.2 Momentânea			
2.2.1 Interrupção		0,5 ciclos - 3 s	< 0,1 pu
2.2.1 Afundamento (Sag)		30 ciclos - 3 s	0,1 - 0,9 pu
2.2.2 Elevação (Swell)		30 ciclos - 3 s	1,1 - 1,4 pu
2.3 Temporária			
2.3.1 Interrupção		3 s - 1 min	< 0,1 pu
2.3.1 Afundamento (Sag)		3 s - 1 min	0,1 - 0,9 pu
2.3.2 Elevação (Swell)		3 s - 1 min	1,1 - 1,2 pu
3 Variações de Longa Duração			
3.1 Interrupções sustentadas		> 1 min	0 pu
3.2 Subtensão		> 1 min	0,8 a 0,9 pu
3.3 Sobretensão		> 1 min	1,1 a 1,2 pu
4 Distorções na Forma de Onda			
4.1 Nível DC		Reg. Permanente	0 - 0,001 pu
4.2 Harmônicas	0 - 1000	Reg. Permanente	0 - 0,2 pu
4.3 interharmônicas	0 – 6 kHz	Reg. Permanente	0 - 0,02 pu
4.4 Ruído	Faixa ampla	Reg. Permanente	0 - 0,01 pu
4.5 Cortes		Reg. Permanente	-
5 Desequilíbrio de Tensão		Reg. Permanente	0,005 – 0,02 pu
6 Variações na Frequência		< 10 s	

### 2.3.1 Transitórios

Transitório é um fenômeno ou uma quantidade que varia entre dois estados estacionários consecutivos durante um intervalo de tempo que é curto em

comparação com a escala de tempo de interesse. Um transitório pode ser um impulso unidirecional de ambas as polaridades ou uma onda amortecida oscilatória com o primeiro pico ocorrendo em ambas às polaridades [11]. Transitórios referem-se a variações na forma de onda de tensão, o que resulta numa condição de sobretensão para uma fração de um ciclo da frequência fundamental e são classificados como impulsivo ou oscilatório.

### 2.3.1.1 Transitórios impulsivos

Um transitório impulsivo (Figura 2.1) é uma mudança súbita na tensão ou corrente em relação às condições de operação de regime permanente com uma única polaridade, positiva ou negativa, e frequência bastante diferente daquela da rede elétrica. Estes fenómenos podem também ser descritos pelo seu conteúdo espectral. Por exemplo,  $1,2\mu\text{s} \times 50\mu\text{s} \ 2000\text{V}$  é um transitório impulsivo com valor de pico de  $2000\text{V}$  que sobe para esse valor em  $1,2\mu\text{s}$  e depois decai para metade do valor de pico em  $50\mu\text{s}$  [3]. As causas mais comuns de transitório impulsivo são por descargas atmosféricas.

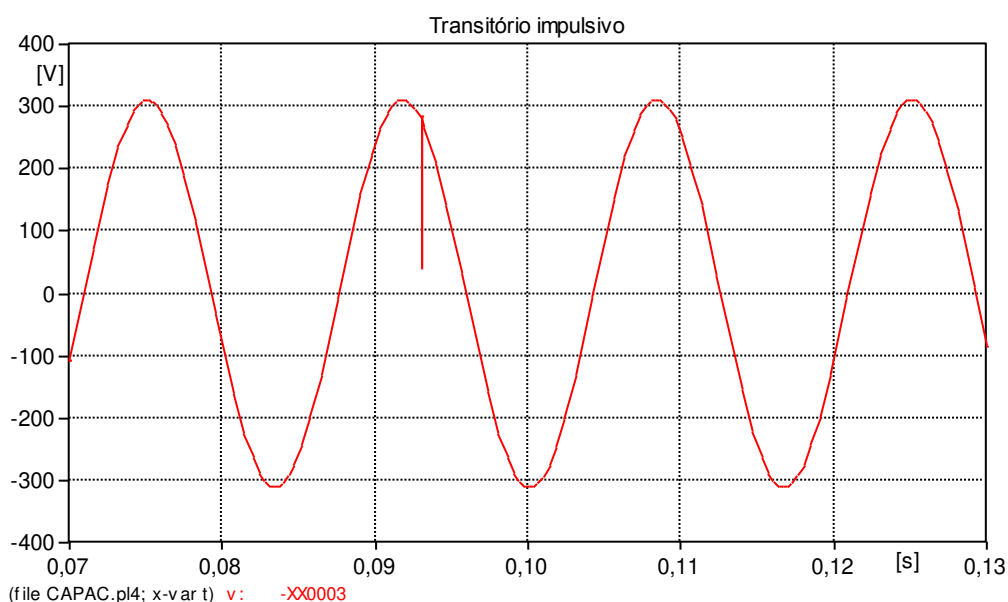


Figura 2.1 - Transitório impulsivo simulado no ATPDraw.

### 2.3.1.2 Transitórios oscilatórios

São mudanças súbitas na tensão ou corrente em relação às condições de operação de regime permanente com mudanças de polaridade, positiva e negativa (Figura 2.2). É descrito pelo seu conteúdo espectral (frequência predominante), duração e magnitude, podendo acontecer devido a operações de chaveamento, respostas a impulsos, energização de bancos de capacitores, ferroressonância, energização de transformadores, etc.

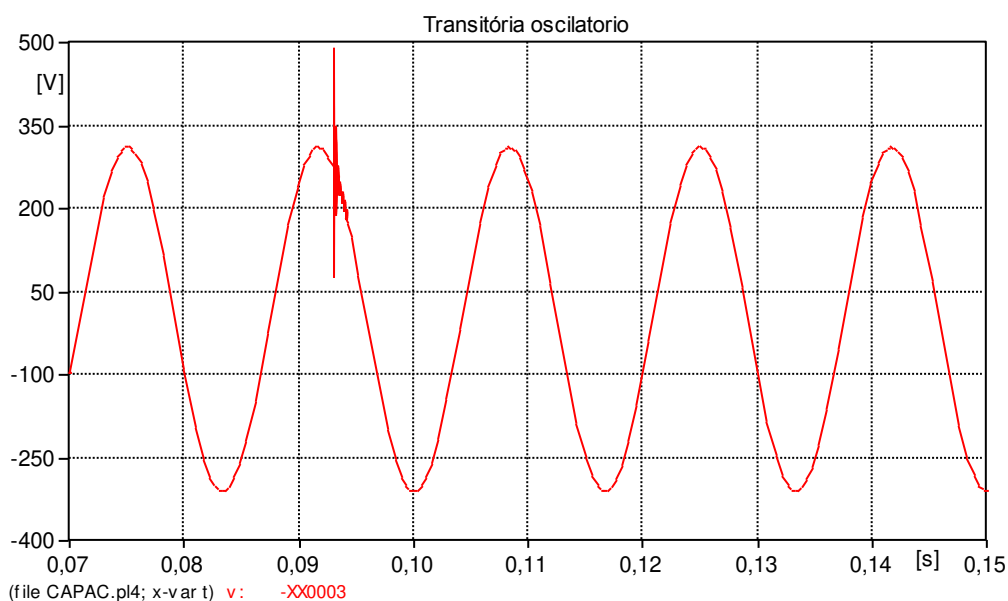


Figura 2.2 - Transitório oscilatório simulado no ATPDraw.

### 2.3.2 Variações de Tensão de Curta Duração

Variações de tensão de curta duração são divididas em períodos de tempo em instantâneas, momentâneas ou temporárias, enquanto a magnitude da tensão de distúrbio se caracteriza como um afundamento, uma elevação ou uma interrupção no fornecimento de energia.

#### 2.3.2.1 Interrupção

Uma interrupção ocorre quando a fonte de tensão ou de corrente diminui para menos de 0,1pu por um período de tempo não superior a 1min. As interrupções podem resultar em faltas no sistema de energia, falhas de equipamento e mau funcionamento de sistemas de controle. As interrupções são medidas pela sua



duração, pois a magnitude da tensão é sempre inferior a 10% do valor nominal. A duração de uma interrupção devido a uma falta no sistema da concessionária é determinada pelo tempo de operação dos dispositivos de proteção empregados. Já a duração de uma interrupção devido a mau funcionamento do equipamento ou conexões soltas pode ser variável.

Algumas interrupções podem ser precedidas por afundamentos de tensão quando as interrupções são devidas às faltas no sistema alimentador. O afundamento de tensão ocorre entre o momento de início de uma falta e a operação do dispositivo de proteção. No alimentador com defeito, as cargas irão experimentar uma queda de tensão seguida imediatamente por uma interrupção. A duração da interrupção irá depender da capacidade de religamento do dispositivo de proteção. Religamento instantâneo, geralmente, limita a interrupção causada por uma falta não permanente para menos de 30 ciclos. Religamento demorado do dispositivo de proteção pode causar uma interrupção momentânea ou temporária [11].

Observa-se que a Figura 2.3 apresenta uma interrupção momentânea, durante a qual a tensão cai para próximo de zero aproximadamente no instante 0.10s.

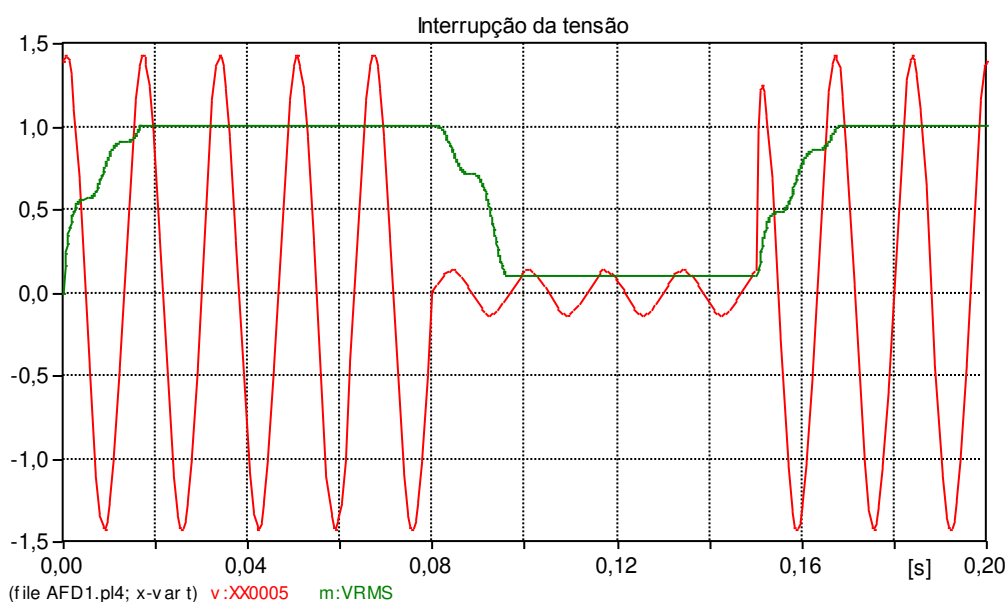


Figura 2.3 - Interrupção momentânea simulada no ATPDraw.

### 2.3.2.2 Afundamento de tensão

Afundamentos de tensão são normalmente associados com faltas no sistema elétrico, mas também podem ser causados por comutação de grandes cargas (interligar dois ou mais pontos entre si). Um afundamento de tensão é uma diminuição na tensão RMS entre 0,1 e 0,9 pu na frequência de alimentação para uma duração entre 0,5 ciclos a 1 minuto.

A Figura 2.4 mostra um típico afundamento da tensão que pode ser associado com uma falta monofásica simples. Além disso, uma falta em um circuito alimentador paralelo vai resultar em um afundamento de tensão na barra da subestação, que afeta todos os outros alimentadores até que a falta seja removida.

As durações de afundamentos são subdivididas em três categorias, como instantânea, momentânea e temporária, coincidindo com as categorias de elevação. Já na variação de tensão por interrupção, apenas as duas últimas categorias prevalecem. Essas durações são destinadas para correlacionar com os típicos tempos de funcionamento do dispositivo de proteção, bem como divisões da duração recomendadas por organizações internacionais [11].

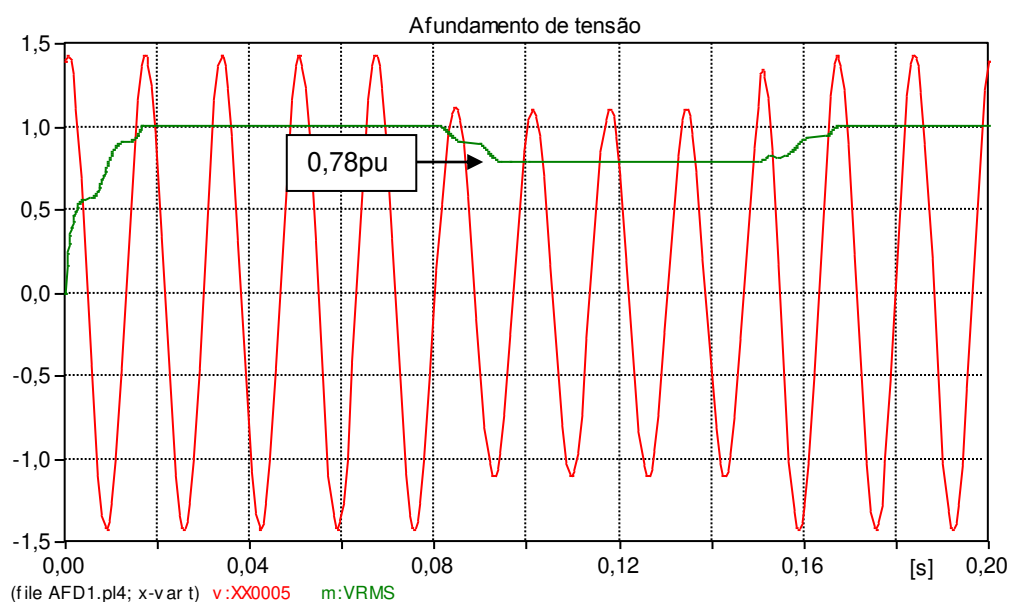


Figura 2.4 - Afundamento de tensão simulado no ATPDraw.

### 2.3.2.3 Elevação de tensão

Uma elevação de tensão (Figura 2.5) é um aumento entre 1,1 e 1,8pu por um período de tempo entre 0,5 ciclos a 1 minuto [17]. Tal como acontece com os afundamentos, a elevação é normalmente associada aos seguintes casos:

- Falta no sistema elétrico podendo ocorrer devido a uma falta monofásica, resultando num aumento temporário da tensão nas fases remanescentes, como mostra a Figura 2.5;
- Saída de grandes cargas ou entrada de bancos de capacitores de grande porte.

Em algumas publicações, o termo sobretensão momentânea é usado como sinônimo de elevação. Uma definição formal de elevação de tensão no padrão IEEE C62.41-1991 é "um aumento momentâneo na tensão de frequência entregue pela rede, fora das tolerâncias normais, com uma duração de mais de um ciclo e menos de alguns segundos" [18].

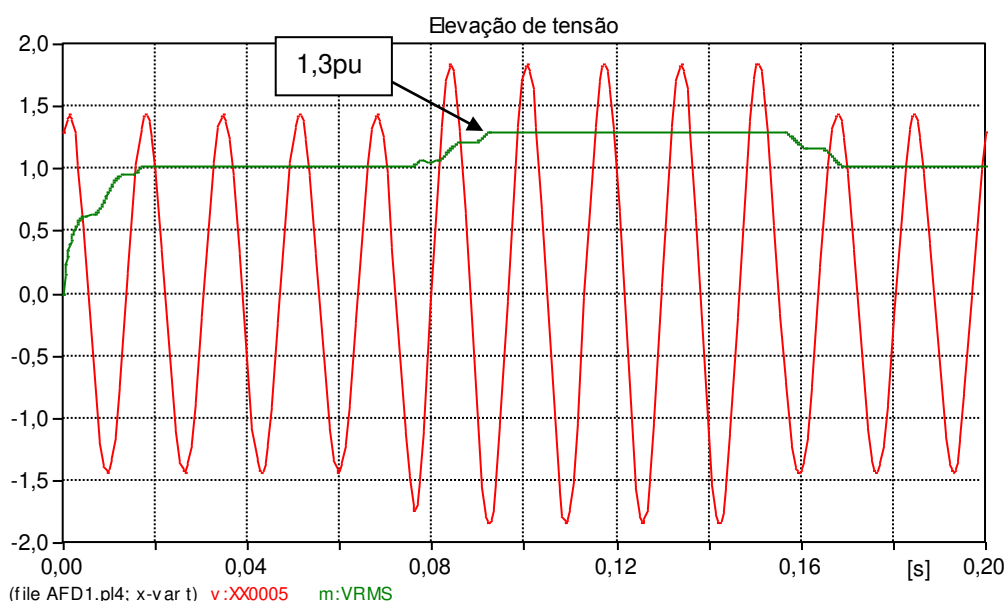


Figura 2.5 - Elevação de tensão simulado no ATPDraw.

### 2.3.3 Variação de Tensão de Longa Duração

Variação de tensão de longa duração é considerada como distúrbio de regime permanente, pois o tempo de duração é superior a 1 minuto. Pode ser classificada como uma interrupção sustentada, subtensão e sobretensão, com

redução da tensão de alimentação a zero, 0,8 a 0,9pu e 1,1 a 1,2pu respectivamente [3].

#### 2.3.3.1 Interrupção sustentada

Uma interrupção sustentada é uma redução da tensão de alimentação a zero por tempo superior a 1 minuto [3]. Interrupções de tensão com mais de 1 min são muitas vezes de natureza permanente e requerem intervenção para restabelecimento do sistema.

#### 2.3.3.2 Sobretensão

Uma sobretensão é caracterizada pelo aumento do valor eficaz da tensão para 1,1 a 1,2p.u durante um tempo superior a 1 minuto [3], podendo ser o resultado de chameamento de carga (saída de grandes blocos de carga), variações na compensação reativa no sistema (entrada de banco de capacitores), assim como configurações incorretas em taps de transformadores.

#### 2.3.3.3 Subtensão

Uma subtensão é definida como uma redução no valor eficaz da tensão para 0,8 a 0,9p.u por um período superior a 1 minuto [3]. A entrada de grande blocos de cargas e a saída de bancos de capacitores podem causar subtensão até o momento em que os reguladores de tensão da rede estabilizem o sistema dentro das tolerâncias que o sistema foi projetado.

#### 2.3.4 **Distorção da Forma de Onda**

A distorção da forma de onda é o desvio, em regime permanente, de uma onda senoidal ideal na frequência fundamental da corrente ou tensão. Alguns dos principais tipos de distorção da forma de onda serão descritos a seguir [3].

### 2.3.4.1 Distorção harmônica

Distorção harmônica (Figura 2.6) é a distorção na forma de onda da corrente ou tensão, onde elas são decompostas em uma série de senóides, onde cada uma apresenta uma frequência que é um múltiplo inteiro (a harmônica) da fundamental. A fundamental neste caso é a frequência de alimentação (60Hz no Brasil). Distorção harmônica é causada por cargas não lineares no sistema elétrico.

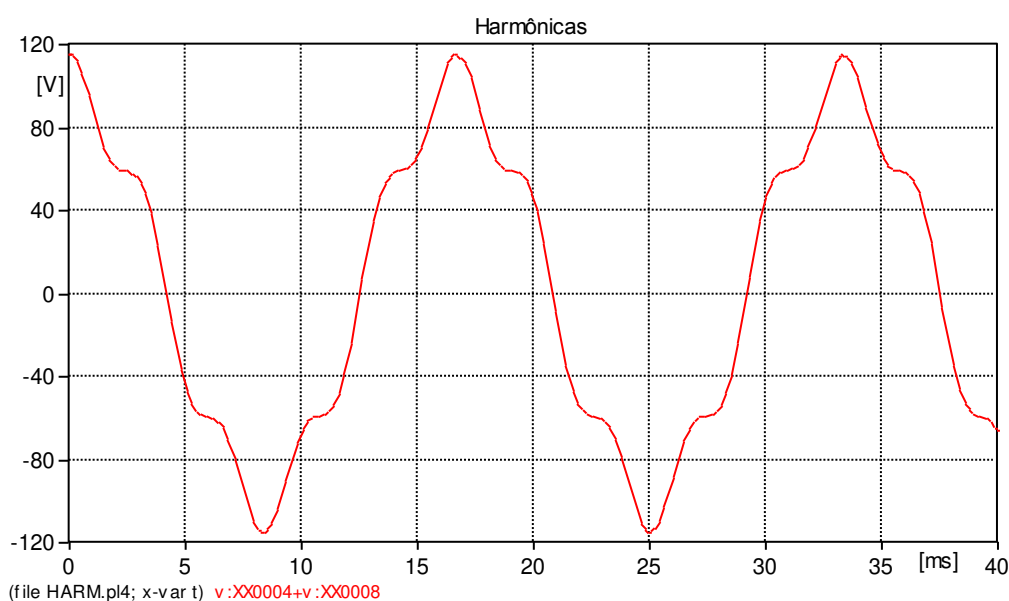


Figura 2.6 - Formas de ondas com harmônicas.

### 2.3.4.2 Nível CC

A presença de um nível de tensão ou corrente CC em sistemas de energia senoidais (CA) pode ocorrer devido à presença do efeito da retificação encontrada em cargas não lineares.

### 2.3.4.3 Interharmônicas

As interharmônicas (Figura 2.7) são quaisquer frequências, em tensão ou corrente, múltipla não inteira da frequência fundamental do sistema de alimentação. Análoga a ordem "n" de uma harmônica, a ordem "m" de uma interharmônica é determinada pela relação entre a sua frequência e a fundamental.

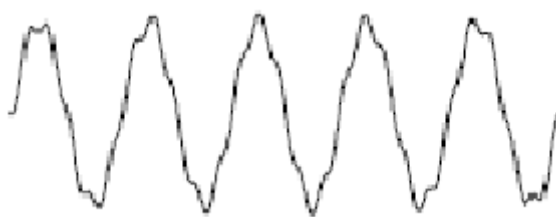


Figura 2.7 - Distorção devido a interharmônicas.

As principais fontes de distorções interharmônicas na forma de onda são os conversores estáticos de frequência, os ciclos conversores, os motores de indução e os equipamentos que produzem arcos voltaicos [3].

#### 2.3.4.4 Ruído

O ruído (Figura 2.8) é um sinal elétrico indesejado com um conteúdo espectral abaixo de 200kHz superposto à tensão ou corrente da rede elétrica, nos condutores das fases ou nos condutores do neutro, podendo ser causado por dispositivos eletrônicos de potência, circuitos de controle, equipamentos com arco elétrico, cargas não lineares e fontes chaveadas [3].

Essencialmente o ruído consiste de distorções do sinal da rede elétrica que não podem ser classificados como distorções harmônicas ou transitórias. Outro dado importante é que o ruído é agravado em sistemas de energia com aterramentos deficientes [3].



Figura 2.8 - Distorção devido a ruído.

#### 2.3.4.5 Cortes (Notching)

Cortes são distúrbios periódicos da tensão causados pelo funcionamento normal de conversores estáticos trifásicos, quando a corrente é comutada a partir de uma fase para outra. Durante este período, ocorre um curto-circuito momentâneo entre duas fases, provocando a redução súbita da tensão cuja intensidade depende das impedâncias do sistema. Geralmente os cortes apresentam componentes de frequência elevada, dificultando sua leitura por meio de equipamentos de medição atualmente usados para análise harmônica. A Figura 2.9 mostra um exemplo de cortes (Notching) [3].

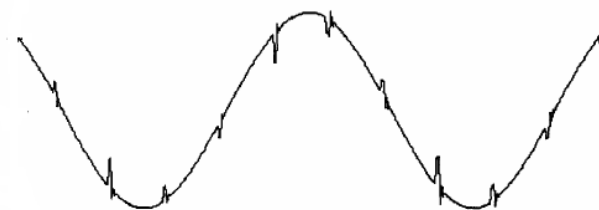


Figura 2.9 - Distorção devido a Cortes (Notching).

#### 2.3.5 Desequilíbrio de Tensão

O desequilíbrio de tensão (Figura 2.10) é definido como a variação desigual no perfil da tensão e pode ser estimado como o máximo desvio da média das tensões das três fases, dividido pela média das tensões, expresso em porcentagem [11]. A principal fonte de desequilíbrio de tensão é a conexão de cargas monofásicas em circuitos trifásicos; anomalias em banco de capacitores, como queima de fusíveis em uma das fases em bancos trifásicos.

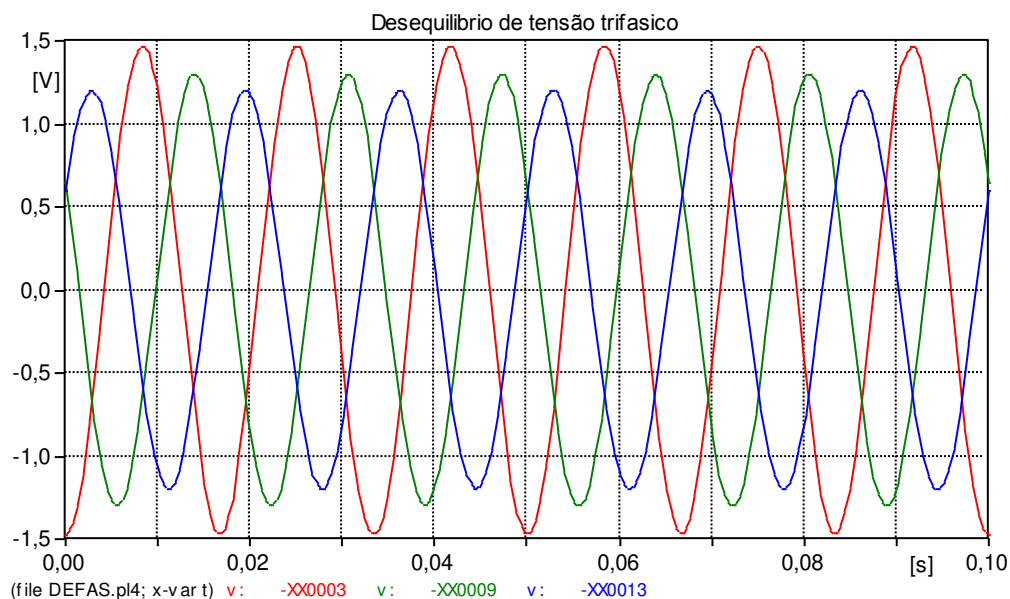


Figura 2.10 - Desequilíbrio de tensão trifásica simulado no ATPDraw.

### 2.3.6 Variação de Frequência

A frequência do sistema de alimentação está diretamente relacionada com a velocidade de rotação dos geradores no sistema. Em qualquer instante, a frequência depende do equilíbrio entre a carga e a capacidade da geração disponível. Quando muda esse equilíbrio dinâmico, pequenas mudanças na frequência podem ocorrer. O tamanho do desvio de frequência e a sua duração dependem das características da carga e da resposta dos dispositivos de controle de frequência.

Variações de frequência, que vão fora dos limites das condições de regime permanente, são normalmente causadas por falhas no sistema de transmissão, desconexão de grandes blocos de carga e saída de grandes parques de geração. No entanto, em condição de operação normal, variações severas de frequência são raras em sistemas de potência modernos e interconectados [3].

## 2.4 Monitoramento da Qualidade de Energia

O monitoramento da qualidade da energia é necessário para identificação dos distúrbios de qualidade de energia em um determinado local do sistema de energia elétrica. A necessidade de monitoração aumenta devido à dificuldade de diagnosticar as incompatibilidades entre a fonte de alimentação e a carga. Além



disso, a necessidade de estudar os níveis de distorção em locais específicos é muito importante para aperfeiçoar técnicas de modelagem.

A monitoração pode ser utilizada para prever o desempenho futuro de cargas ou de técnicas de mitigação da qualidade da energia [11]. No entanto, a razão mais importante para monitorar a qualidade da energia é para evitar os danos econômicos produzidos por distúrbios no sistema elétrico, principalmente em cargas críticas. A frequência de distúrbios na qualidade de energia e sua duração podem afetar os custos da qualidade de energia.

Dessa forma, pode-se dizer que monitoramento da qualidade da energia é o processo de coleta, análise e interpretação de dados brutos em informações úteis. Esse processo efetua-se normalmente através de medição contínua da tensão e da corrente durante um período prolongado. O processo de análise e interpretação tem sido tradicionalmente realizado manualmente, mas os recentes avanços no processamento de sinais e inteligência artificial tornaram possível projetar e implementar sistemas inteligentes, analisar automaticamente e interpretar os dados brutos com mínima intervenção humana [3].

#### **2.4.1 Processo de Detecção**

O processo de detecção é o primeiro passo no tratamento de problemas de qualidade de energia. É um processo em tempo real que determina o ponto de início e fim da perturbação. Assim, qualquer variação de tensão ou frequência que excede os limites predeterminados deve ser identificada. Os mesmos critérios utilizados para classificar os distúrbios na qualidade de energia, componentes de frequência e magnitudes de tensão e corrente são usados para detectar distúrbios. As técnicas usadas no processo de detecção são dependentes do tempo que, por sua vez, requerem dados de exemplos que podem ser comparados com um valor limite. A taxa de amostragem pode afetar a precisão da detecção.

O método mais simples de detecção consiste em identificar qualquer desvio na magnitude da tensão RMS e também da forma de onda nominal. O início da perturbação e os pontos finais são então detectados através da comparação da alteração da grandeza com um valor limite predeterminado. Esse método tem sido utilizado para a detecção de quedas de tensão, oscilações, e interrupções.

### 2.4.2 Escolha de um Local de Monitoramento

O local adequado para a monitoração deve ser o mais próximo possível do equipamento sensível a ser afetado por variações de qualidade de energia. É importante que o monitor esteja sujeito as mesmas variações que o equipamento sensível está. Transitórios de alta-frequência, em particular, podem ser significativamente diferentes, se houver separação significativa entre o monitor e o equipamento afetado [3].

### 2.4.3 Monitor de energia

O monitor de energia forma uma categoria de instrumento que é desenvolvida especificamente para medir, analisar, registrar a qualidade de energia, os harmônicos e os dados de energia ao mesmo tempo e de forma contínua.

As informações são transferidas para um computador portátil que dotado de um software específico executa análise dos dados e gera gráficos de eventos com informações específicas, tais como magnitudes de sobretensão e subtensão, magnitudes e duração de afundamentos e elevações, magnitude e duração de transitórios, curvas CBEMA e ITIC, etc.

### **3 AFUNDAMENTOS DE TENSÃO**

#### **3.1 Introdução**

Há muito tempo que as concessionárias de energia tiveram de aprender a lidar com o crescente número de queixas relativas à qualidade de energia, ou seja, a qualidade do seu produto. Dentre as ocorrências que se destacam, o afundamento de tensão é o que mais ocorre em um sistema de distribuição [3]. A questão crucial é que os afundamentos de tensão afetam cargas sensíveis, como computadores, contadores, controladores lógicos programáveis e outros.

Por ser o fenômeno de interesse neste trabalho, são definidos neste capítulo os conceitos de afundamento de tensão, seus parâmetros, causas e efeitos, bem como são descritas as normas e recomendações nacionais e internacionais, como ANEEL, ONS, IEEE, IEC, SEMI e CBEMA para o problema.

#### **3.2 Definições de Afundamentos de Tensão**

Pode-se definir afundamento de tensão como uma redução de curta duração da tensão RMS, seguido da variação. O afundamento de tensão é especificado em termos de duração e da magnitude da tensão, sendo essa última geralmente expressa como a porcentagem da tensão nominal. Uma queda de tensão significa que a energia necessária à carga não está sendo fornecida adequadamente, podendo ter consequências graves, dependendo do tipo de carga. Os afundamentos de tensão com duração superior a 1 minuto são denominados de subtensão [3;19].

De acordo com alguns institutos o conceito de afundamento é:

A norma IEEE Std 1159-2009 [11] define afundamento de tensão como “um decréscimo entre 0,1 e 0,9 pu do valor eficaz da tensão nominal, com duração entre 0,5 ciclo e 1 minuto”. Segundo esta norma um afundamento de tensão com intensidade menor do que 0,1 pu é considerado interrupção.

A norma IEC Std. 6100-4-30, 2003 [19] define afundamento de tensão, nesta norma denominado de “dip” ou “voltage dip”, como: “uma redução súbita do valor eficaz da tensão entre 0,01 e 0,9 pu de um ponto do

sistema elétrico, seguido de seu restabelecimento após um curto período de tempo, de 0,5 ciclo a uns 60 segundos”.

No Brasil, nos Procedimentos de Rede elaborados pelo ONS, 2009 [20], no item “Padrões de Desempenho da Rede Básica”, Submódulo 2.8, dentre os indicadores de avaliação da qualidade da energia elétrica, definem-se as “Variações de Tensão de Curta Duração” (VTCD), englobando os fenômenos de Interrupção, Afundamento e Elevação de Tensão. De acordo com esses procedimentos, entende-se por variação de tensão de curta duração: “um desvio significativo da amplitude da tensão por um curto intervalo de tempo”.

Segundo a ANEEL, Afundamento Momentâneo de Tensão: “evento em que o valor eficaz da tensão do sistema se reduz, momentaneamente, para valores abaixo de 90% da tensão nominal de operação, durante intervalo inferior a 3 segundos” [21].

Os principais parâmetros do afundamento de tensão são a magnitude, simbolizado por % ou p.u do valor nominal da tensão, e a duração, simbolizado por ciclos, ms ou s [22]. Segundo Bollen [22] existem outros parâmetros para caracterizar estes distúrbios que serão analisados no item 3.4.

### **3.3 Parâmetros dos Afundamentos de Tensão**

Um afundamento de tensão monofásico tem como principais parâmetros, que caracterizam esse fenômeno, a sua magnitude e a duração, esses, somados à frequência de ocorrência, geram informações adequadas sobre o mesmo [23]. Entretanto, analisando os afundamentos de tensão trifásicos, outros parâmetros são incluídos. A seguir são apresentados os parâmetros que caracterizam um afundamento de tensão.

#### **3.3.1 Magnitude**

A Magnitude ( $V_{Mag}$ ) de um afundamento da tensão é definida segundo a norma americana e a recomendação brasileira, como sendo: “Nível extremo do valor eficaz da tensão, residual ou remanescente ( $V_{res}$ ) em relação à tensão nominal ( $V_n$ )

no ponto de observação, expresso em porcentagem (%) ou valor por unidade (pu)” [20;21], conforme expresso (3.1).

$$V_{Mag} = \frac{V_{res}}{V_n} \text{ (pu)} \text{ ou } V_{Mag} = \frac{V_{res}}{V_n} \cdot 100 \text{ (\%)} \quad (3.1)$$

### 3.3.2 Duração

A Duração ( $\Delta t$ ) de um afundamento de tensão é definida como: “O intervalo de tempo decorrido entre o instante ( $t_i$ ) em que o valor eficaz da tensão ultrapassa determinado limite de referência ( $V_{ref}$ ) e o instante ( $t_f$ ) em que a mesma variável volta a cruzar esse limite, expresso em segundos ou ciclos da fundamental” [20;21].

O IEEE 1159 classifica em três tipos os afundamentos de tensão como é mostrado na Tabela 3.1 com suas faixas de duração e magnitude.

Tabela 3.1 - Classificação dos tipos de afundamentos segundo IEEE 1159

Denominação	Duração	Magnitude
Afundamento Instantâneo	0,5 – 30 ciclos	0,1 – 0,9 pu
Afundamento Momentâneo	30 ciclos – 3 segundos	0,1 – 0,9 pu
Afundamento Temporário	3 segundos – 1 minuto	0,1 – 0,9 pu

Com a finalidade de ilustrar os parâmetros supracitados (magnitude e duração), a Figura 3.1 reproduz o resultado de uma simulação no programa ATPDraw, cujo objetivo é mostrar a evolução do valor RMS da tensão para um afundamento causado por um aumento na impedância da linha de transmissão. Nessa simulação, o seu impacto sobre a carga mostra que a magnitude do afundamento é de aproximadamente 80% da tensão nominal (0,26 pu), e com uma duração  $\Delta t$  de 12 ciclos, conforme dado da Tabela 3.1, que classifica o evento como afundamento instantâneo.

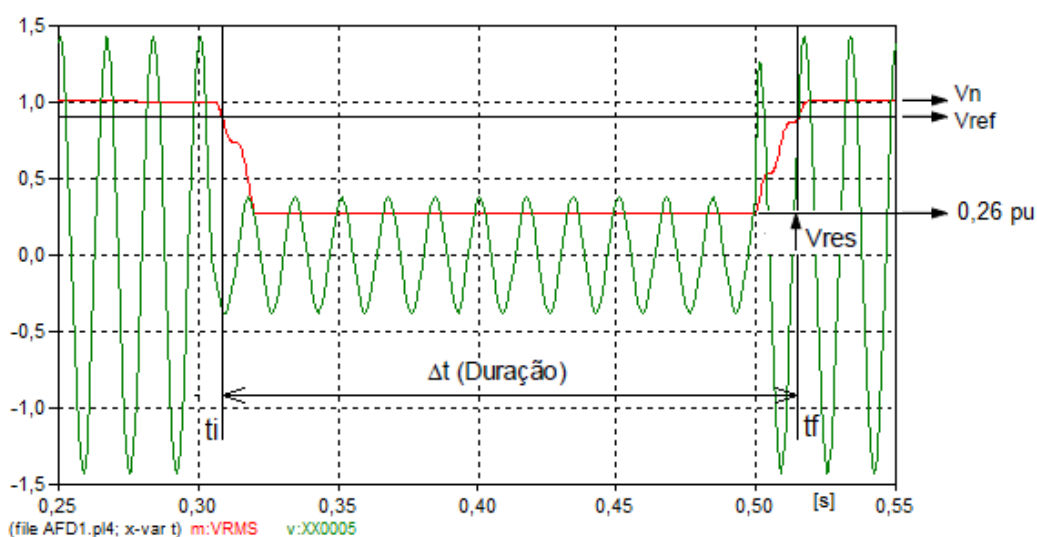


Figura 3.1 - Exemplo de afundamento de tensão com  $V_{Mag} = 0,26$  pu e  $\Delta t = 12$  ciclos.

### 3.3.3 Frequência de Ocorrência

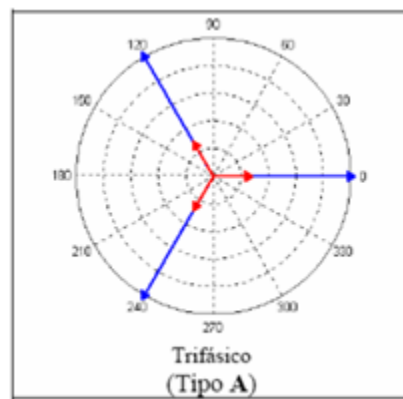
A frequência de ocorrência de afundamento é a quantidade de vezes que cada combinação dos parâmetros, magnitude e duração, ocorre em determinado período de tempo, ao longo de uma monitoração [24]. Conecta-se um medidor à barra de interesse por um determinado período, a fim de obter o desempenho quanto ao número de ocorrências. Em se tratando de eventos que não ocorram com tanta frequência, é necessário um período mais longo de monitoramento para obter resultados mais confiáveis. Quanto ao número de ocorrências de afundamento de tensão, este está relacionado com o sistema de religamento do sistema de proteção e com a origem dos curtos-circuitos no sistema elétrico.

Existem, ainda, duas metodologias para contabilizar os afundamentos de tensão devido aos religamentos. A primeira considera todos os afundamentos de tensão registrados, resultando em um número sobrestimado de eventos. A segunda é a agregação temporal que consta de um processo de representar múltiplas medições associadas a um único evento do sistema monitorado como uma única medição [22].

### 3.3.4 Diagrama Fasorial

Diagrama fasorial consiste na teoria das componentes simétricas e leva em consideração as faltas trifásicas, bifásicas e monofásicas e todos os tipos de conexões dos transformadores e das cargas (delta e estrela). De acordo com a classificação das componentes simétricas [22], são quatro os principais tipos de afundamento de tensão, conforme pode ser observado nas Figuras 3.2 - 3.5.

Os afundamentos Tipo A ocorrem devido a faltas trifásicas, independentemente da conexão do transformador e ligações da carga. Já os afundamentos do tipo B são devidos à falta fase-terra e a carga conectada em estrela, sendo caracterizados por uma queda de tensão em uma das fases. As fases não afetadas pela falta (fases sãs) não são modificadas. Os afundamentos de tensão do tipo C e D são produzidos a partir de qualquer tipo de falta (fase-terra, fase-fase e fase-fase-terra). Um afundamento tipo C pode se transformar em um afundamento tipo D quando se propaga através de um transformador com conexão  $\Delta - Y$ .

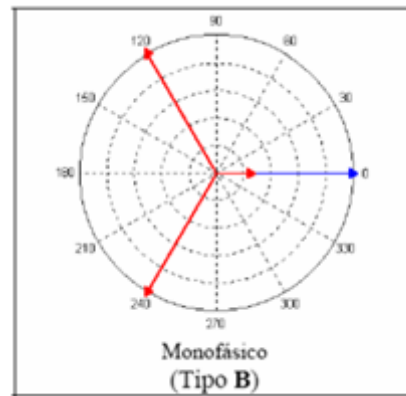


$$V_a = hV$$

$$V_b = -\frac{1}{2}hV - j\frac{\sqrt{3}}{2}hV$$

$$V_c = -\frac{1}{2}hV + j\frac{\sqrt{3}}{2}hV$$

Figura 3.2 - Diagrama fasorial do tipo A.

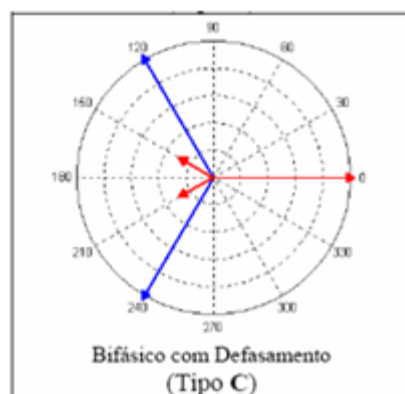


$$V_a = hV$$

$$V_b = -\frac{1}{2}V - j\frac{\sqrt{3}}{2}V$$

$$V_c = -\frac{1}{2}V + j\frac{\sqrt{3}}{2}V$$

Figura 3.3 - Diagrama fasorial do tipo B.

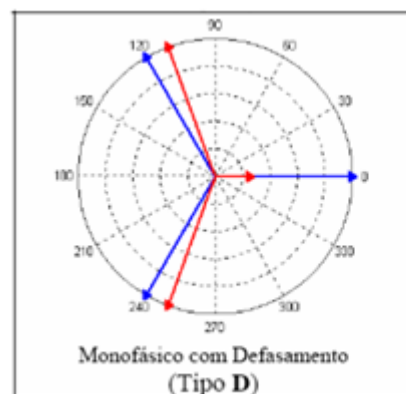


$$V_a = V$$

$$V_b = -\frac{1}{2}V - j\frac{\sqrt{3}}{2}hV$$

$$V_c = -\frac{1}{2}V + j\frac{\sqrt{3}}{2}hV$$

Figura 3.4 - Diagrama fasorial do tipo C.



$$V_a = hV$$

$$V_b = -\frac{1}{2}hV - j\frac{\sqrt{3}}{2}V$$

$$V_c = -\frac{1}{2}hV + j\frac{\sqrt{3}}{2}V$$

Figura 3.5 - Diagrama fasorial do tipo D.

A severidade na magnitude e na abertura angular resultante do afundamento de tensão ( $V_a, V_b, V_c$  em vermelho) é determinada por  $h$  ( $0 \leq h \leq 1$ ), e  $V$  (vetor em azul) é a amplitude da tensão do sistema.

### 3.4 Principais Causas de Afundamentos de Tensão

As causas mais comuns dos afundamentos são faltas em redes de energia (sistemas de transmissão e distribuição) ou em instalações dos usuários



que, em muitos casos, é consequência de descargas atmosféricas e curtos-circuitos. A existência dessas faltas e o desempenho do sistema de proteção, com religamento automático para reduzir a duração das interrupções de fornecimento de energia elétrica, levam à ocorrência de afundamentos de tensão e pequenas interrupções [25].

A ocorrência de afundamentos de tensão e interrupções de curta duração não podem ser previstos, devido à natureza aleatória das faltas que causam tais perturbação. Sistemas de distribuição e transmissão não podem eliminar os afundamentos, mas podem ter seu nível de ocorrências e magnitudes reduzidas por meio de uma reformulação das filosofias de proteção e investimentos para melhorias nas redes, o uso de tecnologias mais imunes a descargas atmosféricas, aumentando a potência de curto-circuito e mais rapidez na proteção contra curtos-circuitos. Em qualquer caso, não é possível a sua eliminação total, nem reduzido a partir de certo limite [25].

#### **3.4.1 Faltas nos Sistemas de Distribuição e Transmissão**

Quedas de tensão resultantes de faltas podem ser severas, causando problemas para os consumidores à medida que se propagam no sistema. A magnitude do afundamento em um determinado ponto no sistema depende, principalmente, do tipo da falta, da distância para a falta, da configuração do sistema e da resistência de falta. A sua duração depende do tipo de proteção utilizado e varia entre meio ciclo (para um fusível) a alguns segundos. Faltas podem ser simétricas (faltas trifásica, ou trifásica-terra) ou assimétricas (faltas monofásica, ou bifásica, ou bifásica-terra). A Figura 3.6 mostra as formas de onda de tensão durante um afundamento de tensão. A duração do afundamento é de aproximadamente 5 ciclos, tempo típico para um disjuntor abrir após receber um comando de disparo a partir de relês protetores do sistema. A recuperação da tensão é rápida e cria-se uma forma quase retangular para a magnitude fundamental da tensão. A magnitude da queda de tensão é diferente para cada uma das fases (falta assimétricas).

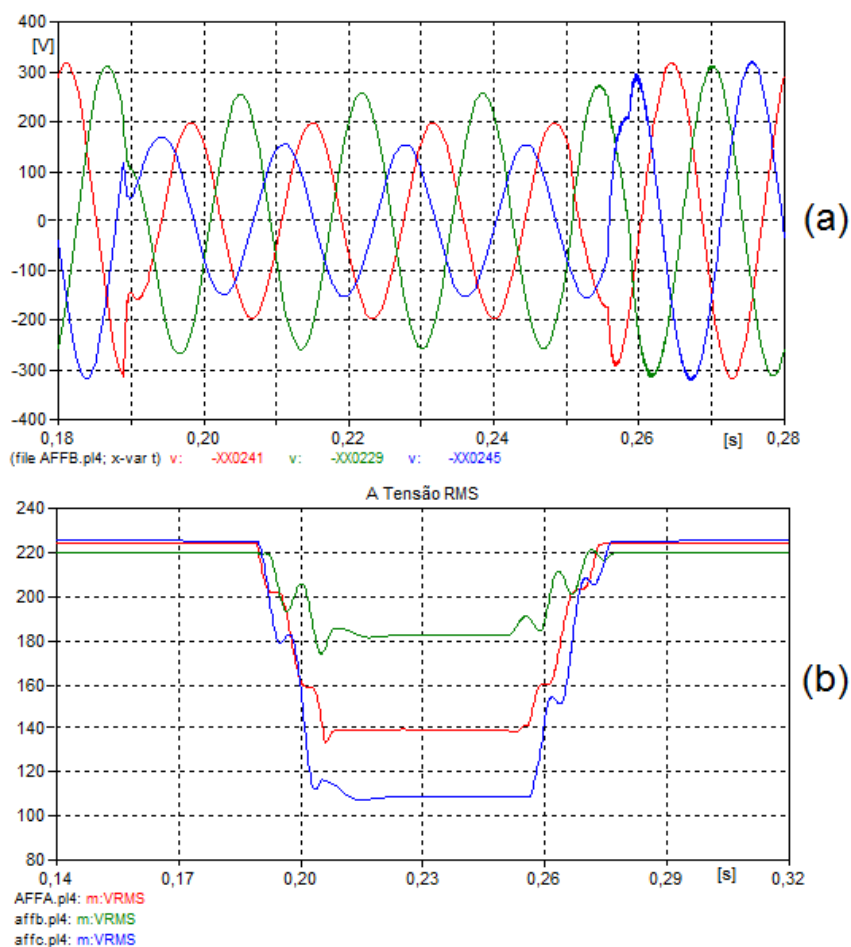


Figura 3.6 - (a) Formas da onda durante afundamento de tensão durante uma falta (b) A tensão RMS.

O valor da tensão do afundamento  $V$  que aparece nas equações das Figuras 3.2 - 3.5 depende do local da falta. Para ilustrar diferente situação considere, por exemplo, o modelo equivalente de um sistema elétrico mostrado pela Figura 3.7.

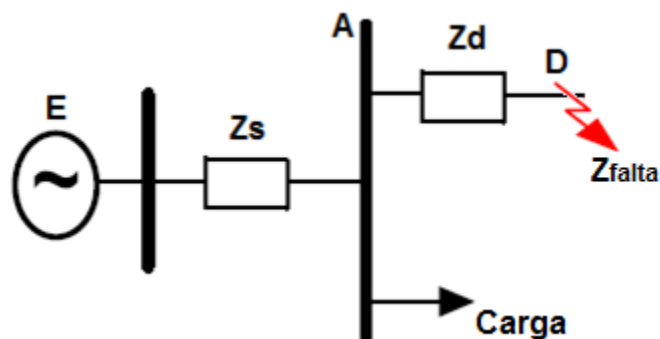


Figura 3.7 - Diagrama unifilar do sistema teste.

A tensão de afundamento no ponto de acoplamento comum  $A$ , para o modelo equivalente da Figura 3.7, considerando o valor de  $E$ , como pré-falta 1 pu e considerando o tipo de falta, é dada por [8]:

$$V_A = \frac{Z_d + Z_{falta}}{Z_d + Z_s + Z_{falta}} \cdot E \quad (3.2)$$

Onde:

E - Tensão da fonte (p.u);

$V_A$  - Afundamento de tensão no ponto de acoplamento A (p.u);

$Z_s$  - Impedância equivalente da fonte no ponto de acoplamento A ( $\Omega$ );

$Z_d$  - Impedância da linha de A até o ponto D ( $\Omega$ );

$Z_{falta}$  - Impedância de falta ( $\Omega$ ).

Se a distância elétrica entre o local da falta e o ponto de medição A for muito longa, a impedância total da linha  $Z_d$  é elevada. Como resposta a uma falta no ponto destacado, a amplitude da tensão  $V_A$  é próxima a da fonte E.

O divisor de tensão da Figura 3.7 mostra que os afundamentos de tensão são atenuados à medida que se deslocam a montante na rede. Em contraste, as quedas de tensão se propagam a jusante, sem atenuação. De fato, assumindo no exemplo da Figura 3.7 que o curto-circuito ocorreu antes do ponto de medição A, a tensão no ponto de medição é zero e, portanto, o potencial do ponto jusante D também é zero.

Com o intuito de reproduzir o fenômeno descrito acima, foi modelado no ATPDraw um sistema teste monofásico (Figura 3.8) para ilustrar o afundamento de tensão gerado na barra A a partir da variação da impedância da linha  $Z_d$  em resposta a um curto-circuito no ponto D.

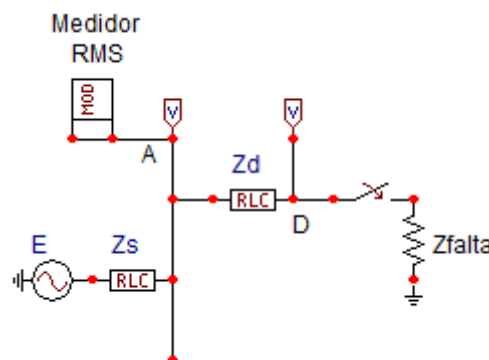


Figura 3.8 - Sistema teste para análise de afundamento considerando a distância entre a barra de acoplamento A e o ponto de falta D.

Caso 1: Impedância da linha  $Z_d \rightarrow (R = 0,1\Omega$  e  $L = 0,8$  mH)

Na Figura 3.9 pode-se observar que nos instantes anteriores à aplicação do curto-circuito, a amplitude da tensão no barramento  $V_A$  (em verde) é próxima à da fonte  $V_{fonte}$  (em vermelho). A partir do instante de aplicação da falta ( $t = 0,07s$ ), a

amplitude da tensão  $V_A$  medida no ponto A (em verde) diminui um pouco. Isso ocorre devido a grande distância elétrica entre o ponto A e D, gerando uma queda de tensão no barramento A de 0,08pu (valor em RMS – linha azul), representando um valor acima da classificação de afundamento pela norma IEEE 1159 (Tabela 3.1).

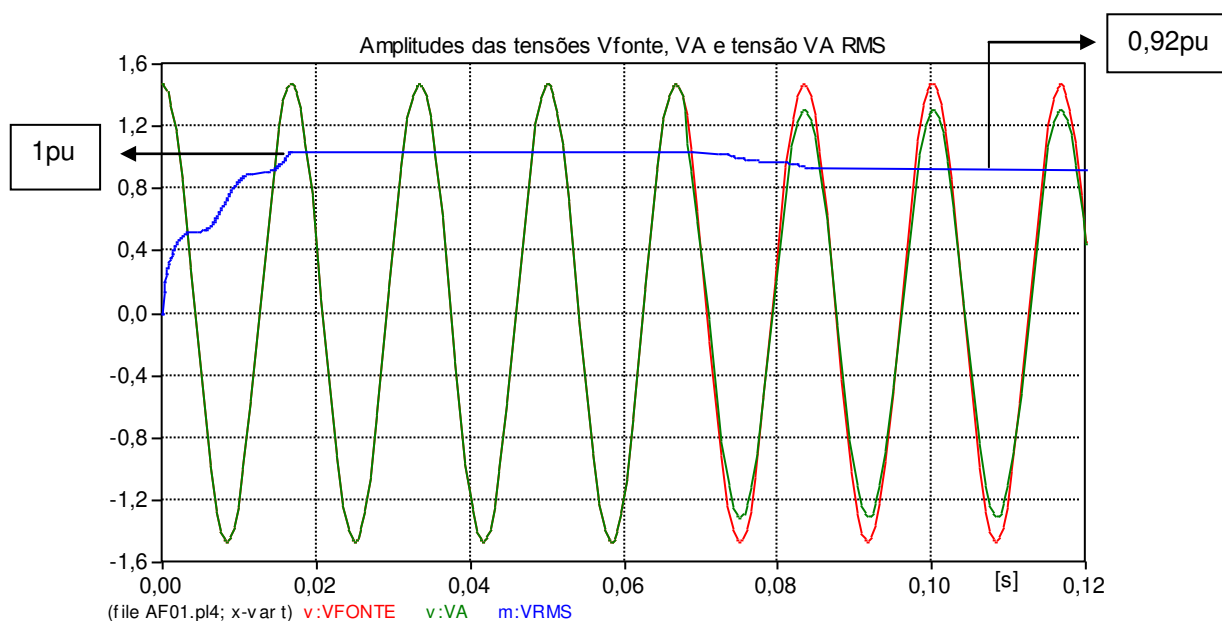


Figura 3.9 - Amplitude das tensões e  $V_A$  RMS.

Caso 2: Impedância da linha  $Z_d \rightarrow (R = 0,01\Omega$  e  $L = 0,03$  mH)

Se a distância elétrica entre o local da falta e o ponto de medição A for reduzida, a impedância da linha  $Z_d$  é caracterizada por um valor menor que do caso 1. A partir da Figura 3.10 nota-se que, no instante  $t$  próximo a 0,07s, momento da falta, a amplitude da tensão no barramento  $V_A$  (em verde) é menor que amplitude da fonte  $V_{\text{fonte}}$  (em vermelho), ou seja, devido a uma menor distância elétrica entre o ponto A e D a queda de tensão no barramento A é mais acentuada que a do caso anterior atingindo 0,80pu (valor em RMS - linha azul), classificado como um afundamento instantâneo pela norma IEEE 1159 (Tabela 3.1).

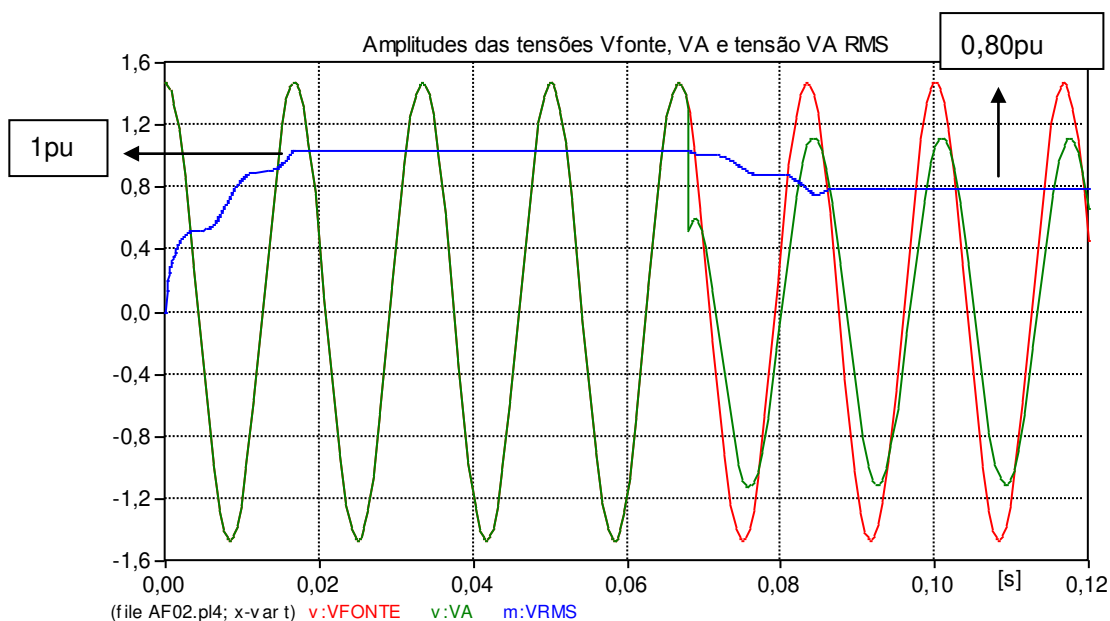


Figura 3.10 - Amplitude das tensões e  $V_A$  RMS.

#### 3.4.1.1 Deslocamento do ângulo de fase

Junto com a redução da magnitude da tensão, uma falta remota também conduz a uma variação do ângulo de fase da tensão. Essa variação do ângulo de fase é conhecida como salto de ângulo de fase [1] e é causada pela diferença angular entre as impedâncias envolvidas no cálculo do afundamento.

O deslocamento de fase é a variação no ângulo de fase, devido à alteração da relação  $X/R$  do circuito que vai da condição de carga normal para a condição de falta, aspecto característico do afundamento de tensão, como se pode observar na Figura 3.11 que, nesse caso, é uma ampliação da Figura 3.10, referente ao Caso 2 do sistema teste citado anteriormente. No instante da falta ( $t \approx 0,068s$ ), a tensão  $V_A$  (em verde), na barra A, sofre um deslocamento de ângulo de fase, geralmente classificado como deslocamento de fase negativo. Isto quer dizer que a tensão no ponto A ( $V_A$ ) durante a falta está atrasada em relação a tensão pré-falta ( $V_{\text{FONTE}}$ ).

Supondo o sistema radial (Figura 3.7) e utilizando o conceito de divisor de tensão para o cálculo da amplitude de afundamentos. O cálculo da tensão complexa de afundamento  $V_A$  é expresso em (3.2), quando a tensão na barra de interesse, antes do curto-circuito for igual a 1,0 pu. [22]. O deslocamento de ângulo de fase é a diferença entre o ângulo da tensão pré falta e o ângulo de fase durante a falta, expresso em (3.3).

$$\Delta V_{\phi} = \arctan\left(\frac{X_d}{R_d}\right) - \arctan\left(\frac{X_s + X_d}{R_s + R_d}\right) \quad (3.3)$$

Onde:

$Z_s = R_s + jX_s$  é a impedância entre a fonte e o ponto de interesse entre;

$Z_d = R_d + jX_d$  é a impedância entre o ponto de interesse e o local de falta.

Quando  $X_s/R_d = X_d/R_d$ , a expressão torna-se zero não ocorrendo deslocamento de ângulo de fase associado ao afundamento de tensão.

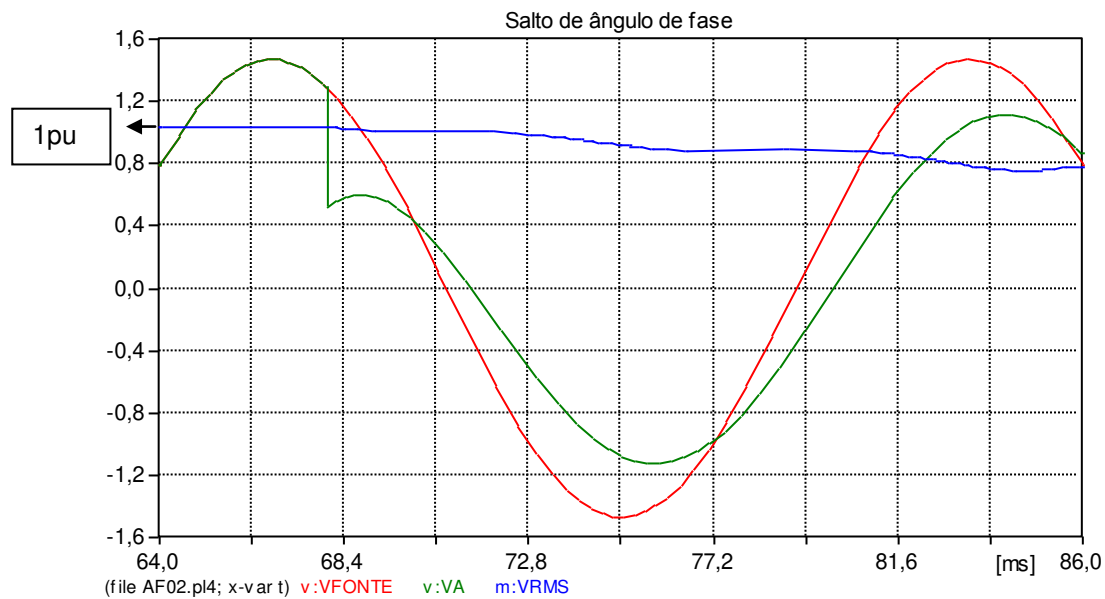


Figura 3.11 - Deslocamento de ângulo de fase  $\Delta V_{\phi} = -22^{\circ}$ .

### 3.4.2 Partida de Motor de Indução

Durante a partida, o motor solicita, aproximadamente, de seis a sete vezes a sua corrente nominal, e com um fator de potência muito baixo. Essa corrente de partida causa queda de tensão cuja magnitude depende das características do motor de indução e da resistência do sistema no ponto em que o motor está conectado. A Figura 3.12 mostra as formas de onda de tensão antes e durante a partida de um motor de indução. A magnitude da tensão em todas as fases cai cerca de 10% do valor nominal se recuperando gradualmente à medida que a corrente solicitada pelo motor diminui.

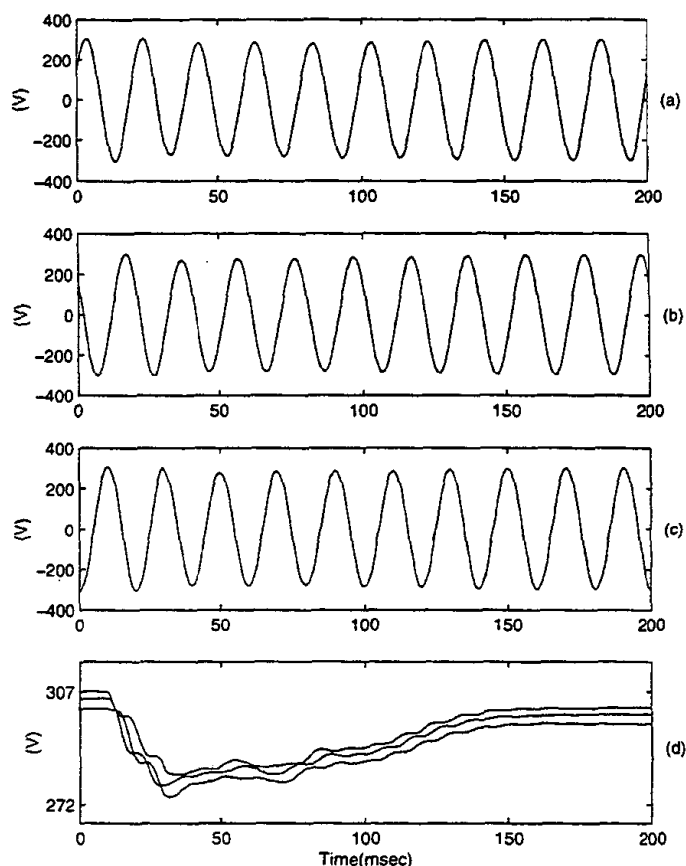


Figura 3.12 - (a) - (c) Forma da onda durante afundamento de tensão durante a partida do motor e (d) A tensão RMS [27].

### 3.4.3 Descargas Atmosféricas

As descargas atmosféricas estão entre as principais causas de distúrbios, provocando sobretensões e interrupções não programadas nas redes de distribuição, e causando danos em aparelhos elétricos. O circuito primário de uma rede de distribuição convencional é muito exposto a descargas atmosféricas, logo, sobretensões surgem em decorrência de descargas diretas (atingindo os condutores fase) ou indiretas (ocorrendo próximo à linha) e são transferidas para o circuito secundário através do transformador, podendo provocar danos às instalações consumidoras e, ocasionalmente, a queima do próprio transformador.

#### **3.4.4 Causas Diversas**

Existem também diversos fatores que causam distúrbios de afundamentos e até interrupções, como a poluição, animais e árvores e problemas com veículos.

No caso da poluição, observa-se que fatores como maresia, poeira e fuligem ambiental se acumulam sobre isoladores de linha de energia ao longo do tempo, causando faltas na isolação e provocando falta a terra especialmente após uma chuva, fazendo com que os dispositivos de proteção atuem causando assim afundamentos em outras linhas. Já animais e árvores podem ocasionar faltas ao fecharem um curto-circuito entre fases ou de fase-terra causando atuação da proteção e queda da tensão em outros alimentadores.

Outro problema são os veículos automotores. As linhas de energia da rede elétrica são frequentemente distribuídas ao lado de vias públicas. Logo, quando veículos colidem com postes de energia elétrica podem causar quedas dos alimentadores e, conseqüentemente, curtos-circuitos, fazendo atuar os dispositivos de proteção resultando em afundamentos de tensão.

### **3.5 Efeitos dos Afundamentos de Tensão**

Muitas cargas sensíveis não distinguem entre um afundamento e uma interrupção momentânea. A severidade dos efeitos do afundamento de tensão depende não só dos efeitos diretos sobre o equipamento em questão, mas também sobre a importância da função desempenhada pelo referido equipamento. Métodos modernos de fabricação muitas vezes envolvem complexos processos contínuos que utilizam muitos dispositivos agindo em conjunto. A falta de um único dispositivo, em resposta a uma queda de tensão, pode parar todo o processo, caracterizando uma das mais graves e dispendiosas conseqüências de quedas de tensão. No entanto, tal dano ou perda é uma função da concepção do processo e é um efeito secundário da queda de tensão e os efeitos diretos mais comuns são descritos nesta seção.



### 3.5.1 Equipamentos de TI

As principais unidades dessa categoria de equipamentos exigem corrente contínuas (CC) de suprimento, fornecido por meio de fontes que convertem a corrente alternada (CA) de alimentação. Uma configuração simplificada de uma fonte comum com regulação de tensão, como a mostrada na Figura 3.13, a tensão contínua CC obtida depois dos retificadores e de um capacitor de filtro não possuem regulação alguma, o que significa que variações na tensão provocam variações de tensão de saída, ocorrendo assim erros nos circuitos digitais.

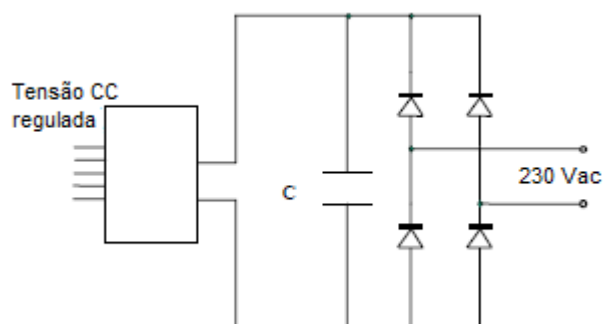


Figura 3.13 - Fonte de alimentação CC regulada.

Uma forma comum de apresentar a sensibilidade desta categoria de equipamentos é por meio de uma curva de tolerância de tensão. A Computer Business Equipment Manufacturers Association (CBEMA) desenvolveu a mais conhecida dessas curvas [3]. O objetivo foi estabelecer limites para as capacidades suportáveis de computadores em termos de magnitude e duração de distúrbios de tensão. A Information Technology Industry Council (ITIC) desenvolveu uma nova versão da curva CBEMA, na segunda metade da década de 1990, conhecida como curva ITIC (Figura 3.14). Essa ferramenta de análise é de interesse do presente trabalho, principalmente para afundamentos de tensão, sendo usada nas investigações apresentadas no Capítulo 4.

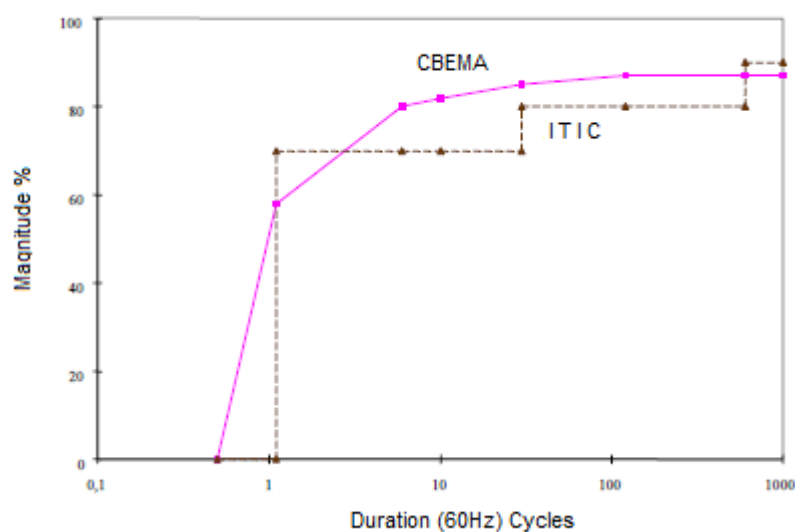


Figura 3.14 - Curva CBEMA e ITIC [22]

### 3.5.2 Contatores

Contatores elétricos são dispositivos eletromecânicos que são utilizados em quase todas as operações de processos industriais, seja no controle ou no chaveamento de cargas. A falha desse componente, devido a afundamentos de tensão, pode levar a parada total ou parcial de um processo, sendo que a retomada plena de produção poderá levar várias horas e até dias. A Figura 3.15 mostra uma representação simplificada de um contador com bobina de corrente alternada que durante um afundamento de tensão essa alimentação da bobina do contator é prejudicada, ou seja, não é suficiente para que o mesmo feche ou abra seus contatos, pois é necessária uma corrente mínima na bobina para que a força magnética criada seja maior que a força estabelecida pelas molas presentes neste sistema, esse mau funcionamento ocorre o “repique dos contatos”, fazendo com que o contator abra e feche seus contatos inúmeras vezes dentro de um pequeno intervalo de tempo.

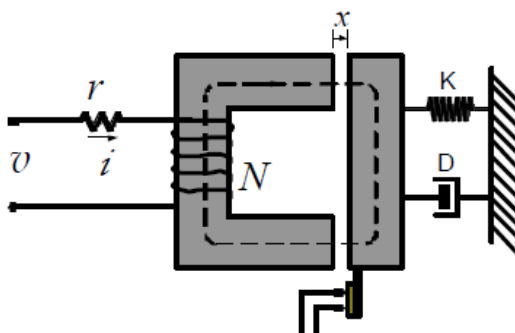


Figura 3.15 - Diagrama esquemático simplificado de um contator

### 3.6 Possíveis Soluções para Atenuar Afundamentos de Tensão

Em um sistema de potência é inevitável a ocorrência completa de faltas, mas é possível reduzir a probabilidade de ocorrência, reduzindo não apenas o número de quedas de tensão, mas também a frequência de interrupção de curta e longa duração. Medidas preventivas e corretivas podem ser consideradas para tais objetivos.

#### 3.6.1 Medidas Preventivas

As medidas preventivas estão baseadas no combate as causas dos distúrbios, com o objetivo de eliminá-los ou de reduzir sua incidência e origens. Nesse sentido, seguem abaixo as principais medidas preventivas que podem ser adotadas para minimizar os prejuízos associados à afundamento de tensão [27-31].

- a) Substituir linhas aéreas por cabos subterrâneos, que são menos afetados pelo mau tempo, levando a uma redução considerável no número de faltas por ano. No entanto, é mais longa a reparação nesses cabos, além de ter um custo mais elevado para a sua instalação;
- b) Investigar as linhas que são frequentemente sujeitas a descargas atmosféricas induzindo falhas para a melhoria do nível de isolamento;
- c) Adicionar dispositivos para-raios;
- d) Manutenção das cadeias de isoladores e outras partes isolantes dos equipamentos e subestações por meio da lavagem regular;
- e) Poda de árvores próximas aos ramais de distribuição e limpeza da faixa de servidão das Linha de Transmissão (LT's);

- f) Evitar riscos de contatos de animais em pontos energizados do sistema elétrico;
- g) Utilização de cabos isolados na rede de distribuição;
- h) Especificação adequada de equipamentos;
- i) Realizar campanhas educativas contra a ocorrência de queimadas, atos de vandalismo;
- j) Reduzir a resistência de aterramento do pé da torre das LT's.

### 3.6.2 Medidas Corretivas

A adoção de medidas corretivas tem como objetivo adequar os equipamentos ao nível de qualidade de energia de suprimento. Essas medidas estão associadas ao tipo de consumidor ou carga sensível que se deseja dessensibilizar, como também ao tipo e origem do distúrbio da QEE. Diferentemente das medidas preventivas que estão baseadas no combate as causas do afundamento de tensão, as medidas corretivas visam o combate dos efeitos deste distúrbio como se pode observar nos itens abaixo.

a) Estabilizadores: trata-se de um autotransformador com o secundário ligado à carga e o primário alimentado por um transformador de tape variável controlado. A tensão de saída é monitorada por um servo-amplificador e, quando esta se desvia do valor pré-fixado, chaves semicondutoras (tiristores associados) fazem a comutação do tape elevando ou abaixando a tensão até um nível aceitável;

b) UPS: A concepção básica de um UPS é converter a energia em corrente alternada para energia em corrente contínua e armazená-la em uma bateria. O UPS então converte a energia em CC da bateria de volta para energia em CA e a direciona para as cargas. Existem dois tipos de UPS; offline e online.

- UPS offline: a carga é alimentada diretamente pela rede. Caso ocorra alguma interrupção na rede, é efetuada a transferência para o inversor e as baterias suprem a carga garantindo energia até o sistema se restabelecer. A transferência é feita por chaveamento estático ou mecânico que dura de 2 a 10ms. Durante esse tempo a energia é interrompida, mas, em geral, isto geralmente não é um problema para a carga. A sua desvantagem é que não propicia uma regulação de tensão e frequência quando a linha está operando normalmente;

- UPS online: a energia suprida pela rede passa por um inversor em série com um retificador antes de alimentar a carga e, por isso, é capaz de proteger contra vários tipos de distúrbios de energia, sendo recomendado para aplicações em cargas críticas. A proteção contra as variações se dá porque o sinal da rede passa por transformações até chegar à carga. O circuito recebe o sinal alternado da rede elétrica e o transforma em contínuo. Essa energia transformada alimenta as baterias e o inversor. Esse, por sua vez, transforma o sinal contínuo, gerando um novo sinal senoidal. Ou seja, o UPS está fornecendo um sinal de saída regulado em tensão, frequência e, de certa forma, desvinculado da entrada.

c) UPS e grupo motor gerador: quando o UPS é associado a um grupo motor diesel gerador, em condições normais a alimentação do sistema UPS é feita pela concessionária, e na possibilidade de interrupção sustentada de fornecimento de energia pela rede da concessionária, o grupo motor gerador diesel é acionado para suprir a carga via UPS.

d) Transformadores Ferroressonantes: também conhecidos por transformadores de tensão constante (*CVT*), podem ser aplicados para amenizar os problemas associados à ocorrência de afundamentos de tensão. Esses equipamentos são especialmente utilizados para baixas potências e, geralmente, possuem relação de transformação 1:1, sendo assim, fornecem tensão de saída que não é significativamente alterada pelas variações na tensão de entrada.

e) Restaurador Dinâmico de tensão: também chamado de DVR (*Dynamic Voltage Restorer*), é um equipamento baseado em eletrônica de potência que compensa distúrbios como afundamentos e elevação de tensão, podendo reduzir as harmônicas de tensão nos sistemas de energia por meio de filtragem ativa. É capaz de injetar formas de ondas complexas para a compensação de transitórios de chaveamento e outros distúrbios que ocorrem nas tensões de alimentação. Como o DVR é instalado em série com a carga, muitos modelos apresentam uma chave eletrônica ou mecânica de *bypass*, em paralelo, para eliminar as perdas no transformador série em situações nas quais o equipamento não está ativo.

### **3.7 Normas ou Recomendações Nacionais e Internacionais**

Neste item será apresentado um resumo das principais recomendações e normas Nacionais e Internacionais que abordam os afundamentos de tensão.

Quanto aos documentos da Legislação Nacional destacam-se os Procedimentos de Distribuição PRODIST, da ANEEL, e os Procedimentos de Rede do ONS.

### **3.7.1 ANEEL “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST)” Modulo 8 Qualidade da Energia Elétrica**

Os Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional (PRODIST)” Modulo 8 qualidade da energia elétrica:

- Estabelece os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica (QEE), abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado.
- Define os conceitos (terminologia) caracteriza os fenômenos, parâmetros e valores de referência relacionados à conformidade de tensão em regime permanente e as perturbações na forma de onda de tensão, estabelecendo mecanismos que possibilitem à ANEEL fixar padrões para os indicadores de QEE.
- Para a qualidade dos serviços prestados estabelece a metodologia para apuração dos indicadores de continuidade, dos tempos de atendimento definindo limites e responsabilidades.
- Estabelece, também, a metodologia de monitoramento automático dos indicadores de QEE.

### **3.7.2 ONS Sub-Módulo 2.8 “Procedimentos de Rede”**

Os Padrões de Desempenho da Rede Básica – ONS Sub-módulo 2.8:

- Define as Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD), no qual os afundamentos de tensão são definidos como momentâneo e temporário dentro do tipo de VTCD.
- Descreve as bases conceituais e os procedimentos para o gerenciamento dos indicadores e os padrões de desempenho do Sistema Interligado Nacional (SIN), incluindo os de tensão, frequência, continuidade de serviço e funções de transmissão da rede básica [20].

No âmbito internacional os documentos que tratam dos afundamentos de tensão e a QEE são as normas e recomendações da IEEE, IEC, SEMI, CBEMA e ITIC, que serão explicitadas adiante.

### 3.7.3 Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos – (do acrônimo em inglês IEEE - institute of electrical and electronics engineers)

- IEEE 1159 (2009) “IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality”. Essa norma [11] foi a mais utilizada neste trabalho e tem por objetivo auxiliar na monitoração e na correta interpretação dos resultados obtidos de medição de distúrbios da qualidade da energia elétrica. Define, ainda, cada tipo de distúrbio em função das características dos eventos registrados tais como: faixas de intensidade e duração.

- IEEE 446 (1995) “IEEE Recommended Practice For Emergency And Standby Power Systems For Industrial And Commercial Applications”: essa norma [32] apresenta o conceito de afundamento de tensão focando a sensibilidade de equipamentos e os efeitos de partidas de motores. Apresenta reco

mendações que devem ser utilizadas na etapa de projeto para evitar a ocorrência desse distúrbio.

- IEEE 493 (2007) “IEEE Recommended Practice For The Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems”: propõe metodologias para calcular as características dos afundamentos de tensão, tais como, intensidade, duração e frequência de ocorrência. A intensidade do afundamento num determinado local pode ser obtida através do cálculo do curto-circuito quando são conhecidas as impedâncias da rede, a impedância da falta e a localização da falta. A duração do evento pode ser estimada conhecendo-se os tempos típicos de atuação das proteções envolvidas. Já por meio do conhecimento das estatísticas de faltas do sistema pode-se estimar o número de afundamentos de tensão para qualquer barra de interesse. É o que explica essa norma [24].

- IEEE 1100 (1999) “IEEE Recommended Practice For Powering and Grounding Electronic Equipment”: o intuito dessa norma [33] é o de apresentar diversas metodologias e critérios para a monitoração de afundamentos de tensão, bem como mostrar a aplicação das curvas CBEMA / ITIC.

- IEEE 1250 (1995) “IEEE Guide For Service to Equipment Sensitive to Momentary Voltage Disturbances”: a norma [34] descreve os efeitos dos afundamentos de tensão em computadores e em outros equipamentos sensíveis que possuem dispositivos de estado sólido para conversão de energia. Além disso,

identifica os problemas potenciais e propõe métodos de mitigação, que permitem o funcionamento satisfatório dos equipamentos sensíveis.

- IEEE 1346 (1998) “IEEE Recommended Practice For Evaluating Electric Power System Compatibility With Electronic Process Equipment”: essa Norma [35] apresenta uma metodologia para a avaliação técnica e financeira da compatibilidade entre a rede de suprimento de energia e os processos industriais durante a ocorrência de afundamentos de tensão. Vale ressaltar que não propõe nenhuma limitação ao desempenho da rede nem à sensibilidade dos equipamentos e processos. No entanto, recomenda a normalização das metodologias de análise da compatibilidade entre a rede de suprimento e as cargas. A norma foi concebida para ser utilizada durante a fase de projeto de novas instalações, portanto, não propõe soluções para problemas de qualidade de energia em redes existentes.

- IEEE P1433 “A Standard Glossary of Power Quality Terminology”: o objetivo desse grupo de trabalho [36] é desenvolver um conjunto único de definições para todos os tipos de distúrbios da qualidade da energia elétrica.

- IEEE P1564 “Voltage Sags Indices”: o objetivo deste grupo de trabalho [37] é propor índices para afundamentos de tensão através da análise da forma de onda registrada durante o distúrbio.

#### **3.7.4 Comissão Eletrotécnica Internacional (do acrônimo em inglês IEC - International Electrotechnical Commission)**

- IEC 61000 “Electromagnetic Compatibility” [19]: é constituída de uma série de documentos e relatórios técnicos, onde o assunto principal é a compatibilidade eletromagnética. Esse material tem como objetivo descrever os fenômenos e fornecer parâmetros que auxiliem fabricantes e usuários de equipamentos eletroeletrônicos do ponto de vista de emissividade e imunidade frente aos distúrbios de QEE.

Essa norma está dividida em normas básicas e genéricas. As básicas abordam todos os aspectos gerais do assunto e descrevem os fenômenos, metodologias de medição e técnicas de ensaio. Enquanto que as genéricas dizem respeito a um produto ou a uma família de produtos e são utilizadas na confecção de normas para novos produtos ainda não normalizados. Existem dois tipos de normas genéricas; o primeiro chamado de “Residencial, Comercial e Indústrias Leves”, e o



segundo chamado de “Ambientes Industriais”. No primeiro são abordados ambientes residenciais, lojas, cinemas, centros esportivos, laboratórios e oficinas. No segundo, refere-se a ambientes industriais, locais com instalações de equipamentos científicos e médicos, e locais com correntes elevadas ou chaveamentos frequentes de cargas indutivas ou capacitivas de grande porte.

- IEC 61000-2-1 (1990) clause 8 “Voltage Dips and Short Supply Interruption”: essa norma [38] descreve brevemente os afundamentos, considerando os parâmetros intensidade e duração. Também são analisadas as causas dos afundamentos e os efeitos sobre cargas sensíveis.

- IEC 61000-2-4 (2002) “Environment – Compatibility Levels in Industrial Plants For Low Frequency Conducted Disturbances” [39]: essa norma define três classes de ambientes eletromagnéticos. São indicados valores de referência de afundamentos de tensão para cada classe de ambiente.

- IEC 61000-2-8 (2002), “Environment – Voltage Dips and Short Interruptions on Public Electric Power Supply Systems With Statistical Measurements Results” [40]: essa norma descreve de forma detalhada as causas e a propagação dos afundamentos de tensão. Também são abordados os efeitos sobre cargas sensíveis e métodos de medição.

- IEC 61000-4-11 (2004), “Testing and Measuring Techniques - Voltage Dips, Short Interruptions and Voltage Variations Immunity Tests”: essa norma [41] deve ser utilizada para testar o nível de imunidade de equipamentos eletroeletrônicos cuja corrente nominal é menor que 16A por fase. Descreve os procedimentos e os equipamentos de teste, não devendo ser aplicada em equipamentos que funcionem em tensão CC ou em tensão cuja frequência é 400 Hz.

### **3.7.5 Especificações para imunidade de equipamentos contra afundamentos de tensão (do acrônimo em inglês specifications for equipment voltage sag immunity – SEMI)**

As normas industriais SEMI têm por objetivo aprimorar a produtividade dos fabricantes de materiais semicondutores. Elas surgem do acordo voluntário entre os fabricantes e os consumidores finais de materiais semicondutores.

- SEMI F47-0200 “Specification for Semiconductor Processing Equipment Voltage Sag Immunity” [42]: essa norma indica o nível de imunidade que os

processos que fabricam semicondutores devem possuir. A Figura 3.16 mostra a curva de tolerância especificada para afundamentos de tensão cuja duração está entre 50ms e 1s. A norma não permite a utilização de UPS com o objetivo de melhorar a tolerância dos processos.

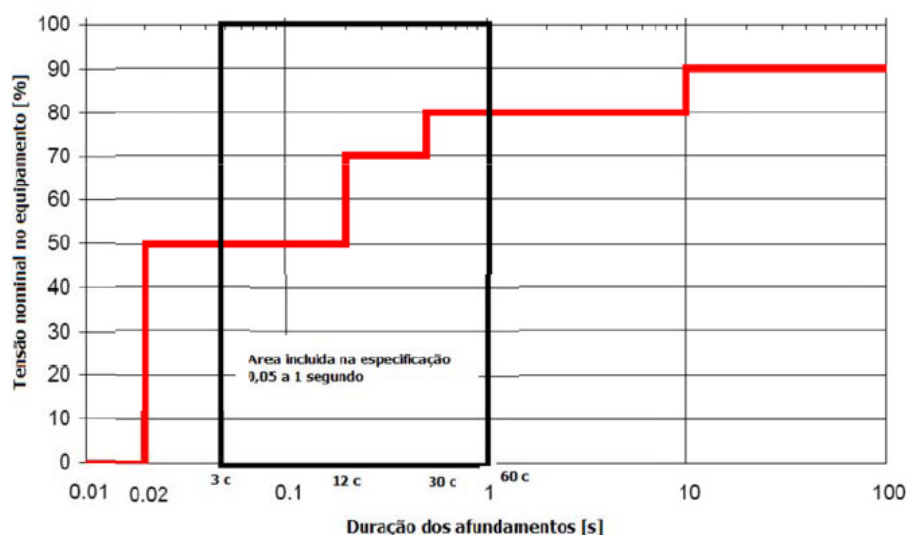


Figura 3.16 - Curva de tolerância segundo a Norma SEMI F47-0200.

- SEMI F42-0999 “Test Method For Semiconductor Processing Equipment Voltage Sag Immunity”: essa norma [43] define a metodologia de teste para determinar a tolerância dos equipamentos frente a afundamentos de tensão, visando o atendimento da norma SEMI F47.

### 3.7.6 Curva CBEMA e ITIC

Curvas que retratam a Tolerância de equipamentos Computacionais em relação à magnitude e duração de variações de tensão.

A curva CBEMA (Figura 3.17) desenvolvida pela primeira vez em 1987, pela *Computer and Business Equipment Manufacturers Association*, tornou-se um padrão para especificar faixas de operação em que os microprocessadores apresentavam erros de funcionamento ou danos. Em 1994, e com atualização em 2000, foi proposta pela Information Technology Industry Council a curva ITIC Figura 3.18, com o objetivo de melhorar a realidade das especificações dos

microprocessadores. As curvas são definidas no plano, tensão *versus* tempo, em três regiões:

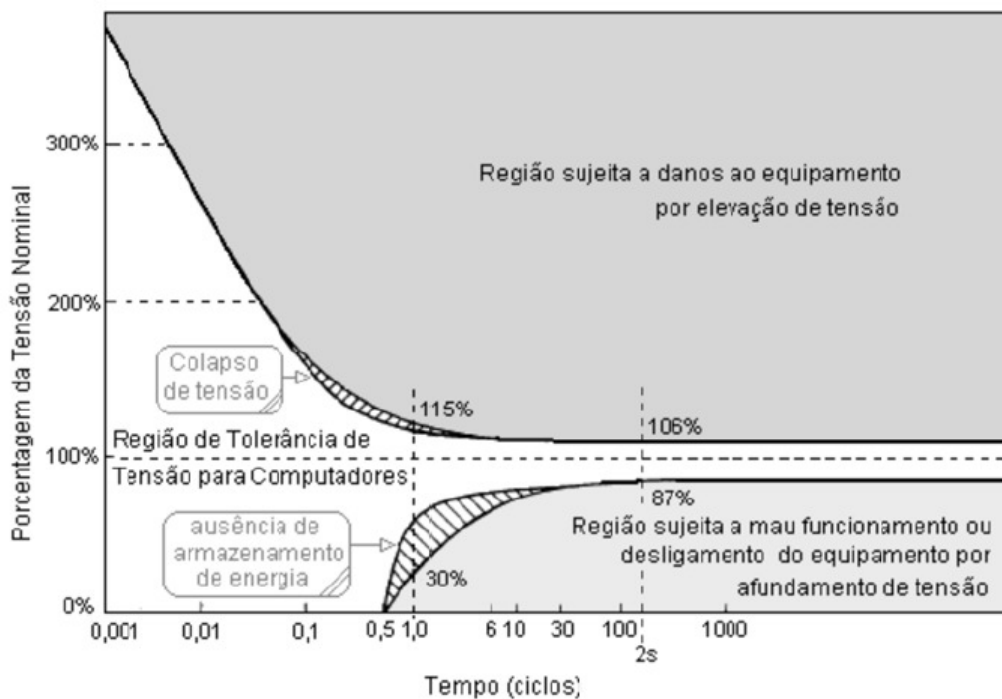


Figura 3.17 - Curva CBEMA de tolerância de tensão para componentes eletroeletrônicos microprocessados [34].

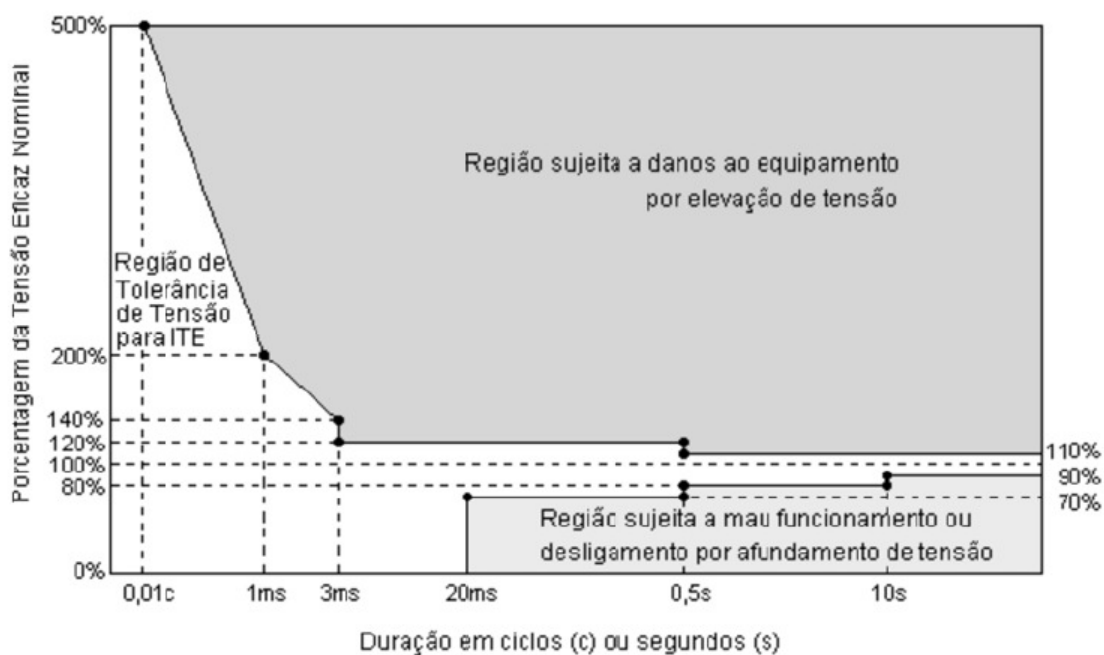


Figura 3.18 - Curva ITIC de tolerância de tensão para componentes eletroeletrônicos microprocessados [34].

- A região central é a de funcionamento normal e representa os limites de tensão que o equipamento pode suportar, sem sofrer danos.

- A região superior está sujeita a causar danos ao equipamento por elevação de tensão, com possibilidade de ruptura da isolação, devido à ocorrência de sobretensões transitórias.

- A região inferior está sujeita a um mau funcionamento ou desligamento do equipamento por afundamento de tensão, com possibilidade de parada de operação dos equipamentos.

A curva ITIC é a de interesse no presente trabalho, sendo usada no Capítulo 4 para as análises de ocorrências para analisar a qualidade de energia disponibilizada para o prédio do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas CCET.

## **4 MONITORAMENTO DA QUALIDADE DE ENERGIA**

### **4.1 Principais Causas de Afundamentos de Tensão**

Diante do tema proposto nesta dissertação e com a finalidade de investigar a qualidade de energia em um sistema de distribuição real, escolheu-se como ponto de investigação um centro de pesquisa associado à Universidade Federal do Maranhão, neste caso o Centro de Ciências Exatas e Tecnológica – CCET. A escolha está baseada nos problemas perceptíveis àqueles que usam as instalações elétricas neste centro. Portanto, os objetivos estão focados nas variações de tensão, na avaliação dos impactos dos distúrbios elétricos em baixa tensão e na coleta de dados práticos para análise através de monitoração local usando um analisador de energia, e por fim, o uso de dados coletados para aprimoramento do modelo computacional eletromagnético a fim de simular fenômenos eletromagnéticos.

A subestação de energia do CCET foi monitorada por seis meses no período de 30 de maio de 2016 à 26 de novembro de 2016. Os dados obtidos foram analisados de forma a obter índices que garantissem a conformidade no que diz respeito à qualidade de energia, das leituras realizadas com os parâmetros exigidos pela norma IEEE 1159.

O CCET possui um conjunto interessante de cargas para investigação, algumas muito sensíveis a pequenas variações na tensão fornecida, como computadores e equipamentos de laboratórios que, muitas vezes, sofrem diversos danos quando ocorrem os distúrbios elétricos, gerando prejuízos aos seus usuários.

Neste capítulo será descrito o sistema elétrico do Campus Universitário da UFMA, a subestação do CCET e os principais eventos registrados durante o período de monitoramento e sugestões para a mitigação da QEE.

### **4.2 Descrição do Sistema Elétrico do Campus Universitário da UFMA**

O Campus da UFMA está localizado no Bairro do Bacanga, região metropolitana de São Luís, Maranhão. O nível de tensão de fornecimento é de 13,8 kV, pela concessionária de distribuição local, por meio do alimentador ALM-01C3, da Subestação do Anjo da Guarda que, além de fornecer energia ao Campus

Universitário da UFMA, também alimenta os bairros do Itaqui-Bacanga. A medição comercial é realizada pelo lado da média tensão em uma Cabine de Medição localizada próxima ao prédio da Prefeitura do Campus. O sistema de Distribuição de Energia Elétrica opera em topografia radial oferecendo um único caminho elétrico entre a fonte e as cargas como se pode observar pelo Diagrama Unifilar e pela Topografia da Rede (Apêndices A e B).

Atualmente, o Campus Universitário conta com 40 subestações entre aéreas e abrigadas com potências, que variam de 75 kVA a 1 MVA, tensão 13,8/0,38 kV com conexão delta-estrela (Apêndice C).

### 4.3 Justificativas para Monitoração

Visando não só as necessidades imediatas do projeto de pesquisa ao qual a presente dissertação está vinculada, mas também na possibilidade de sua continuação e no surgimento de novas aplicações, foi usado o Analisador de Qualidade de Energia PP-4300 (Figura 4.1), pois o mesmo apresenta muitos recursos úteis.



Figura 4.1 - Analisador de qualidade de energia Power Platform PP-4300

### 4.4 Cargas Sensíveis

Além de computadores dos laboratórios, secretarias, coordenações e departamentos, o CCET possui inúmeros equipamentos sensíveis à variações da tensão, sendo que alguns deles fazem parte de pesquisas, tornando-se muito mais preocupante, não só por conta do seu valor financeiro referentes aos danos

temporários (ou permanentes) associados aos equipamentos elétricos, existem os prejuízos referentes à perda de informações associadas as pesquisas em desenvolvimento, caso o equipamento danificado estiver sendo usado em investigações científicas.

Dentre os diversos laboratórios do CCET, escolheu-se como exemplo para ilustrar essa situação, o laboratório do Núcleo de Análise de Resistência Pesticida (NARP), onde se pode verificar a importância de se manter a qualidade da energia vista a existência de alguns equipamentos como:

- **Cromatógrafo a gás (GC) acoplado a um Espectrofotômetro de Massa (MS):** juntos fazem análise e traço de materiais orgânicos com baixíssima sensibilidade. A amostra líquida ou gasosa pode ser injetada manualmente ou automaticamente por um braço robótico (Figura 4.2).



Figura 4.2 - Cromatógrafo a gás acoplado a um Espectrofotômetro de Massa

- **Cromatógrafo Líquido de Alta Eficiência** (Figura 4.3): conhecido como **HPLC** (sigla Inglesa), este aparelho utiliza lâmpada ultravioleta e arranjos a diodos. Realiza as mesmas análises do Cromatógrafo a gás e alguns outros compostos.



Figura 4.3 - Cromatógrafo Líquido de Alta Eficiência

• **Potenciostato/Galvanostato** (Figura 4.4): opera com vários tipos como potenciometria, coulometria, amperometria (potenciometria de onda quadrada, voltametria cíclica, variando a corrente com o tempo, variando o potencial, etc) e galvanometria. É um equipamento que trabalha com micro corrente, micro potencial elétrico e é utilizado para identificação de composto como pesticidas, proteínas e outras aplicações. Por ser bastante sensível, deve-se ter muito cuidado com o chamado ruído de fundo que interfere nos resultados gráficos. Este aparelho exige uma boa qualidade de energia para evitar interferências nos resultados.



Figura 4.4 - Potenciostato / Galvanostato



• **Laboratório NARP:** além dos equipamentos citados, também possui estoques de padrões de pesticidas e de enzimas que precisam ficar resfriados em geladeiras (Figura 4.5) a temperatura entre 5°C a 7°C. A falta de energia por um período superior a duas horas pode inativar as enzimas e comprometer os padrões de análise de pesticidas, que podem custar mais de um mil reais, de 2 a 3 gramas, dependendo do material e do fabricante. Por isso, as duas geladeiras existentes nesse laboratório não podem ser desligadas.



Figura 4.5 - Geladeiras com estoques de padrões de pesticidas e de enzimas

Todos esses equipamentos além de ligados a fontes de alimentação ininterrupta (UPS) devem sempre ficar em ambiente refrigerado de 18 °C a 23 °C e por isto ficam instalados em ambiente climatizado 24 horas, não podendo ter umidade no interior do sistema e ainda trabalha com um fluxo de gás Hélio (que é inerte) mesmo sem operação. Estes equipamentos estão também nos Laboratórios de Biodiesel, na Central Analítica (análise de petróleo) e outros de análises de produtos naturais.

## 4.5 Descrição da Subestação de Interesse

Localizada atrás do Bloco 7 do CCET, a subestação (Figura 4.6) é dividida por uma parede em que metade é de alvenaria e a outra de elementos vazados, o que isola o transformador do grupo gerador. Possui grades de ferro e portões com persianas de alumínio metálicas na porta. Os equipamentos que compõem o sistema da subestação serão descritos a seguir.



Figura 4.6 - Subestação do CCET

### 4.5.1 O Transformador

A subestação utiliza um transformador da marca TRAF0, cujas especificações técnicas estão impressas nos dados de placa e apresentadas abaixo:

- Potência 500 kVA trifásico 13,8/0,38kV;
- Frequência 60 Hz;
- Impedância 4,5% a 75°C;
- Norma NBR 5356;
- Fabricação 12/90;
- Resfriamento ONAN;
- Nível de Isolação AT 15/95 kV;
- Elevação de temperatura dos enrolamentos 55°C
- Elevação de temperatura do liquido 50°C

A Figura 4.7 mostra o aspecto físico do transformador da subestação, bem como o isolamento feito em torno do mesmo. O acesso ao transformador só é permitido por pessoas autorizadas pela Prefeitura do Campus Universitário.



Figura 4.7 - Aspecto físico do Transformador da subestação CCET

#### 4.5.2 Sistema de Autogeração

O sistema de autogeração é composto por motor diesel, gerador trifásico (Figura 4.8) 380 V, 500 kVA injeção direta, 4 tempos, aspiração natural e turbo alimentado, refrigerado a água, com alternador para carga de bateria, motor de partida e sistema de governo mecânico.

As características do gerador síncrono são: trifásico 380 V, 500 kVA, sistema brushless, 4 pólos, passo encurtado, ligação estrela com neutro acessível, isolamento classe H e regulador de tensão eletrônico incorporado. O sistema de auto geração possui ainda:

- Quadro de comando tipo, montado sobre a base;
- Controlador microprocessado;
- Modos de operação automático, manual e teste;

- Partida automática através de falta ou falha da concessionária;
- Retificador eletrônico automático para bateria de partida.



Figura 4.8 - Aspecto físico do grupo gerador subestação CCET

#### 4.5.3 Disjuntor a Pequeno Volume de Óleo (PVO)

A proteção principal é composta de disjuntor tripolar de média tensão (Figura 4.9) 17,5 kV - 50/60 Hz, a pequeno volume de óleo (PVO), para uso interno, comando frontal, acionamento manual, fabricado pela BEGHIM segundo as normas IEC 600 056 e NBR 7118, na versão PL 15C cujas especificações técnicas estão impressas nos dados de placa:

Corrente nominal: 630 A;

Capacidade de interrupção: 350 MVA;

Corrente de interrupção: 16 kA;

Nível básico de impulso: 110 kV;

Relé de sobrecorrente tipo OCD-1L: 20 A.



Figura 4.9 - Aspecto físico do disjuntor a PVO subestação CCET

#### 4.6 Analisador de QEE

Para esta pesquisa foi utilizado o analisador de qualidade de energia elétrica [44], fabricação Dranetz-BMI, modelo Power Platform PP 4300 (Figura 4.1) que possui quatro canais diferentes de tensão e corrente (oito no total), mede, analisa e grava dados de qualidade de energia e harmônicos simultaneamente (análises de harmônicos até a 50ª harmônica) e possui quatro modos de operação, como:

- Modo Scope (Figura 4.10) [44]: permite visualização em tempo real das formas de onda de tensão e corrente e diagramas fasoriais.

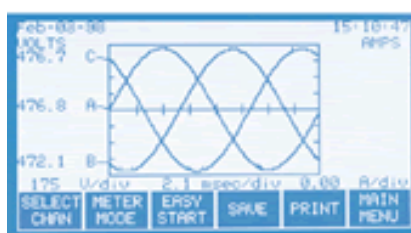


Figura 4.10 - Modo de operação Scope

- Modo Medição (Figura 4.11) [44]: medições segundo a segundo de até 16 parâmetros tais como Volts, Amperes, Watts, VA, VAR, fator de potência, frequência, desequilíbrio de tensão, TDH's V e I, fator de crista de corrente, fator K, demanda, energia e enésimas harmônicas.



Figura 4.11 - Modo de operação Medição

- Gravador de Evento (Figura 4.12) [44]: visualiza dados de eventos gravados, incluindo formas de onda para determinar a origem dos problemas. Captura de dados críticos em configurações únicas, incluindo dados de eventos por evento, formas de onda de corrente e tensão real capturada e eventos de qualidade de energia classificados ao padrão IEEE 1159 para perturbação de tensão.

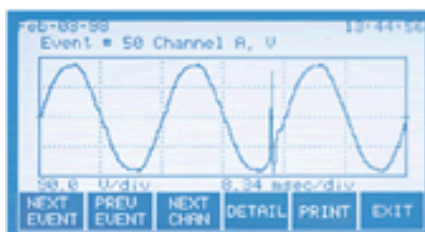


Figura 4.12 - Modo de operação Gravador de Eventos

- Gráficos no tempo (Figura 4.13) [44]: com até 16 parâmetros diferentes e 8 canais individuais que identificam anormalidades antes que se tornem problemas. Elo para relatórios de eventos para obter detalhes textuais e forma de onda. Permite capacidades de ampliação a exibição de detalhes para 0,1 seg / div.

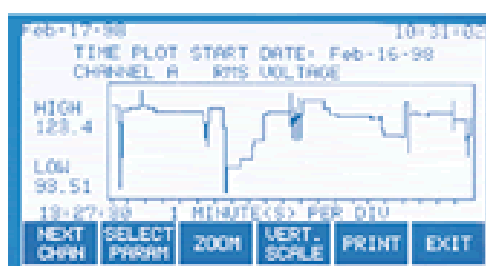


Figura 4.13 - Modo de operação gráfica no tempo

Especificações do analisador de QEE:

- a) Medidas de tensão: 100 a 600 Vrms, com precisão de  $\pm 1\%$ ;
- b) Transientes de tensão: 50 a 1.000 Vpk, com duração mínima de 1 microssegundo e precisão de  $\pm 10\%$ ;
- c) Medições de corrente: 10 a 200% da corrente total da ponta de prova e precisão de  $\pm 1\%$ ;
- d) Frequência: faixa de 35 a 60 Hz com precisão de  $\pm 0,2\%$ ;
- e) Transitórios de corrente: 10 a 300% da escala do TC com duração mínima de 1 microssegundo e precisão de  $\pm 10\%$ .

A Figura 4.14 ilustra o arranjo de medição montado na subestação do CCET através do analisador de qualidade de energia elétrica.



Figura 4.14 - Analisador de qualidade de energia Power Platform PP-4300

#### 4.7 O Software para Análise da Monitoração

Dranetz-VIEW é um software que permite rapidamente visualizar e analisar dados do monitoramento de energia. Oferece funcionalidade automatizada e incorpora poderosas capacidades analíticas e opções personalizáveis para atender às necessidades de cada usuário. A tela de abertura do programa de supervisão está representada na Figura 4.15, onde é possível observar diversos botões. Essa tela pode ser configurada pelo usuário, dando mais flexibilidade ao sistema.

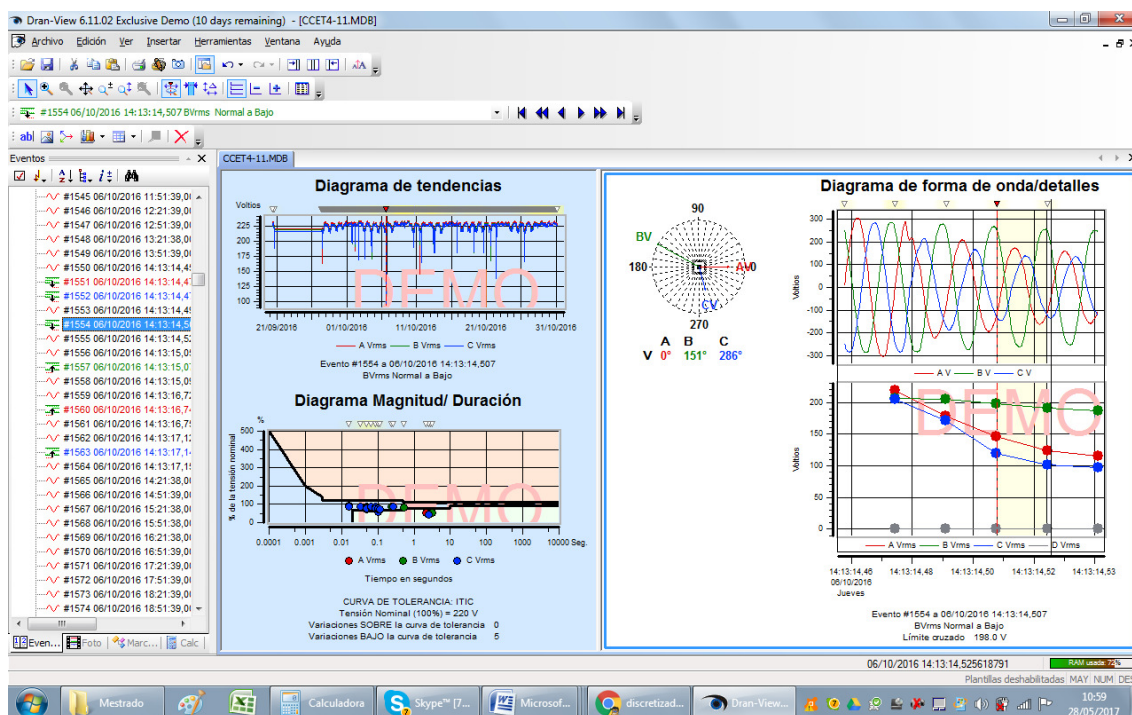


Figura 4.15 - Tela de abertura do software Dranetz-VIEW

Com o programa podem ser realizadas as seguintes funções:

- Formas de ondas, fasores e detalhes de eventos da tensão e corrente;
- Diagramas no tempo de tensões, correntes, potências, energia, transitórios, etc;
- Curva de tolerância CBEMA, SEMI e ITIC;
- Diagrama de THD de tensões e correntes;
- Geração de tabelas de todas as medidas do período monitorado.

## 4.8 Esquema de Monitoramento

Executou-se medições com o analisador de Qualidade de Energia Elétrica, na subestação do CCET por um período de 181 dias, realizado entre 30 de maio de 2016 e 26 de novembro de 2016, com o objetivo de investigar as perturbações que afetam a qualidade de energia elétrica.

A coleta de dados foi feita por meio de medição direta pelo lado do secundário do transformador, no barramento do quadro geral onde foram instaladas as sondas de tensão e corrente.



As perturbações registradas no barramento de baixa tensão da subestação do CCET são armazenadas na memória interna do equipamento e depois enviadas para o cartão de memória. Os dados gravados no cartão de memória são levados para processamento no Programa Dranetz-VIEW instalado no computador do Laboratório de Qualidade de Energia Elétrica.

Os limites de normalidade definidos no setup do Analisador de QEE determinam sua habilidade e registro das variações transitórias de tensão, ou seja, somente foram registradas as perturbações que excederem esses limites. Assim, para este caso foram estabelecidos, a priori, os seguintes valores: 10% de sobretensão e 10% de subtensão no analisador instalado no barramento do secundário do transformador. Portanto, o Analisador de QEE registrou variações transitórias de tensão sempre que os níveis ultrapassam limites preestabelecidos.

#### **4.9 Principais Eventos**

Para conhecer as características dos principais eventos que incidem sobre o barramento secundário do transformador do CCET e a sensibilidade dos equipamentos quando submetidos à variações de tensão, foi necessário classificar os fenômenos conforme os procedimentos informados na Tabela 2.2.

Com base nos dados registrados pelo analisador e seguindo os intervalos discretizados e padronizados pelo ONS [20], registrou-se 198 afundamentos de tensão e 4 interrupções sustentada, separados por faixas de amplitude e duração para contabilização dos eventos. A Tabela 4.1 resume os eventos registrados. Objetivando uma melhor visualização dos dados dessa tabela, elaborou-se um gráfico tridimensional mostrado na Figura 4.16. Esse gráfico apresenta o número de ocorrências de afundamentos de tensão em função da magnitude e duração.

Tabela 4.1 - Ocorrências de afundamento de tensão

Magnitude (pu)	Duração				
	(16,67ms - 300ms)	(300 ms - 600ms)	(600 ms - 1s)	(1s - 3s)	(3s - 1min)
0,85 - 0,90	80	10	0	0	0
0,80 - 0,85	39	2	0	0	0
0,70 - 0,80	36	0	0	1	0
0,60 - 0,70	9	0	0	0	0
0,50 - 0,60	7	0	1	4	1
0,40 - 0,50	4	0	0	0	1
0,30 - 0,40	1	0	0	0	1
0,20 - 0,30	0	0	0	0	0
0,10 - 0,20	0	0	1	0	0
< 0,10	0	0	0	0	0

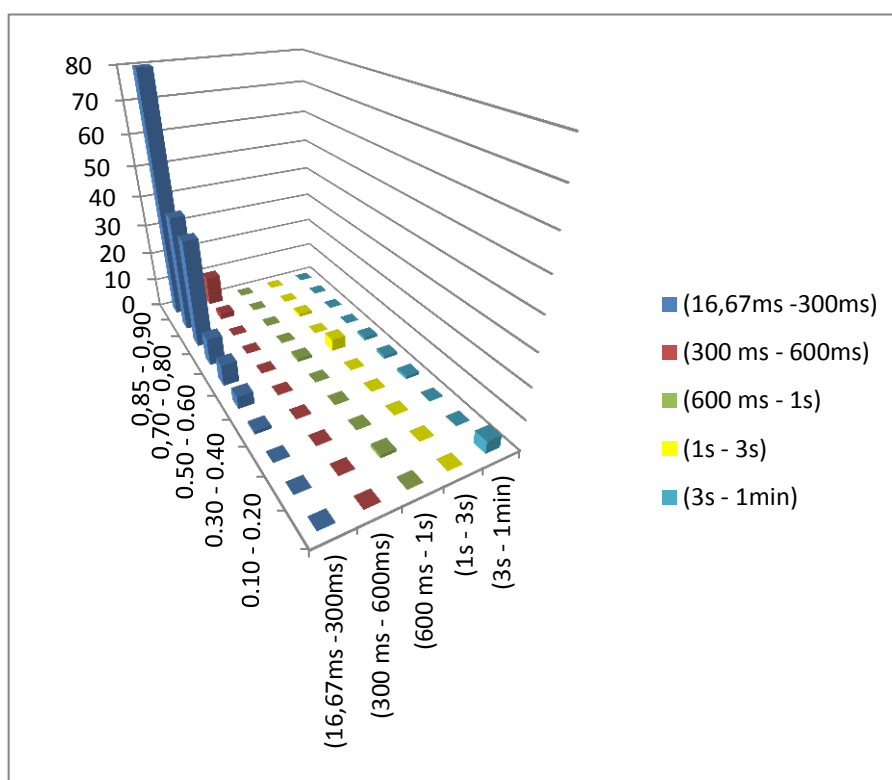


Figura 4.16 - Ocorrências dos afundamentos de Tensão

Das 198 ocorrências registradas de afundamento de tensão, verificadas na Tabela 4.1, 53 ocorrências, que correspondem a 27%, são de afundamentos de tensão registrados na região inferior da curva ITIC (Figuras 4.17).

O gráfico dessa figura permite verificar, isoladamente, os casos e o quantitativo de ocorrências em que as variações de tensão possam ter

comprometido processos controlados por computadores e outros equipamentos microprocessados. Isto deve-se ao fato das variações de tensão terem ocorrido na região inferior da curva ITIC, o que ocasiona um mau funcionamento ou desligamento de equipamentos por afundamento.

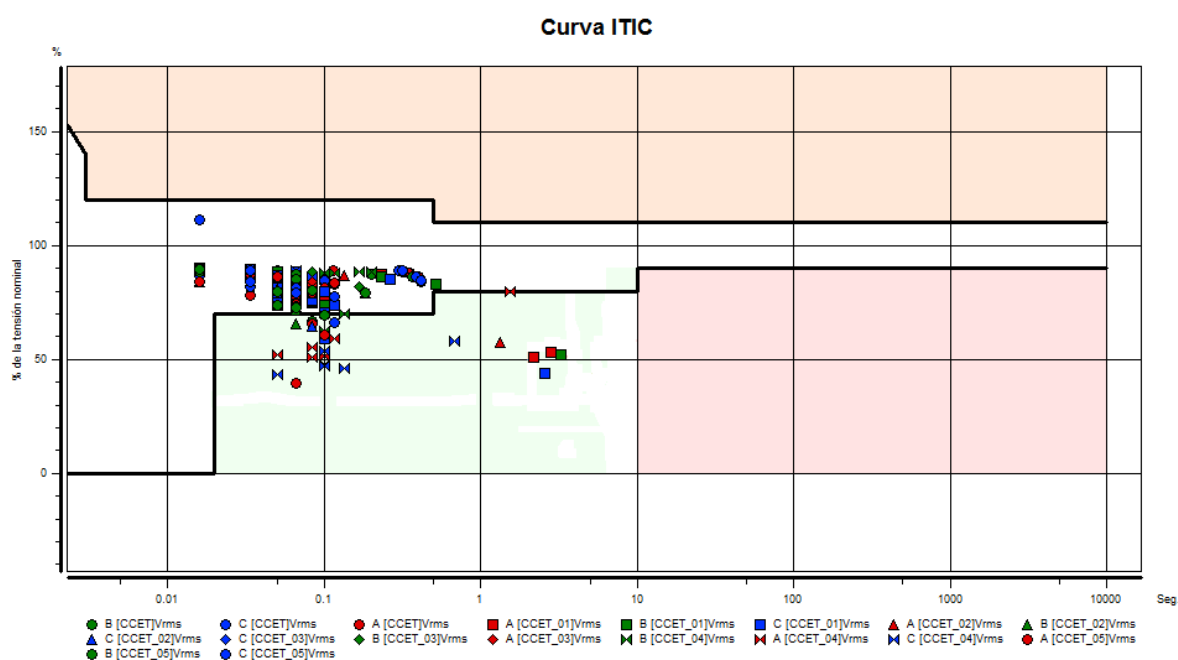


Figura 4.17 - Curva ITIC período 30/05 a 26/11 de 2016

Além dos afundamentos de tensão, esse sistema de monitoramento foi configurado para capturar informações de transitórios, elevações e interrupções. Porém, não foram registradas ocorrências no que diz respeito a transitórios e elevações, apenas quatro casos de interrupção sustentada. Os quatro casos foram interrupções sustentadas de origem interna, ocorrido devido a desligamentos feitos pela equipe de manutenção da Prefeitura do Campus.

Com base nesses eventos ocorridos, a Tabela 4.2 e a Figura 4.18 apresentam as variações de tensão para o período ao qual foi monitorado o barramento do secundário do transformador do CCET. Já a tabela 4.3 e a Figura 4.19 representam os eventos ocorridos por fases.

Tabela 4.2 - Eventos registrados no barramento do secundário do transformador do CCET

Variações de tensão	Afundamento Instantâneo	Afundamento Momentâneo	Afundamento Temporário	Interrupção Sustentada
Total	189	6	3	4
Valor percentual	93%	3%	2%	2%

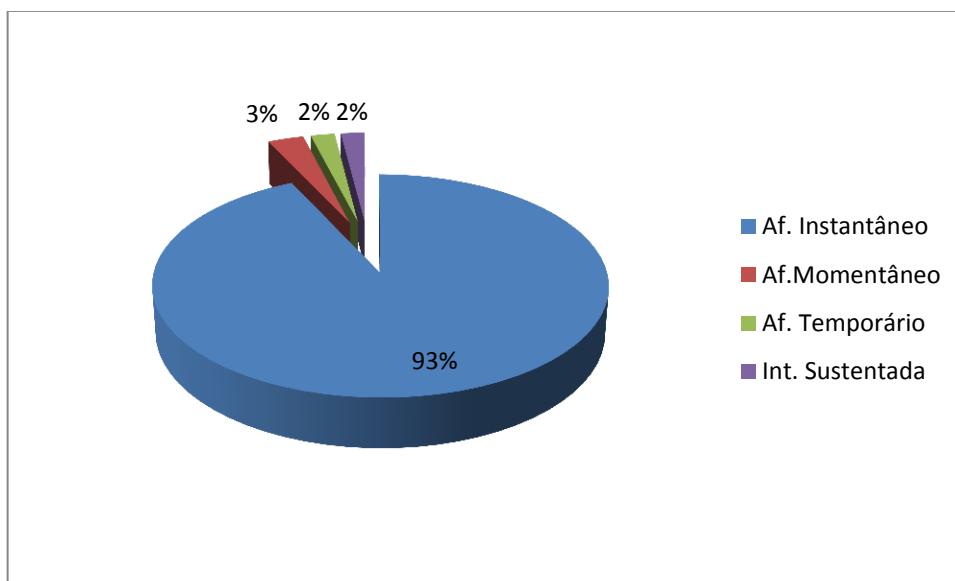


Figura 4.18 - Eventos registrados

Tabela 4.3 - Eventos registrados por fase no barramento secundário do transformador do CCET

Fase A	Fase B	Fase C	Total
71	60	67	198
36%	30%	34%	100%

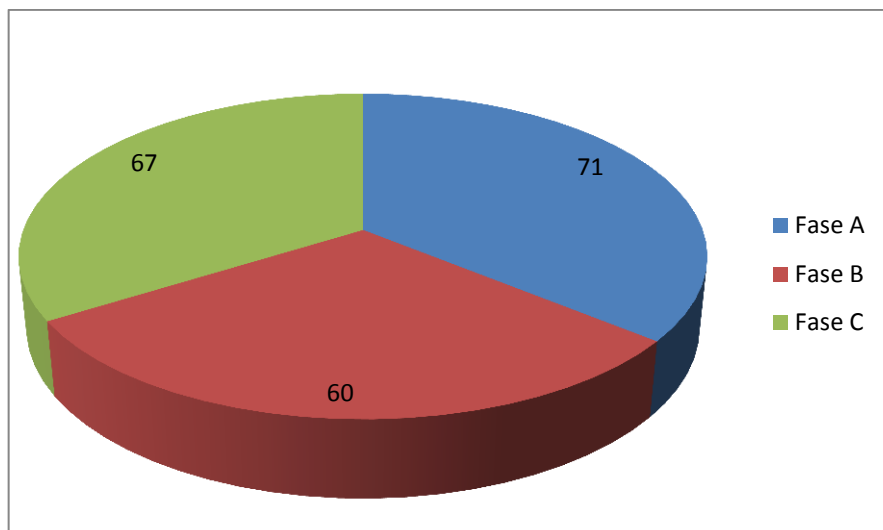


Figura 4.19 - Eventos registrados por fase

Após essa série de medições e da classificação realizada, observou-se que as variações de tensão que incidem sobre as instalações do CCET se resumem em:

- a) Os distúrbios de afundamento instantâneo de tensão são responsáveis por 93% dos problemas de variações de tensão que afetam as instalações do CCET;
- b) 68% dos afundamentos instantâneos de tensão são de baixa amplitude (magnitude de 0,9 a 0,8 da tensão nominal) e de duração inferior a 0,5s;
- c) 6% são afundamentos de tensão com duração superior a 1 segundo;
- d) 27% dos afundamentos de tensão ocorreram na região inferior da curva ITIC, sujeita a mau funcionamento ou desligamento por afundamento de tensão (Figura 4.20).
- e) Em relação aos eventos registrados por fase, foi observado que não houve uma predominância desses eventos por determinada fase e sim praticamente uma igualdade nos afundamentos entre as fases.

#### 4.9.1 Perfil dos Afundamentos do CCET

Os modernos equipamentos dos usuários finais são na maioria controlados por dispositivos eletrônicos microprocessados, sendo mais sensíveis às variações de QEE do que eram os equipamentos utilizados no passado. Em detrimento dessa situação, vários trabalhos surgiram com o objetivo de analisar a imunidade de equipamentos que executam ensaios com o intuito de determinar as

curvas de sensibilidades de equipamentos como, por exemplo, ASD's, PLC's, contadores entre outros [45-49].

Após conhecer as características dos afundamentos de tensão que incidem sobre o barramento secundário do transformador do CCET, foi possível determinar o perfil dos afundamentos de tensão incidentes no barramento monitorado, ilustrado na Figura 4.20. O perfil traçado representa 98% de todos os afundamentos de tensão incidentes durante o período de 30 de maio de 2016 e 26 de novembro de 2016. Por meio dele é possível verificar se os equipamentos serão atingidos ou não pelos afundamentos e se podem ou não falhar quando instalados no CCET. Vale ressaltar que isso só pode ser feito quando se conhece a curva de sensibilidade do referido equipamento.

A curva, delineada em vermelho na Figura 4.20 representa o perfil dos afundamentos de tensão e pode servir para análise de sensibilidade dos equipamentos instalados no CCET e as futuras aquisições por representar em sua parte superior os afundamentos registrados no barramento de baixa tensão da subestação. O perfil dos afundamentos possuem os seguintes parâmetros:

- 1) Afundamentos de até 0,30 pu para duração inferior a 3,4 segundos;
- 2) Afundamentos de até 0,80 pu para duração superior a 3,4 segundos e inferior a 10 segundos;

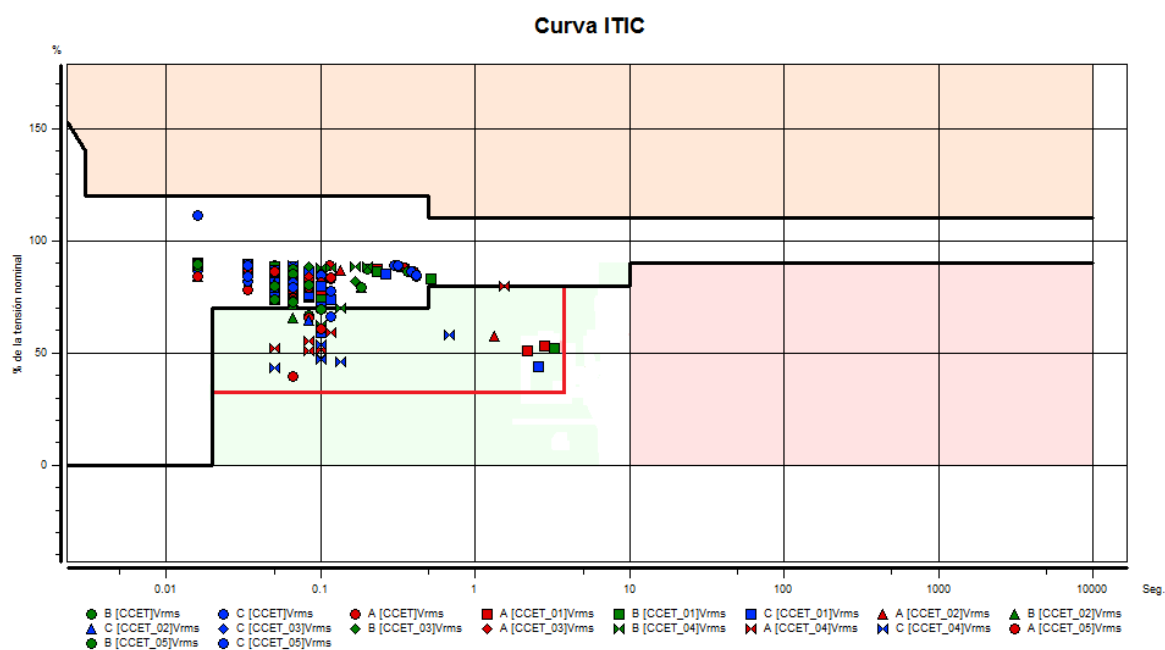


Figura 4.20 - Perfil de afundamentos de tensão do CCET

#### **4.10 Sugestões para a Mitigação dos Eventos de QEE Registrados no CCET**

Após o período de monitoramento do sistema elétrico do CCET foi possível registrar 202 eventos, sendo que 198 foram casos de variações de curta duração, 4 casos de interrupções sustentadas e 53 casos de afundamentos na região abaixo da curva inferior ITIC. Portanto, evidenciou-se que as tensões sofreram variações significativas durante esse período podendo causar, em alguns casos, mau funcionamento de equipamentos sensíveis. Para tanto, algumas ações preventivas que podem ser executadas para minimização dos problemas de variações de tensão, dentre elas destacam-se:

a) Poda de árvores, lavagem e manutenção preventiva de chaves, isoladores e conexões na rede de média e baixa tensão, principalmente antes do início do período de chuvas;

b) Cumprimento da Norma NR-10 nas instalações elétricas do CCET para evitar acidentes ou incidentes que ocasionam faltas e interrupções;

c) Criação de um histórico de ocorrências de manutenção dos componentes da rede de distribuição, como também do dia e hora dos eventos e perdas causadas;

d) Topografia da rede de distribuição do Campus Universitário;

e) Como plano de contingência, reconfigurar a rede de distribuição de radial para anel aberto, interligando o trecho da rede próximo a entrada da Cidade Universitária com o trecho da rede após a cabine de medição, diminuindo as áreas afetadas por falta através da transferência de carga por caminho alternativo, como demonstrado no Apêndice D;

f) Implantar gradativamente rede compacta e/ou multiplexada.

Além dessas medidas preventivas, também devem ser instalados Sistemas de Alimentação Ininterrupta (UPS) que atendam aos tipos de afundamentos e as interrupções momentâneas registradas, suprindo todas as cargas sensíveis, e conclusão das instalações do Grupo Motor Diesel Gerador da Subestação para os casos de interrupção sustentada.

## 5 MODELAGEM COMPUTACIONAL DO SISTEMA REAL DE DISTRIBUIÇÃO

### 5.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentados os modelos dos componentes computacionais do Sistema Elétrico Real de Distribuição para que se possa simular o comportamento desse sistema elétrico em regime permanente e transitório. A expansão da tecnologia e sua evolução nas últimas décadas facilitou a representação dos diversos elementos dentro de um programa computacional, principalmente em relação à velocidade de processamento e à capacidade de armazenamento. Entretanto, para que se tenha o resultado esperado, é necessário identificar qual o programa que melhor atenda, que proporcionará uma análise criteriosa a respeito do comportamento de um sistema físico em um ambiente computacional. Geralmente, deve-se ter como base aquele programa que é considerado o mais aceito e melhor difundido na comunidade acadêmica e que possa produzir como resultado as grandezas elétricas (tensão e corrente) ao longo do tempo, incluindo seu comportamento transitório durante uma ocorrência de falta.

Para modelagem e simulações do sistema elétrico de interesse foi utilizado o programa computacional ATPDraw 4.0 [50] já reconhecido mundialmente pela sua eficiência em simular fenômenos transitórios eletromagnéticos com extrema fidelidade. O ATPDraw é um pré-processador gráfico do programa ATP (Alternative Transients Program), que por sua vez é versão do programa EMTP (Electromagnetic Transients Program) [51] para plataforma Windows. Através do ATPDraw o usuário pode construir um circuito elétrico usando apenas o mouse e selecionar os componentes a partir dos menus, e então o ATPDraw gera um arquivo de entrada ATP no formato apropriado.

A referência [52] descrever esse programa como uma poderosa ferramenta de simulação que está sendo amplamente utilizada em estudos de qualidade de energia. Esse programa pode ser usado para estudo em regime permanente e transitório, além de harmônicos; representam componentes não lineares e desenvolvem modelos definidos pelo usuário. Essa referência mostra como os usuários podem se beneficiar das novas versões das ferramentas que compõem este programa.



## 5.2 Componentes da Rede de Média e Baixa Tensão

Antes de analisar o comportamento de um sistema elétrico, seja em regime permanente ou transitório, é primordial que se faça a modelagem de cada componente do sistema elétrico no programa de computador em que as simulações serão feitas. Isso é necessário para que a simulação tenha êxito, pois dessa forma os modelos representarão com maior fidelidade o sistema real. Além disso, é imprescindível que se conheça os aspectos físicos de cada elemento que se deseja representar e qual o grau de precisão que se deseja alcançar.

### 5.2.1 Rede da Concessionária

No programa ATPDraw, a rede elétrica da concessionária é representada por uma fonte simétrica de tensão trifásica ideal que no ATPDraw é modelada pelo componente AC3PH e um elemento RL trifásico acoplado com parâmetros de sequência positiva e zero modelado pelo componente LINESY\_3, como mostrado na Figura 5.1.

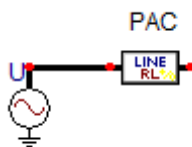


Figura 5.1 – Representação da rede elétrica da concessionária no ATPDraw.

A fonte de tensão com amplitude em 11.267,65 V – 60 Hz, que representa a tensão fase de pico e cuja interface gráfica de entrada dos referidos dados no programa é mostrada na Figura 5.2.

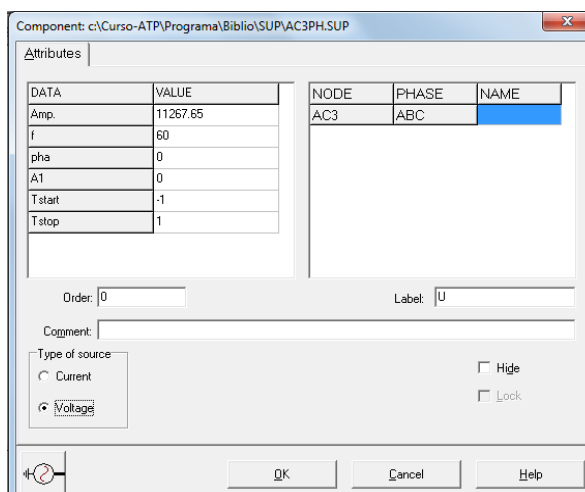


Figura 5.2 - Interface de entrada dos parâmetros da fonte trifásica

O componente LINESY\_3 (Figura 5.3) é modelado através dos valores das correntes de curto-circuito trifásicas e monofásicas fornecidas pela concessionária local, no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) e informadas na Tabela 5.1. Por meio desses valores são encontradas as impedâncias de curto-circuito de sequência positiva e sequência zero no PAC (Apêndice E.1 e E.2). A interface gráfica de entrada dos referidos dados no programa é mostrada na Figura 5.3.

Tabela 5.1 - Corrente de curto-circuito no PAC (Fonte: concessionária local)

	Corrente de curto-circuito
Trifásico	15.00,221 $\angle -72,50^\circ$
Fase-terra	728,491 $\angle -79,19^\circ$

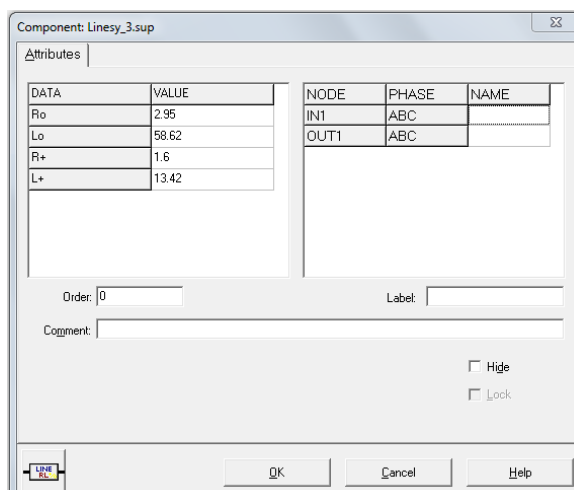


Figura 5.3 - Interface de entrada dos parâmetros da impedância da fonte

## 5.2.2 Chaves

As chaves de abertura/fechamento são representadas no ATPDraw pelos componentes Switch time 3-ph (fases independentes trifásicas) e Switch time controlled (monofásico). Seu componente está ilustrado na Figura 5.4 e a interface de entrada contendo os parâmetros da chave (neste caso apenas trifásica), como tempo de abertura/fechamento, está ilustrada na Figura 5.5.



Figura 5.4 - Representação de chave trifásica/monofásica no ATPDraw

Component: SWIT\_3XT.SUP

Attributes

DATA	VALUE	NODE	PHASE	NAME
T-cl_1	-1	IN1	3	
T-op_1	0.001	OUT1	3	
T-cl_2	-1			
T-op_2	0.001			
T-cl_3	-1			
T-op_3	0.001			
Imar	0			

Order: 0 Label:

Comment:

Output: 0 - No  Hide  Lock

OK Cancel Help

Figura 5.5 - Interface de entrada dos parâmetros para controle da abertura e fechamento

## 5.2.3 Linhas de Distribuição e Cabos de Baixa Tensão

A rede de distribuição de média tensão é formada por cabos aéreos nus de alumínio (CA) sem alma de aço e cabos subterrâneos epronax utilizados para circuitos de entrada entre o ramal aéreo e a subestação via eletrodutos. Todos os trechos da rede de distribuição, tanto os aéreos como os subterrâneos, mostrados no Apêndice F, são representados no ATPDraw através de parâmetros concentrados apenas com a informação dos valores da impedância, ou seja, impedâncias de sequência positiva e zero representadas pelo componente LINESY\_3 (Figura 5.1), visto que para redes de distribuição com comprimento inferior a 80 km o efeito da capacitância é pequeno e pode ser desprezado e em se

tratando de fenômenos de baixa frequência a serem simulados, a representação por parâmetros concentrados é aceitável [53-55].

Para obtenção dos parâmetros ( $R_0$ ,  $L_0$ ,  $R_+$  e  $L_+$ ) do componente LINESY\_3 (Figura 5.6), para cada trecho da rede foi utilizado na modelagem os dados técnicos levando em consideração o comprimento de cada trecho, a indutância e a resistência por unidade de comprimento da seção dos condutores colhidos a partir do catálogo do fabricante [56]. A modelagem dos cabos de baixa tensão utiliza o mesmo critério, porém, seus parâmetros elétricos são obtidos no catálogo de cabos de baixa tensão [57]. A interface de entrada contendo os parâmetros da rede de distribuição está ilustrada na Figura 5.6 e os cálculos dos respectivos parâmetros estão no Apêndice E.3.

DATA	VALUE	NODE	PHASE	NAME
R <sub>0</sub>	0.0521	IN1	3	
L <sub>0</sub>	0.1114	OUT1	3	
R <sub>+</sub>	0.0521			
L <sub>+</sub>	0.1114			

Order: 0 Label: T1

Comment:

Hide  
 Lock

OK Cancel Help

Figura 5.6 - Interface de entrada da Rede de distribuição.

#### 5.2.4 Medidores de Tensão e Corrente

Os medidores de tensão e corrente são utilizados para mostrar as formas de onda da tensão e da corrente, em função do tempo, nos pontos onde estão conectados no sistema. A conexão desses medidores é feita da mesma forma como se procede com medidores reais de tensão e corrente, ou seja, em paralelo (tensão) e em série (corrente) com o circuito. Esses componentes possuem as seguintes terminologias; Probe Volt (sonda de tensão) e Probe Curr (sonda de corrente), e podem ser acessados no campo Probes & 3-phase do menu de seleção de componentes (Figuras 5.7a e b).

Esses medidores podem ser utilizados em circuitos trifásicos ou monofásicos, desde que para isso seja efetuado um clique duplo com o botão esquerdo do mouse sobre esses componentes, e logo em seguida seja modificado o menu de opções que surgirá na tela, para a opção desejada.

Além dos modelos já existentes no ATPDraw, foi necessário construir através da Linguagem MODELS, que possibilita ao usuário do ATPDraw desenvolver modelos não disponíveis no programa, um medidor de tensão RMS (Figura 5.7c) para registrar os afundamentos de tensão eficaz. O Apêndice G ilustra as linhas de declarações estruturadas na linguagem MODELS do ATP para a modelagem do medidor RMS.

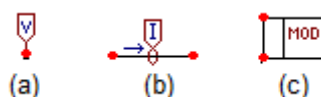


Figura 5.7 - Medidores: a) tensão de pico, b) corrente de pico, c) tensão e corrente RMS

### 5.2.5 Transformador

Na modelagem do transformador, representado no ATPDraw pela Figura 5.8, do sistema elétrico utilizou-se o componente transformador trifásico saturado SATTRAFO, com a interface de entrada dos parâmetros do transformador ilustrada na Figura 5.9, onde é fornecida no primário a tensão de linha e os respectivos parâmetros resistivo e indutivo. No secundário a tensão de fase, os parâmetros (resistência e indutâncias), além do tipo de conexão, defasamento angular, corrente de magnetização, fluxo de magnetização em regime permanente e resistência de magnetização. No ATPDraw, pode-se também incluir a característica de saturação dos transformadores através do fornecimento de pontos da curva de saturação do equipamento. Entretanto, dependendo do estudo para qual o modelo do transformador está sendo formulado, esses dados podem ser desprezados. Por exemplo, a representação da saturação do núcleo é fundamental para estudos que envolvem ferorrressonância, porém é desprezível para cálculos de curto-circuito e fluxo de carga, estudos normalmente realizados em regime permanente [58], ou mesmo no caso de transitórios eletromagnéticos causados por descargas atmosféricas. Em seguida, são fornecidas as principais características do transformado da subestação do CCET [59].

Potência Nominal – 500 kVA;  
 Tensão - 13,8/0,38 kV;  
 Perdas em vazio – 1.300 W;  
 Perdas totais – 6.400 W;  
 Corrente em excitação I<sub>0</sub> - 1,6%;  
 Impedância de curto-circuito Z<sub>cc</sub> - 5,0%;  
 Conexão –  $\Delta / Y$ .

Com esses dados são realizadas operações matemáticas (Apêndice E.4) para a parametrização do modelo [60].

No Apêndice H é demonstrado os parâmetros dos transformadores utilizados no sistema elétrico inseridos no modelo do ATPDraw.

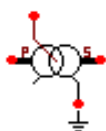


Figura 5.8 - Representação do transformador trifásico no ATPDraw

	Prim.	Sec.		NODE	PHASE	NAME
U [V]	13800	220		P	ABC	
R [ohm]	7.3	0.001855		S	ABC	
L [mH,ohm]	73.24	0.1859		Sat	ABC	
				S-N	1	

Figura 5.9 - Interface de entrada dos parâmetros do transformador de 500 kVA

## 5.2.6 Cargas

Neste trabalho são utilizadas cargas estáticas que podem ser representadas pelo componente RLC3, ilustrada na Figura 5.10, de impedância constante por fase, cujos parâmetros de entrada são os valores de resistência e reatância da carga equivalente nas principais barras (Figura 5.11). Nessas

condições, são conhecidos os valores das potências ativa e reativa da carga em operação normal de pré falta, bem como a sua tensão, valores esses obtidos através das medições registradas pelo analisador. Com essas informações e para a representação da carga na forma de impedância, foram calculados os respectivos valores de resistência e reatância (Apêndice E.5).



Figura 5.10 - Representação da carga trifásica no ATPDraw

DATA	VALUE	NODE	PHASE	NAME
R_1	1.636	IN1	3	
L_1	0.881	OUT1	3	
C_1	0			
R_2	2.001			
L_2	1.078			
C_2	0			
R_3	1.714			
L_3	0.923			

Order: 0      Label: 225

Comment:

Output: 0 - No

Hide       Lock       \$Vintage,1

OK      Cancel      Help

Figura 5.11 - Interface de entrada dos parâmetros da carga

### 5.2.7 Elementos de Representação de Falta

Para simular uma determinada falta em um sistema elétrico é utilizado o componente Splitter (a) para separar as fases da linha, Switch time controlled (b), já comentada no item 5.2.2, controlado no tempo, em série com uma impedância de falta caso exista (Figura 5.12) composta pela junção de resistências (c) que pode variar para cada tipo de falta.

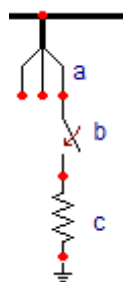


Figura 5.12 - Representação de curto-circuito fase terra

### 5.3 Implementação da Rede de Distribuição

Elaborado os modelos de cada componente nas seções anteriores, foi implementado o sistema elétrico no ATPDraw com a configuração mostrada na Figura 5.13 . Essa configuração reproduz o sistema real de distribuição da UFMA e foi implementado com propósito de realizar simulações em regime permanente e sob condição de falta e aferir com os valores registrados nas medições realizadas pelo analisador de energia.





### 5.3.1 Validação do Modelo da Rede de Distribuição

Esse item tem a finalidade de confrontar o fluxo de corrente registrado pelo analisador de energia, no barramento do secundário do transformador da subestação do CCET, com os valores encontrados na simulação do modelo computacional operando em regime permanente no mesmo barramento, comparando os diagramas de corrente e suas grandezas.

A Figura 5.14 representa o diagrama das correntes registradas pelo analisador de energia no dia 6 de outubro de 2016 às 13h21min com as seguintes correntes de pico por fase:  $I_a = 566,6 \text{ A} \times \sqrt{2} = 801 \text{ A}$ ,  $I_b = 514 \text{ A} \times \sqrt{2} = 727 \text{ A}$  e  $I_c = 612,6 \text{ A} \times \sqrt{2} = 866 \text{ A}$ .

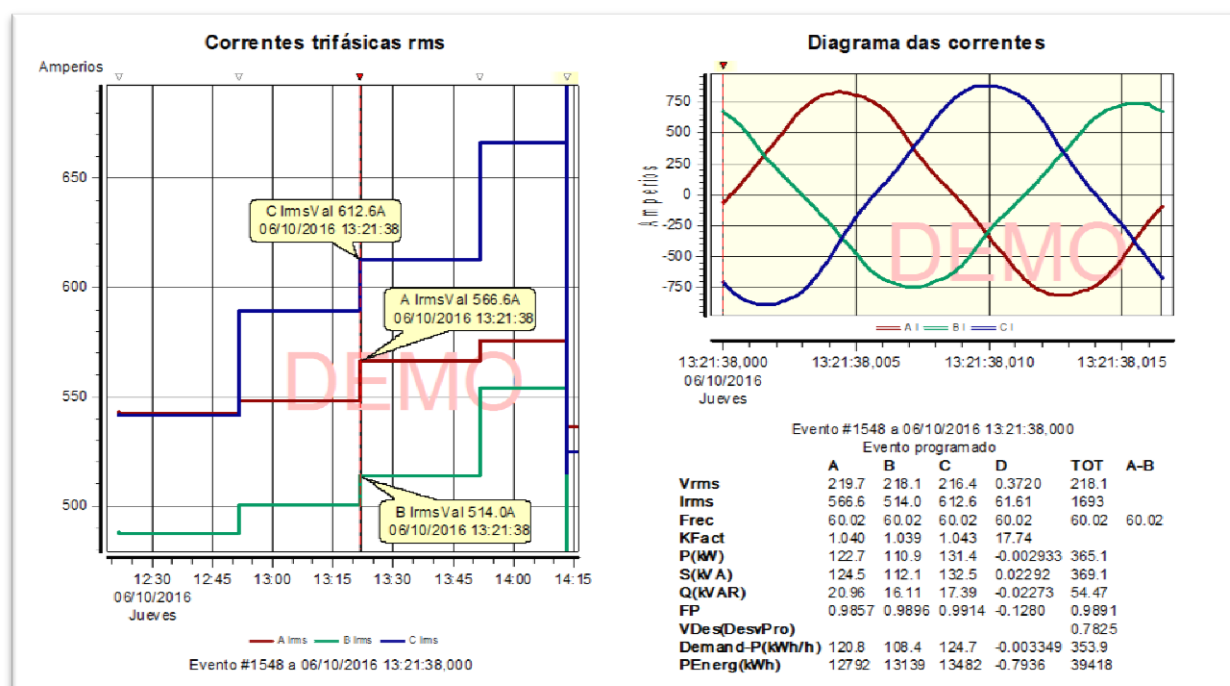


Figura 5.14 - Diagrama das correntes e grandezas elétricas registradas em  $t = 13\text{h}21\text{min}$

Para se determinar as correntes de pico no mesmo barramento (Figura 5.14), no modelo criado no ATPDraw (Figura 5.13), é necessário simular o fluxo de potência no programa com as cargas (círculo em vermelho Figura 5.15) do barramento modeladas seguindo os critérios do item 5.2.6, com os valores de  $V_{rms}$ ,  $P(\text{kW})$  e  $Q(\text{kvar})$  registrados no mesmo instante de tempo (13h21min). A Tabela 5.2 mostra os valores das grandezas elétricas registradas neste instante e os valores da impedância por fase que representam os parâmetros do modelo de carga.

Tabela 5.2 - Grandezas elétricas e impedâncias das cargas por fase

Grandeza	Fase A	Fase B	Fase C
Vrms(V)	219,7	218,1	216,4
P(W)	122.700	110.900	131.400
Q(Var)	20.960	16.110	17.390
R( $\Omega$ )	0,382	0,420	0,350
X( $\Omega$ )	0,065	0,061	0,046
L(mH)	0,173	0,162	0,123

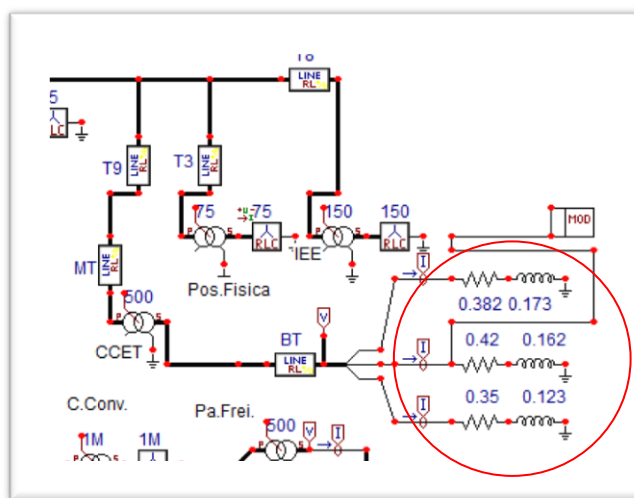


Figura 5.15 - Parte do sistema modelado na interface do ATPDraw para simular o fluxo de potência

A Figura 5.16 apresenta a forma de onda das correntes de pico em regime permanente obtidos após simulação e as caixas de saída das correntes em amperes por fase. Os valores encontrados para essas grandezas são de  $I_a = 793,45$  A,  $I_b = 739,96$  A e  $I_c = 867,68$  A.

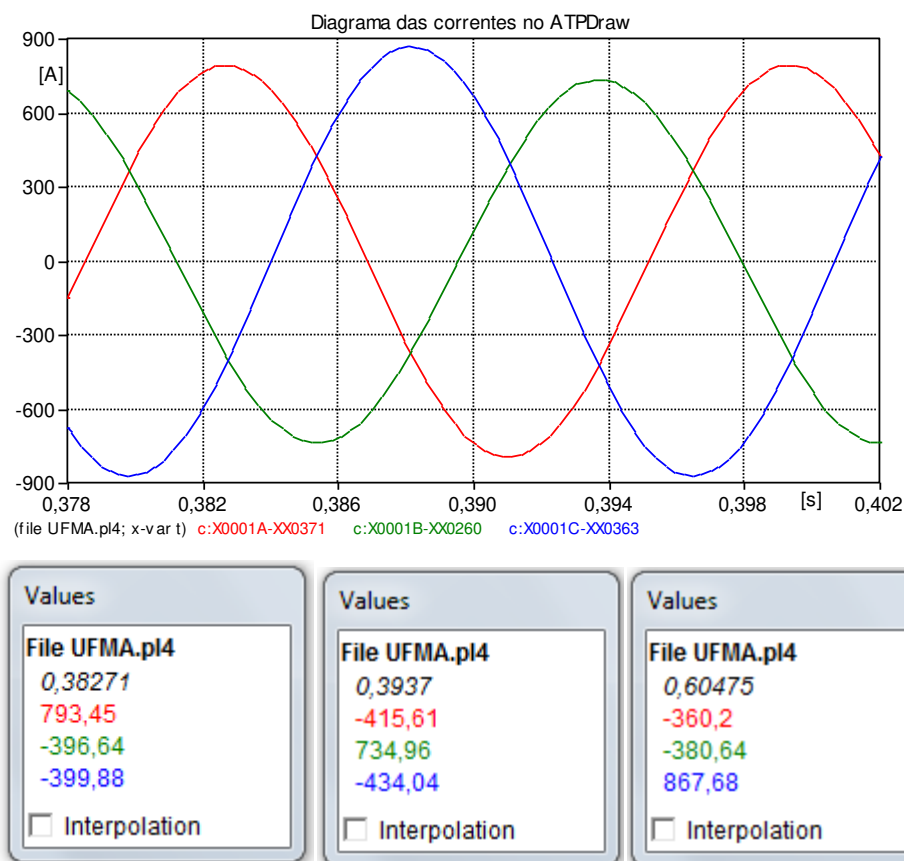


Figura 5.16 - Correntes de pico trifásicas em regime permanente do secundário do transformador da subestação do CCET

O modelo apresentado na Figura 5.13 fornece resultados coerentes se comparado com os valores obtidos pelo analisador de qualidade de energia. Tal afirmação é comprovada na análise da Tabela 5.3, que expressa como é pequena a diferença entre os valores registrados e simulados, apresentando o maior erro na fase “b” de 1,09%, confirmando, inicialmente, a coerência do modelo do sistema de distribuição proposto.

Tabela 5.3 - Comparação das correntes no barramento monitorado no CCET

	Ia(A)	Ib(A)	Ic(A)
Analisador de Energia	801	727	866
Simulado	793,45	734,96	867,68
Erro absoluto	7,55	7,96	1,68
Erro relativo	0,94%	1,09%	0,19%

### 5.3.2 O Modelo da Rede de Distribuição sob Condição de Falta

Uma falta em sistemas elétricos é interpretada por uma condição anormal do sistema e pode ser relacionada a diferentes tipos de problemas como: manobras

de linhas e capacitores, problemas de isolação, contatos e rompimentos de cabos, contatos de cabos em árvores, curtos-circuitos ou a outros agentes externos.

O modelo da rede de distribuição sob condição de falta tem a finalidade de investigar alguns eventos registrados pelo analisador de energia, aqueles no qual se pode associar afundamentos de tensão a um evento de curto-circuito na rede de media tensão e posteriormente simular no ATPDraw. Para tal, são apresentados dois estudos de caso a seguir.

*a) Caso 1: Simulação de curto-circuito monofásico na rede de media tensão na fase C eliminada em 4,732 ms.*

Foi simulado em um ponto da rede de distribuição (ramal de derivação que vai para outras duas subestações) uma falta monofásica na fase “C” a terra (FT), como ilustrado na Figura 5.17, por intermédio de uma Switch time controlled (monofásico), comentada no item 5.2.7, em série com uma resistências de  $12\Omega$ . Essa simulação teve todo o sistema modelado para o regime pré-falta do evento registrado pelo analisador ocorrido no dia 02/10/2016 às 16:37hs (Figura 5.19).

Pode-se observar na Figura 5.18 que no instante  $T_{-cl} = 0,76628s$  (tempo de fechamento da Switch time) a fase “C” experimenta um afundamento de tensão e atinge o regime pós falta caindo para tensões remanescentes de 258 Vpico no primeiro ciclo, 253 Vpico no segundo e 241 Vpico no terceiro, restabelecendo-se após a abertura da chave em  $T_{-op} = 0,8136s$  eliminando a falta e retornando para o regime inicial. A tensão na fase “A” apresenta uma pequena redução.

Analisando as grandezas de tensões, observa-se que os erros mostrados na Tabela 5.4 entre as grandezas medidas e as simuladas são inferiores a 6%. Para os diagramas de tensão verifica-se uma coerência entre eles, com apenas uma diferença nas primeiras curvas senoidais. Este comportamento se deve a um fenômeno transitório manifestado no instante da falta [61].

Tabela 5.4 - Tensões remanescentes Caso 1

Ciclo (Fase C)	1	2	3
Analisador de Energia (Vpico)	254	245	228
Simulado (Vpico)	258	253	241
Erro absoluto (Vpico)	4	8	13
Erro relativo (%)	1,57%	3,27%	5,70%

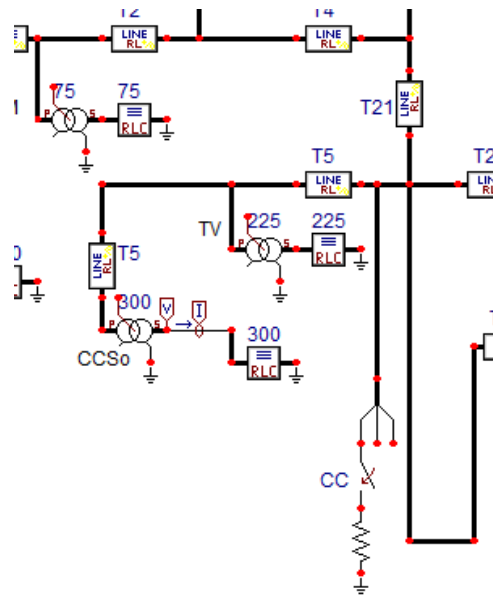


Figura 5.17 - Simulação de uma falta na Fase “C” no ramal de derivação para outras duas subestações

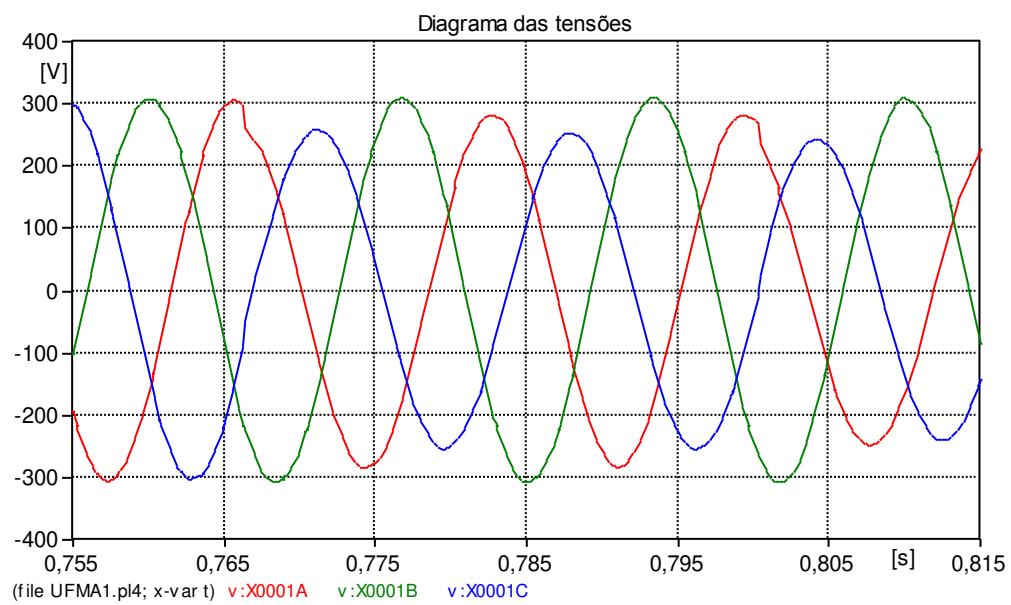


Figura 5.18 - Evento simulado no ATPDraw

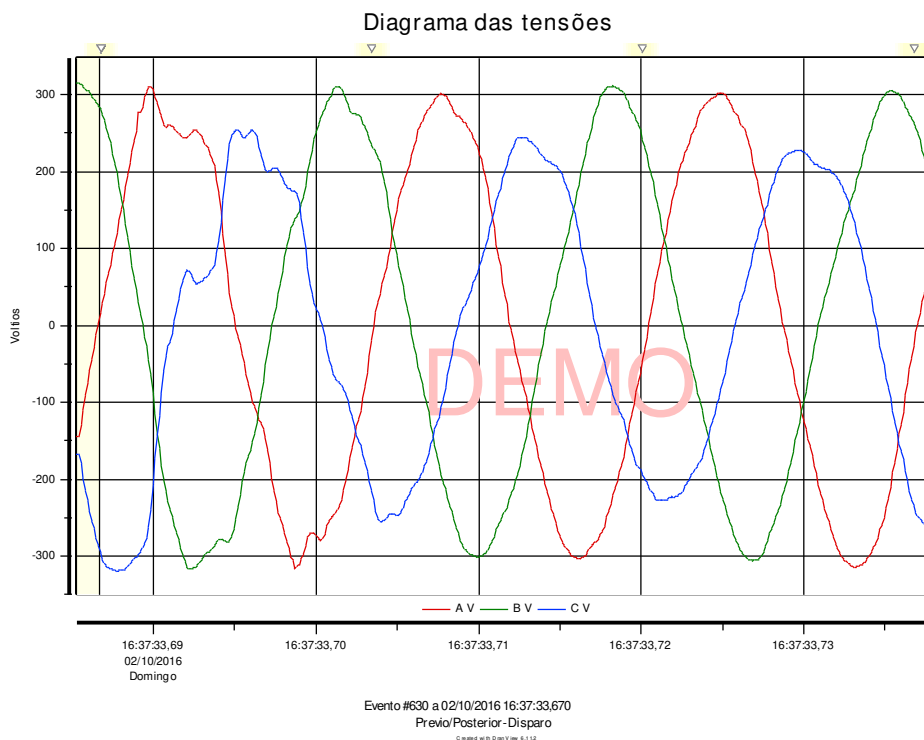


Figura 5.19 - Evento registrado pelo analisador de qualidade de energia

b) *Caso 2: Simulação de curto-circuito bifásico-terra na rede de média tensão nas fases A e B eliminada em 5,17 ms.*

Foi simulado no mesmo ponto do caso anterior um curto-circuito bifásico-terra envolvendo as fases “A” e “B”, como ilustrado na Figura 5.20, por intermédio de duas chaves Switch time controlled (monofásico), em série com uma resistência de  $1\Omega$ . Essa simulação teve todo o sistema modelado para o regime de pré-falta do evento registrado pelo analisador ocorrido no dia 04/09/2016 às 00:05hs cujos registros estão ilustrados (Figura 5.21).

Pode-se observar na Figura 5.22 que no instante  $T_{-cl} = 1,9023s$  (tempo de fechamento das Switch time) as fases “A”, “B” e “C” experimentam um afundamento de tensão atingindo o regime pós falta caindo para tensões remanescentes de 242 Vpico, 35 Vpico e 267 Vpico, respectivamente, para o segundo ciclo, restabelecendo-se após a abertura da chave em  $T_{-op} = 1,954s$  eliminando a falta e retornando para o regime inicial.

Analisando as grandezas de tensões, observa-se que os erros mostrados na Tabela 5.5 entre as grandezas medidas e as simuladas são inferiores a 10%. Para os diagramas de tensão, verifica-se uma coerência entre os diagramas apenas uma diferença no instante da falta devido as oscilações transitórias iniciais.

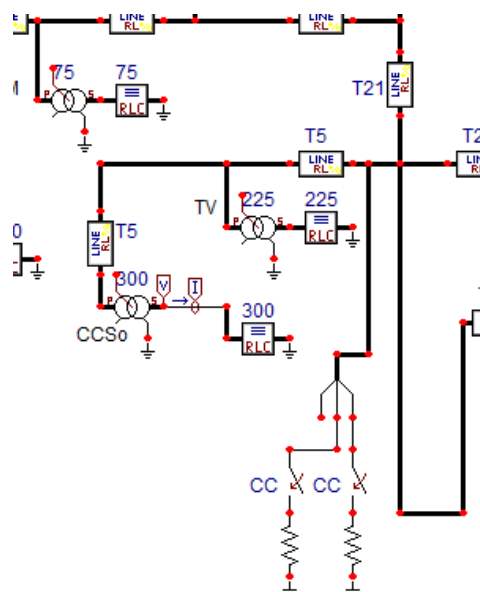


Figura 5.20 - Simulação de uma falta na Fase "A" e "B" para terra no ramal de derivação para duas outras subestações

Tabela 5.5 - Tensões remanescentes Caso 2

Fase	A	B	C
Analizador de Energia (Vpico)	264	35	285
Simulado (Vpico)	242	35	267
Erro absoluto (Vpico)	22	0	18
Erro relativo (%)	9,1%	0%	6,7%

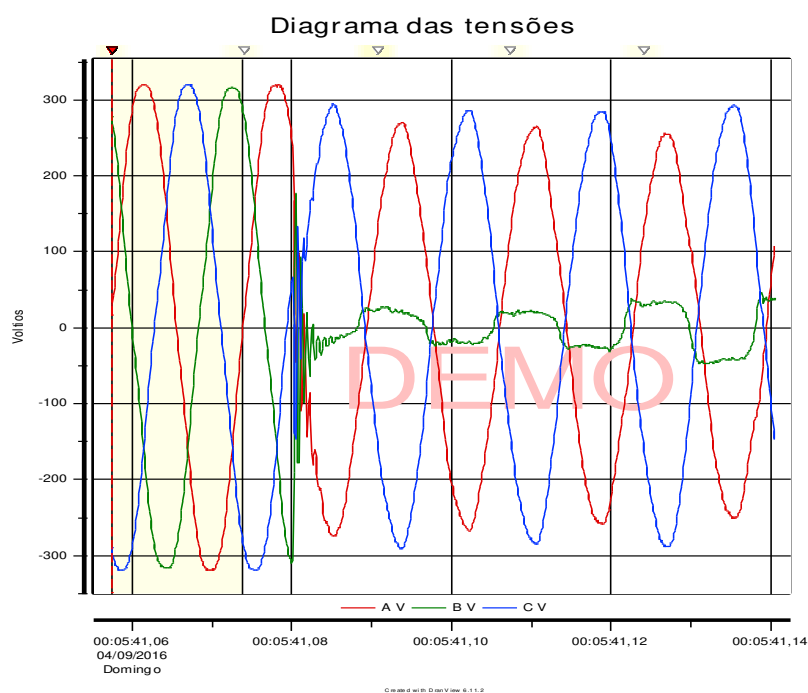


Figura 5.21 - Evento registrado pelo analisador de qualidade de energia



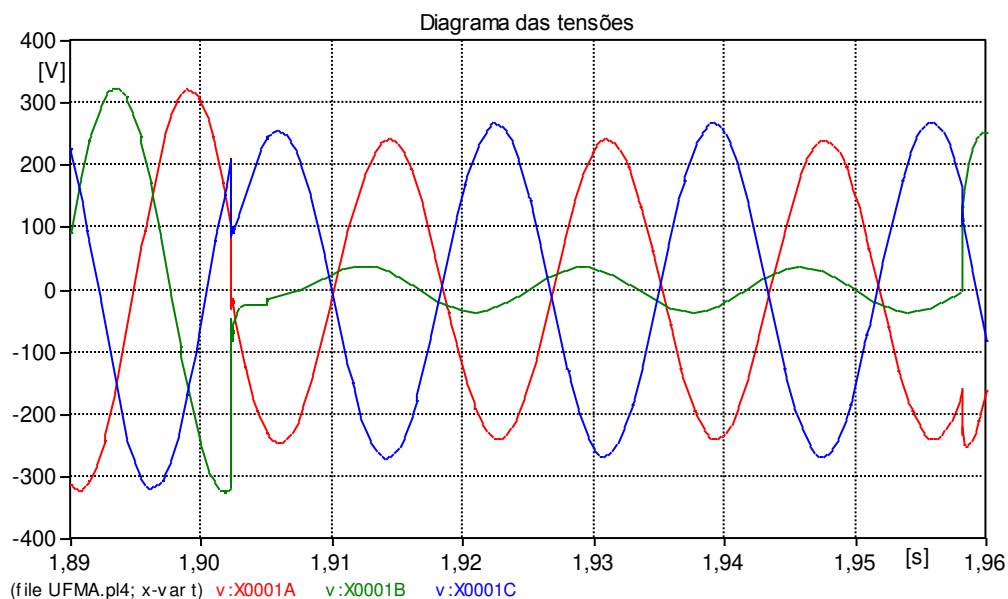


Figura 5.22 - Evento simulado no ATPDraw

Portanto, um modelo confiável simulado no ATPDraw pode ser alcançado quando os parâmetros do sistema e dos transformadores são conhecidos ou podem ser obtidos com precisão razoável, como apresentado nesta dissertação. Os resultados aqui apresentados demonstram a capacidade do modelo de simular os eventos registrados a partir das medições em campo com o intuito de analisar o sistema tanto em regime permanente como em transitório.

Assim, pode-se afirmar que o modelo desenvolvido é um “ponto de partida” para futuros trabalhos de QEE na rede de distribuição investigada com possibilidade de expansão e melhorias para inclusão de geração distribuída, análise da contribuição harmônica gerada por cargas não-lineares, estudo para correção do FP, distúrbios provocados por chaveamentos de bancos capacitores, além de estudo de proteção para futura implantação de uma subestação 69 kV na Cidade Universitária.

## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 6.1 Conclusões

A partir do monitoramento da qualidade de energia no CCET da UFMA, realizado durante um período de seis meses, observou-se que os eventos que mais ocorreram foram os afundamentos de tensão que, apesar de ainda não existir uma solução definitiva para eles - tendo em vista que, na sua maioria, são decorrentes de curtos-circuitos ocasionados por fenômenos naturais - o que pode ser feito é tomar medidas preventivas, como poda de árvores, lavagem e manutenção preventiva de chaves, isoladores e conexões na rede de média e baixa tensão, principalmente antes do início do período de chuvas, e implantação gradativa de rede compacta protegida. Além dessas medidas, outra opção é a instalação de Sistemas de Alimentação Ininterrupta (UPS) que atendam aos tipos de afundamentos e as interrupções momentâneas registradas, suprindo todas as cargas sensíveis, e a conclusão das instalações do Grupo Motor Diesel Gerador da Subestação para os casos de interrupção sustentada.

Para execução do monitoramento utilizou-se o analisador PP4300, que mostrou ser um sistema flexível com extensa capacidade de gerenciamento de dados e relatórios, uso compreensível, embora seja necessário dedicar um tempo considerável para configuração do sistema, de modo que o mesmo seja capaz de disponibilizar as informações dentro dos padrões desejados. A captura dos eventos que ocorreu no sistema elétrico foi feita de forma adequada, possibilitando análises interessantes do ponto de vista da qualidade da energia disponibilizada.

Após o monitoramento e a análise dos dados monitorados, utilizou-se desses dados (Capítulo 5) e outros parâmetros (ver Apêndices E, F e H) para modelagem dos principais componentes do sistema elétrico de média e baixa tensão da Cidade Universitária, utilizando a ferramenta computacional ATPDraw com o intuito de modelar o sistema e analisar tanto em regime permanente - com a finalidade de confrontar o fluxo de corrente registrado pelo analisador de energia com os valores encontrados na simulação do modelo computacional operando em regime permanente no mesmo barramento - como em transitório, simulando eventos registrados pelo analisador de energia.

Portanto, através dos resultados obtidos pelas simulações, pode-se verificar que os diagramas e as grandezas de tensão estão bem próximos aos valores apresentados pelo analisador de energia, demonstrando a capacidade do modelo de simular os eventos registrados a partir das medições em campo com o intuito de analisar o sistema tanto em regime permanente como em transitório.

## **6.2 Trabalhos Futuros**

A elaboração de uma pesquisa mais aprofundada demanda esforço e tempo para se debruçar nas minúcias de cada aspecto aqui apresentado. Deste modo, coloca-se à disposição ideias a serem investigadas mais densamente em trabalhos futuros. Assim, seguem aspectos a serem considerados:

- Análise da contribuição harmônica gerada por cargas não-lineares;
- Estudo para correção do FP;
- Distúrbios provocados por chaveamentos de bancos capacitores;
- Distúrbios provocados por descargas atmosféricas;
- Estudo da coordenação e da seletividade em uma rede de distribuição para futura implantação de uma subestação de 69 kV no Campus Universitário.

## 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] NBR ISO 9000 – **Sistemas de gestão da qualidade** – Fundamentos e vocábulos. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2000.
- [3] DUGAN, R.C.; et al. **Electrical power systems quality**. McGraw-Hill, 2.ed., 2004. 521 p.
- [4] CARVALHO, P.L. **Uma contribuição ao estudo da depressão de tensão**. Dissertação de mestrado. Itajubá, EFEI, 1997.123 p.
- [5] ATPDRAW version 4.0p2, User Manual, TR A4389, EFI, Norway, 2000.
- [6] ANEEL – **Agência Nacional de Energia Elétrica**. (2007). Disponível em:<<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em 20 de março de 2017.
- [7] BRONZEADO, H.S. et al. **Uma proposta de nomenclatura de termos e definições associados à qualidade da energia elétrica**. II Seminário sobre qualidade da energia elétrica – SBQEE, São Lourenço – MG: EFEI, 1997.
- [8] SARAIVA FILHO, F.C.. **Proposta de recuperador dinâmico para correção de afundamentos de tensão**. Dissertação de mestrado – Escola Politécnica Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, 2002.
- [9] CARVALHO FILHO, J. M.; **Qualidade da Energia Elétrica - I: Estudo Dirigido II: Disciplina de Doutorado ECD-97**, Itajubá, 1997.
- [10] TIWARI, R.; KUMAR, D. **Study of power quality disturbance for restructuring of power systems**. International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR), 2 dezembro 2014. 1-4.
- [11] IEEE Std. 1159. **Recommended practice for monitoring electric power quality**. IEEE Transmission and Distribution Committee, 2009. 91 p.
- [12] HEYDT, G. **Electric power quality**. Start in a Circle Publications, West La Fayette, Indiana 1991.
- [13] BHATTACHARYA, K.; BOLLEN, M.; DAALDER, J.E. **Operation of restructured power systems**. Kluwer Academic Publishers. 1. ed. Norwell, v. 1, 2001.
- [14] IEC 61000-2-5:1995 – **Electromagnetic compatibility (EMC)** – Part 2: Environment – Section 5: - Classification of electromagnetic environments. Basic EMC publication.

- [15] ANSI C84.1-1989, **American national standard for electric power systems and equipment** – Voltage Ratings (60 Hz).
- [16] IEEE Std 519-1992, **IEEE Recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems** (ANSI).
- [17] ROSENTINO JUNIOR, A.J.P. ; GONDIM,I.N.; BERNARDES, V.A. **Distúrbios de qualidade de energia elétrica**.IV CEEL,Uberlândia,p.4,Nov.2005.
- [18] IEEE C62.41 - 1991 - **Recommended practice on Surge Voltages in Low-Voltage AC Power Circuits**, USA, 1991.
- [19] IEC 6100-4-30 Ed.2 **Electromagnetic compatibility (EMC)** – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods.
- [20] Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, **Padrões de desempenho da rede básica** - Submódulo 2.8, Procedimentos de Rede, revisão 2, 2015, Brasil.
- [21] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional** – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, Revisão 8, vigente a partir de 01/01/2017.
- [22] BOLLEN, M. H. **Understanding power quality problem: voltage sags and interruptions**. New York: P.M. Anderson Series Editor, IEEE Press Series on Power Engineering, 2000, 541p.
- [23] CARVALHO, A.J.B.; **Análise do comportamento das variações de tensão de curta duração (VTCDs) utilizando comparação entre os programas ATP e ANAFAS**. In: SEMINARIO BRASILEIRO DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA (SBQEE). Código; BEL 11 7689 Topico: Modelagem e Simulação, 6, 2005, Belém, Pará, Brasil.
- [24] IEEE Std. 493: **Recommended practice for the design of reliable industrial and commercial power systems**. New York, 2007.
- [25] Pacific Gas and Electric Company. **Short duration voltage sags can cause disruptions**. PG&E, pp 1-12, Junho 2000.
- [26] Mendes, W. R.; Ribeiro, N. S. S; Samesima,M.I. **Influência das conexões dos transformadores de potência na propagação dos afundamentos de tensão pelo sistema elétrico**. pp 6, 2008.
- [27] LAMORRE, J; MUELLER, D; VINETT, P; and JONES, W. **Voltage Sag Analysis Case Studies**. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 30, n. 4 July/August, 1994, p. 1083-1088.
- [28] WAGNER, V; GREBE, T; KRETSCHMANN, R; MORGAN, L; AL PRICE. **Power system compatibility withn process equipment**. IEEE Industry Application Magazine, Jan/Feb, 1996, p. 11-15.

- [29] CALDON, R.; FAURI, M.; FELLIN, L. **Voltage sag effects on continuous industrial processes**: Desensitizing Study for Textile Manufacture. In D13:1 - D13:6.Study Committee 36 Colloquium and Meetings, Foz do Iguaçu, 1995.
- [30] SARMIENTO, H. G; ESTRADA, E. **A Voltage sag study in an industry with adjustable speed drives**. IEEE Industry Application Magazine, Jan / Feb, 1996, p.16-19.
- [31] CARVALHO FILHO, J. M. **Uma contribuição á avaliação do atendimento a consumidores com cargas sensíveis** – Proposta de Novos Indicadores, Tese de Doutorado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Dezembro de 2000.
- [32] IEEE Std. 446 - **Recommendel practice for emergency and standby Power systemes for industrial and commercial aplications**. IEEE Orange Book, 1995.
- [33] IEEE 1100 - **IEEE Recommended practice for powering and grounding electronic equipment**. 1999.
- [34] IEEE 1250 - **IEEE Guide for service to equipment sensitive to momentary voltage disturbances**.1995.
- [35] IEEE Stand. 1346 - **IEEE Recommended practice for evaluating electric power system compatibility with electronic process equipment**, 1998.
- [36] IEEE P1433. **A Standard glossary of power quality terminology**.
- [37] IEEE Std 1564 - **IEEE Guide for voltage sag indices**, 2014.
- [38] IEC 61000-2-1 (1990) clause 8. **Voltage dips and short supply interruption**.
- [39] IEC 61000-2-4 (2002). **Environment – Compatibility levels in industrial plants for low frequency conducted disturbances**.
- [40] IEC 61000-2-8 (2002). **Environment – Voltage dips and short interruptions on public electric power supply systems with statistical measurements results**.
- [41] IEC 61000-4-11 (2004). **Testing and measuring techniques - voltage dips, Short Interruptions and Voltage Variations Immunity Tests**.
- [42] SEMI F47-0200. **Specification for semiconductor processing equipment voltage sag immunity**.
- [43] SEMI F42-0999. **Test method for semiconductor processing equipment voltage sag immunit**.
- [44] DRANETZ – BMI. **User’s guide-Power Platform 4300**. Rev. B, New Jersey, USA, 2002. Disponível em: <<http://www.dranetz.com/technical-support-request/manuals-guides-references/>>. Acesso em: 8 de março de 2017.

- [45] MC GRANAGHAN, M. MUELLER, D. R. SAMOTYJ, M. J. F. **Voltage sags in industrial systems**. IEEE Transactions on Industry Applications. V. 29, n. 2, Março / Abril, 1993.  
Disponível em:<<http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp> > Acesso em: 8 de março de 2017.
- [46] MILANOVIC, J.V., DESMET, J. J. M., BELMANS, R. **Sensitivity of AC adjustable speed drives to voltage sags and short interruptions**. IEEE Transactions on Industry Applications. v. 20, n. 1, Janeiro, 2005. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp> > Acesso em: 8 de março de 2017.
- [47] DJOKIC, S . Z., MILANOVIC, J. V., KIRSCHEN.D.S. **Sensitivity of AC coil contactors to voltage sags, short interruptions, and Undervoltage transients**. IEEE Transactions on Industry Applications. v. 19, n. 3, Janeiro, 2004. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp> > Acesso em: 8 de março de 2017.
- [48] LEE,G., ALBU,M. M., FELLOW,G. T. **A Power quality index based on equipment sensitivity, Cost, and Network Vulnerability**. IEEE Transactions on Industry Applications. v. 19, n. 3, Janeiro, 2004. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp> > Acesso em: 8 de março de 2017.
- [49] WON, D., AHN, S., CHUNG, I., KIM, J. **A New definition of voltage sag duration considering the voltage tolerance curve**. IEEE Bologna Power Tech Conference. Bolonha, Italia: 2003 Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp> > Acesso em: 8 de março de 2017.
- [50] Alternative Transients Program (ATP): Rule Book, Leuven EMTP Center, 1992.
- [51] Meyer, W. S., EMTP Rule Book, 1st ed. Portland, OR: B.P.A., 1973.
- [52] VELASCO, J . A. M.; ARNEDEO, J . M. **EMTP Modular library for power quality analysis**. Power Tech Budapest 99,Budapeste-Hungria,1999.
- [53] OLIVEIRA, T. C. **Desenvolvimento e aplicação de um sistema de software para estudos de fundamentos de tensão**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá. Outubro, 2004.
- [54] Mc GRANAGHAN, M. F.; MULLER, D. R.; SAMOTYJ, M. J. **Voltage sags in industrial systems**. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 29, n. 2; pp 397 – 402. March, 1993.
- [55] STEVENSON Jr. W. D. **Elementos de Análise de Sistemas de Potência**, 2ª Edição, McGraw-Hill. 1986.
- [56] PRYSMIAN – **Dimensionamento - média tensão**. Disponível em: [http://br.prysmiangroup.com/br/files/dimensionamento\\_mt.pdf](http://br.prysmiangroup.com/br/files/dimensionamento_mt.pdf). Acesso em 20 de maio 2017.
- [57] MAMEDE FILHO, João. **Instalações elétricas industriais**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

[58] MARTINEZ, J. A.; MORK, B. A. **Transformer modeling for low and mid frequency transients** – A review, IEEE Transactions Power Delivery, v. 20, n. 2, Ap. 2005, pp. 1625-1631.

[59] CEPEL – **Especificação de transformadores de distribuição**. Disponível em: <http://servicos.cepel.com.br>. Acesso em 20 de maio 2017.

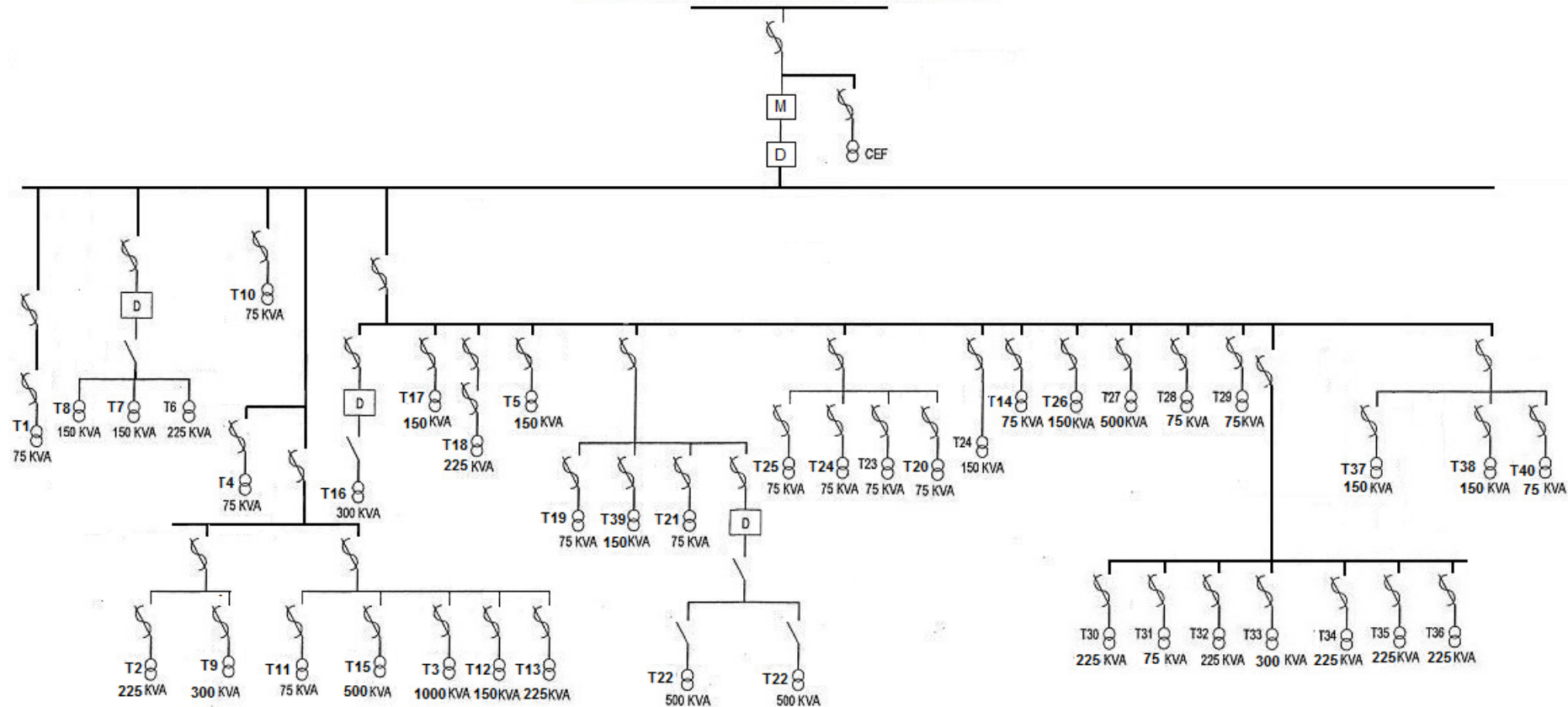
[60] SANTOS, C. G. **A Influência das resistências de terra nos efeitos das descargas atmosféricas**. Dissertação de mestrado, PGEE-UFU, Uberlândia, 2009.

[61] MACHADO, P. V. **Efeitos de transitórios rápidos em transformadores de potência devido a chaveamento de equipamentos de manobra** – Trabalho Conclusão de Curso – UFF – 2010.

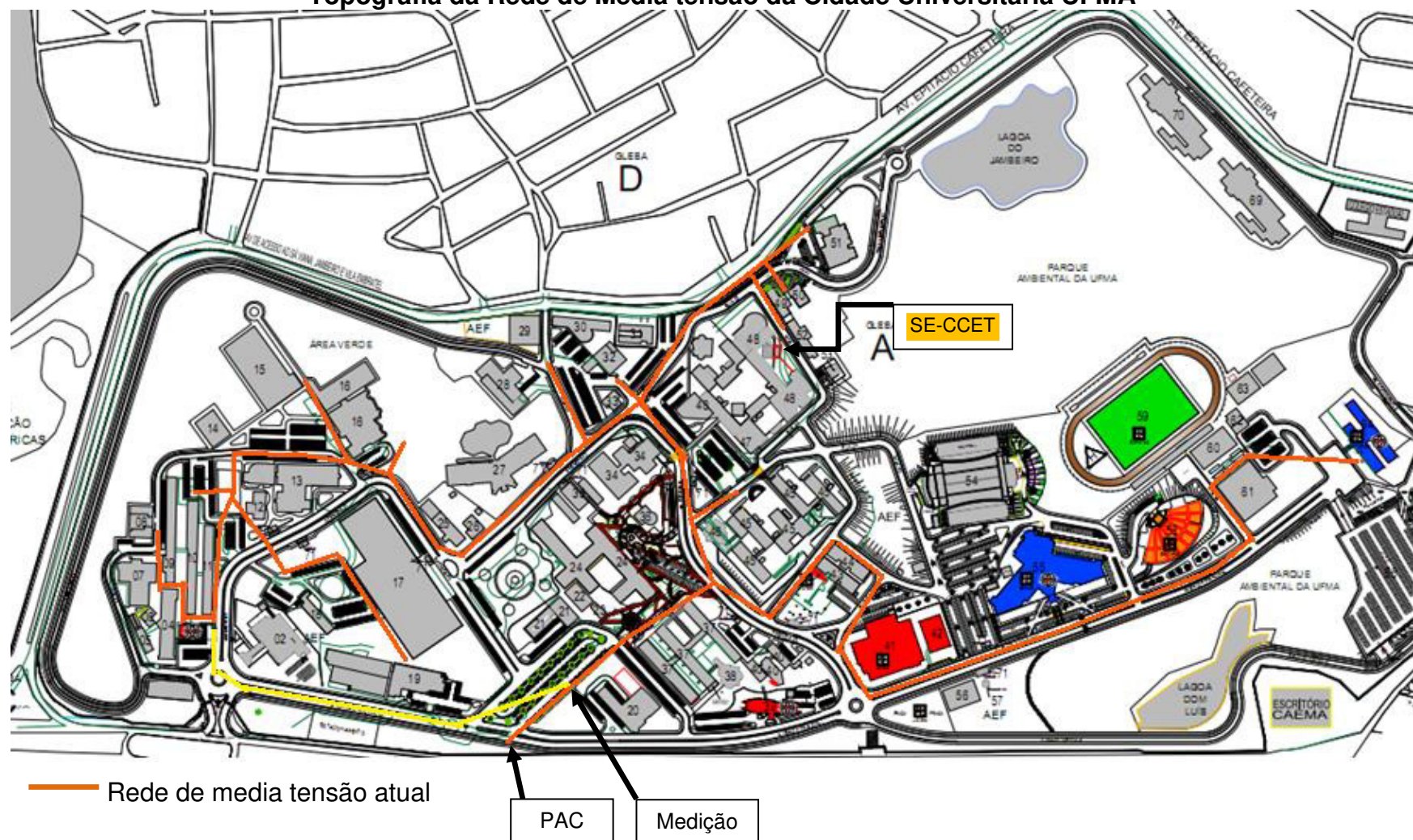


**APÊNDICES**  
**APÊNDICE A**  
**Diagrama Unifilar de media tensão da Cidade Universitária UFMA**

**Alimentador Subestação Anjo da Guarda**



**APÊNDICE B**  
**Topografia da Rede de Media tensão da Cidade Universitária UFMA**

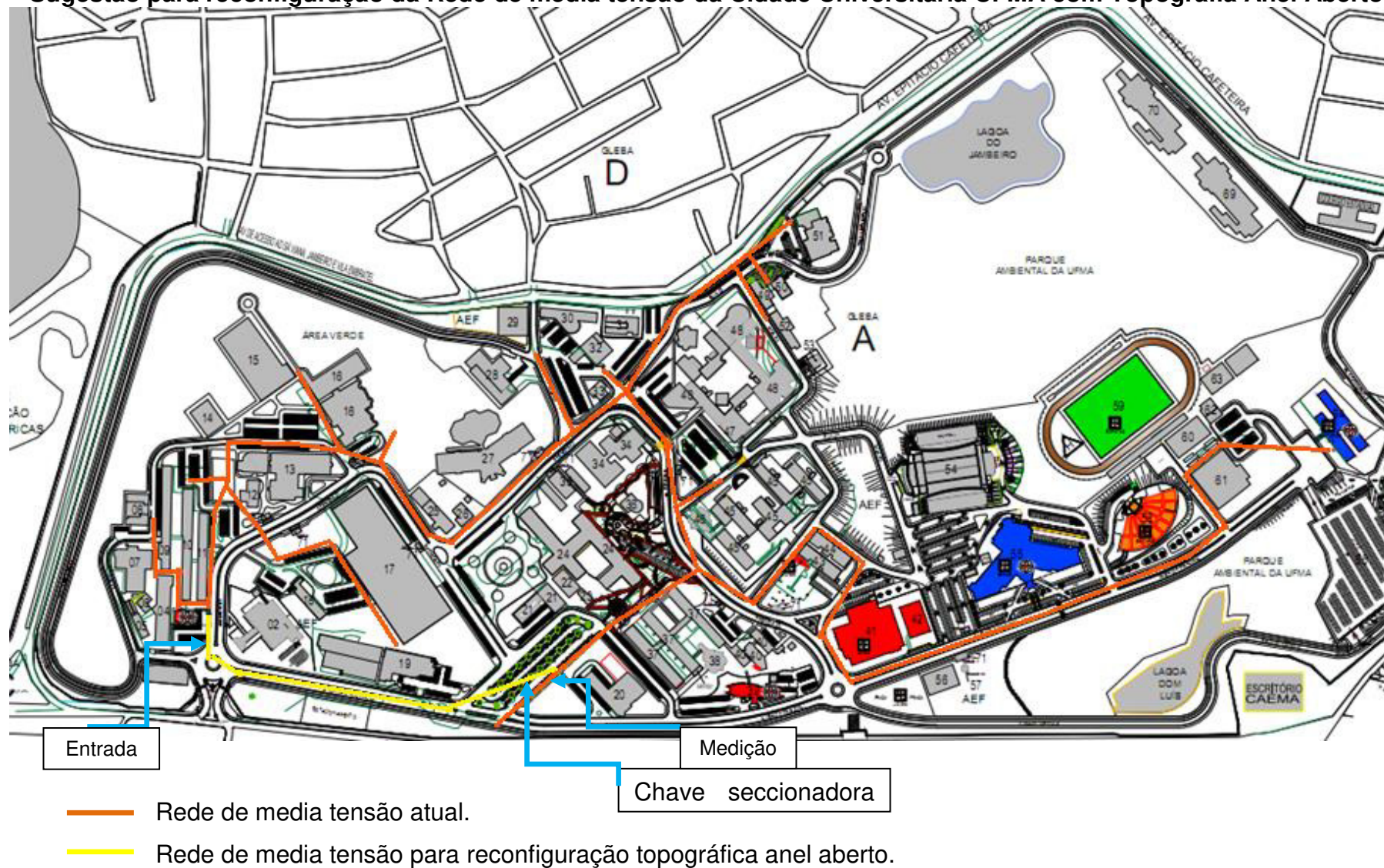


**APÊNDICE C**  
**Subestações da Cidade Universitária UFMA com suas potências e o total instalado**

TRAFO	SUBESTAÇÃO	POT.(kVA)
T1	Anexo PRECAM	75
T2	TV UFMA	225
T3	Centro de Conveniência	1.000
T4	C.Pesquisa CCH CCSO	75
T5	Casa da Justiça	150
T6	NTI	150
T7	NTI	150
T8	NTI	225
T9	CCSO	300
T10	Radio Universitária	75
T11	Colégio Universitário	75
T12	Núcleo de Esporte 1	150
T13	Núcleo de Esporte 2	225
T14	Anexo Pavilhão	75
T15	Paulo Freire	500
T16	CCH	300
T17	Área de Vivência	150
T18	Restaurante Universitário	225
T19	Biblioteca CCET	75
T20	Garagem e Almoarifado	75
T21	IEE	75
T22	CCET	500
T23	Biodiesel	75
T24	Gráfica	75
T25	Casa do Estudante	75
T26	Pavilhão Tecnológico	150
T27	Odontologia	500
T28	Farmácia	75
T29	Biotério	75
T30	CCBS 1	225
T31	CCBS 2	75
T32	Anatomia	225
T33	Biblioteca	300
T34	Área de conveniência CEB velho	225
T35	Pró-reitoras do CEB velho	225
T36	Biologia	150
T37	Labohidro	150
T38	Pós Graduação Medicina	150
T39	Pós Graduação Física	150
T40	Anexo Biologia	75
	Total	7.825

## APÊNDICE D

## Sugestão para reconfiguração da Rede de media tensão da Cidade Universitária UFMA com Topografia Anel Aberto



## APÊNDICE E

### E.1 Cálculo da Impedância de sequência positiva:

Tabela A 1 - Corrente de curto-circuito trifásico no PAC (Fonte: concessionária local)

	Corrente de curto-circuito
Trifásico	1.500,221 $\angle -72,50^\circ$

Curto-circuito trifásico equilibrado  $I_A=I_B=I_C$  (apenas sequência positiva).

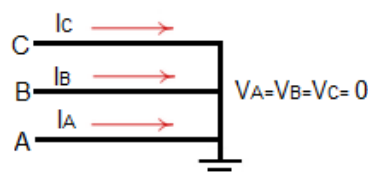


Figura A 1 - Curto-circuito trifásico

$$I_{cc3\phi} = \frac{E}{Z_1}$$

$$Z_1 = \frac{E}{I_{cc3\phi}} = \frac{13.800/\sqrt{3}}{1.500,221 \angle -72,50^\circ}$$

$$Z_1 = 5,3108 \angle 72,50^\circ$$

$$Z_1 = 1,60 + j5,06\Omega$$

$$R_1 = 1,60\Omega$$

$$X_1 = 5,06\Omega$$

$$L_1 = 13,42\text{mH}$$

### E.2 Cálculo da Impedância de sequência zero:

Tabela A 2 - Corrente de curto-circuito fase-terra no PAC (Fonte: concessionária local)

	Corrente de curto-circuito
Fase-terra	728,491 $\angle -79,19^\circ$

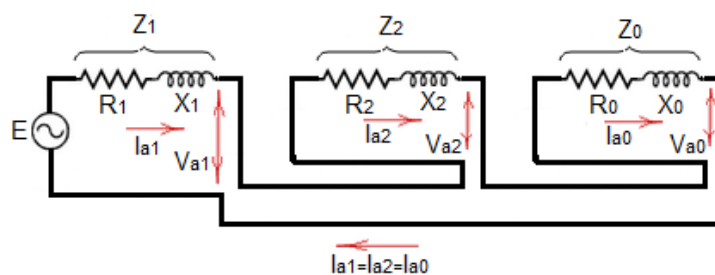


Figura A 2 - Modelos dos diagramas de seqüências

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = \frac{I_{cc1\phi}}{3}$$

$$I_{cc1\phi} = 3 \cdot \left( \frac{E}{Z_0 + 2Z_1} \right) = 3 \cdot \left( \frac{E}{Z_{tot}} \right)$$

$$Z_{tot} = 3 \cdot \left( \frac{E}{I_{cc1\phi}} \right) = 3 \cdot \left( \frac{\frac{13.800}{\sqrt{3}}}{728,491 \angle -79,19^\circ} \right) = 32,811 \angle 79,19^\circ$$

$$Z_0 = Z_{tot} - 2Z_1 = 32,81 \angle 79,19^\circ - 2(5,3108 \angle 72,50^\circ)$$

$$Z_0 = 22,2946 \angle 82,37^\circ$$

$$Z_0 = 2,95 + j22,10 \Omega$$

$$R_0 = 2,95 \Omega$$

$$X_0 = 22,10 \Omega$$

$$L_0 = 58,62 \text{mH}$$

### E.3 Cálculo dos parâmetros da rede de distribuição:

O exemplo abaixo demonstra um dos procedimentos para obter o valor de um determinado trecho da rede elétrica de média tensão:

Tabela A 3 - Características elétricas

Trecho	Condutor	Comprimento(m)	R0(Ω/Km)	X0(Ω/Km)	R+(Ω/Km)	X+(Ω/Km)
T1	3/0-CA	100	0,5587	1,8955	0,3810	0,4323

$$R_+ = 0,3810 \times 0,1 = 0,0381 \Omega$$

$$L_+ = \frac{0,4323 \times 0,1}{0,377} = 0,1147 \text{mH}$$

$$R_0 = 0,5587 \times 0,1 = 0,05587 \Omega$$

$$L_0 = \frac{1,8955 \times 0,1}{0,377} = 0,5028 \text{mH}$$

Para os demais trechos segue-se a mesma sequência de cálculo.

### E.4 Cálculo dos parâmetros dos Transformadores:

Potência Nominal – 500 kVA;

Tensão - 13,8/0,38 kV;

Perdas em vazio – 1.300 W;

Perdas totais – 6.400 W;

Corrente em excitação  $I_0$  - 1,6%;

Impedância de curto-circuito  $Z_{cc}$  - 5,0%;

Conexão –  $\Delta / Y$ .

Com esses dados são realizadas operações matemáticas para a parametrização do modelo [57].

Impedância de base para do lado primário (AT):

$$Z_{b1} = \frac{V^2}{P} \times 3 \Rightarrow Z_{b1} = \frac{13.800^2}{500.000} \times 3 \Rightarrow Z_{b1} = 1.142,64\Omega$$

Impedância de base para do lado secundário (BT):

$$Z_{b2} = \frac{V^2}{P} \Rightarrow Z_{b2} = \frac{380^2}{500.000} \Rightarrow Z_{b2} = 0,2888\Omega$$

Resistência percentual:

$$R_{\%} = \frac{P_{totais}}{S} \times 100 \Rightarrow R_{\%} = \frac{6.400}{500.000} \times 100 \Rightarrow R_{\%} = 1,28\%$$

Impedância (AT):

$$Z_{AT} = \frac{Z_{b1}}{2} \times 5,0\% \Rightarrow Z_{AT} = \frac{1.142,64}{2} \times 5,0\% \Rightarrow Z_{AT} = 28,57\Omega$$

Resistência (AT):

$$R_{AT} = Z_{AT} \times 1,28\% \Rightarrow R_{AT} = 28,57 \times 1,28\% \Rightarrow R_{AT} = 0,366\Omega$$

Reatância (AT):

$$X_{AT} = \sqrt{(Z_{AT})^2 - (R_{AT})^2} \Rightarrow X_{AT} = \sqrt{(28,57)^2 - (0,366)^2} \Rightarrow X_{AT} = 28,56\Omega$$

Indutância (AT):

$$L_{AT} = \frac{X_{AT}}{2\pi f} \times 10^3 \Rightarrow L_{AT} = \frac{28,57}{377} \times 10^3 \Rightarrow L_{AT} = 75,77mH$$

Impedância (BT):

$$Z_{BT} = \frac{Z_{b2}}{2} \times 5,0\% \Rightarrow Z_{BT} = \frac{0,2888}{2} \times 5,0\% \Rightarrow Z_{BT} = 0,0072\Omega$$

Resistência (BT):

$$R_{BT} = Z_{BT} \times 1,28\% \Rightarrow R_{BT} = 0,0072 \times 1,28\% \Rightarrow R_{BT} = 0,000092\Omega$$

Reatância (BT):

$$X_{BT} = \sqrt{(Z_{BT})^2 - (R_{BT})^2} \Rightarrow X_{BT} = \sqrt{(0,0072)^2 - (0,000092)^2} \Rightarrow X_{BT} = 0,0072\Omega$$

Indutância (BT):

$$L_{BT} = \frac{X_{BT}}{2\pi f} \times 10^3 \Rightarrow L_{BT} = \frac{0,0072}{377} \times 10^3 \Rightarrow L_{BT} = 0,0191mH$$

Corrente nominal monofásica:

$$I_{1\phi} = \frac{P_{1\phi}}{V} \Rightarrow I_{1\phi} = \frac{500.000/3}{13.800} \Rightarrow I_{1\phi} = 12,08A$$

Corrente a vazio:

$$I_0 = I_{0\%} \times I_{1\phi} \sqrt{2} \times 1,33 \Rightarrow I_0 = 1,6\% \times 12,08 \times \sqrt{2} \times 1,33 \Rightarrow I_0 = 0,36A$$

Fluxo nominal:

$$\lambda_n = \frac{V}{4,44 \times f} \Rightarrow \lambda_n = \frac{13.800}{4,44 \times 60} \Rightarrow \lambda_n = 51,80Wbest$$

Potência Nominal – 1 MVA;

Tensão - 13,8/0,38kV;

Perdas em vazio – 2.100 W;

Perdas totais – 12.700 W;

Corrente em excitação  $I_0$  - 1,2%;

Impedância de curto-circuito  $Z_{cc}$  - 5,5%;

Conexão –  $\Delta / Y$ .

Com esses dados são realizadas operações matemáticas para a parametrização do modelo [57].

Impedância de base para do lado primário (AT):

$$Z_{b1} = \frac{V^2}{P} \times 3 \Rightarrow Z_{b1} = \frac{13.800^2}{1.000.000} \times 3 \Rightarrow Z_{b1} = 571,32\Omega$$

Impedância de base para do lado secundário (BT):

$$Z_{b2} = \frac{V^2}{P} \Rightarrow Z_{b2} = \frac{380^2}{1.000.000} \Rightarrow Z_{b2} = 0,1444\Omega$$

Resistência percentual:

$$R_{\%} = \frac{P_{\text{totais}}}{S} \times 100 \Rightarrow R_{\%} = \frac{12.700}{1.000.000} \times 100 \Rightarrow R_{\%} = 1,27\%$$

Impedância (AT):

$$Z_{AT} = \frac{Z_{b1}}{2} \times 5,5\% \Rightarrow Z_{AT} = \frac{571,32}{2} \times 5,5\% \Rightarrow Z_{AT} = 15,72\Omega$$

Resistência (AT):

$$R_{AT} = Z_{AT} \times 1,27\% \Rightarrow R_{AT} = 15,72 \times 1,27\% \Rightarrow R_{AT} = 0,20\Omega$$

Reatância (AT):

$$X_{AT} = \sqrt{(Z_{AT})^2 - (R_{AT})^2} \Rightarrow X_{AT} = \sqrt{(15,72)^2 - (0,20)^2} \Rightarrow X_{AT} = 15,71\Omega$$

Indutância (AT):

$$L_{AT} = \frac{X_{AT}}{2\pi f} \times 10^3 \Rightarrow L_{AT} = \frac{15,71}{377} \times 10^3 \Rightarrow L_{AT} = 41,67mH$$



Impedância (BT):

$$Z_{BT} = \frac{Z_{b2}}{2} \times 5,5\% \Rightarrow Z_{BT} = \frac{0,1444}{2} \times 5,5\% \Rightarrow Z_{BT} = 0,0040\Omega$$

Resistência (BT):

$$R_{BT} = Z_{BT} \times 1,27\% \Rightarrow R_{BT} = 0,0040 \times 1,27\% \Rightarrow R_{BT} = 5,04 \times 10^{-5}\Omega$$

Reatância (BT):

$$X_{BT} = \sqrt{(Z_{BT})^2 - (R_{BT})^2} \Rightarrow X_{BT} = \sqrt{(0,0040)^2 - (5,04 \times 10^{-5})^2} \Rightarrow X_{BT} = 0,00397\Omega$$

Indutância (BT):

$$L_{BT} = \frac{X_{BT}}{2\pi f} \times 10^3 \Rightarrow L_{BT} = \frac{0,00397}{377} \times 10^3 \Rightarrow L_{BT} = 0,01053mH$$

Corrente nominal monofásica:

$$I_{1\phi} = \frac{P_{1\phi}}{V} \Rightarrow I_{1\phi} = \frac{1.000.000/3}{13.800} \Rightarrow I_{1\phi} = 24,15A$$

Corrente a vazio:

$$I_0 = I_{0\%} \times I_{1\phi} \sqrt{2} \times 1,33 \Rightarrow I_0 = 1,2\% \times 24,15 \times \sqrt{2} \times 1,33 \Rightarrow I_0 = 0,55A$$

Fluxo nominal:

$$\lambda_n = \frac{V}{4,44 \times f} \Rightarrow \lambda_n = \frac{13.800}{4,44 \times 60} \Rightarrow \lambda_n = 51,80Wbest$$

Potência Nominal – 300 kVA;

Tensão - 13,8/0,38kV;

Perdas em vazio – 950 W;

Perdas totais – 4.310 W;

Corrente em excitação  $I_0$  – 2,2%;

Impedância de curto-circuito  $Z_{cc}$  – 4,5%;

Conexão –  $\Delta / Y$ .

Com esses dados são realizadas operações matemáticas para a parametrização do modelo [57].

Impedância de base para do lado primário (AT):

$$Z_{b1} = \frac{V^2}{P} \times 3 \Rightarrow Z_{b1} = 1.904,40\Omega$$

Impedância de base para do lado secundário (BT):

$$Z_{b2} = \frac{V^2}{P} \Rightarrow Z_{b2} = 0,4813\Omega$$

Resistência percentual:

$$R_{\%} = \frac{P_{totais}}{S} \times 100 \Rightarrow R_{\%} = 1,436\%$$

Impedância (AT):

$$Z_{AT} = \frac{Z_{b1}}{2} \times 4,5\% \Rightarrow Z_{AT} = 42,849\Omega$$

Resistência (AT):

$$R_{AT} = Z_{AT} \times R_{\%} \Rightarrow R_{AT} = 0,62\Omega$$

Reatância (AT):

$$X_{AT} = \sqrt{(Z_{AT})^2 - (R_{AT})^2} \Rightarrow X_{AT} = 42,84\Omega$$

Indutância (AT):

$$L_{AT} = \frac{X_{AT}}{2\pi f} \times 10^3 \Rightarrow L_{AT} = 113,65mH$$

Impedância (BT):

$$Z_{BT} = \frac{Z_{b2}}{2} \times 4,5\% \Rightarrow Z_{BT} = 0,0108\Omega$$

Resistência (BT):

$$R_{BT} = Z_{BT} \times R_{\%} \Rightarrow R_{BT} = 0,000155\Omega$$

Reatância (BT):

$$X_{BT} = \sqrt{(Z_{BT})^2 - (R_{BT})^2} \Rightarrow X_{BT} = 0,010828\Omega$$

Indutância (BT):

$$L_{BT} = \frac{X_{BT}}{2\pi f} \times 10^3 \Rightarrow L_{BT} = 0,0287mH$$

Corrente nominal monofásica:

$$I_{1\phi} = \frac{P_{1\phi}}{V} \Rightarrow I_{1\phi} = \frac{300.000/3}{13.800} \Rightarrow I_{1\phi} = 7,25A$$

Corrente a vazio:

$$I_0 = I_{0\%} \times I_{1\phi} \sqrt{2} \times 1,33 \Rightarrow I_0 = 0,30A$$

Fluxo nominal:

$$\lambda_n = \frac{V}{4,44 \times f} \Rightarrow \lambda_n = \frac{13.800}{4,44 \times 60} \Rightarrow \lambda_n = 51,80Wbest$$

Potência Nominal – 225 kVA;

Tensão - 13,8/0,38kV;

Perdas em vazio – 765 W;

Perdas totais – 3.465 W;

Corrente em excitação  $I_0$  – 2,3%;

Impedância de curto-circuito  $Z_{cc}$  – 4,5%;

Conexão –  $\Delta / Y$ .

Com esses dados são realizadas operações matemáticas para a parametrização do modelo [57].

Impedância de base para do lado primário (AT):

$$Z_{b1} = \frac{V^2}{P} \times 3 \Rightarrow Z_{b1} = 2.539,20\Omega$$

Impedância de base para do lado secundário (BT):

$$Z_{b2} = \frac{V^2}{P} \Rightarrow Z_{b2} = 0,6417\Omega$$

Resistência percentual:

$$R_{\%} = \frac{P_{totais}}{S} \times 100 \Rightarrow R_{\%} = 1,54\%$$

Impedância (AT):

$$Z_{AT} = \frac{Z_{b1}}{2} \times 4,5\% \Rightarrow Z_{AT} = 57,132\Omega$$

Resistência (AT):

$$R_{AT} = Z_{AT} \times R_{\%} \Rightarrow R_{AT} = 0,88\Omega$$

Reatância (AT):

$$X_{AT} = \sqrt{(Z_{AT})^2 - (R_{AT})^2} \Rightarrow X_{AT} = 57,13\Omega$$

Indutância (AT):

$$L_{AT} = \frac{X_{AT}}{2\pi f} \times 10^3 \Rightarrow L_{AT} = 151,53mH$$

Impedância (BT):

$$Z_{BT} = \frac{Z_{b2}}{2} \times 4,5\% \Rightarrow Z_{BT} = 0,0144\Omega$$

Resistência (BT):

$$R_{BT} = Z_{BT} \times R_{\%} \Rightarrow R_{BT} = 0,000222\Omega$$

Reatância (BT):

$$X_{BT} = \sqrt{(Z_{BT})^2 - (R_{BT})^2} \Rightarrow X_{BT} = 0,0144\Omega$$

Indutância (BT):

$$L_{BT} = \frac{X_{BT}}{2\pi f} \times 10^3 \Rightarrow L_{BT} = 0,03829mH$$

Corrente nominal monofásica:

$$I_{1\phi} = \frac{P_{1\phi}}{V} \Rightarrow I_{1\phi} = \frac{225.000/3}{13.800} \Rightarrow I_{1\phi} = 5,43A$$

Corrente a vazio:

$$I_0 = I_{0\%} \times I_{1\phi} \sqrt{2} \times 1,33 \Rightarrow I_0 = 0,24A$$

Fluxo nominal:

$$\lambda_n = \frac{V}{4,44 \times f} \Rightarrow \lambda_n = \frac{13.800}{4,44 \times 60} \Rightarrow \lambda_n = 51,80Wbest$$

Potência Nominal – 150 kVA;

Tensão - 13,8/0,38kV;

Perdas em vazio – 540 W;

Perdas totais – 2.450 W;

Corrente em excitação  $I_0$  – 2,6%;

Impedância de curto-circuito  $Z_{cc}$  – 4,5%;

Conexão –  $\Delta / Y$ .

Com esses dados são realizadas operações matemáticas para a parametrização do modelo [57].

Impedância de base para do lado primário (AT):

$$Z_{b1} = \frac{V^2}{P} \times 3 \Rightarrow Z_{b1} = 3.808,80\Omega$$

Impedância de base para do lado secundário (BT):

$$Z_{b2} = \frac{V^2}{P} \Rightarrow Z_{b2} = 0,96267\Omega$$

Resistência percentual:

$$R_{\%} = \frac{P_{totais}}{S} \times 100 \Rightarrow R_{\%} = 1,633\%$$

Impedância (AT):

$$Z_{AT} = \frac{Z_{b1}}{2} \times 4,5\% \Rightarrow Z_{AT} = 85,698\Omega$$

Resistência (AT):

$$R_{AT} = Z_{AT} \times R_{\%} \Rightarrow R_{AT} = 1,40\Omega$$

Reatância (AT):

$$X_{AT} = \sqrt{(Z_{AT})^2 - (R_{AT})^2} \Rightarrow X_{AT} = 85,69\Omega$$

Indutância (AT):

$$L_{AT} = \frac{X_{AT}}{2\pi f} \times 10^3 \Rightarrow L_{AT} = 227,29mH$$

Impedância (BT):

$$Z_{BT} = \frac{Z_{b2}}{2} \times 4,5\% \Rightarrow Z_{BT} = 0,0217\Omega$$

Resistência (BT):

$$R_{BT} = Z_{BT} \times R_{\%} \Rightarrow R_{BT} = 0,0003538\Omega$$

Reatância (BT):

$$X_{BT} = \sqrt{(Z_{BT})^2 - (R_{BT})^2} \Rightarrow X_{BT} = 0,02165\Omega$$

Indutância (BT):

$$L_{BT} = \frac{X_{BT}}{2\pi f} \times 10^3 \Rightarrow L_{BT} = 0,05744mH$$

Corrente nominal monofásica:

$$I_{1\phi} = \frac{P_{1\phi}}{V} \Rightarrow I_{1\phi} = \frac{150.000/3}{13.800} \Rightarrow I_{1\phi} = 3,62A$$

Corrente a vazio:

$$I_0 = I_{0\%} \times I_{1\phi} \sqrt{2} \times 1,33 \Rightarrow I_0 = 0,18A$$

Fluxo nominal:

$$\lambda_n = \frac{V}{4,44 \times f} \Rightarrow \lambda_n = \frac{13.800}{4,44 \times 60} \Rightarrow \lambda_n = 51,80Wbest$$

Potência Nominal – 75 kVA;

Tensão - 13,8/0,38kV;

Perdas em vazio – 330 W;

Perdas totais – 1.470 W;

Corrente em excitação  $I_0$  – 3,1%;

Impedância de curto-circuito  $Z_{cc}$  – 3,5%;

Conexão –  $\Delta / Y$ .

Com esses dados são realizadas operações matemáticas para a parametrização do modelo [57].

Impedância de base para do lado primário (AT):

$$Z_{b1} = \frac{V^2}{P} \times 3 \Rightarrow Z_{b1} = 7.617,60\Omega$$

Impedância de base para do lado secundário (BT):

$$Z_{b2} = \frac{V^2}{P} \Rightarrow Z_{b2} = 1,92533\Omega$$

Resistência percentual:

$$R_{\%} = \frac{P_{totais}}{S} \times 100 \Rightarrow R_{\%} = 1,96\%$$

Impedância (AT):

$$Z_{AT} = \frac{Z_{b1}}{2} \times 3,5\% \Rightarrow Z_{AT} = 133,308\Omega$$

Resistência (AT):

$$R_{AT} = Z_{AT} \times R_{\%} \Rightarrow R_{AT} = 2,61\Omega$$

Reatância (AT):

$$X_{AT} = \sqrt{(Z_{AT})^2 - (R_{AT})^2} \Rightarrow X_{AT} = 133,28\Omega$$

Indutância (AT):

$$L_{AT} = \frac{X_{AT}}{2\pi f} \times 10^3 \Rightarrow L_{AT} = 353,53mH$$

Impedância (BT):

$$Z_{BT} = \frac{Z_{b2}}{2} \times 3,5\% \Rightarrow Z_{BT} = 0,0337\Omega$$

Resistência (BT):

$$R_{BT} = Z_{BT} \times R_{\%} \Rightarrow R_{BT} = 0,0006603\Omega$$

Reatância (BT):

$$X_{BT} = \sqrt{(Z_{BT})^2 - (R_{BT})^2} \Rightarrow X_{BT} = 0,03368\Omega$$

Indutância (BT):

$$L_{BT} = \frac{X_{BT}}{2\pi f} \times 10^3 \Rightarrow L_{BT} = 0,08935mH$$

Corrente nominal monofásica:

$$I_{1\phi} = \frac{P_{1\phi}}{V} \Rightarrow I_{1\phi} = \frac{75.000/3}{13.800} \Rightarrow I_{1\phi} = 1,81A$$

Corrente a vazio:

$$I_0 = I_{0\%} \times I_{1\phi} \sqrt{2} \times 1,33 \Rightarrow I_0 = 0,11A$$

Fluxo nominal:

$$\lambda_n = \frac{V}{4,44 \times f} \Rightarrow \lambda_n = \frac{13.800}{4,44 \times 60} \Rightarrow \lambda_n = 51,80Wbest$$

**E.5 Cálculo dos parâmetros da carga no barramento secundário do Transformador da subestação do CCET em operação normal de pré falta no dia 6 de outubro de 2016 as 13h21min:**

$$R = P \times \frac{V^2}{P^2 + Q^2}$$

$$X = Q \times \frac{V^2}{P^2 + Q^2}$$

Onde:

R - resistência da carga;

X - reatância da carga;

P - potência ativa;

Q - potência reativa.

Tabela A 4 - Grandezas elétricas por fase

	A	B	C
V	219,7	218,1	216,4
P	122.700	110.900	131.400
Q	20.960	16.110	17.390

$$R_A = 122700 \times \frac{219,7^2}{122.700^2 + 20.960^2} \Rightarrow R_A = 0,382 \Omega$$

$$X_A = 20960 \times \frac{219,7^2}{122.700^2 + 20.960^2} \Rightarrow X_A = 0,065 \Omega$$

$$R_B = 110900 \times \frac{218,1^2}{110.900^2 + 16.110^2} \Rightarrow R_B = 0,420 \Omega$$

$$X_B = 16110 \times \frac{218,1^2}{110.900^2 + 16.110^2} \Rightarrow X_B = 0,061 \Omega$$

$$R_C = 131400 \times \frac{216,4^2}{131.400^2 + 17.390^2} \Rightarrow R_C = 0,350 \Omega$$

$$X_C = 17390 \times \frac{216,4^2}{131.400^2 + 17.390^2} \Rightarrow X_C = 0,046 \Omega$$

## APÊNDICE F

Impedâncias de sequência positiva e zero da rede de média e baixa tensão.

T1	100m			
Cabos MT	R+(ohms)	L+(ohms)	Ro(ohms)	Lo(ohms)
3/0-CA	0,0381	0,0432	0,0559	0,1896
L(mH)		0,1147		0,5028
T2	50m			
Cabos MT	R+(ohms)	L+(ohms)	Ro(ohms)	Lo(ohms)
3/0-CA	0,0191	0,0216	0,0279	0,0948
L(mH)		0,0573		0,2514
T3	35m			
Cabos MT	R+(ohms)	L+(ohms)	Ro(ohms)	Lo(ohms)
3/0-CA	0,0133	0,0151	0,0196	0,0663
L(mH)		0,0401		0,1760
T4	150m			
Cabos MT	R+(ohms)	L+(ohms)	Ro(ohms)	Lo(ohms)
3/0-CA	0,0572	0,0648	0,0838	0,2843
L(mH)		0,1720		0,7542
T5	70m			
Cabos MT	R+(ohms)	L+(ohms)	Ro(ohms)	Lo(ohms)
3/0-CA	0,0267	0,0303	0,0391	0,1327
L(mH)		0,0803		0,3519
T6	170m			
Cabos MT	R+(ohms)	L+(ohms)	Ro(ohms)	Lo(ohms)
3/0-CA	0,0648	0,0735	0,0950	0,3222
L(mH)		0,1949		0,8547
T7	190m			
Cabos MT	R+(ohms)	L+(ohms)	Ro(ohms)	Lo(ohms)
3/0-CA	0,0724	0,0821	0,1062	0,3601
L(mH)		0,2179		0,9553
T8	110m			
Cabos MT	R+(ohms)	L+(ohms)	Ro(ohms)	Lo(ohms)
3/0-CA	0,0419	0,0476	0,0615	0,2085
L(mH)		0,1261		0,5531
T9	80m			
Cabos MT	R+(ohms)	L+(ohms)	Ro(ohms)	Lo(ohms)
3/0-CA	0,0305	0,0346	0,0447	0,1516
L(mH)		0,0917		0,4022
T10	24m			
Cabos MT	R+(ohms)	L+(ohms)	Ro(ohms)	Lo(ohms)
3/0-CA	0,0091	0,0104	0,0134	0,0455
L(mH)		0,0275		0,1207
T11	38m			
Cabos MT	R+(ohms)	L+(ohms)	Ro(ohms)	Lo(ohms)



3/0-CA	0,0145	0,0164	0,0212	0,0720
L(mH)		0,0436		0,1911
T12	135m			
Cabos MT	R+(ohms)	L+(ohms)	Ro(ohms)	Lo(ohms)
3/0-CA	0,0514	0,0584	0,0754	0,2559
L(mH)		0,1548		0,6788
T13	60m			
Cabos MT	R+(ohms)	L+(ohms)	Ro(ohms)	Lo(ohms)
3/0-CA	0,0229	0,0259	0,0335	0,1137
L(mH)		0,0688		0,3017
T14	203m			
Cabos MT	R+(ohms)	L+(ohms)	Ro(ohms)	Lo(ohms)
3/0-CA	0,0773	0,0878	0,1134	0,3848
L(mH)		0,2328		1,0207
T15	96m			
Cabos MT	R+(ohms)	L+(ohms)	Ro(ohms)	Lo(ohms)
3/0-CA	0,0366	0,0415	0,0536	0,1820
L(mH)		0,1101		0,4827
T16	75m			
Cabos MT	R+(ohms)	L+(ohms)	Ro(ohms)	Lo(ohms)
3/0-CA	0,0286	0,0324	0,0419	0,1422
L(mH)		0,0860		0,3771
T17	32m			
Cabos MT	R+(ohms)	L+(ohms)	Ro(ohms)	Lo(ohms)
3/0-CA	0,0122	0,0138	0,0179	0,0607
L(mH)		0,0367		0,1609
T18	54m			
Cabos MT	R+(ohms)	L+(ohms)	Ro(ohms)	Lo(ohms)
3/0-CA	0,0206	0,0233	0,0302	0,1024
L(mH)		0,0619		0,2715
T19	65m			
Cabos MT	R+(ohms)	L+(ohms)	Ro(ohms)	Lo(ohms)
3/0-CA	0,0248	0,0281	0,0363	0,1232
L(mH)		0,0745		0,3268
T20	85m			
Cabos MT	R+(ohms)	L+(ohms)	Ro(ohms)	Lo(ohms)
3/0-CA	0,0324	0,0367	0,0475	0,1611
L(mH)		0,0975		0,4274
T21	245m			
Cabos MT	R+(ohms)	L+(ohms)	Ro(ohms)	Lo(ohms)
3/0-CA	0,0933	0,1059	0,1369	0,4644
L(mH)		0,2809		1,2318
T22	45m			
Cabos MT	R+(ohms)	L+(ohms)	Ro(ohms)	Lo(ohms)
3/0-CA	0,0171	0,0195	0,0251	0,0853

L(mH)		0,0516		0,2263
T23	162m			
Cabos MT	R+(ohms)	L+(ohms)	Ro(ohms)	Lo(ohms)
3/0-CA	0,0617	0,0700	0,0905	0,3071
L(mH)		0,1858		0,8145
T24	56m			
Cabos MT	R+(ohms)	L+(ohms)	Ro(ohms)	Lo(ohms)
3/0-CA	0,0213	0,0242	0,0313	0,1061
L(mH)		0,0642		0,2816
T25	328m			
Cabos MT	R+(ohms)	L+(ohms)	Ro(ohms)	Lo(ohms)
3/0-CA	0,1250	0,1418	0,1833	0,6217
L(mH)		0,3761		1,6491
T26	143m			
Cabos MT	R+(ohms)	L+(ohms)	Ro(ohms)	Lo(ohms)
3/0-CA	0,0545	0,0618	0,0799	0,2711
L(mH)		0,1640		0,7190

## APÊNDICE G

Linhas de declarações estruturadas na linguagem MODELS do ATP para a modelagem do Medidor rms.

```

C data:UFMA.ATP
BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW maio, quarta 24, 2017
C A Bonneville Power Administration program
C Programmed by H. K. Høidalen at SEfAS - NORWAY 1994-2003
C -----
POWER FREQUENCY          60.
C dT >< Tmax >< Xopt >< Copt >
  1.E-6  2.
    500  1  1  1  1  0  0  1  0
MODELS
INPUT
MM0001 {v(XX0260)}
MM0002 {i(XX0260)}
MODEL medidor
  COMMENT -- comentários
  Medidor monofásico de tensão e corrente rms; potência ativa; potência
  aparente e fator de potência.
  ENDCOMMENT
  INPUT      -- grandezas de entrada
  v         -- Tensão no nó no qual o medidor está conectado (fase terra ATP) [V]
  i         -- corrente no nó ( este nó deve pertencer a uma chave) [A].
  -- OUTPUT -- Grandezas de saída para serem utilizadas na rede do ATP
  DATA -- dados de entrada
    freq {DFLT: 60}
  -- CONST -- constantes utilizadas no modelo
  VAR
    S      -- potência aparente [VA];
    P      -- potência ativa [W];
    Q      -- potência reativa [VAr];
    vrms   --valor rms da tensão [V];
    irms   --valor rms da corrente [A];
    fp     -- fato de potência ;
    v2     -- valor instantâneo da tensão ao quadrado;
    i2     -- valor instantâneo da corrente ao quadrado;
    vi     -- potência aparente instatânea (v*i);
    iv2    -- integral de v2;
    ii2    -- integral de i2;
    ivi    -- integral de vi;
  --      Pmed -- potência ativa média [W];
    period -- periodo da onda de tensão [s];
TIMESTEP MIN: 1e-5
DELAY
  CELLS(iv2):1/freq/timestep +1
  CELLS(ii2):1/freq/timestep +1

```

```

        CELLS(ivi):1/freq/timestep +1
-- FUNCTION -- funções utilizadas no modelo
-- HISTORY -- histórico das variáveis
INIT -- condições iniciais das variáveis;
    S:=0
    P:=0
    Q:=0
    fp:=0
    integral(v2):=0
    integral(i2):=0
    integral(vi):=0
    histdef(iv2):=0
    histdef(ii2):=0
    histdef(ivi):=0
    histdef(integral(v2)):=0
    histdef(integral(i2)):=0
    histdef(integral(vi)):=0
    period:=recip(freq)
ENDINIT
EXEC
    -- *****
    -- Cálculos iniciais
    -- *****

v2:=v*v
i2:=i*i
vi:=v*i
iv2:=integral(v2)
ii2:=integral(i2)
ivi:=integral(vi)
    -- *****
    -- Valor rms da tensão e corrente
    -- *****
vrms:=sqrt((iv2-delay(iv2,period))/period)
irms:=sqrt((ii2-delay(ii2,period))/period)
    -- *****
    -- Potência aparente
    -- *****
S:=vrms*irms
    -- *****
    -- Potência Ativa
    -- *****
P:=(ivi-delay(ivi,period))/period
if P <= 0. then
    P:=0.
ENDIF
if P >= S then
    P:=S
ENDIF
    -- *****
    -- Potência Reativa

```

```
-- *****  
Q:= sqrt(S**2 - P**2)  
-- *****  
-- Fator de Potência  
-- *****  
fp:=P/S  
ENDEXEC  
ENDMODEL  
RECORD  
    medidor.S as S  
    medidor.p as P  
    medidor.Q as Q  
    medidor.fp as fp  
    medidor.vrms as vrms  
    medidor.irms as irms  
USE medidor AS medidor  
INPUT  
    v:= MM0001  
    i:= MM0002  
DATA  
    freq:= 60.  
ENDUSE  
ENDMODELS
```

## APÊNDICE H

Parâmetros dos transformadores utilizados no sistema elétrico inseridos no modelo do ATPDraw.

Trafo – 75kVA	Primário	Secundário
U(V)	13.800	220*
R(ohm)	2,61	0,000660389
L(mH)	353,53	0,08935507

$$I(0) = 0,11A$$

$$F(0) = 51,80 \text{ Wbesp}$$

Trafo – 112,5kVA	Primário	Secundário
U(V)	13.800	220*
R(ohm)	1,57	0,0003973
L(mH)	235,70	0,05957217

$$I(0) = 0,14A$$

$$F(0) = 51,80 \text{ Wbesp}$$

Trafo – 150kVA	Primário	Secundário
U(V)	13.800	220*
R(ohm)	1,40	0,0003538
L(mH)	227,29	0,05744592

$$I(0) = 0,18A$$

$$F(0) = 51,80 \text{ Wbesp}$$

Trafo – 225kVA	Primário	Secundário
U(V)	13.800	220*
R(ohm)	0,88	0,000222376
L(mH)	151,53	0,03829785

$$I(0) = 0,24A$$

$$F(0) = 51,80 \text{ Wbesp}$$

Trafo – 300kVA	Primário	Secundário
U(V)	13.800	220*
R(ohm)	0,62	0,0001556
L(mH)	113,65	0,02872383

$$I(0) = 0,30A$$

$$F(0) = 51,80 \text{ Wbesp}$$

Trafo – 500kVA	Primário	Secundário
U(V)	13.800	220*
R(ohm)	0,366	0,00009241
L(mH)	75,77	0,01914962

$$I(0) = 0,20A$$

$$F(0) = 51,80 \text{ Wbesp}$$

Trafo – 1MVA	Primário	Secundário
U(V)	13.800	220*
R(ohm)	0,20	5,04317E-05
L(mH)	41,67	0,01053231

$$I(0) = 0,55A$$

$$F(0) = 51,80 \text{ Wbesp}$$

\* - Tensão fase-neutro