

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**



**INFLUÊNCIA DAS CONEXÕES DOS
TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA NA PROPAGAÇÃO
DOS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO PELO SISTEMA
ELÉTRICO**

WILLIANS RIBEIRO MENDES

Uberlândia, 01 de agosto de 2008

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**INFLUÊNCIA DAS CONEXÕES DOS TRANSFORMADORES DE
POTÊNCIA NA PROPAGAÇÃO DOS AFUNDAMENTOS DE
TENSÃO PELO SISTEMA ELÉTRICO**

Dissertação apresentada por Willians Ribeiro Mendes
à Universidade Federal de Uberlândia para a
obtenção do título de Mestre em Ciências.

Banca Examinadora:

Prof. Milton Itsuo Samesima, Dr. - UFU (Orientador)
Prof. José Carlos de Oliveira, Ph.D. - UFU.
Prof. Dalgerti Lélis Milanese, PhD. – UNESP.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

M538i Mendes, Willians Ribeiro, 1981 –
Influência das conexões dos transformadores de potência na
propagação dos afundamentos de tensão pelo sistema elétrico / Willians
Ribeiro Mendes. - 2008.
152 f.: il.

Orientador: Milton Itsuo Samesima.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
Inclui bibliografia.

1. Energia elétrica - Qualidade - Teses. I. Samesima, Milton Itsuo. II.
Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.311

**INFLUÊNCIA DAS CONEXÕES DOS TRANSFORMADORES DE
POTÊNCIA NA PROPAGAÇÃO DOS AFUNDAMENTOS DE
TENSÃO PELO SISTEMA ELÉTRICO**

Dissertação apresentada por Willians Ribeiro Mendes à
Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do
título de Mestre em Ciências.

Prof. Milton Itsuo Samesima, Dr.
Orientador

Prof. Darizon Alves de Andrade, Ph.D.
Coordenador do Curso de Pós-Graduação

Aos meus pais, Luiz Carlos e Rosa, alicerces da minha vida e aos meus irmãos, Wellington e Juliana por me apoiarem e incentivarem. Por estes terem sido fontes de força e inspiração fundamentais para o cumprimento de mais esta etapa de minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e pela realização de mais um sonho.

Ao professor Milton Itsuo Samesima, pela valiosa orientação, que com incansável dedicação e apoio, contribuiu de forma definitiva para a realização deste trabalho.

Aos meus pais e aos meus irmãos, meus maiores incentivadores.

Aos amigos Fabrício Augusto, Rogério Pinto e Alexandre Mendes, pelo apoio e auxílio, sem os quais não seria possível a realização deste trabalho.

Aos amigos, em especial, a Loana, Nilo Sergio, João Salve, Elise Saraiva e Alan pelo apoio e companheirismo.

Aos amigos, irmãos de luta e de pensão; André, Felipe, Klerisson, Leandro, Ideo e Sebastião, pela força e incentivo nas horas de desânimo.

Aos professores, Jose Antonio Lambert e Mario Kioshi Kawaphara, da Universidade Federal de Mato Grosso - UFMT, pelas recomendações para o ingresso no programa de pós-graduação da UFU.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da UFU, professores e colegas da pós-graduação, pelo auxílio, esclarecimentos e amizade.

Ao CAPES pelo apoio financeiro durante todo o período do mestrado.

RESUMO

Este trabalho propõe verificar a influência dos tipos de conexões dos transformadores na propagação dos afundamentos de tensão em um sistema elétrico. Com o intuito de se analisar o fenômeno, foi modelado no ATP - Alternative Transient Program, através de formulações matemáticas baseando-se nas teorias de circuitos trifásicos equilibrados e desequilibrados um sistema elétrico e uma fonte geradora de afundamentos de tensão, com a qual é possível gerar qualquer tipo de afundamento através das variações da magnitude e ângulo de fase.

A influência das conexões dos enrolamentos dos transformadores na propagação dos afundamentos de tensão pode ser observada quando os afundamentos contêm componentes de sequência zero e as conexões do transformador bloqueiam o fluxo da referida seqüência. Em alguns afundamentos de tensão, as componentes de seqüência zero não são envolvidas, e nesses casos, a influência pode ser observada em consequência dos transformadores que introduzem defasamento angular. Finalmente, a influência pode ocorrer também devido a combinação desses dois tipos de transformadores respectivamente.

Assim, a propagação dos afundamentos de tensão através dos mais diferenciados tipos de conexões dos transformadores resultam em afundamentos com características completamente diferentes daqueles que os originaram.

Palavras-Chave: Afundamentos de tensão, conexões de transformadores, qualidade da energia, propagação de afundamentos de tensão.

ABSTRACT

The purpose of this work is to analyze the influence of all types of connections transformers on the propagation of voltage sags on electrical system. For analyzes the phenomenon, it was modeled on the ATP - Alternative Transient Program - a standard IEEE 14-bus system and a sags generator, which is able to generate any kind of voltage sag with any variations of the magnitude and phase angle.

The influence of transformers winding connection in the propagation of voltage sags can be observed when the disturbance contains zero-sequence components and the winding connection block the flow of this sequence. In some voltage sags, the quantities of zero sequence components are not involved because the origin of the short circuits does not involve the ground. In these cases, the influence can be expected in consequence of phase shift introduced by some transformers. Finally, the influence can also occur due to the combination of these two types of transformers respectively

Voltage sags propagation through the most differentiated kinds of transformers connections result in sags with very different characteristics from those that originated them.

Key Words, *Power quality, propagation of voltage sags, transformers winding, voltage sag, voltage sags.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	– Custos envolvidos para cada nível de mitigação das VTCDs.....	19
Figura 2.2	– Afundamento de tensão de 60% da tensão nominal com a duração de 80ms.....	21
Figura 2.3	– Afundamentos com diferentes características provocados por uma falta em um ponto do sistema.....	26
Figura 2.4	– Definição de intensidade e duração de um afundamento de tensão.....	27
Figura 2.5	– Principais causas para ocorrência de faltas em um sistema de distribuição.....	33
Figura 2.6	– Aplicação do método divisor de tensão.....	34
Figura 2.7	– Área de vulnerabilidade definida para uma carga.....	36
Figura 2.8	– Diagrama unifilar do sistema usado para ilustração.....	37
Figura 2.9	– Esquema de um transformador do tipo I, conexão YNyn.....	40
Figura 2.10	– Esquema de um transformador do tipo II, conexão Dd.....	42
Figura 2.11	– Esquema de um transformador do tipo III, conexão Dyn.....	44
Figura 2.12	– Tipos básicos de transformadores quanto à propagação do afundamento; a) não modifica os afundamentos; b) remove a componente de sequência zero; c) provoca defasamento angular.....	46
Figura 3.1	– Diagrama unifilar do sistema elétrico padrão IEEE de 14 barras.....	67
Figura 3.2	– Representação da linha de transmissão – parâmetros distribuídos.....	71
Figura 3.3	– Representação monofásica do transformador.....	73
Figura 3.4	– Representação da carga – impedância constante.....	76
Figura 3.5	– Sistema modificado.....	78
Figura 3.6	– Afundamento do tipo A gerado pela fonte modelada no ATP.....	83
Figura 3.7	– Afundamento do tipo B gerado pela fonte modelada no ATP.....	83
Figura 3.8	– Afundamento do tipo C gerado pela fonte modelada no ATP.....	84
Figura 3.9	– Afundamento do tipo D gerado pela fonte modelada no ATP.....	84
Figura 3.10	– Afundamento do tipo E gerado pela fonte modelada no ATP.....	85
Figura 3.11	– Afundamento do tipo F gerado pela fonte modelada no ATP.....	85
Figura 3.12	– Afundamento do tipo C gerado pela fonte modelada no ATP.....	86

Figura 3.13	– Sistema de duas barras para análise de afundamentos de tensão gerado por um curto-circuito.....	87
Figura 3.14	– Diagrama fasorial das tensões do lado Y. a) Antes da falta. b) Durante a falta.....	89
Figura 3.15	– Diagrama fasorial das tensões do lado Δ . a) Antes da falta. b) Durante a falta.....	91
Figura 3.16	– Afundamento de tensão gerado pela fonte modelada no ATP.....	92
Figura 3.17	– Afundamento de tensão visto pelo lado Δ	93
Figura 3.18	– Valores calculados e simulados das tensões no lado do Δ . a) Valores calculados. b) Valores simulados.....	95
Figura 4.1	– Sistema IEEE utilizado para simulações.....	99
Figura 4.2	– Inserção da fonte geradora do distúrbio no sistema.....	102
Figura 4.3	– Afundamento tipo A com magnitude de 0,15 pu e duração de 30 ciclos.....	103
Figura 4.4	– Afundamentos momentâneos de tensão em uma barra de 69 KV - histograma das ocorrências de 1998 e 1999, agregadas por nível.....	106
Figura 4.5	– Afundamentos momentâneos de tensão em uma barra de 69 KV - histograma das ocorrências de 1998 e 1999, agregadas por duração....	107
Figura 4.6	– Níveis de vulnerabilidade do sistema, gerado pela aplicação do distúrbio.....	113
Figura 4.7	– Diagrama unifilar de um sistema elétrico simplificado.....	114
Figura 4.8	– Afundamento do tipo B e transformador tipo 1. a) forma de onda no primário; b) forma de onda no secundário.....	121
Figura 4.9	– Sistema IEEE com os transformadores do tipo 2 e 3.....	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	– Denominações das VTCDs segundo o ONS.....	22
Tabela 2.2	– Classificação dos afundamentos de tensão de acordo com a ligação das cargas e tipos de faltas.....	28
Tabela 2.3	– Representação matemática para cada tipo de afundamento de tensão.....	31
Tabela 2.4	– Propagação do afundamento de tensão, provocado por um curto fase-terra, através de cada tipo de transformador.....	47
Tabela 2.5	– Propagação do afundamento de tensão, provocado por um curto fase-fase, através de cada tipo de transformador.....	48
Tabela 2.6	– Tipos de afundamentos no secundário do transformador.....	57
Tabela 3.1	– Dados dos geradores (G) e dos compensadores estáticos de reativos (CER).....	69
Tabela 3.2	– Dados dos novos pontos de alimentação do sistema.....	69
Tabela 3.3	– Dados das linhas de transmissão.....	72
Tabela 3.4	– Dados dos transformadores utilizados nos estudos de casos.....	75
Tabela 3.5	– Dados das cargas.....	76
Tabela 3.6	– Dados das novas cargas.....	77
Tabela 3.7	– Representação analítica de cada tipo de afundamento de tensão....	80
Tabela 3.8	– Exemplo dos dados retirados da rotina criada no programa MatLab.....	82
Tabela 3.9	– Tensões das fases durante o afundamento.....	94
Tabela 3.10	– Afundamento de tensão experimentado pelo lado Δ do transformador.....	94
Tabela 4.1	– Dados das barras de transmissão.....	100
Tabela 4.2	– Dados das cargas do sistema.....	100
Tabela 4.3	– Percentual de faltas em sistemas elétricos de transmissão americana.....	104
Tabela 4.4	– Regiões de agregação dos afundamentos segundo a norma NRS-048.....	105
Tabela 4.5	– Tempo típico de eliminação de falta.....	107
Tabela 4.6	– Faixas de magnitudes e durações do distúrbio aplicado.....	108
Tabela 4.7	– Dados dos transformadores utilizados nos estudos de casos.....	109

Tabela 4.8	– Característica do distúrbio aplicado nos barramentos.....	110
Tabela 4.9	– Nível de impacto do distúrbio visto no PAC.....	111
Tabela 4.10	– Nível do distúrbio aplicado nos barramentos.....	111
Tabela 4.11	– Nível do impacto do distúrbio visto no PAC.....	112
Tabela 4.12	– Nível de impacto do distúrbio mais severo visto no PAC com 10% de carga e com carga nominal.....	116
Tabela 4.13	– Nível do impacto do distúrbio que ocorre com maior frequência observado no PAC com 10% de carga e com carga nominal.....	116
Tabela 4.14	– Influência dos transformadores nas características dos afundamentos.....	120
Tabela 4.15	– Testes que serão realizados no sistema modelado com distúrbio aplicado na barra 1.....	123
Tabela 4.16-1	– Resultados obtidos nas barras 9, 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo A na barra 1, com duração de 30 ciclos.....	124
Tabela 4.16-2	– Resultados obtidos nas barras 9, 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo B aplicado na barra 1, com 30 ciclos de duração.....	125
Tabela 4.16-3	– Resultados obtidos nas barras 9, 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo C na barra 1 e com 30 ciclos de duração.....	126
Tabela 4.16-4	– Resultados obtidos nas barras 9, 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo D na barra 1 e com 30 ciclos de duração.....	126
Tabela 4.16-5	– Resultados obtidos nas barras 9, 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo E na barra 1 e com 30 ciclos de duração.....	127
Tabela 4.16-6	– Resultados obtidos nas barras 9, 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo F na barra 1 e com 30 ciclos de duração.....	128
Tabela 4.16-7	– Resultados obtidos nas barras 9, 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo G na barra 1 e com 30 ciclos de duração.....	128
Tabela 4.17-1	– Resultados obtidos nas barras 9, 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo B na barra 1 e com 30 ciclos de duração.....	129
Tabela 4.17-2	– Resultados obtidos nas barras 9, 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo E na barra 1 e com 30 ciclos de duração.....	129
Tabela 4.18-1	– Resultados obtidos nas barras 9, 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo B, com sistema sem modificações, na barra 1 e com 30 ciclos de duração.....	131
Tabela 4.18-2	– Resultados obtidos nas barras 9, 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo E, sistema sem modificações, na barra 1 e com 30 ciclos de duração.....	131
Tabela 4.18-3	– Resultados obtidos nas barras 9, 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo F, com sistema original, na barra 1 e com 30 ciclos de duração.....	132

Tabela 4.18-4	– Resultados obtidos nas barras 9. 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo G, com sistema original, na barra 1 e com 30 ciclos de duração.....	132
Tabela 4.19	– Resumo dos dados das tabelas 4.18-2 até 4.18-4.....	133
Tabela 4.20-1	– Resultados obtidos nas barras 9. 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo B, com sistema modificado, na barra 1 e com 30 ciclos de duração.....	134
Tabela 4.20-2	– Resultados obtidos nas barras 9. 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo C, sistema sem modificações, na barra 1 e com 30 ciclos de duração.....	134
Tabela 4.20-3	– Resultados obtidos nas barras 9. 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo D, com sistema original, na barra 1 e com 30 ciclos de duração.....	134
Tabela 4.21	– Resumo dos dados das tabelas 4.20-1 até 4.20-3.....	135
Tabela 4.22-1	– Resultados obtidos nas barras 9. 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo A e com todas as fontes de alimentação conectadas, com duração de 30 ciclos.....	136
Tabela 4.22-2	– Resultados obtidos nas barras 9. 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo B e com todas as fontes de alimentação conectadas, com duração de 30 ciclos.....	136
Tabela 4.22-3	– Resultados obtidos nas barras 9. 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo C e com todas as fontes de alimentação conectadas, com duração de 30 ciclos.....	137
Tabela 4.22-4	– Resultados obtidos nas barras 9. 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo D e com todas as fontes de alimentação conectadas, com duração de 30 ciclos.....	137
Tabela 4.22-5	– Resultados obtidos nas barras 9. 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo E e com todas as fontes de alimentação conectadas, com duração de 30 ciclos.....	138
Tabela 4.22-6	– Resultados obtidos nas barras 9. 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo F e com todas as fontes de alimentação conectadas, com duração de 30 ciclos.....	138
Tabela 4.22-7	– Resultados obtidos nas barras 9. 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo G e com todas as fontes de alimentação conectadas, com duração de 30 ciclos.....	138

SUMÁRIO

Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xi
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – Considerações iniciais.....	1
1.2 – Estado da arte do tema.....	4
1.3 – O contexto e as Contribuições da presente dissertação.....	8
1.4 – A estrutura da dissertação.....	9
CAPÍTULO 2 – CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE OS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO	13
2.1 – Considerações iniciais.....	13
2.2 – Prejuízos causados por afundamentos de tensão.....	14
2.2.1 – Soluções.....	17
2.3 – Conceitos e definições.....	20
2.3.1 – Legislação sobre as VTCD's.....	24
2.4 – Caracterização do afundamento de tensão.....	26
2.5 – Origem dos afundamentos de tensão.....	32
2.5.1 – Salto de ângulo de fase – phase angle jump.....	33
2.6 – Áreas de vulnerabilidade.....	35
2.7 – Variáveis de influência nas VTCD's.....	38
2.8 – Propagação dos afundamentos de tensão.....	39
2.9 – A influência do tipo de conexão dos transformadores nos afundamentos de tensão.....	39

2.9.1	– Propagação do afundamento de tensão tipo B através dos transformadores.....	49
2.9.2	– Propagação do afundamento de tensão tipo C através dos transformadores.....	51
2.9.3	– Propagação do afundamento de tensão tipo D através dos transformadores.....	52
2.9.4	– Propagação do afundamento de tensão tipo E através dos transformadores.....	53
2.9.5	– Propagação do afundamento de tensão tipo F através dos transformadores.....	54
2.9.6	– Propagação do afundamento de tensão tipo G através dos transformadores.....	56
2.10	– Considerações finais.....	58
 CAPÍTULO 3 – MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO NO ATP.....		59
3.1	– Considerações iniciais.....	59
3.2	– Softwares que são utilizados para análise de afundamentos de tensão.....	60
3.2.1	– Programa CREUTENSI da EDF.....	60
3.2.2	– Programa CALIFE da EDF.....	61
3.2.3	– Programa VSAT do EPRI/ELECTROTEK.....	61
3.2.4	– Programa do PTI – Power Technologies Inc.....	62
3.2.5	– Programa ANAQUALI do CEPEL.....	64
3.2.6	– Programa ATP – Alternative Transients Program.....	65
3.2.7	– Adotando o ATP como simulador.....	66
3.3	– Modelagem do sistema.....	66
3.3.1	– Geradores.....	68
3.3.2	– Linhas de transmissão.....	70
3.3.3	– Transformadores.....	73
3.3.4	– Cargas.....	75
3.5	– Modelagem do gerador de afundamentos.....	79

3.6	– Confirmação da modelagem do gerador de afundamentos.....	87
3.6.1	– Cálculo do curto-circuito fase-terra.....	88
3.6.2	– Simulando um afundamento causado por curto-circuito fase-terra.....	91
3.7	– Considerações finais.....	95
 CAPÍTULO 4 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS.....		97
4.1	– Considerações iniciais.....	97
4.2	– Descrição do sistema elétrico simulado.....	98
4.3	– Procedimentos para o estudo.....	100
4.4	– Casos simulados.....	103
4.4.1	– Caso 1 – área de vulnerabilidade.....	109
4.4.2	– Caso 2 – influência das correntes de carga.....	113
4.4.3	– Caso 3 – influência dos transformadores.....	117
4.4.3.1	– Caso 3.1 – Distúrbios aplicados na barra 1 com magnitudes de 15% e 90%, com apenas um ponto de alimentação.....	124
4.4.3.2	– Caso 3.2 – Distúrbios aplicados na barra 1 com magnitude de 15%, com três pontos de alimentação e a troca dos transformadores tipo 2 pelo tipo 3.....	130
4.4.3.3	– Caso 3.3 – Distúrbios aplicados na barra 1 com magnitude de 90%, com todos os pontos de alimentação.....	135
4.5	– Considerações finais.....	139
 CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES GERAIS.....		141
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		145

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A energia elétrica é um dos bens de consumo fundamentais da sociedade moderna disponibilizada ao consumidor. A adequada disponibilidade da energia é alcançada através de planejamento, projeto, construção e operação cuidadosa de uma complexa rede elétrica composta por geradores, transformadores, linhas de transmissão e de distribuição e outros equipamentos auxiliares. Sob o ponto de vista do consumidor, o sistema elétrico parece comportar-se sempre em estado permanente: imperturbável, constante e com capacidade inesgotável [2].

Entretanto, o sistema de potência está sujeito à constantes distúrbios gerados pelas variações aleatórias das cargas, pelas faltas oriundas de causas naturais, e em alguns casos como resultado de falhas de equipamentos ou humanas. Cronologicamente pode-se dizer que as preocupações com os diversos temas relacionados à Qualidade da Energia Elétrica têm sido cada vez mais comuns nas concessionárias de energia elétrica e aos consumidores

em geral, e vêm assumindo importância destacada nos cenários nacional e internacional [3].

Cargas e equipamentos com características não-lineares nos sistemas elétricos de potência, genericamente designadas por cargas elétricas especiais, geram correntes distorcidas que possuem elevado conteúdo harmônico. Essas correntes, sendo injetadas nas redes elétricas e nas instalações industriais adjacentes, poderão causar os mais variados tipos de anomalias.

Neste sentido, os problemas relativos ao desempenho e a vida útil dos equipamentos dependem, dentre outros fatores, da severidade dos distúrbios e do nível de suportabilidade dos equipamentos [4].

Associada ao processo de modernização do parque industrial, tem havido a aplicação disseminada de acionamentos de velocidade variável (AVVs) e de sistemas controlados eletronicamente. Isto tem revelado um aspecto de vital importância da QEE e que diz respeito à sensibilidade destas cargas frente às variações momentâneas de tensão, inevitáveis no sistema elétrico e são resultantes de curtos-circuitos em extensas áreas, mesmo que localizadas em pontos remotos do sistema elétrico.

Diante deste cenário, vários grupos de estudos especializados na área da Qualidade da Energia Elétrica, tanto no Brasil quanto no exterior, estão envolvidos em pesquisas no que diz respeito a esse tema. E ainda se esforçam para elaborar normas que auxiliam tanto na monitoração como na correta interpretação dos resultados obtidos de medição de distúrbios da qualidade da energia elétrica [10].

No que tange as publicações internacionais consideradas de maior aceitação, pode-se citar os termos e definições propostos pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) [3]. No Brasil, atualmente, tem-se como referência os termos e definições propostos pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), através do PRODIST [5].

O distúrbio de qualidade aqui focalizado nesta dissertação, conhecido na literatura internacional como “voltage sags” ou “voltage dips”, e neste trabalho denominados de “afundamentos de tensão” representam, atualmente, um dos principais desafios enfrentado por empresas de energia, fornecedores de equipamentos elétricos e consumidores de um modo geral. Ocorrências de afundamentos de tensão, combinadas com a sensibilidade dos modernos equipamentos, têm resultado em um número expressivo de interrupções de processos industriais [6].

A motivação principal dos estudos de afundamentos de tensão são os problemas causados a uma grande variedade de equipamentos sensíveis ao fenômeno. Alguns equipamentos, como aqueles onde o controle de velocidade variável, sistemas controlados por computadores, podem ser retirados durante os afundamentos de tensão, provocando perdas econômicas significativas.

O consumidor precisa ser mais bem orientado sobre a vulnerabilidade ao fenômeno de afundamento de tensão para evitar prejuízos nos equipamentos diminuindo assim, a preocupação com a compatibilidade entre equipamentos, novas tecnologias e a rede elétrica em que serão conectados e mesmo quanto à qualidade e confiabilidade do sistema elétrico.

Existem no mercado diferentes tipos de alternativas para mitigação dos afundamentos de tensão; tal como aquelas apontadas nas referências [9 e 10]. Há uma gama de opções de dispositivos com armazenamento interno de energia (nobreaks com baterias), até aqueles que não possuem nenhuma forma de energia armazenada, denominados comumente condicionadores ou estabilizadores de tensão. Os primeiros, usualmente utilizados para alimentar cargas críticas, apresentam o inconveniente de custos iniciais altos e com custos de manutenção elevados, entretanto tem sido uma solução muito

aplicada, no Brasil, na alimentação de equipamentos de informática e no controle e automação.

Como segunda alternativa, sem nenhuma armazenagem interna de energia e utilizando a tensão residual para corrigir o valor eficaz da tensão de rede a um nível aceitável pela carga, apesar de não corrigir totalmente os afundamentos que ocorrem na rede, consegue eficácia em boa parte dos casos. Torna-se uma solução atraente do ponto de vista econômico, devido os baixos custos de implantação e manutenção, conforme referencias [9 e 10].

Existe ainda uma série de outras soluções intermediárias, tais como os sistemas eletromecânicos (grupo motor-gerador com volantes de inércia) e os sistemas eletromagnéticos.

Alguns equipamentos eletrônicos modernos, no entanto, simplesmente não são afetados pela redução temporária no o valor rms da tensão. A duração do distúrbio e o ângulo de salto podem ter uma influência [18]. Descrevendo o afundamento de tensão simplesmente pela sua amplitude e duração não condiz com a real severidade do evento. Uma parte importante do estudo desse fenômeno é também conhecer o número de ocorrências e ser capaz de prever suas incidências. É onde se inicia o estudo da propagação do fenômeno através do sistema.

1.2 - ESTADO DA ARTE DO TEMA

Levando em conta a incerteza do comportamento dos equipamentos sensíveis e das interconexões da planta industrial ao sistema, bem como as práticas operacionais e de mitigação equipamentos instalados nos

consumidores individuais. Tudo isso é essencial para uma realística avaliação das perdas financeiras devido a interrupções e aos afundamentos de tensão.

As referencias [5 e 7] traz em estudos particulares sobre tal assunto, mostrando metodologias mais precisas para se determinar os prejuízos causados pelo distúrbio. A hora da ocorrência, a duração, repetição e previsibilidade devem ser consideradas, em horários de produção máxima as pequenas falhas passam a representar grandes prejuízos. Perturbações no suprimento de eletricidade fazem com que equipamentos operem de forma inadequada.

Em [15] é apresentada uma metodologia generalizada para avaliação anual das perdas financeiras devido a interrupções de tensão e de afundamentos de tensão. Os custos de interrupções de tensão e os afundamentos são tratados separadamente e, depois, de forma combinada para estimar o total das perdas na rede e por ano.

Ainda [15] diz que o processo de levantamento preciso das perdas geradas pela queda dos processos industriais é a parte fundamental da avaliação econômica.

As características dos afundamentos como magnitude, ângulo de fase e duração podem ser determinadas, e estas poderão diferir nas barras de carga daquelas do local de origem do curto circuito. Neste sentido, os afundamentos de tensão ao se propagarem pelo sistema elétrico terão suas características alteradas, não apenas devido à impedância entre a origem do evento e a carga, mas também devido ao tipo de conexão dos transformadores através dos quais se propagam ao longo da rede.

Gnativ e Milanovic [18] propõe um conjunto de índices usados para o estudo da influência da configuração topológica da propagação dos afundamentos nos sistemas de distribuição. Observou-se que a topologia e a propagação dos afundamentos de tensão nos sistemas de distribuição têm uma

correlação muito forte. Verificou-se também que, os afundamentos em redes de malha são geralmente mais severos do que em sistemas radiais. Ainda em [18], os autores apontam duas características de suma importância para o estudo do distúrbio afundamento de tensão.

Concluem, portanto, que o fenômeno caracterizado simplesmente pela sua amplitude e duração apresenta resultados irrelevantes. E ainda, apontam para características importantes para que o estudo seja fidedigno ao estudo do distúrbio real; a se saber são: o número esperado de afundamentos de tensão e as características mais realísticas possíveis. A duração do afundamento, a magnitude, o ângulo de fase e a conexão do equipamento (trifásico ou monofásico) todos esses fatores também exercem influência.

O que afirma a referencia [18], também pode ser visto na referencia [32] que apresenta a característica da propagação do distúrbio como sendo um termo usado para descrever a perturbação em locais situados além de a origem de uma perturbação. E que a natureza da perturbação na fonte e os parâmetros dos elementos que constituem o sistema são alguns dos fatores que contribuem para as características de propagação.

Em 2003, o autor Nimpitiwan [33] apresenta as preocupações das concessionárias americanas com relação ao tema da propagação do distúrbio. Em seu estudo o autor mostra que estudos realizados em uma concessionária onde foi modelado um sistema real de distribuição e que apresenta problemas de afundamento de tensão. O que se observa é uma diferença entre as características do distúrbio na origem e no ponto de conexão com o consumidor.

Thiago Clé de Oliveira [26] confirma o que fora dito anteriormente, sobre a forte influência dos transformadores sobre a propagação do afundamento de tensão. O artigo apresenta a análise de um afundamento de

tensão originado por curto-circuitos em uma barra distante do consumidor e analisa que características desse distúrbio são afetadas pelos transformadores.

Jovica Milanovic em seu trabalho publicado em 2006 [21] aborda o tema da propagação de forma bem específica, ou seja, este focado em determinar qual o grau de influência que as conexões dos transformadores exercem na propagação do afundamento de tensão. A metodologia que o autor emprega, é também muito usada na maioria das referências aqui citadas, que utiliza curtos-circuitos aplicados em um local distante do consumidor, e o ponto de conexão de carga ao sistema elétrico.

De todas as referências analisadas, esta é a que trata o assunto da propagação com mais propriedade, ou seja, com o detalhamento necessário para a obtenção de resultados desejados.

Na referência [32], o autor realiza o estudo da propagação do afundamento de tensão através da simulação digital, que é uma ferramenta promissora para o problema, uma vez que medições de campo de tal distúrbio são complicadas e com um custo elevado. O EMTP tem sido muito utilizado para suprir essa lacuna.

Na referência [3] o autor faz uma análise criteriosa acerca de alguns softwares utilizados nos estudos de afundamento de tensão, deixando claro alguns pontos positivos e negativos de cada software empregado.

Já a [4] mostra especificamente faz uma comparação entre dois softwares de reconhecimento internacional e nacional. Um deles o ATP – Alternative Transient Program, e o ANAFAS – Programa de Análise de Falhas Simultâneas – esse desenvolvido pelo CEPEL. Os resultados obtidos na dissertação do autor mostram que a média das divergências das intensidades de afundamentos de tensão calculadas, utilizando-se os dois programas, foi inferior a 5%; confirmando que o software escolhido, o ATP, não irá

apresentar resultados discrepantes, sendo coerentes com as teorias apresentadas.

A referência [29] visa à predição deste fenômeno e o desempenho das redes de distribuição frente ao mesmo, utilizando simulação digital no EMTP como ferramenta computacional. Diferentes modelos são usados para representar os componentes, e que seja utilizado na obtenção das características do evento com adequada precisão. Os resultados dos testes são incluídos para ilustrar a desempenho dos modelos desenvolvidos e validar a seleção de modelagem com diferentes abordagens.

De forma semelhante as referências [20, 31, 36 e 37] utilizam e consolidam o ATP como sendo uma escolha apropriada para o e avaliação do distúrbio aqui considerado. Os resultados obtidos destacam a importância de se usar o ATP em estudos de qualidade de energia, constituindo-se pois em um programa que permite descrever o comportamento dinâmico e transitório do sistema de forma detalhada e precisa, se torna fundamental nas análises de alguns fenômenos associados à qualidade de energia elétrica, dentre os quais os afundamentos de tensão.

1.3 - O CONTEXTO E AS CONTRIBUIÇÕES DA PRESENTE DISSERTAÇÃO

O estudo da propagação do distúrbio, afundamento de tensão, disponível na literatura é muito limitada, necessitando de maiores esclarecimentos sobre os parâmetros que o influenciam ao longo do sistema elétrico. No entanto, o tema se reveste de grande importância na previsão e mitigação deste fenômeno, desde sua origem até aos consumidores.

Uma vez que estudo com grandes sistemas reais torna a realização deste um tanto quanto complexa, e assim sendo, a simulação destes torna-se indispensável e o software a ser utilizado é EMTP [2] ferramenta simulação no domínio tempo. Neste sentido, esta dissertação contribuí nos seguintes aspectos:

- Elaboração e compilação de uma referência bibliográfica aprofundada sobre o tema;
- Verificação da modelagem já existem sobre transformadores de potência com diversos tipos de conexões, aplicada no estudo da propagação do afundamento de tensão;
- Modelagem de fontes geradoras do distúrbio afundamento de tensão;
- Aplicação dos modelos elaborados em um sistema de 14 barras padrão proposto pelo IEEE.

Na busca de uma avaliação da propagação do distúrbio e os objetivos traçados para esclarecimentos mais detalhados, esta dissertação foi estruturada como a seguir.

1.4 - A ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Com o intuito de se atingir os objetivos propostos, além deste capítulo introdutório, esta dissertação será desenvolvida obedecendo a seguinte estrutura:

CAPÍTULO 2

CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

Neste capítulo serão abordadas a teoria e a conceituação do distúrbio avaliado, qual seja o afundamento de tensão, bem como sua classificação, origem e características. Também são abordados normas e padrões avaliativos que definem seu grau de severidade. Assim, os tipos de afundamentos que mais afetam os consumidores de uma forma geral são descritos e também este capítulo pretende-se preencher algumas lacunas acerca do fenômeno da propagação do afundamento de tensão, tal como aqueles relacionados com os tipos de conexões dos transformadores.

CAPÍTULO 3

MODELAGEM DOS ELEMENTOS DO SISTEMA ELÉTRICO NO ATP

No Capítulo, serão descritas as técnicas para realização dos estudos, explicando todas as etapas do processo de cálculos adotados, com base em referências que mostram a eficiência e a eficácia do programa ATP na utilização do estudo dos afundamentos de tensão.

São apresentados também a modelagem dos componentes do sistema teste através de modelos e parâmetros de cada elemento utilizado nos estudos. Mostrando através de um exemplo através de cálculos matemáticos para ilustração do processo de propagação de afundamentos, estando de acordo com a literatura e de conformidade com dados mais realísticos.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Neste capítulo serão apresentados os resultados da simulação no ATP de forma simples e clara os resultados dos casos simulados do sistema proposto, casos estes escolhidos de forma a contemplar o maior número de eventos que possam ocorrer bem como os casos mais críticos. Com isso, espera-se mostrar a relevância do tema, e o quanto ainda é incompleto o tema da propagação deste distúrbio da qualidade.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES GERAIS

Este capítulo final destina-se a apresentar as principais conclusões e contribuições obtidas em toda a dissertação. Adicionalmente, serão sugeridos temas para futuros trabalhos de continuidade.

CAPÍTULO 2

CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

2.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Dentre os fenômenos que contribuem para a perda de qualidade da energia de um determinado suprimento elétrico, são aqueles associados às variações das tensões que ocupam posição de destaque. Em particular, os afundamentos de tensão destacam-se como as mais preocupantes formas com que tais alterações se manifestam nas redes elétricas. Isto se justifica pelo fato de que os afundamentos de tensão, quer sejam momentâneos ou temporários, são os que mais notadamente se fazem presentes na operação dos complexos elétricos gerados por situações operativas anormais, tais como os curto-circuitos.

Quando se estuda o tema, algumas filosofias se destacam: a primeira, estabelecida pelo Institute of Electric and Electronics Engineers – IEEE; uma segunda, pela International Electro-technical Commission – IEC. Adicionalmente, uma terceira estabelecida pelo Procedimentos de Rede, item Padrões de Desempenho da Rede Básica, submódulo 2.2. Assim neste

capítulo serão apresentados os conceitos e definições sobre afundamentos de tensão.

Também fará parte aqui os enfoques sobre as origens e variáveis de influência dos afundamentos de tensão no sistema elétrico, suas principais causas, parâmetros e fatores aleatórios que tornam a análise bastante complexa. Dentro das variáveis de influência uma em particular será o objeto de estudo desta dissertação, que é a influência das conexões dos transformadores sobre os afundamentos quando estes propagam pela rede elétrica.

A dificuldade em identificar a origem dos afundamentos é suprida pela análise das medições obtidas. Este é um passo importante, não só para determinação de responsabilidades, mas também para que se possam direcionar as possíveis ações.

2.2 - PREJUÍZOS CAUSADOS POR AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

Esta seção concentra-se nos efeitos dos defeitos na produção e os custos que podem ser esperados como consequência de uma energia de fornecida fora dos padrões pré-estabelecida por normas.

Os prejuízos causados pelos afundamentos de tensão podem ser extremamente elevados, dependendo da sensibilidade dos equipamentos e dos processos afetados. Em decorrência da enorme utilização da energia elétrica e do largo uso de equipamentos elétricos e eletrônicos, consumidores comerciais e industriais são fortemente afetados pelos distúrbios da qualidade da energia [9].

Sabe-se que os problemas de qualidade de energia no que tange aos afundamentos de tensão representam um custo para a indústria e o comércio. Nos Estados Unidos os custos são cerca de 20 bilhões de dólares por ano, segundo o Wall Street Journal e o Newsweek de 2002; enquanto as despesas em medidas preventivas é inferior a 5% desse valor. “Quanto dinheiro deve ser investido em prevenção para compensar o risco de falhas?”. A resposta depende da natureza da atividade atingida. O primeiro passo é entender a natureza dos problemas e avaliar como cada um deles afeta a atividade empresarial e que perdas podem resultar. No Brasil, segundo a mesma referência, estima-se que os prejuízos gerados pelos afundamentos é da ordem de 2 bilhões de dólares por ano.

Para o caso de consumidores industriais, pode-se relacionar vários custos relacionados à perda da qualidade da energia [9], a saber:

- Custos para reiniciar a produção (mão-de-obra);
- Custo devido a danos causados a materiais;
- Custos devido a danos causados à planta industrial (equipamentos);
- Custo para o reprocessamento de materiais;
- Custos relacionados à operação de equipamentos de geração auxiliar;
- Multas devido a atrasos nas entregas do produto;
- Perda da qualidade do produto e insatisfação do cliente;
- Entre outros.

Estima-se que o tempo gasto para a retomada da produção após a ocorrência de um afundamento pode variar de 1 hora a 3 horas para eventos com durações inferiores a 300ms. Por exemplo, para indústrias têxteis, com processos e sistemas acionados a velocidade variável, um afundamento de 80% da tensão nominal e com duração de apenas 6 ciclos pode ser tão

prejudicial quanto à perda de produtividade causada pela interrupção do fornecimento de energia por 2h [5].

Em termos médios, o custo total causado pela interrupção do fornecimento de energia por 4 horas é no entorno de US\$75.000,00 enquanto para um evento de 10% ou 20% com duração de apenas 15 ciclos, este custo médio pode ser aproximadamente de US\$8.000,00, o que mostra a grandeza dos custos relacionados ao fenômeno em relação aos custos decorrentes à perda total do fornecimento de energia [5].

Estes dados sobre custos apresentados até aqui se referem a indústrias e consumidores nos Estados Unidos, onde já existe um grande número de pesquisas realizadas sobre tal distúrbio.

Muitos afundamentos são causados por faltas na rede de alimentação, e a sua severidade depende das localizações relativas do gerador, da falta e do ponto de medição. Não existem estatísticas oficiais sobre a severidade e distribuição dos afundamentos de tensão, mas atualmente estão em desenvolvimento medições de média escala das quais pode ser esperado obter informações valiosas no devido tempo.

Um estudo, realizado em um importante gerador de energia, mediu perturbações de tensão em 12 locais com demanda entre 5 e 30 MVA. Em um período de dez meses foram registradas 858 perturbações, 42 das quais resultaram em interrupção do fornecimento e conseqüentemente prejuízos econômicos [9].

Trata-se de custos enormes envolvidos, uma vez que poderiam parecer eventos triviais, durando menos de um segundo. O problema é que, como é indefinida a resposta aos afundamentos de tensão por parte de alguns equipamentos sensíveis, tais como equipamentos de processamento de dados, ou acionamentos de velocidade variável para motores, torna-se quase impossível prever o comportamento do sistema como um todo.

Para os processos contínuos, como fabricação de papel, o efeito de um afundamento é quase tão sério como um blecaute completo, com os mesmos custos de manutenção, perdas de matéria-prima e perda de produção. Para operações onde se emprega computadores, o tempo necessário para reinicializar grande número de estações de trabalho e recuperar transações pendentes e documentos não salvos, pode ser de várias horas [9].

Conforme mencionado anteriormente, na medida em que cada vez mais são utilizados equipamentos sensíveis maior serão os índices das perdas na qualidade da energia; crescem as preocupações com o número crescente de falhas nos equipamentos devido à ocorrência, principalmente, dos afundamentos de tensão. Assim, devem ser realizados, portanto, esforços no sentido de se conhecer e aplicar as alternativas mais adequadas para a eliminação ou minimização dos problemas e prejuízos resultantes das variações indesejadas nas tensões de alimentação.

2.2.1 - SOLUÇÕES

Existe uma variedade de soluções passíveis de utilização para a redução ou eliminação das paradas inoportunas provocadas pelas VTCDs. Por conseguinte, ao se escolher a opção que mais seja adequado ao tipo de problema é fundamental que se tenha total conhecimento sobre os pontos ou equipamentos mais susceptíveis aos distúrbios da qualidade.

Uma avaliação criteriosa do caso específico norteará a opção, seja ela pela melhoria ou ajuste no sistema já existente, ou pela utilização de algum condicionador de energia. Deve ser dito, entretanto, que a melhor alternativa para o problema deve partir de um estudo detalhado da qualidade da energia

no ponto de conexão da carga no sistema, permitindo a especificação de equipamentos com maior tolerância e imunidade às ocorrências dos afundamentos de tensão [9].

Para efeito de maior clareza, podem-se considerar as soluções para os problemas associados aos VTCDs como pertencentes a três grupos: o primeiro, formado pelas alternativas que visam reduzir o número, magnitude ou duração dos distúrbios nos sistemas; o segundo, constituído pela inserção de equipamentos que dão condições de operação contínua às cargas mesmo durante a ocorrência dos eventos; e o terceiro, pelo aumento da suportabilidade das cargas aos distúrbios.

Diferentes métodos para aumentar a suportabilidade dos equipamentos ou mesmo mitigar os distúrbios VTCDs foram desenvolvidos ao longo do tempo. Em grande escala, estão os condicionadores de energia, os compensadores estáticos série/paralelo ou mesmo os sistemas de energia ininterruptos – UPS –, utilizados para imunizar partes vitais das instalações elétricas contra perturbações, embora com custos elevados que poderão inviabilizar os procedimentos para mitigação dos eventos. Neste sentido, a figura 2.1 ilustra a relação dos custos crescentes encontrados à medida que as soluções caminham o consumidor para a concessionária.

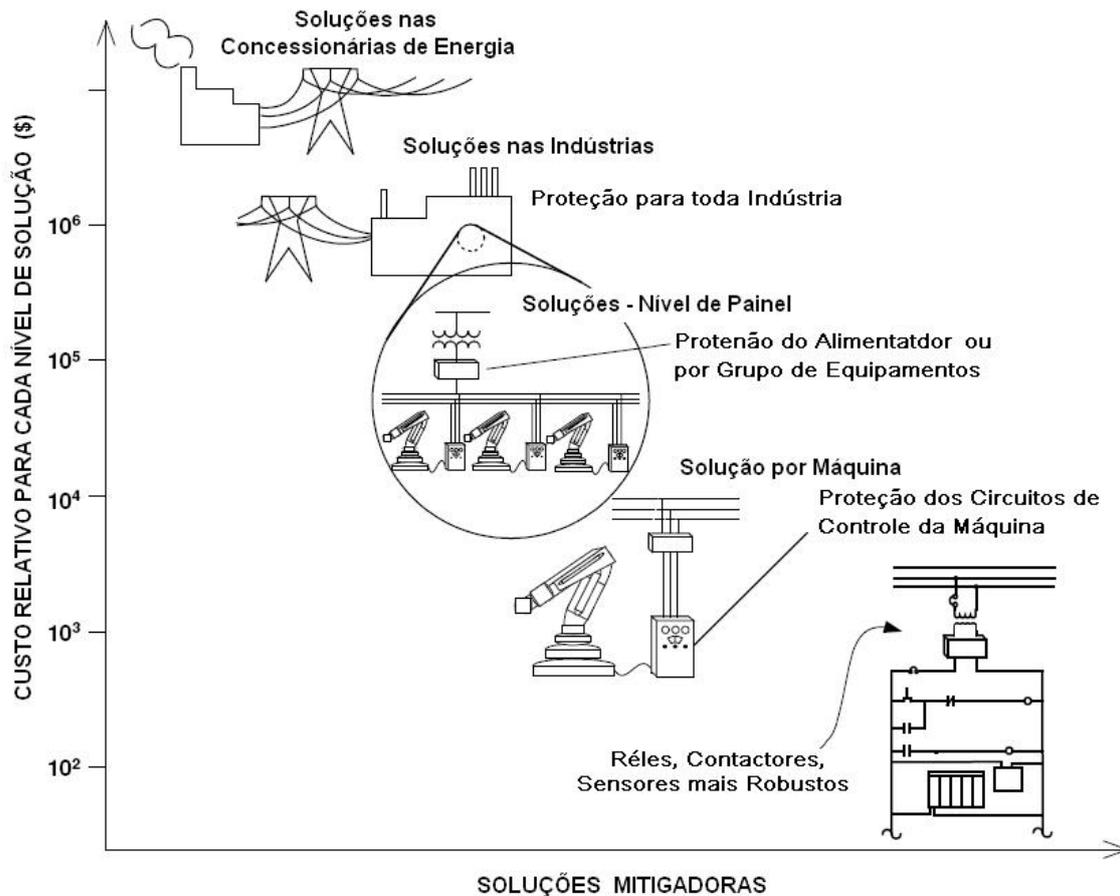


Figura 2.1 – Custos envolvidos para cada nível de mitigação das VTCDs

A figura acima mostra os custos envolvidos para minimizar os efeitos dos distúrbios VTCDs em cada seguimento, desde a concessionária até o consumidor.

As soluções aplicadas aos equipamentos exigem amplo conhecimento de cada componente e isso pode aumentar o custo inicial, havendo a necessidade de avaliar qual o método que pode melhor proporcionar uma relação custo x benefício [27].

2.3 - CONCEITOS E DEFINIÇÕES

Normalmente, na literatura observa-se que são utilizados somente os parâmetros magnitude e duração para a caracterização do afundamento de tensão, atribuindo um único valor para os eventos trifásicos, através dos critérios de agregação de fases. Assim, o método proposto por Bollen [1] ao considerar a assimetria e desequilíbrio dos fasores de tensão durante a ocorrência do distúrbio, permite que o comportamento de equipamentos sensíveis, principalmente trifásicos, possam ser avaliados perante outras características, tais como o ângulo de fase (phase-angle jump).

Já o IEEE, através da Std IEEE 1159 (1995) [41]; ao considerar os fenômenos de qualidade de energia elétrica, define afundamento de tensão como sendo a redução do valor eficaz da tensão para um valor entre 0,1 e 0,9pu, durante um período de tempo compreendido entre 0,5 ciclos e 60 segundos. Adicionalmente, o IEEE classifica os afundamentos de tensão, segundo a sua duração, em três categorias:

- Instantâneos: entre 0,5 ciclos e 30 ciclos;
- Momentâneos: entre 30 ciclos e 3 segundos;
- Temporários: entre 3 segundos e 1 minuto.

Segundo o IEEE, a intensidade de um afundamento de tensão é definida pela menor tensão remanescente durante a ocorrência do distúrbio, ou seja, a ocorrência de um afundamento de tensão de 0,8pu significa que a tensão foi reduzida para 0,80pu. Um evento, cuja intensidade é inferior a 0,10pu, é considerado pelo IEEE como sendo uma interrupção de curta duração.

Como ilustração, a figura 2.2 mostra um afundamento de tensão retangular para 60%, e duração de 80ms. O afundamento de tensão na figura

tem uma forma de onda retangular que é uma redução momentânea da tensão para um nível fixo da tensão eficaz e a restauração imediata para o nível de tensão original após a duração do afundamento. Embora ela não seja comum na realidade, esta forma de onda é usada muitas vezes em simulações por representar o pior caso.

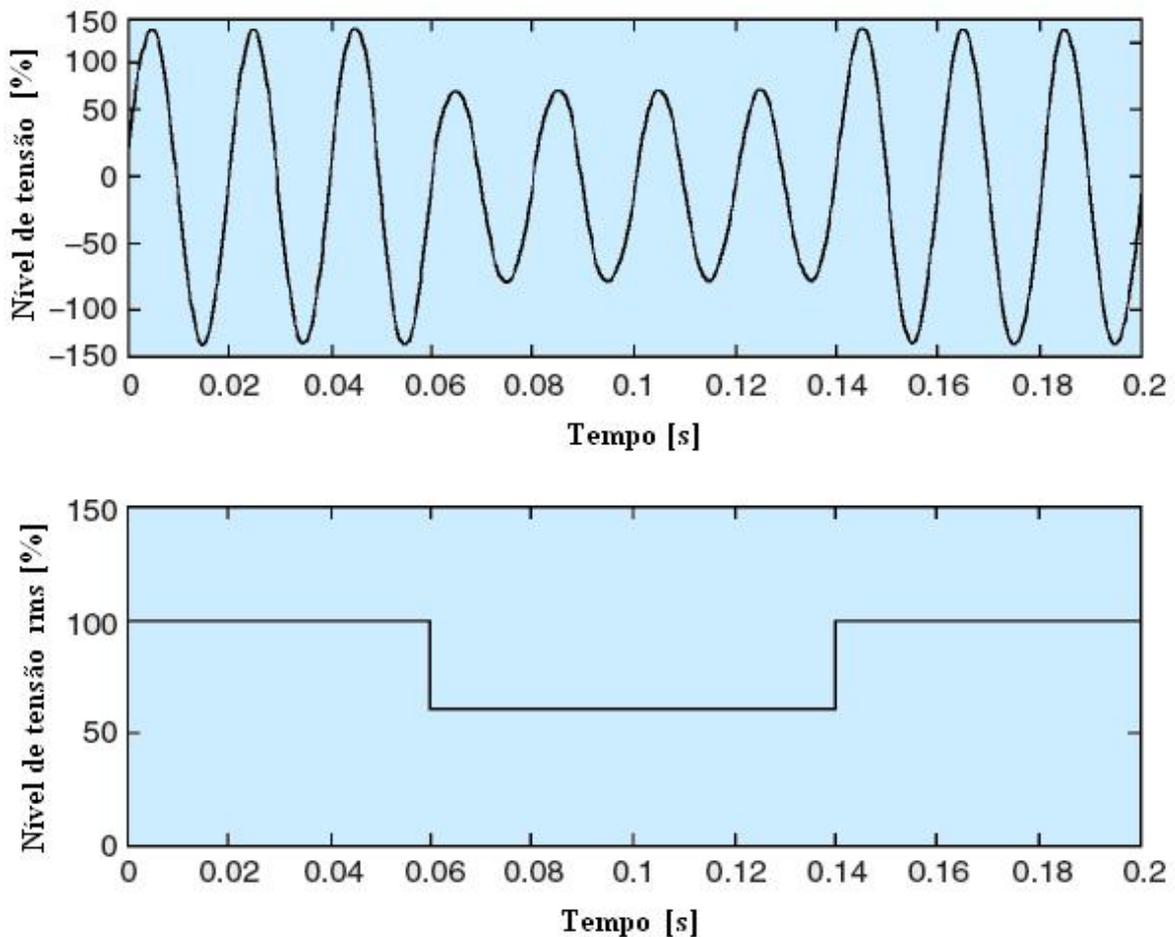


Figura 2.2 – Afundamento de tensão de 60% da tensão nominal com a duração de 80ms

A IEC [42], por outro lado, define a magnitude do afundamento de tensão como sendo a redução do valor eficaz da tensão, entre 0,10 e 0,99pu, durante um período de tempo compreendido entre 0,5 ciclo a alguns segundos.

De acordo com os Procedimentos de Rede, elaborados pelo ONS, no item Padrões de Desempenho da Rede Básica, Submódulo 2.2 [43], entende-se por Variação de Tensão de Curta Duração: “um desvio significativo da amplitude da tensão por um curto intervalo de tempo”.

As denominações das VTCDs segundo o ONS são descritas na tabela 2.1, a seguir.

Tabela 2.1 – Denominações das VTCDs segundo o ONS

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da Tensão*
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	$t \leq 3 s$	$V < 0,1 pu$
	Afundamento Momentâneo de Tensão	$1 ciclo \leq t \leq 3 s$	$0,1 pu \leq V < 0,9 pu$
	Elevação Momentânea de Tensão		$V > 1,1 pu$
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	$3 s < t \leq 1 min$	$V < 0,1 pu$
	Afundamento Temporária de Tensão		$0,1 pu \leq V < 0,9 pu$
	Elevação Temporária de Tensão		$V > 1,1 pu$

*valor eficaz em relação à tensão nominal.

Esse documento ainda esclarece como se deve mensurar a amplitude, a duração e a severidade do distúrbio.

- A amplitude da VTCD é definida pelo valor extremo do valor eficaz (média quadrática) da tensão em relação à tensão nominal do sistema no ponto considerado, enquanto perdurar o evento.

- A duração do distúrbio é definida pelo intervalo de tempo decorrido entre o instante em que o valor eficaz da tensão ultrapassa determinado limite e o instante em que o mesmo volta a cruzar este limite. Em outras palavras, se um sistema com tensão de 1pu sofre um curto-circuito levando essa tensão para 0,5pu, e considerando que há restauração completa da tensão após o término do distúrbio, o afundamento só se iniciará no instante em que a tensão remanescente ficar abaixo de 0,9pu e terminará quando a mesma se igualar ou ultrapassar esse mesmo valor. Portanto, nesse caso, a duração do afundamento de tensão é inferior à duração do curto-circuito.
- A severidade da VTCD em cada fase deve ser avaliada levando-se em conta não só a sua amplitude e duração, mas também a frequência de ocorrência em determinado período de tempo.

Entre agosto e setembro de 2005, a Aneel deu início aos trabalhos de elaboração e posterior consolidação dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (Prodist). Uma vez consolidados, os Procedimentos de Distribuição servirão como documentos na forma de regulamentações, normatizações e padronizações que têm como objetivo possibilitar a conexão elétrica aos sistemas de distribuição por usuários, garantindo que os indicadores de desempenho ou de qualidade de serviço sejam atingidos de forma clara e transparente.

O Módulo 8, em sua versão mais recente de fevereiro de 2008, contempla os conceitos da qualidade da energia elétrica, fornecendo definições e procedimentos apropriados para os distúrbios elétricos. Todos os procedimentos referentes às VTCDs são direcionados para os consumidores do grupo A, que correspondem às unidades consumidoras com fornecimento

em tensão igual ou superior a 2,3 kV, ou ainda inferior a 2,3 kV, e que são atendidas a partir de sistema de distribuição subterrâneo.

Uma das referências utilizadas na elaboração do Módulo 8 do Prodist foi justamente o submódulo 2.2 dos Procedimentos de Rede elaborados pelo ONS, de modo que a classificação das VTCDs ficou idêntica à utilizada nessa referência, sendo desnecessário, portanto, a uma repetição da tabela 2.1 ilustrada anteriormente. Adicionalmente, o documento descreve uma metodologia de medição das VTCDs, a qual também considera a frequência de ocorrência para avaliação da severidade do distúrbio.

Ambos os documentos nacionais não mencionam se a tensão remanescente do sistema deve ou não ser utilizada para caracterizar a magnitude da VTCD. Portanto, neste trabalho, utilizar-se-á a tensão remanescente para caracterizar a magnitude do distúrbio, em concordância com a proposição do IEEE descrita no item anterior.

2.3.1 - LEGISLAÇÃO SOBRE AS VTCD's

Neste item será apresentado um resumo das principais normas e padrões que fazem referência as VTCD's.

IEEE 1159 (1995) “IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality”: O objetivo desta norma é auxiliar tanto na monitoração como na correta interpretação dos resultados obtidos de medição de distúrbios da qualidade da energia elétrica. Esta norma define cada tipo de distúrbio em função das características dos eventos registrados tais como: faixas de intensidade e duração.

IEEE 1346 (1998) “IEEE Recommended Practice For Evaluating Electric Power System Compatibility With Electronic Process Equipment”: Esta Norma 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. A norma 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.

IEC 61000 ”Electromagnetic Compatibility” [44]: Esta norma é constituída de uma série de documentos e relatórios técnicos, onde o assunto principal é a compatibilidade eletromagnética. O objetivo desta norma é descrever os fenômenos e fornecer parâmetros que auxiliem fabricantes e usuários de equipamentos eletro-eletrônicos do ponto de vista de emissividade e imunidade frente aos distúrbios de QEE.

IEC 61000-2-8 [46], “Environment – Voltage Dips and Short Interruptions on Public Electric Power Supply Systems with Statistical Measurements Results”. Esta 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.

2.4 - CARACTERIZAÇÃO DO AFUNDAMENTO DE TENSÃO

Nos eventos monofásicos a caracterização das VTCD's ocorre a partir do valor eficaz da tensão em função do tempo. Assim, intensidade do afundamento de tensão, de acordo com a filosofia do IEEE, é o menor valor da tensão remanescente durante a ocorrência do distúrbio [41]. Neste sentido a figura 2.3 ilustra a importância da caracterização adequada e correta do evento, de onde se conclui que um mesmo evento com uma única origem pode resultar em alguns consumidores eventos com diferentes características.

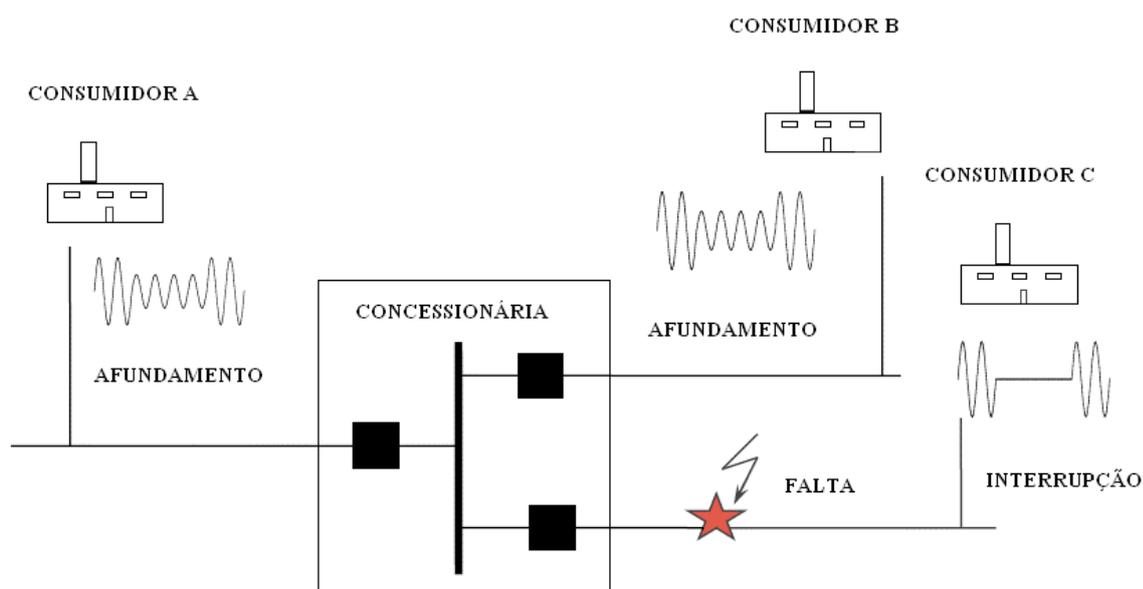


Figura 2.3 – Afundamentos com diferentes características provocados por uma falta em um ponto do sistema.

Assim, uma ocorrência de distúrbio no sistema de potência pode afetar uma, duas ou as três fases. A magnitude e a duração do afundamento de tensão, resultante em cada fase, podem diferenciar-se substancialmente, dependendo da sua localização. Na análise de afundamentos de tensão deve-

se definir, portanto, como os eventos trifásicos são obtidos, tendo em vista o que pode ocorrer o evento com magnitudes distintas nas três fases do sistema.

A duração do evento é o tempo durante o qual o valor eficaz da tensão permanece abaixo de um patamar da tensão de referência (nominal, pré-falta, operativa, etc.). Neste sentido, os conceitos de intensidade e duração do afundamento de tensão são ilustrados no exemplo da figura 2.4.

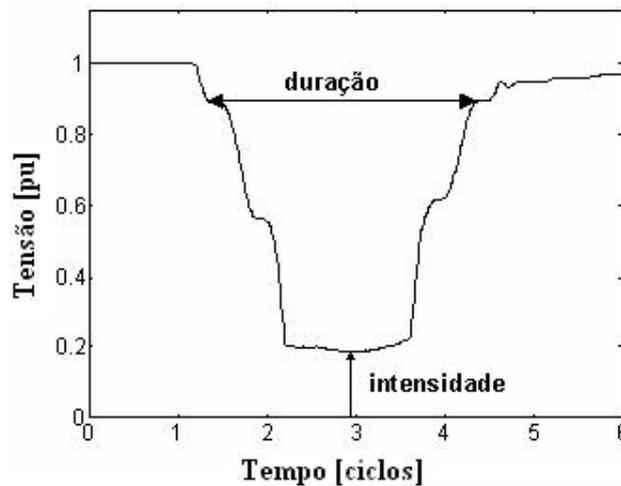


Figura 2.4 – Definição de intensidade e duração de um afundamento de tensão

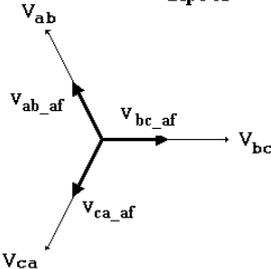
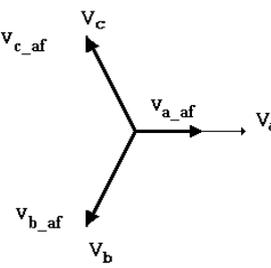
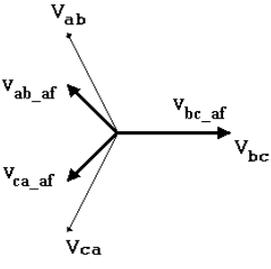
Ao contrário de outros métodos encontrados na literatura, que caracterizam o afundamento de tensão somente através da intensidade e duração, o método proposto por Bollen [1] considera a assimetria e desequilíbrio dos fasores de tensão durante a ocorrência do distúrbio. Dessa forma, evita-se desprezar efeitos importantes, permitindo que o comportamento dos equipamentos sensíveis, principalmente os trifásicos, possa ser avaliado perante essas outras características dos afundamentos de tensão.

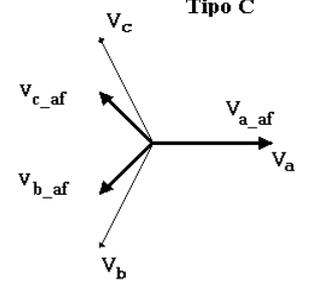
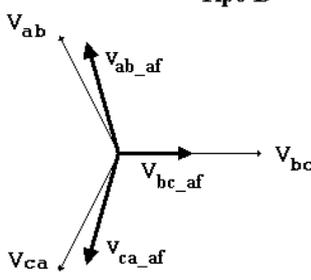
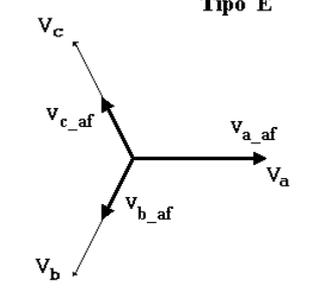
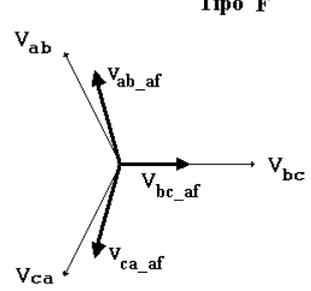
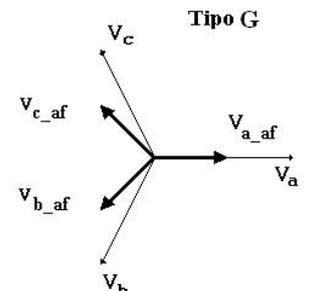
Assim, baseando-se na conhecida teoria das componentes simétricas, o método considera os diversos tipos de faltas trifásicas, bifásicas e monofásicas; as conexões estrela e delta das cargas, utilizadas nos diversos equipamentos elétricos, e todos os tipos de conexões dos transformadores.

Considera-se, também, que as impedâncias de seqüência positiva e negativa das fontes são iguais, resultando em sete tipos básicos principais de afundamentos de tensão, conforme mostrados na tabela 2.2 a seguir. O tipo A é devido às faltas trifásicas e os tipos B, C e D são devido às faltas bifásicas e monofásicas; e os tipos E, F e G são devidos às faltas bifásicas para terra.

Portanto, o fenômeno afundamento de tensão é classificado em vários tipos, de acordo com as formas de conexão das cargas trifásicas (estrela ou triângulo) e os tipos de ligação dos transformadores [2]. Esta classificação é mostrada na tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Classificação dos afundamentos de tensão de acordo com a ligação das cargas e tipos de faltas

Tipo de Faltas	Ligação da Carga	Esquema das Tensões
Trifásicas	Estrela ou Triângulo Tipo A	<p style="text-align: center;">Tipo A</p> 
	Estrela Tipo B	<p style="text-align: center;">Tipo B</p> 
Monofásicas	Triângulo Tipo C	<p style="text-align: center;">Tipo C</p> 

Tipo de Faltas	Ligação da Carga	Esquema das Tensões
Bifásicas	Estrela Tipo C	<p style="text-align: right;">Tipo C</p> 
	Triângulo Tipo D	<p style="text-align: right;">Tipo D</p> 
Bifásicas à terra	Estrela Tipo E	<p style="text-align: right;">Tipo E</p> 
	Triângulo Tipo F	<p style="text-align: right;">Tipo F</p> 
	Triângulo Tipo G	<p style="text-align: right;">Tipo G</p> 

A partir da tabela 2.2, verifica-se que os sete tipos de afundamentos de tensão, classificados como **A**, **B**, **C**, **D**, **E**, **F** e **G**, são resultantes de diferentes tipos de faltas (trifásica, bifásica, bifásica à terra e monofásica).

Com o intuito de analisar o distúrbio VTCD foi modelado no Alternative Transient Program (ATP), através das formulações matemáticas extraídas das teorias de curtos-circuitos trifásicos, um gerador de afundamentos de tensão, capaz de reproduzir qualquer tipo de afundamento com magnitude e salto do ângulo de fase (phase angle jump) e com o tempo de duração que se desejar.

O desenvolvimento destas equações se dará de forma detalhada no próximo capítulo, que se refere à modelagem deste estudo.

Adicionalmente, os sete tipos de afundamentos na forma analítica são apresentados na tabela 2.3, a seguir.

Tabela 2.3 – Representação matemática para cada tipo de afundamento de tensão

Tipo A	Tipo B
$V_a = hV$	$V_a = hV$
$V_b = -\frac{1}{2}hV - j\frac{\sqrt{3}}{2}hV$	$V_b = -\frac{1}{2}V - j\frac{\sqrt{3}}{2}V$
$V_c = -\frac{1}{2}hV + j\frac{\sqrt{3}}{2}hV$	$V_c = -\frac{1}{2}V + j\frac{\sqrt{3}}{2}V$
Tipo C	Tipo D
$V_a = V$	$V_a = hV$
$V_b = -\frac{1}{2}V - j\frac{\sqrt{3}}{2}hV$	$V_b = -\frac{1}{2}hV - j\frac{\sqrt{3}}{2}V$
$V_c = -\frac{1}{2}V + j\frac{\sqrt{3}}{2}hV$	$V_c = -\frac{1}{2}hV + j\frac{\sqrt{3}}{2}V$
Tipo E	Tipo F
$V_a = V$	$V_a = hV$
$V_b = -\frac{1}{2}hV - j\frac{\sqrt{3}}{2}hV$	$V_b = -\frac{1}{2}hV - j\frac{1}{\sqrt{12}}(2+h)V$
$V_c = -\frac{1}{2}hV + j\frac{\sqrt{3}}{2}hV$	$V_c = -\frac{1}{2}hV + j\frac{1}{\sqrt{12}}(2+h)V$
Tipo G	
$V_a = \frac{1}{3}(2+h)V$	
$V_b = -\frac{1}{6}(2+h)V - j\frac{\sqrt{3}}{2}hV$	
$V_c = -\frac{1}{6}(2+h)V + j\frac{\sqrt{3}}{2}hV$	

2.5 - ORIGEM DOS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

As faltas no sistema elétrico são as principais causas do afundamento de tensão, sobretudo no sistema da concessionária, tendo em vista a existência de centenas de quilômetros de linhas aéreas de transmissão e de distribuição, sujeitas aos fenômenos naturais [7].

Assim, as faltas em linhas aéreas ocorrem principalmente devido à incidência de descargas atmosféricas. Nos sistemas de distribuição, o problema é mais acentuado porque são geralmente desprovidos de cabos guarda. No entanto, é conveniente salientar que nem todas as descargas atmosféricas resultam em curtos-circuitos e, conseqüentemente, em afundamentos de tensão. Os sistemas são projetados, em geral, para suportar cerca de 95% das sobretensões de origem atmosférica e as linhas aéreas, sobretudo as de transmissão, são providas de cabos-guarda [8].

Outras origens de curtos-circuitos são as queimadas em plantações, vendavais, contatos por animais e aves, contaminação de isoladores, falhas humanas, etc.

As faltas podem ser de natureza temporária ou permanente. As faltas temporárias são, em sua grande maioria, decorrentes de descargas atmosféricas, temporais e ventos, que não provocam geralmente danos permanentes ao sistema de isolamento, sendo que este pode ser prontamente restabelecido através de religamentos automáticos ou manuais. As faltas permanentes, ao contrário, são causadas por danos físicos em algum elemento de isolamento do sistema, daí ser necessária a intervenção da equipe de manutenção da rede considerada.

A título de ilustração a figura 2.5, mostra as principais causas de faltas no sistema de distribuição obtidas por uma concessionária norte-americana [6].

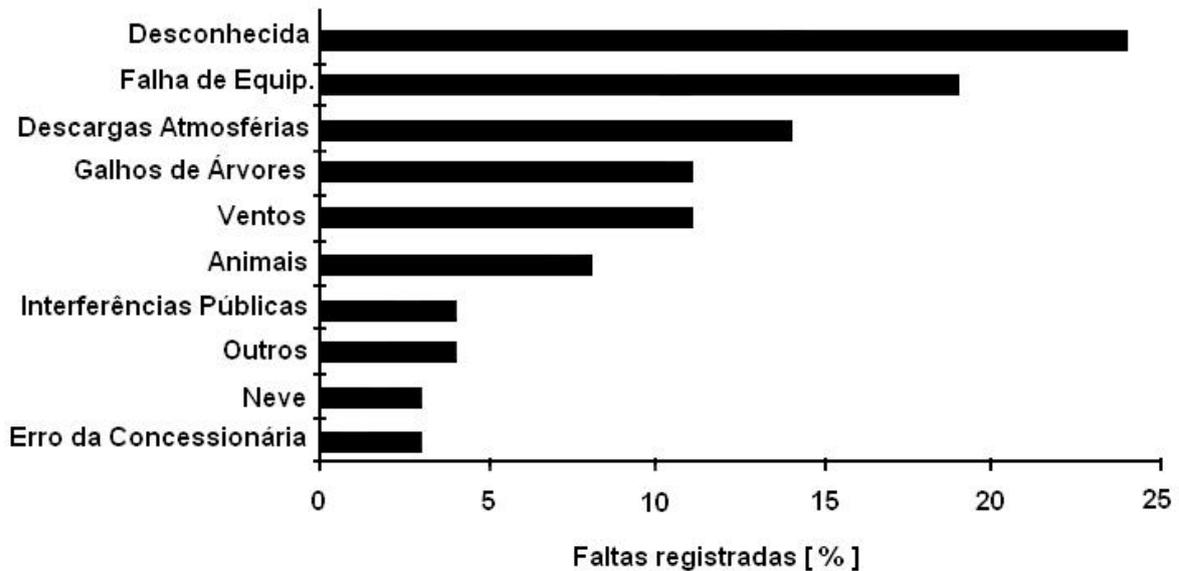


Figura 2.5 – Principais causas para ocorrência de faltas em um sistema de distribuição

A dificuldade em identificar a origem dos afundamentos ressalta na análise das medições obtidas. Este é um passo importante, não só para determinação de responsabilidades, mas também para que se possam direcionar as possíveis ações.

2.5.1- SALTO DE ÂNGULO – PHASE ANGLE JUMP

Sabe-se que em regime permanente, a tensão é uma grandeza complexa (um fasor) que tem o módulo e ângulo. Uma mudança no sistema, tal como um curto-circuito, causa uma alteração na tensão. Esta alteração não afeta só a magnitude, mas também a fase do fasor.

A origem das alterações de ângulo de fase durante faltas deve-se devido à diferença na relação de X/R entre a fonte e o sistema. Uma segunda causa da alteração do ângulo de fase é a transformação dos afundamentos para níveis de tensão mais baixos [1].

Quando ocorre uma alteração de ângulo de fase devido a um afundamento de tensão, este não é imediatamente sentido pelos conversores, o que resulta em disparos dos tiristores de forma incorreta, tendo em vista que muitos tipos de conversores utilizam tiristores que disparam em ângulos pré-determinados. Este fato pode levar a uma operação inadequada, desligamento e até danos permanentes, dependendo do tipo de equipamento, do ajuste da proteção do conversor, e da categoria dos componentes de eletrônica de potência utilizados.

Para elucidar a origem do ângulo de fase, será utilizado o modelo de divisor de tensão para o cálculo da amplitude de afundamentos em sistemas radiais, conforme ilustrada na figura 2.6. O cálculo da tensão complexa de afundamento é dado pela equação 2.1. Assumindo que a tensão pré falta da fonte é 1pu, o ângulo de fase é calculado através da equação 2.2 [1]. O salto de ângulo de fase é a diferença entre o ângulo da tensão pré falta e o ângulo de fase durante a falta.

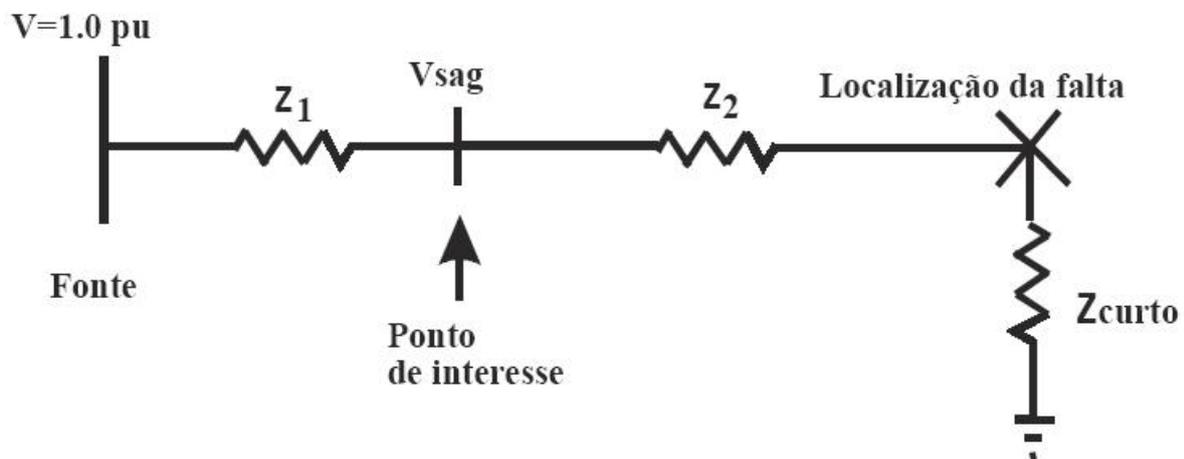


Figura 2.6 – Aplicação do método divisor de tensão

Da figura 2.6, pode-se escrever:

$$V_{afundamento} = \frac{(Z_2 + Z_{curto})}{(Z_1 + Z_2 + Z_{curto})} \times 1 pu \quad (2.1)$$

Onde

$$Z_1 = R_1 + jX_1$$

$$Z_2 = R_2 + jX_2$$

$$\Delta\phi = \arctan\left(\frac{X_2}{R_2}\right) - \arctan\left(\frac{X_1 + X_2}{R_1 + R_2}\right) \quad (2.2)$$

Se $\frac{X_1}{R_1} = \frac{X_2}{R_2}$, a equação (2.2) torna-se zero e não há ângulo de fase.

Este salto de ângulo só estará presente se as razões X/R da fonte e do alimentador faltoso forem diferentes. Sabe-se que, na realidade, os equipamentos são sensíveis à combinação da amplitude do afundamento e da alteração de ângulo.

2.6- ÁREAS DE VULNERABILIDADE

O conceito de área de vulnerabilidade foi desenvolvido para auxiliar na avaliação da probabilidade de uma carga específica estar sujeita a afundamentos de tensão de uma determinada amplitude. Assim, a área de vulnerabilidade é definida para um consumidor específico e para um limite de afundamento de tensão. Limite de tensão este, estabelecido a partir do tipo de

carga existente neste consumidor. De posse dos dados de sensibilidade da carga, é possível determinar qual é o valor de afundamento de tensão passível de afetá-la, e conseqüentemente, define qual a área geográfica (área de vulnerabilidade) do sistema capaz de causá-lo [14].

A determinação da área de vulnerabilidade é realizada através de cálculos de curto circuito ao longo do sistema elétrico. É importante ressaltar que quanto mais sensível a carga, maior será a sua área de vulnerabilidade. Para ilustrar, a figura 2.7 apresenta a área de vulnerabilidade definida para uma carga específica (área cinza). Isto significa que, para uma falta em qualquer ponto dentro da área cinza a carga estará sujeita a problemas relativos a mau funcionamento ou desligamentos.

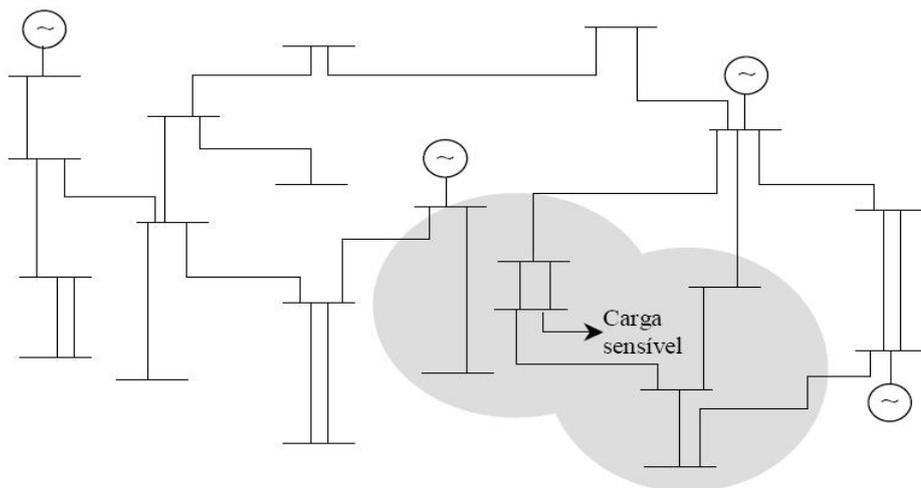


Figura 2.7 – Área de vulnerabilidade definida para uma carga

A partir da modelagem e avaliação computacional do sistema é possível determinar a magnitude da depressão de tensão, experimentada pelos consumidores, para qualquer tipo de falta que ocorrer ao longo do sistema elétrico [8].

É importante observar, que a probabilidade de falha do equipamento, é função da extensão da área de vulnerabilidade e também que, a área de vulnerabilidade guarda uma relação com a “distância elétrica” e não, necessariamente, com a “distância geográfica” entre o ponto da falta e a carga sensível [2].

A figura 2.8 mostra uma aplicação numérica da equação (2.1) para uma falta sólida no ponto A ($Z_f = 0$), utilizando as reatâncias de seqüência positiva do alimentador. O uso somente das reatâncias é utilizado para simplificar os cálculos envolvidos na determinação da magnitude e ângulo do afundamento de tensão.

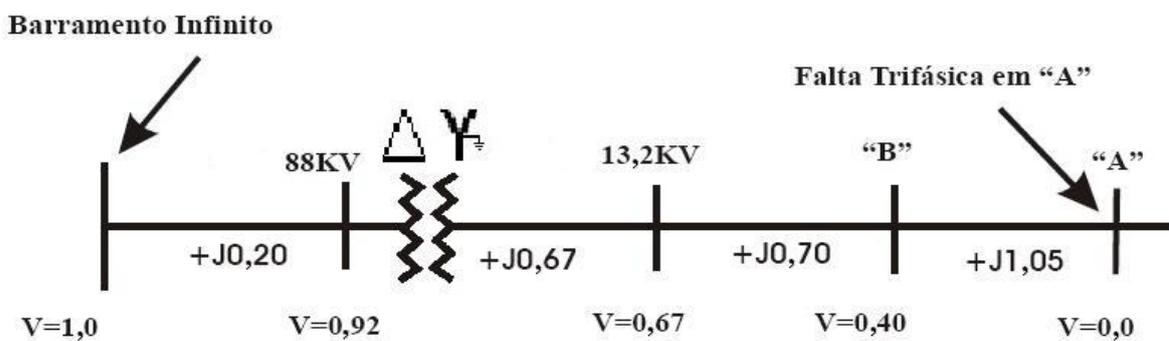


Figura 2.8 – Diagrama unifilar do sistema usado para ilustração

Estes mesmos conceitos poderão ser aplicados em sistemas mais completos, entretanto, os cálculos são mais complexos devido à topologia não radial destas redes, exigindo softwares elaborados para garantir a precisão dos resultados [10].

Para as redes de transmissão interconectadas em locais mais próximos do curto-circuito o afundamento é mais severo e, à medida que se afasta do local de curto-circuito a magnitude se reduz, tendo intensidade mínima em locais mais distantes, conforme pode ser observado pela aplicação da equação (2.1).

Complementarmente, através dos resultados das simulações, é possível obter uma estimativa no sistema elétrico, os níveis de VTCDs relativos aos vários tipos de curtos-circuitos ao longo de todo o sistema elétrico analisado. Desta forma é possível mapear toda a rede elétrica em função do tipo e local do curto [6].

2.7 - VARIÁVEIS DE INFLUÊNCIA NAS VTCDs

A análise das VTCDs pode ser considerada complexa por envolver diversos fatores que influenciam em suas características (frequência, magnitude e duração), são amplamente discutidas nas referências [3, 5 e 7], as quais são apresentadas a seguir:

- Tipo de falta;
- Localização da falta;
- Resistência de falta;
- Tensão pré-falta;
- Conexão dos transformadores entre o ponto de falta e a carga;
- Desempenho do sistema de proteção;
- Existência de sistemas de religamento;
- Taxas de falta de linhas de transmissão e distribuição;
- Bitolas dos cabos envolvidos;
- Sistemas aéreos e/ou subterrâneos;
- Nível de curto-circuito do PAC;

De todas as variáveis anteriores, a proposta dessa dissertação é analisar especificamente a contribuição ou a influência que as conexões dos transformadores exercem sobre o fenômeno da propagação do afundamento de tensão ao longo do sistema elétrico analisado.

2.8 - PROPAGAÇÃO DOS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

Os afundamentos de tensão ao se propagarem pelo sistema elétrico terão suas características alteradas, não apenas devido as impedâncias entre a origem do evento e a carga, mas também pelo tipo de conexão dos transformadores através dos quais se propagam ao longo da rede [21].

Sendo assim, uma das etapas nos estudos desta dissertação é avaliar e investigar os níveis da influência ou, de que forma as conexões dos transformadores irão alterar as características dos afundamentos de tensão, quando estes se propagam pela rede elétrica.

2.9 - A INFLUÊNCIA DO TIPO DE CONEXÃO DOS TRANSFORMADORES NOS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

O transformador é um dos equipamentos de maior relevância para os sistemas elétricos, pois ele permite na geração, transmissão e distribuição de energia níveis econômicos convenientes e seguros de tensão de suprimento. A

fim de atender este objetivo, os transformadores podem ser ligados ao sistema elétrico através de várias conexões, destacando-se: Y/Y, Δ /Y, Δ / Δ e Y/ Δ [24].

Nas análises e nos cálculos dos afundamentos de tensão, o tipo de conexão dos transformadores existentes entre o ponto de falta e a barra do consumidor, influenciará as características do afundamento de tensão percebido pela carga. Neste sentido, basicamente, os transformadores podem ser agrupados em três categorias [11]:

Transformador do tipo I

- São aqueles que não filtram as componentes de seqüência zero e geralmente, devido às mesmas razões citadas anteriormente, não introduzem defasamento angular. Pertencem a esta categoria os transformadores com as conexões Yaterrado-Yaterrado, Yaterrado- Δ -Yaterrado, sendo neste caso, o Δ é o enrolamento de compensação. Na figura 2.9, tem-se o esquema de um transformador YNyn, onde a relação de transformação é unitária e as tensões do secundário e do primário estão relacionadas de acordo com a equação (2.3).

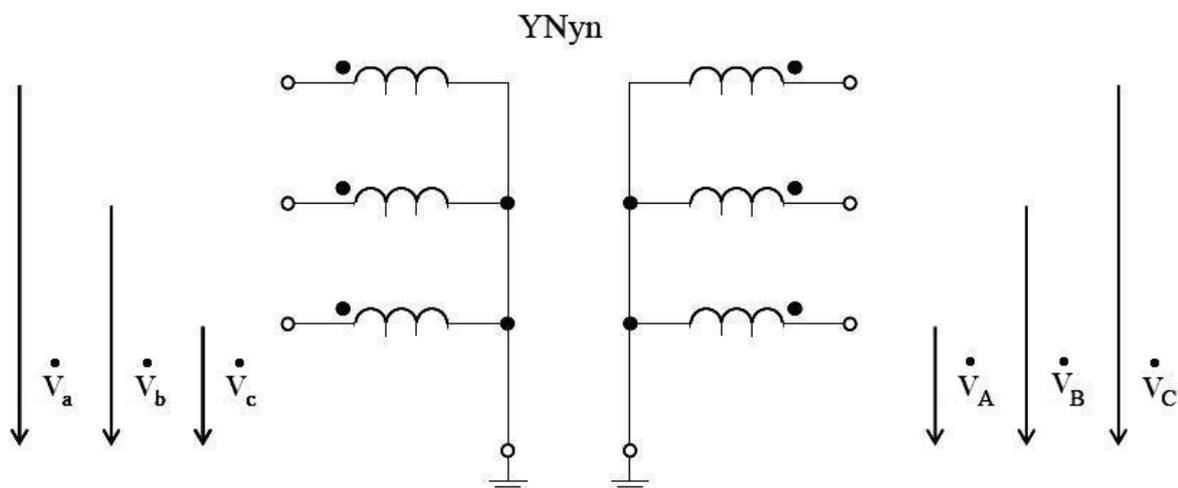


Figura 2.9 – Esquema de um transformador do tipo I, conexão YNyn

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_A \\ \dot{V}_B \\ \dot{V}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Portanto, a matriz de transformação T1 é definida por:

$$T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Onde:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{V}_a, \dot{V}_b, \dot{V}_c \end{bmatrix} &= \text{Tensões fase-neutro do lado primário;} \\ \begin{bmatrix} \dot{V}_A, \dot{V}_B, \dot{V}_C \end{bmatrix} &= \text{Tensões fase-neutro do lado secundário;} \\ \begin{bmatrix} \dot{V}_{ab}, \dot{V}_{bc}, \dot{V}_{ca} \end{bmatrix} &= \text{Tensões fase-fase do lado primário;} \\ \begin{bmatrix} \dot{V}_{AB}, \dot{V}_{BC}, \dot{V}_{CA} \end{bmatrix} &= \text{Tensões fase-fase do lado secundário.} \end{aligned}$$

Transformador tipo II

- São aqueles que somente filtram as componentes de seqüência zero da tensão de frequência fundamental, e que geralmente, do ponto de vista construtivo, são fabricados de modo a não introduzir defasamento angular, ou seja, com conexões Y-Y, Δ - Δ , Yaterrado-Y e Y-Yaterrado. A figura 2.10 a seguir, mostra um esquema deste tipo de transformador, Δ - Δ onde a relação de transformação também é unitária. As tensões do secundário e do primário podem ser determinadas através da equação (2.5).

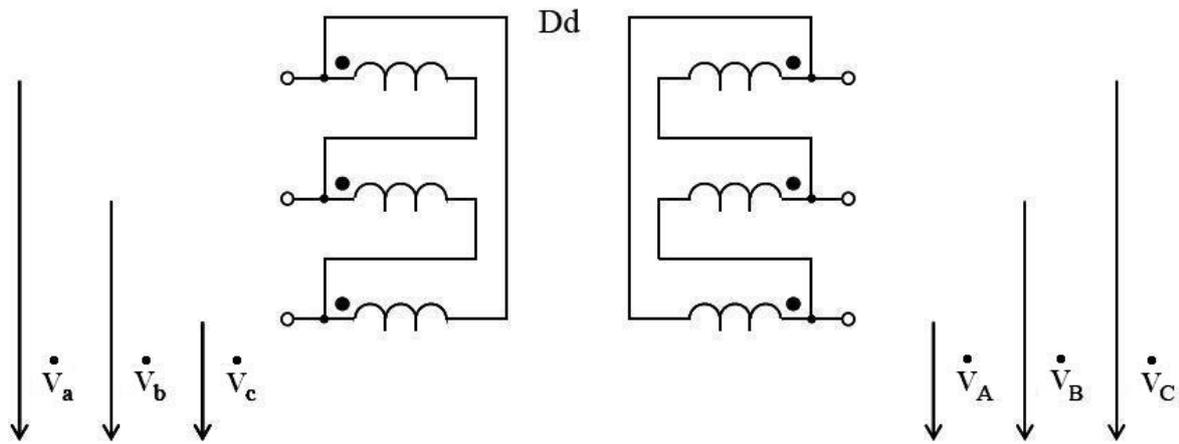


Figura 2.10 – Esquema de um transformador do tipo II, conexão Dd.

$$\left. \begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \dot{V}_{ab} \\ \dot{V}_{bc} \\ \dot{V}_{ca} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} \dot{V}_{AB} \\ \dot{V}_{BC} \\ \dot{V}_{CA} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_{ab} \\ \dot{V}_{bc} \\ \dot{V}_{ca} \end{bmatrix}
 \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

As tensões \dot{V}_A , \dot{V}_B e \dot{V}_C são indeterminadas por causa do delta. Sabe-se o valor de \dot{V}_A :

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_A &= \dot{V}_A \\ \dot{V}_B &= \dot{V}_{BC} + \dot{V}_C = \dot{V}_{BC} + \dot{V}_{CA} + \dot{V}_A = \dot{V}_b - \dot{V}_a + \dot{V}_A \\ \dot{V}_C &= \dot{V}_{CA} + \dot{V}_A = \dot{V}_c - \dot{V}_a + \dot{V}_A \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_A \\ \dot{V}_B \\ \dot{V}_C \end{bmatrix} = \dot{V}_A + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix}$$

Então

$$\dot{V}_A = \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot \dot{V}_a - \dot{V}_b - \dot{V}_c) \quad (2.7)$$

E assim se obtém:

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_A &= \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot \dot{V}_a - \dot{V}_b - \dot{V}_c) \\ \dot{V}_B &= \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot \dot{V}_a - \dot{V}_b - \dot{V}_c) - \dot{V}_a + \dot{V}_b = \frac{1}{3} \cdot (-\dot{V}_a + 2 \cdot \dot{V}_b - \dot{V}_c) \\ \dot{V}_C &= \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot \dot{V}_a - \dot{V}_b - \dot{V}_c) - \dot{V}_a + \dot{V}_c = \frac{1}{3} \cdot (-\dot{V}_a - \dot{V}_b + 2 \cdot \dot{V}_c) \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_A \\ \dot{V}_B \\ \dot{V}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix}$$

Portanto a matriz de transformação T2 é definida pela equação (2.9) abaixo.

$$T_2 = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Transformador do tipo III

- São aqueles, cujas tensões nas bobinas em um dos enrolamentos (primário ou secundário) ocorrem em função da diferença fasorial (tensão composta) entre duas tensões aplicadas nas bobinas do outro enrolamento. Estes transformadores típicos são os de conexão Y-Δ, Δ-Y, Yaterrado-Δ e Δ-Yaterrado, que além de filtrarem a componente de seqüência zero da tensão de freqüência fundamental, introduzem defasamento angular entre as tensões primária e secundária. Na figura 2.11, abaixo, observa-se o esquema de um transformador Dyn. As tensões envolvidas podem ser relacionadas de acordo com a equação (2.10).

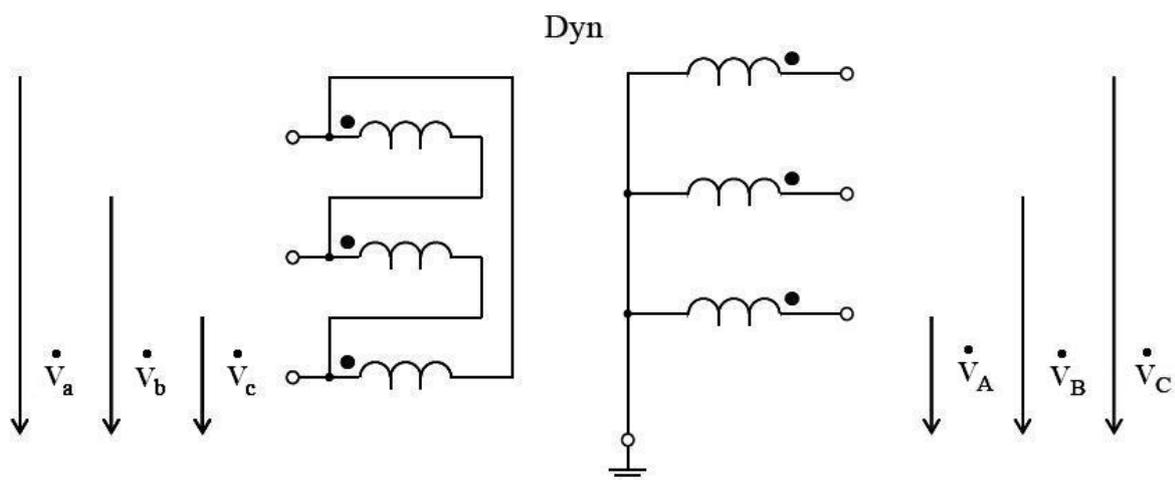


Figura 2.11 – Esquema de um transformador do tipo III, conexão Dyn.

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_A \\ \dot{V}_B \\ \dot{V}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Considerando que as tensões \dot{V}_A , \dot{V}_B e \dot{V}_C estão defasadas de 90° em relação às tensões \dot{V}_a , \dot{V}_b e \dot{V}_c , quando a alimentação é simétrica, e que possam estas ficar em fase, multiplica-se a matriz de transformação T3 pelo operado j . Portanto, a matriz transformação T3 fica,

$$T_3 = \frac{j}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

De posse das matrizes de transformação T2 e T3 pode-se obter uma relação bastante importante para o entendimento do fenômeno da propagação do distúrbio estudado.

Como $T_2 = T_3^2$; pode-se concluir que quando dois transformadores Dy estiverem em cascata eles se equivalem a um transformador Dd, ou ainda se dois transformadores do tipo Yd estiverem em cascata eles se equivalem a um transformador do tipo Yy [11].

Nos transformadores que removem a tensão de seqüência zero, a tensão no secundário é igual à tensão aplicada ao primário subtraída a tensão de seqüência zero. Todos os transformadores que apresentam o circuito de seqüência zero como um ramo em aberto no primário e/ou no secundário remove a tensão de seqüência zero sendo eles com conexões do tipo Yy, Dd, YNd, Dy e Yd, respectivamente.

Neste sentido, a figura 2.12 ilustra três tipos de transformadores e seus respectivos circuitos equivalentes de sequência zero [21].

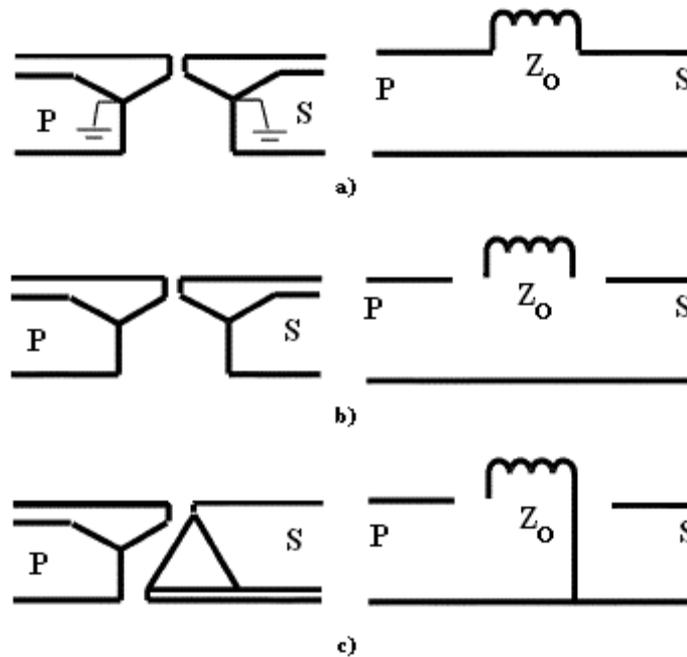


Figura 2.12 – Tipos básicos de transformadores quanto à propagação do afundamento; a) não modifica os afundamentos; b) remove a componente de sequência zero; c) provoca defasamento angular.

Os afundamentos que possuem componentes de sequência zero de tensão são os de origem de curtos-circuitos fase-terra e fase-fase-terra, que ao fluir através de cada tipo de transformador sofre diferentes alterações, tanto em sua magnitude quanto em seu ângulo de fase.

Para resumir o que cada tipo de conexão de transformador influencia na propagação do afundamento, ou seja, quais são as mudanças que ele impõe sobre o distúrbio, quando este flui através do transformador, observe nas tabelas 2.4 e 2.5, os afundamentos ao propagarem pelos transformadores com os tipos de conexões variados sofrem ou não uma alteração em suas características. A exemplo, em transformadores do tipo I – YNyn – resultam em afundamentos idênticos no secundário, pois esse tipo de transformador

permite a passagem de todas as componentes de sequência e não promove defasamento angular [24].

Já com uma importância mais significativa, quando o afundamento se propaga através dos transformadores do tipo III, que neste caso além de não permitir que as componentes de sequência zero se propaguem, também gera defasagem angular. Uma característica importante, é no secundário dos transformadores do tipo II, nunca se verá uma interrupção, advinda do primário.

Tabela 2.4 – Propagação do afundamento de tensão, provocado por um curto fase-terra, através de cada tipo de transformador.

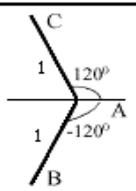
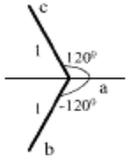
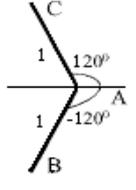
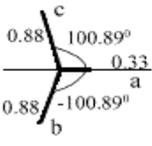
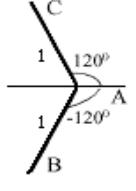
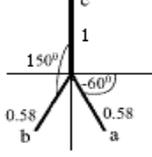
AFUNDAMENTO CAUSADO POR	TIPO DE CONEXÃO	PROPAGAÇÃO DO AFUNDAMENTO
 <p>CURTO FASE-TERRA</p>	<p>TIPO 1</p> <p>YNyn</p>	 <p>AFUNDAMENTO IDENTICO</p>
 <p>CURTO FASE-TERRA</p>	<p>TIPO 2</p> <p>Dd</p>	 <p>AFUNDAMENTO NAS TRÊS FASES</p>
 <p>CURTO FASE-TERRA</p>	<p>TIPO 3</p> <p>Dyn</p>	 <p>AFUNDAMENTO EM DUAS FASES</p>

Tabela 2.5 – Propagação do afundamento de tensão, provocado por um curto fase-fase, através de cada tipo de transformador.

AFUNDAMENTO CAUSADO POR	TIPO DE CONEXÃO	PROPAGAÇÃO DO AFUNDAMENTO
$\begin{array}{c c} 0.5 & 1 \\ \hline B, C & A \end{array}$ <p>CURTO FASE-FASE</p>	<p>TIPO 1 YNyn</p>	$\begin{array}{c c} 0.5 & 1 \\ \hline b, c & a \end{array}$ <p>AFUNDAMENTO IDENTICO</p>
$\begin{array}{c c} 0.5 & 1 \\ \hline B, C & A \end{array}$ <p>CURTO FASE-FASE</p>	<p>TIPO 2 Dd</p>	$\begin{array}{c c} 0.5 & 1 \\ \hline b, c & a \end{array}$ <p>AFUNDAMENTO IDENTICO</p>
$\begin{array}{c c} 0.5 & 1 \\ \hline B, C & A \end{array}$ <p>CURTO FASE-FASE</p>	<p>TIPO 3 Dyn</p>	$\begin{array}{c c} 0.87 & 0.87 \\ \hline b & a \end{array}$ <p>AFUNDAMENTO EM DUAS FASES E INTERRUPTÃO EM UMA FASE</p>

Finalmente pode-se dizer que, os afundamentos de tensão ao se propagarem pelo sistema elétrico terão suas características alteradas, não apenas devido à impedância entre a origem do evento e a carga, mas também principalmente devido ao tipo de conexão dos transformadores através dos quais se propagam ao longo da rede [23].

2.9.1 - PROPAGAÇÃO DO AFUNDAMENTO DE TENSÃO TIPO B ATRAVÉS DOS TRANSFORMADORES

Será apresentado neste item o comportamento do afundamento do tipo B ao se propagar para outros níveis de tensão na rede, ou seja, avaliar as alterações que ocorrem quando este se propaga pelos diferentes tipos de transformadores existentes na rede elétrica.

Transformador tipo I – Uma carga estrela no secundário de um transformador do tipo I, em cujo primário é aplicado um distúrbio do tipo B, irá sentir o mesmo afundamento.

Transformador tipo II – Neste caso, aplicando-se as matrizes de transformação ao distúrbio, considerando que $[\dot{V}_A, \dot{V}_B, \dot{V}_C]$ são as tensões de fase no lado secundário do transformador, tem-se que:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_A \\ \dot{V}_B \\ \dot{V}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} h \\ a^2 \\ a \end{bmatrix} \cdot \dot{V} \quad (2.12)$$

Realizando a operação acima tem-se que:

$$\begin{aligned}\dot{V}_A &= \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot h + 1) \cdot \dot{V} \\ \dot{V}_B &= \left(-\frac{1}{6} \cdot (2 \cdot h + 1) - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot \dot{V} \\ \dot{V}_C &= \left(-\frac{1}{6} \cdot (2 \cdot h + 1) - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot \dot{V}\end{aligned}\tag{2.13}$$

Observa-se que estas expressões são muito similares aquelas dos afundamentos de tensão do tipo D. Estas expressões em (2.13) são denominadas de tipo D*, na referencia [11] é considerado um maior detalhamento.

Transformador tipo III – Como este tipo de transformador que modifica tensões de linha para tensões de fase, e quando ocorre um afundamento do tipo B no primário deste e no secundário é conectada uma carga em estrela esta estará submetida a uma tensão igual à tensão de uma carga conectada em triangulo, e neste caso o afundamento visto no secundário deste transformador será do tipo C*. Essa denominação C* e D* indicam que a magnitude do afundamento não é igual a V, mas sim igual a $\frac{1}{3} + \frac{2}{3}V$, conforme descrito anteriormente.

2.9.2 - PROPAGAÇÃO DO AFUNDAMENTO DE TENSÃO TIPO C ATRAVÉS DOS TRANSFORMADORES

Similarmente ao caso anterior, propõe-se aqui analisar que alterações ocorrem quando o afundamento do tipo C propaga pelos diferentes tipos de transformadores existentes na rede elétrica.

Transformador tipo I – Uma carga em estrela conectada no secundário deste tipo de transformador, onde o primário esteja submetido a um distúrbio do tipo C, terá o mesmo tipo de afundamento.

Transformador tipo II – Aplicando a matriz de transformação T2 à análise do distúrbio tem-se:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_A \\ \dot{V}_B \\ \dot{V}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ -\frac{1}{2} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot h \\ -\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot h \end{bmatrix} \cdot \dot{V} = \begin{bmatrix} 1 \\ -\frac{1}{2} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot h \\ -\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot h \end{bmatrix} \cdot \dot{V} \quad (2.14)$$

Observa-se que no secundário é mantido o mesmo afundamento do tipo C, pois este afundamento não possui componente de sequência zero.

Transformador tipo III – Quando ocorre um distúrbio do tipo C no primário deste tipo de transformador, e há uma carga em estrela no secundário do mesmo, esta carga ficará submetida a uma tensão com as mesmas

características se lá estivesse uma carga conectada em triângulo. Então, neste caso a carga estará submetida a um afundamento do tipo D.

2.9.3 - PROPAGAÇÃO DO AFUNDAMENTO DE TENSÃO TIPO D ATRAVÉS DOS TRANSFORMADORES

Similarmente aos casos anteriores será aqui analisado o afundamento do tipo D ao se propagar para outros níveis de tensão da rede, ou seja, analisar quais alterações que ocorrem quando o afundamento do tipo D propaga pelos diferentes tipos de transformadores existentes na rede elétrica.

Transformador tipo I – Uma carga conectada em estrela no secundário deste tipo de transformador, em cujo primário é aplicado um afundamento do tipo D, fica esta submetida a um mesmo afundamento.

Transformador tipo II – Aplicando-se a matriz transformação T2 ao distúrbio se obtem-se o valor das tensões conforme as equações (2.15), onde se observa nenhuma mudança, pois este tipo de distúrbio não possui componentes de sequencia zero.

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_A \\ \dot{V}_B \\ \dot{V}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} h \\ -\frac{1}{2} \cdot h - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} \cdot h + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \dot{V} = \begin{bmatrix} h \\ -\frac{1}{2} \cdot h - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} \cdot h + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \dot{V} \quad (2.15)$$

Transformador tipo III – Neste caso, o resultado é aquele oposto ao de uma carga conectada em triângulo submetida a um afundamento do tipo C, “enxergaria” um distúrbio do tipo D. Sendo assim, neste caso a carga ficará submetida a um evento do tipo C.

2.9.4 - PROPAGAÇÃO DO AFUNDAMENTO DE TENSÃO TIPO E ATRAVÉS DOS TRANSFORMADORES

Similarmente aos casos anteriores, será avaliada aqui a propagação do afundamento do tipo E.

Transformador tipo I – Uma carga em estrela conectada no secundário deste transformador, ao aplicar um afundamento do tipo E no primário fará com que a carga estará submetida ao mesmo tipo de distúrbio.

Transformador tipo II – Aplicando a matriz de transformação T2 ao distúrbio, tem-se que:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_A \\ \dot{V}_B \\ \dot{V}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ a^2 \cdot h \\ a \cdot h \end{bmatrix} \cdot \dot{V} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} \cdot (2+h) \\ -\frac{1}{6} \cdot (2+h) - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot h \\ -\frac{1}{6} \cdot (2+h) + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot h \end{bmatrix} \cdot \dot{V} \quad (2.16)$$

Observa-se que as equações obtidas em (2.16) correspondem ao afundamento de tensão do tipo G, e as tensões para este em componentes simétricas é:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} \cdot \dot{V} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1+2 \cdot h \\ 1-h \end{bmatrix} \cdot \dot{V} \quad (2.17)$$

Transformador tipo III – Este caso é análogo a de uma carga conectada em triângulo quando submetida ao distúrbio tipo E, e esta submeterá a um afundamento do tipo F.

2.9.5 - PROPAGAÇÃO DO AFUNDAMENTO DE TENSÃO TIPO F ATRAVÉS DOS TRANSFORMADORES

As análises aqui para evitar repetição serão concentradas na propagação do afundamento do tipo F.

Transformador tipo I – Com uma carga conectada em estrela no secundário deste transformador cujo primário é aplicado um evento do tipo F, irá sentir o mesmo tipo de distúrbio.

Transformador tipo II – Aplicando a matriz transformação T2 ao distúrbio obtem-se:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_A \\ \dot{V}_B \\ \dot{V}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h \\ \frac{1}{2} \cdot h - j \cdot \frac{2+h}{\sqrt{12}} \\ \frac{1}{2} \cdot h + j \cdot \frac{2+h}{\sqrt{12}} \end{bmatrix} \cdot \dot{V} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} h \\ \frac{1}{2} \cdot h - j \cdot \frac{2+h}{\sqrt{12}} \\ \frac{1}{2} \cdot h + j \cdot \frac{2+h}{\sqrt{12}} \end{bmatrix} \cdot \dot{V} \quad (2.18)$$

Pode-se observar da expressão anterior que não houve nenhuma alteração da tensão entre o primário e o secundário, pois este tipo de distúrbio não apresenta componente de sequência zero.

Transformador tipo III – Aplicando a matriz transformação T3, obtém-se as equações (2.19). Como resultado, ocorre uma transformação do afundamento do tipo F para o tipo G.

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_A \\ \dot{V}_B \\ \dot{V}_C \end{bmatrix} = \frac{j}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h \\ \frac{1}{2} \cdot h - j \cdot \frac{2+h}{\sqrt{12}} \\ \frac{1}{2} \cdot h + j \cdot \frac{2+h}{\sqrt{12}} \end{bmatrix} \cdot \dot{V} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} \cdot (2+h) \\ \frac{1}{6} \cdot (2+h) - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot h \\ \frac{1}{6} \cdot (2+h) + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot h \end{bmatrix} \cdot \dot{V} \quad (2.19)$$

2.9.6 - PROPAGAÇÃO DO AFUNDAMENTO DE TENSÃO TIPO G ATRAVÉS DOS TRANSFORMADORES

De maneira similar aos casos anteriores verifica-se aqui o comportamento do afundamento de tensão do tipo G ao se propagar através dos diversos tipos de conexões de transformadores.

Transformador tipo I – Com uma carga em estrela conectada no secundário deste transformador cujo primário é submetido a um afundamento do tipo G, irá sentir o mesmo tipo de distúrbio.

Transformador tipo II – Aplicando a matriz transformação T2 ao distúrbio obtém-se:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_A \\ \dot{V}_B \\ \dot{V}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{3} \cdot (2+h) \\ \frac{1}{6} \cdot (2+h) - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot h \\ \frac{1}{6} \cdot (2+h) + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot h \end{bmatrix} \cdot \dot{V} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} \cdot (2+h) \\ \frac{1}{6} \cdot (2+h) - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot h \\ \frac{1}{6} \cdot (2+h) + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot h \end{bmatrix} \cdot \dot{V} \quad (2.20)$$

Observa-se que a alteração ocorreu entre o primário e o secundário, pois este tipo de distúrbio não apresenta componente de sequência zero.

Transformador tipo III – Aplicando a matriz transformação T3 ao distúrbio obtém-se:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_A \\ \dot{V}_B \\ \dot{V}_C \end{bmatrix} = \frac{j}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{3} \cdot (2+h) \\ -\frac{1}{6} \cdot (2+h) - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot h \\ -\frac{1}{6} \cdot (2+h) + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot h \end{bmatrix} \cdot \dot{V} = \begin{bmatrix} h \\ -\frac{1}{2} \cdot h - j \cdot \frac{2+h}{\sqrt{12}} \\ -\frac{1}{2} \cdot h + j \cdot \frac{2+h}{\sqrt{12}} \end{bmatrix} \cdot \dot{V} \quad (2.21)$$

Neste caso, no secundário deste transformador observa-se um distúrbio do tipo F. Finalmente, a tabela 2.6 resume os resultados obtidos das análises anteriores. Das análises e cálculos dos afundamentos de tensão realizados, o tipo de conexão dos transformadores existentes entre o local da falta e a carga irá influenciar significativamente na magnitude e no ângulo de fase do afundamento [11].

Tabela 2.6 – Tipos de afundamentos no secundário do transformador

Tipo de conexão	Afundamento de tensão no lado primário						
	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo D	Tipo E	Tipo F	Tipo G
YNyn	A	B	C	D	E	F	G
Yy, Dd, Dz	A	D*	C	D	G	F	G
Yd, Dy, Yz	A	C*	D	C	F	G	F

C* D* - indica que a magnitude do afundamento não é igual a V, mas será igual $\frac{1}{3} + \frac{2}{3}V$.

2.10 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, foram apresentados os principais parâmetros que caracterizam os afundamentos de tensão, a saber: intensidade e duração, e os tipos de faltas, aplicando-se um método simples de cálculo da magnitude em um sistema radial.

Constatou-se, nas avaliações deste capítulo, que grupos de trabalho associados ao IEEE, IEC e ONS, têm envidado esforços no sentido de estabelecer padrões, terminologia, parâmetros para caracterização dos afundamentos de tensão, etc. Muito embora estes esforços ainda se encontrem em níveis de proposição e não culminaram ainda em aprovação de normas e padrões pelos órgãos reguladores, esta etapa de trabalhos já norteia os rumos das futuras regulamentações do assunto.

Observou-se ainda que, quando os afundamentos de tensão possuem componentes de sequência zero alguns tipos de transformadores não permitem o fluxo dessas componentes. Todavia, para alguns tipos de afundamentos, a componente de sequência zero não está presente, originários de curtos-circuitos que não envolvem a terra, a influência neste caso é devido à defasagem imposta pelos transformadores de tipo III.

Nas análises e cálculos dos afundamentos de tensão, o tipo de conexão dos transformadores existentes entre o local da falta e a carga tem uma influência significativa na magnitude e no ângulo de fase do afundamento.

Os resultados das análises mostram a importância da avaliação das conexões dos transformadores presentes entre a concessionária e o consumidor final e a maneira com que o fenômeno se propaga pela rede.

CAPÍTULO 3

MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO NO ATP

3.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os estudos envolvendo afundamentos de tensão são conduzidos a partir do monitoramento das tensões do sistema elétrico ou através da utilização de metodologias de predição [7].

Através da simulação digital pode-se representar detalhadamente a rede com todos os componentes do sistema elétrico, tanto para a realização de estudos preditivos como corretivos, dando suporte aos setores de engenharia no equacionamento e solução dos problemas identificados.

Assim, neste capítulo serão apresentados os conceitos básicos dos modelos dos principais componentes do sistema quando se realizam estudos de afundamentos de tensão, utilizando-se programas de transitórios eletromagnéticos, sendo que nesta dissertação será usado o programa ATP[4].

Também serão considerados neste capítulo os procedimentos para a modelagem da fonte geradora de afundamentos desenvolvida no ATP, seguido de casos testes para validação dos modelos aqui adotados, conforme a seguir.

3.2 - SOFTWARES QUE SÃO UTILIZADOS PARA ANÁLISE DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

Os itens subseqüentes apresentam o estado da arte no que tange a softwares existentes para análise de afundamentos de tensão, tanto em âmbito nacional quanto internacional. Tal apresentação busca ressaltar os principais atributos de cada sistema e, principalmente, destacar as limitações e necessidade de desenvolvimentos complementares apresentadas em cada programa para possíveis adequações na simulação digital [3].

3.2.1 - PROGRAMA CREUTENSI DA EDF

Este programa [EDF, 1993] desenvolvido pela EdF – “Eletricitè de France” – tem o objetivo de fornecer, com boa aproximação, as características dos afundamentos de tensão e das interrupções em redes de distribuição de média tensão.

O programa considera, como dados de entrada, apenas os dados da rede de média tensão (MT), ou seja, dados das subestações de alta tensão (AT), transformadores AT / MT, cabos de média tensão (comprimento, seção, tipo, etc.) e subestações de média para baixa tensão. Desta forma, é desconsiderada na análise a possibilidade de faltas na baixa tensão ou em sistemas de média tensão adjacentes.

O cálculo da amplitude dos afundamentos é baseado no método da posição de falta. Uma grande dificuldade comentada pelo autor é propor a distribuição das posições das faltas ao longo de cada alimentador a fim de tratá-las adequadamente. Quando as faltas são temporárias, não há como saber

as suas localizações. Para o cálculo da duração dos VTCDs são utilizados os tempos de extinção da falta.

3.2.2 - PROGRAMA CALIFE DA EDF

O programa CALIFE [DOQUET, 1992] é uma ferramenta utilizada para estimar a qualidade da energia disponível aos consumidores, baseando-se em cálculos de fluxo de potência e curto-circuito.

O desenvolvimento do programa envolveu três versões preliminares, correspondentes às progressivas implementações da arquitetura do software. A versão final do programa considera ocorrências de curtos-circuitos em linhas de transmissão, barramentos e transformadores e permite analisar determinadas falhas de operação de equipamentos, tal como falha na abertura de disjuntores. Também é possível realizar análises de afundamentos de tensão, interrupções de curta e longa duração.

3.2.3 - PROGRAMA VSAT DO EPRI/ELECTROTEK

O programa VSAT do EPRI foi desenvolvido em parceria com a “Electrotek Concepts, Inc.”[ELECTROTEK, 1997]. Este aplicativo foi projetado para ambiente “Windows 95” ou “Windows NT” e utiliza bancos de dados com extensão “mdb” compatíveis com o “Microsoft Access”.

O programa possui alguns importantes atributos:

- Possibilidade de caracterização dos afundamentos segundo os tipos A, B, C e D, conforme proposta de Bollen [BOLLEN, 2000b];
- Possibilidade de definir a forma de conexão da carga, ou seja, se esta é conectada em Δ ou Y;
- Especificar o número de transformadores Δ/Y existentes entre a carga do consumidor e um barramento específico monitorado.

De acordo com o documento consultado [ELECTROTEK, 1997], o programa VSAT não calcula a duração dos afundamentos de tensão.

3.2.4 - PROGRAMA DO PTI – POWER TECHNOLOGIES INC

O programa de análise de afundamentos de tensão desenvolvido pela “Power Technologies, Inc.”(PTI) [STECIUK, 1996], utiliza a metodologia das posições de falta proposta pelo IEEE, conforme [CONRAD, 1991], [BECKER, 1994].

As análises dos afundamentos de tensão executadas pelo programa consistem basicamente de quatro procedimentos:

- Análise de fluxo de potência;
- Cálculo dos afundamentos de tensão pelo processo de aplicação de curtos-circuitos deslizantes. Para a aplicação das faltas, cada linha é dividida em seções iguais e o número de seções varia de acordo com o comprimento da linha. As tensões fase-neutro ou

fase-fase, no consumidor, são armazenadas para cada condição de falta;

- Cálculo do número de afundamentos de tensão no consumidor, utilizando as taxas de falta das linhas do sistema, os resultados do fluxo de potência e as tensões determinadas no processo de aplicação de faltas deslizantes. Dependendo da conexão da carga do consumidor, a frequência de ocorrência de afundamentos de tensão pode ser calculada em função da tensão de linha e/ou da tensão de fase;
- Os dados obtidos do fluxo de potência, do processo de aplicação de faltas e do cálculo das ocorrências de afundamentos de tensão podem ser ordenados por magnitude, tipo de falta, local da falta e tensão nominal do sistema no ponto da falta. As áreas de vulnerabilidade podem ser traçadas num mapa geográfico ou diagrama unifilar, que podem ser usados para destacar linhas de transmissão ou distribuição que necessitem de investimentos em confiabilidade.

Este aplicativo possui a funcionalidade de automatizar a execução dos programas de fluxo de potência e análise de faltas, bem como as demais tarefas num único programa. Essa integração torna a análise de afundamentos de tensão rápida e simples, requerendo apenas um arquivo de taxas de falta para cada ramo associado às linhas de transmissão do fluxo de potência.

Entre futuras implementações pretendidas no programa, os autores citam a inclusão do cálculo da duração dos afundamentos de tensão, utilizando as práticas e filosofias de proteção de sobrecorrente da concessionária ou introduzindo os ajustes dos relés e fusíveis para cada linha de transmissão, subtransmissão e distribuição.

3.2.5 - PROGRAMA ANAQUALI DO CEPEL

O programa ANAQUALI, desenvolvido pelo Cepel para cálculo e análise de afundamentos momentâneos de tensão, utiliza os resultados dos cálculos de curto-circuito realizados pelo ANAFAS [CEPEL, 1998]. A metodologia implementada baseia-se na simulação de faltas deslizantes aplicadas ao longo das linhas e barramentos dentro de uma área de influência pré-definida, e na monitoração das tensões (fase-neutro e/ou fase-fase) na barra de interesse onde se deseja obter os índices de qualidade.

Adicionalmente, o ANAQUALI permite a geração de gráficos de perfil de tensão na barra de interesse em função da posição do curto-circuito nas linhas e a geração de diagramas fasoriais correspondentes.

Os dados que descrevem a rede elétrica são fornecidos ao ANAQUALI via arquivo texto no padrão ANAFAS, acrescido dos valores dos comprimentos das linhas pertencentes à área de influência. Os dados estatísticos, contendo as frequências de ocorrência de defeitos nas linhas e barras (individualmente e/ou por nível de tensão), são fornecidos para o ANAQUALI através de telas específicas, sendo armazenados em um banco de dados.

Em versões futuras do ANAQUALI, os autores pretendem modelar a curva de sensibilidade da carga ligada na barra de interesse, o que permitirá uma melhor avaliação do impacto causado pelos afundamentos momentâneos. Outra melhoria pretendida no programa se refere à implementação dos tempos de atuação da proteção nas diferentes linhas da área de influência.

3.2.6 - PROGRAMA ATP – ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM

O ATP é um programa desenvolvido originalmente para a simulação de fenômenos transitórios em sistemas elétricos de potência e a sua aplicação em estudos de qualidade de energia, como qualquer outro programa do tipo EMTP, abrangendo diversas áreas [6].

Apesar do ATP ser a ferramenta computacional muito utilizada para estudos de transitórios eletromagnéticos, a sua formatação de entrada de dados é muito complexa, tornando-se um grande obstáculo para sua utilização. Por esta e outras razões, as simulações apresentadas neste trabalho foram desenvolvidas pelo o seu aplicativo ATPDraw.

No ATPDraw é possível construir um diagrama unifilar a partir de modelos predefinidos dos principais componentes de uma rede elétrica, tais como: as representações de elementos a parâmetros concentrados, elementos distribuídos, chaves, geradores, transformadores, linhas de transmissão, pára-raios, reatores, não-linearidades, etc. O ATPDraw é um software com interfaces para o Windows 9x/NT/2000/XP com muitos recursos gráficos, que permitem a criação e edição dos arquivos de dados de entrada para o processamento no ATP [7].

De uma forma geral, são considerados os parâmetros em componentes de fase (monofásico ou trifásico) e em redes de seqüência (zero, positiva e negativa), dependendo do estudo a ser desenvolvido.

Outra vantagem está na utilização de programas para processamento das saídas gráficas dos resultados das simulações, que são realizadas por meio de programas específicos como o PLOTXY, PCPLOT, GTPPLOT, GNUPLOT, etc., podendo ser executados diretamente na barra de ferramentas do ATPDraw.

3.2.7 - ADOTANDO O ATP COMO SIMULADOR

Na referência [4], é realizada uma análise clara e objetiva sobre a utilização do simulador ATP para casos de afundamentos de tensão, estabelecendo parâmetros comparativos entre o ATP e o ANAFAS, cujas conclusões dessa comparação contribuíram de forma significativa para a escolha do ATP como o simulador a ser utilizado nesta dissertação.

Ainda em [4] os casos simulados não se verificou divergências consideráveis nos resultados, podendo-se concluir que é possível utilizar nos estudos e no cálculos dos afundamentos de tensão, um programa de curto-circuito que admite a representação e a modelagem simplificada dos componentes da rede elétrica, sem alterar de forma significativa a precisão dos resultados.

As referencias [36] e [37] realizaram também estudos sobre os afundamentos de tensão, cujos resultados mostraram bastante satisfatórios.

Por fim, o ATP é uma ferramenta computacional de livre acesso e gratuito e neste sentido, nesta dissertação optou-se pela sua utilização.

3.3 - MODELAGEM DO SISTEMA

Neste item serão apresentados os conceitos básicos dos modelos dos principais componentes do sistema quando se realizam estudos de afundamentos de tensão, utilizando-se programas de transitórios eletromagnéticos, em particular o programa ATP [5]. Para as modelagens dos componentes do sistema elétrico, fora utilizado o sistema padrão IEEE de 14 barras.

O diagrama unifilar do referido sistema do IEEE é apresentado na figura 3.1. Este sistema é alimentado por 2 geradores síncronos (barras 1 e 2) e possui 3 compensadores síncronos estáticos, usados exclusivamente para suprir reativos ao sistema (barras 3, 6 e 8). A este sistema estão conectados 10 cargas, totalizando 248,9 MW e 77,9 MVar de demanda [12].

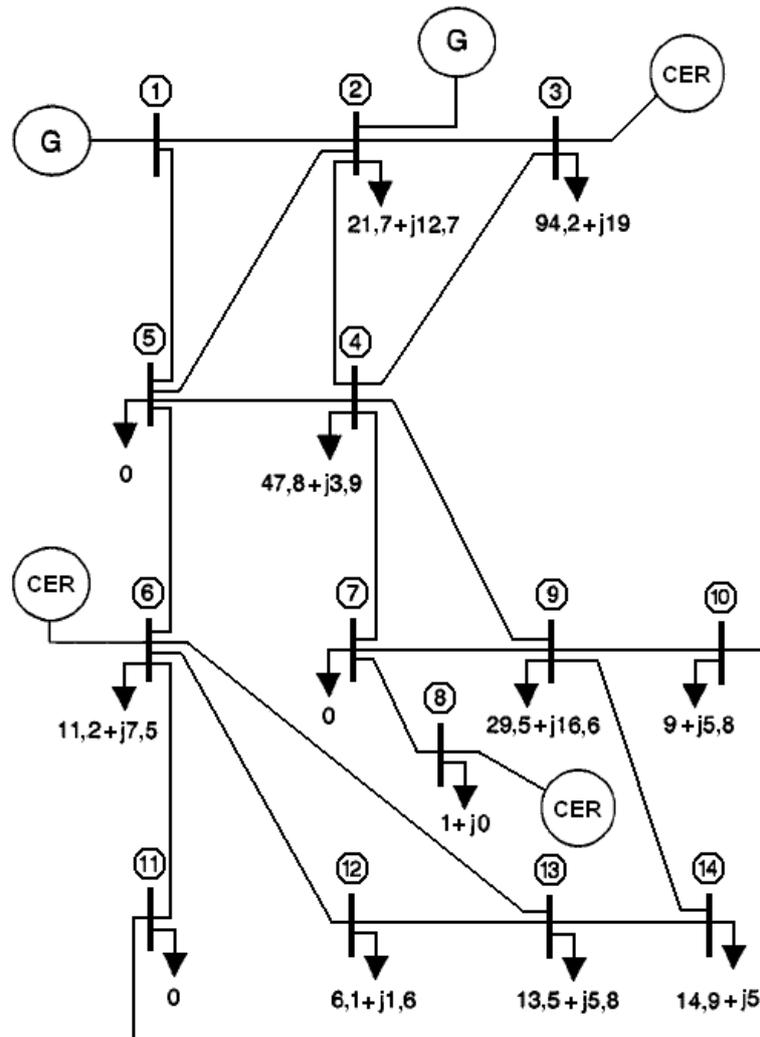


Figura 3.1 – Diagrama unifilar do sistema elétrico padrão do IEEE de 14 barras.

Os dados dos componentes do sistema elétrico são apresentados a seguir em pu, referenciados à potência base de 100 MVA e à tensão base de 138 KV, que é a tensão nominal de todo o sistema.

3.3.1 - GERADORES

São disponíveis na literatura inúmeros modelos e opções de modelagem da máquina síncrona. Neste sentido, a modelagem da máquina síncrona depende bastante do tipo de estudo que será realizado, podendo ser representada por modelos variados, desde os mais simples até os mais sofisticados.

Especificamente no ATP são disponíveis diferentes modelos de máquinas elétricas, e para a aplicação nos estudos de afundamentos de tensão destacam-se os modelos tipo 14 e 59 [25].

O modelo 14 é semelhante ao modelo utilizado pelos programas de curto-circuito, ou seja, o gerador é representado por uma fonte de tensão constante atrás de uma impedância, admitindo que a dinâmica das equações de Park não seja importante. Normalmente, este modelo é utilizado para representar simplificadaamente as máquinas de pequeno porte, os quais apresentam pouca influência no estabelecimento do perfil de tensão do sistema elétrico.

Ressalta-se que nos estudos relativos a afundamentos de tensão, são desprezadas as variações de velocidade e vibrações torsionais, pois, não é necessário considerar os parâmetros representativos das partes mecânicas das máquinas.

Para o sistema aqui utilizado os dados dos geradores são apresentados na tabela 3.1.[12]

Tabela 3.1 – Dados dos geradores (G) e dos compensadores estáticos de reativos (CER).

Nº da Barra	Potência Nominal (MVA)	Resistência (pu)	Reatância (pu)
1	615	0	0,0365
2	60	0,00129	0,4375
3	60	0,00129	0,4375
6	25	0,00006	0,05
8	25	0,00006	0,05

Entretanto, algumas alterações no sistema elétrico escolhido foram necessárias transformando-o em um mais simples a ser modelado. Assim, a tabela 3.1 foi substituída pela tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Dados dos novos pontos de alimentação do sistema

Nº da Barra	Tensão Nominal (KV)	Potência Nominal (MVA)
1	138	100
2	138	100
3	138	100
6	138	100
8	138	100

A escolha do nível de tensão e de potência apresentadas se devem ao fato da necessidade de avaliar o grau de influência do distúrbio sobre este sistema, quando o mesmo estiver fortemente conectado aos outros sistemas. Assim, a aplicação do fenômeno ocorrerá em nível de transmissão, ou seja, o distúrbio terá a sua origem no nível de 138 KV.

3.3.2 - LINHAS DE TRANSMISSÃO

Os modelos disponíveis no ATP para linhas de transmissão são bastante flexíveis e atendem às necessidades de diversos estudos. Neste caso, as linhas podem ser representadas por parâmetros concentrados ou distribuídos, dependendo da precisão dos resultados desejados e em função do seu comprimento. Geralmente, para linhas com comprimento inferiores a 80 Km a representação através de parâmetros concentrados é aceitável, apenas com a informação dos valores da impedância (R e X) para a seqüência positiva e zero. No ATP, ainda há a possibilidade de se utilizar um modelo mais simplificado com apenas a informação da impedância de seqüência positiva das linhas [3].

Na modelagem das por parâmetros distribuídos deverão ser fornecidos ao programa os valores de resistência e de reatância série, bem como da susceptância “shunt”, todos por unidade de comprimento para as seqüências positiva e zero.

Os modelos que admitem a freqüência constante podem ser considerados de dois tipos: com ou sem distorção. No tipo “sem distorção”, considera-se no modelo apenas os parâmetros L e C da linha. Já no tipo “com distorção”, a sua resistência é considerada, sendo 25% do seu valor em cada extremidade e 50% no meio da linha [5], conforme mostra a figura 3.2 a seguir:

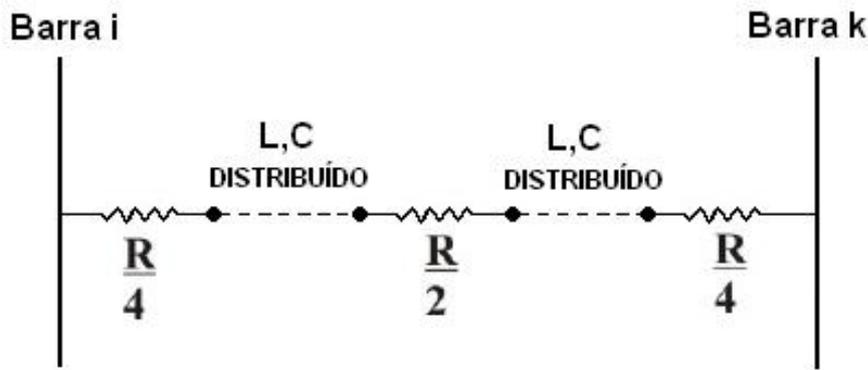


Fig.3.2 – Representação de linha de transmissão – parâmetros distribuídos

Esse procedimento simplifica bastante as equações de propagação de onda na linha sendo que, a subdivisão em mais pontos do fora apresentada não se mostra necessária em estudo de transitórios.

Na maioria dos estudos em sistemas elétricos, a utilização dos modelos de linhas com parâmetros distribuídos mostra-se satisfatórios, com resultados apropriados, não sendo necessária a utilização de modelos com parâmetros variáveis com a frequência. Contudo, dependendo da particularidade do estudo a ser realizado e da necessidade da obtenção de resultados mais adequados, considerando este efeito, o ATP dispõe de diversas alternativas para a modelagem, como por exemplo, o modelo de JMARTI [5].

Nos estudos de afundamento de tensão, a representação da linha através de parâmetros distribuídos já é suficiente, pois se tratam de fenômenos de baixa frequência [12], comparados a outros fenômenos transitórios.

Para a modelagem do sistema proposto, resolve-se adotar como parâmetros de resistência e reatância, os valores que o próprio sistema padrão IEEE de 14 barras fornece, assim sendo, segue abaixo a tabela 3.3 com os valores das linhas entre barras em pu.

Tabela 3.3 – Dados das linhas de transmissão.

Nº. da Linha	Da Barra	Para barra	Resistência (pu)	Reatância (pu)	Susceptância (pu)
01	1	2	0,01938	0,05917	0,0528
02	1	5	0,05403	0,22304	0,0492
03	2	3	0,04699	0,19797	0,0438
04	2	4	0,05811	0,17632	0,0374
05	2	5	0,05695	0,17388	0,034
06	3	4	0,06701	0,17103	0,0346
07	4	5	0,01335	0,04211	0,0128
08	4	7	0,00001	0,20912	0
09	4	9	0,00001	0,55618	0
10	5	6	0,00001	0,25202	0
11	6	11	0,09498	0,1989	0
12	6	12	0,12291	0,25581	0
13	6	13	0,06615	0,13027	0
14	7	8	0,00001	0,17615	0
15	7	9	0,00001	0,11001	0
16	9	10	0,03181	0,0845	0
17	9	14	0,12711	0,27038	0
18	10	11	0,08205	0,19207	0
19	12	13	0,22092	0,19988	0
20	13	14	0,17093	0,34802	0

A linha entre as barras 6 e 11 foi retirada para que o fenômeno afundamento de tensão possa propagar em um sistema radial também.

3.3.3 - TRANSFORMADORES

Os transformadores de potência são modelados através das impedâncias de seqüência positiva e zero entre os enrolamentos. No ATP são fornecidos os valores de resistência e reatância em ohms, e a tensão de base para cada enrolamento, ou seja, são informadas as impedâncias, primária e secundária, e para o caso de um transformador de três enrolamentos, a terciária [5].

A figura 3.3 apresenta o circuito equivalente de um transformador monofásico com vários enrolamentos.

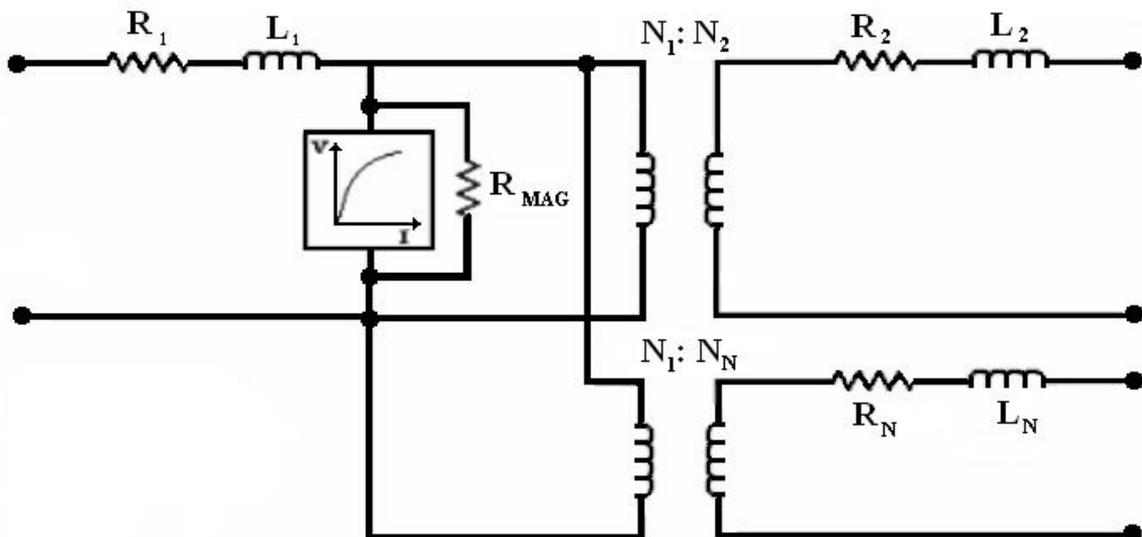


Fig.3.3 – Representação monofásica do transformador.

No ATP, pode-se modelar a característica de saturação dos transformadores através do fornecimento de pontos da curva de saturação do equipamento. Os modelos de transformadores monofásicos podem ser acoplados de forma a se constituir um transformador trifásico, respeitando-se as ligações de cada enrolamento. Para a modelagem dos transformadores é necessário conhecer a impedância dos mesmos, os quais serão calculados a seguir.

Inicialmente à partir da escolha da tensão de base, determina-se a impedância base, utilizando a expressão (3.1).

$$Z_{bn} = \frac{(V_{FNn})^2}{P_{1F}} \quad (3.1)$$

Onde:

$[V_{FNn}]$ = Potência ativa da carga [MW]

$[P_{1F}]$ = Potência reativa da carga [MVAr]

Com o valor da impedância de base é possível calcular a reatância e conseqüentemente a indutância, a qual é empregada no modelo do transformador, como mostrado pelas equações (3.2 e 3.3), respectivamente.

$$X_n = \frac{Z_{bn}}{2} \times Z_{\%} \quad (3.2)$$

$$L_n = \frac{X_n}{2\pi f} \times 10^3 \quad (3.3)$$

Por fim, com os parâmetros do transformador de interesse na modelagem no ATP, são inseridos no referido programa os dados calculados. Neste sentido, a tabela 3.4 a seguir o resumo características dos transformadores utilizados na modelagem.

Tabela 3.4 – Dados dos transformadores utilizados nos estudos de casos

Transformador	Potência Nominal (MVA)	Tipo de Conexão	Resistência (%)	Reatância (%)
A	25	Δ - Δ	0	7
B	25	Δ - Δ	0	7
C	25	Δ - Δ	0	7
D	25	Δ - Δ	0	7
E	10	Δ -Y	0	5
F	5	Δ -Y	0	5
G	1	Δ -Y	0	5

3.3.4 - CARGAS

As cargas podem ser modeladas através do modelo de impedância constante, em que são fornecidos ao programa os valores de resistência e reatância da carga equivalente conectados nas barras do sistema.

Normalmente, das cargas são conhecidos os valores das potências ativa e reativa da carga em regime permanente, bem como a sua tensão nominal. Com estas informações, a representação da carga na forma $R + jX$ é obtida.

Assim, conforme a referência [12] a tabela 3.5 a seguir apresenta as informações das diversas cargas do sistema.

Tabela 3.5 – Dados das cargas.

Nº. da Barra	Potência Ativa (MW)	Potência Reativa (MVar)	Resistência (pu)	Reatância (pu)
2	21,7	12,7	3,43257	2,00892
3	94,2	19	1,02007	0,20575
4	47,8	3,9	2,07822	0,16956
6	11,2	7,5	6,16435	4,12791
9	29,5	16,6	2,5746	1,44876
10	9	5,8	7,85066	5,05932
12	6,1	1,6	15,33819	4,02313
13	13,5	5,8	6,25318	2,68655
14	14,9	5	6,03214	2,02421
Totais	248,9	77,9	---	---

A representação da carga através de impedância constante esta conforme a figura 3.4, sendo que os valores de $[V_K]$, $[P_K]$ e $[Q_K]$ podem ser obtidos de um estudo de fluxo de potência ou por medições [4].

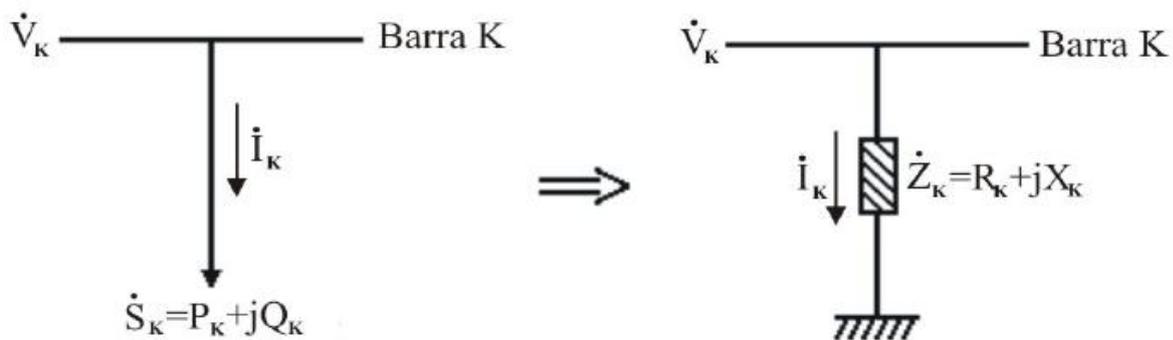


Fig.3.4 – Representação da carga - impedância constante

Da figura 3.4, os parâmetros da carga são:

- $[P_K]$ = Potência ativa da carga [MW]
- $[Q_K]$ = Potência reativa da carga [MVar]
- $[V_K]$ = Tensão do fluxo de potência [KV]
- $[Z_K]$ = Impedância da carga [Ω]

A partir destas informações das cargas obtém-se $[R_K]$ e $[X_K]$, utilizando as equações 3.4 e 3.5 respectivamente.

$$R_K = \frac{V_K^2 \cdot P_K}{(P_K)^2 + (Q_K)^2} \quad (3.4)$$

$$X_K = \frac{V_K^2 \cdot Q_K}{(P_K)^2 + (Q_K)^2} \quad (3.5)$$

Onde:

$[R_K]$ = Resistência da carga [Ω]

$[X_K]$ = Reatância da carga [Ω]

O objetivo desta análise não é de analisar o efeito do afundamento de tensão nas cargas, mas da propagação do distúrbio no sistema é a mais adequada. Deve-se destacar que foram desconsideradas algumas cargas e incluídas outras com mais relevância para o estudo. Assim, a tabela 3.5 anterior foi substituída pela a tabela 3.6 a seguir.

Tabela 3.6 – Dados das novas cargas

Nº da Barra	Potência Ativa (MW)	Potência Reativa (MVar)	Resistência (pu)	Reatância (pu)
7	20	15	5,2	2,6
9	12	9	9,2	3,8
10	3	1	0,5	0,25
11	1	0,5	0,003	0,0015
13	7,5	5	3	2
14	7,5	5	3	2
Totais	118,5	27,5	---	---

A alteração nas cargas foi necessária, pois no sistema original não havia nenhum transformador e com a introdução destes para o estudo houve a necessidade de mudar, ou melhor, reduzir os valores de potencia para que este se adequasse ao presente estudo.

Com as alterações ocorridas no sistema padrão IEEE de 14 barras, este será denominado a partir daqui como sistema teste conforme ilustra a figura 3.5.

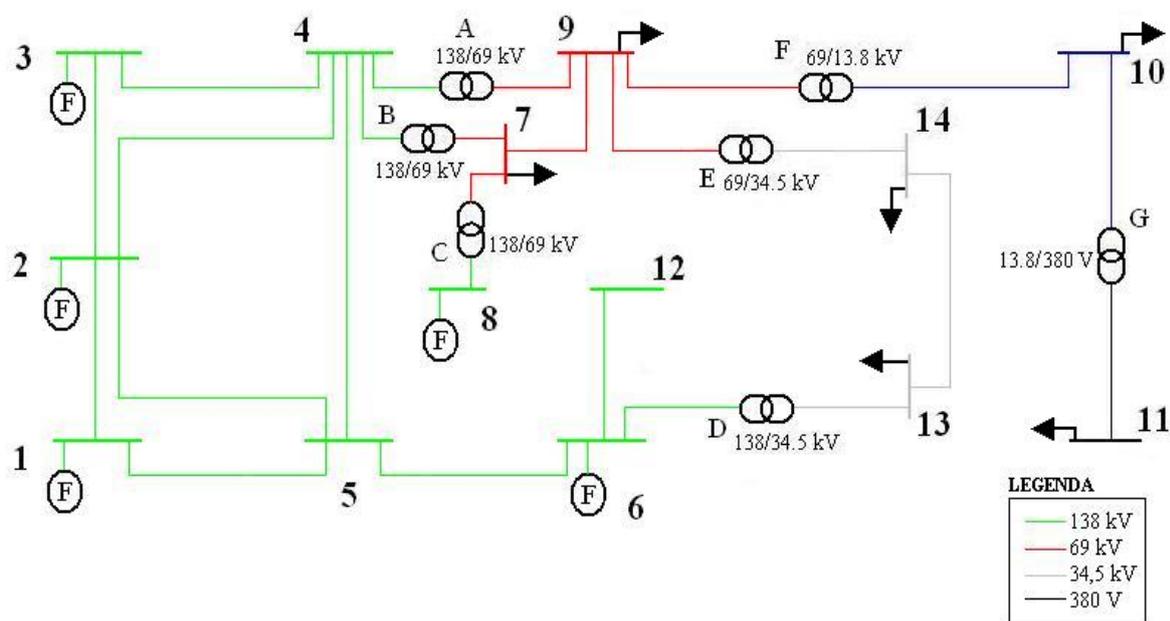


Figura 3.5 – Sistema modificado

Salienta-se que as modificações inseridas visam facilitar a análise e a implementação dos dados nos simulador digital. De posse das impedâncias do sistema e a inserção das modificações mencionadas foram então inseridos no programa ATP para as simulações digitais objetivando verificar a propagação do distúrbio no sistema elétrico.

3.5 - MODELAGEM DO GERADOR DE AFUNDAMENTOS

Para a proposta inicial deste trabalho em avaliar a propagação do distúrbio, foi necessário desenvolver uma fonte que produzisse tal fenômeno no programa de simulação.

Assim, com o intuito de analisar o fenômeno da propagação do afundamento de tensão, a modelagem do sistema no ATP ocorreu através das formulações matemáticas das teorias de curto-circuitos trifásicos, um gerador de afundamentos de tensão, capaz de reproduzir qualquer tipo de afundamento, com características diferentes em magnitude, salto do ângulo de fase (phase angle jump) e duração.

O desenvolvimento desta fonte teve como base os sete tipos de afundamentos, como mostra a tabela 3.7. Maior detalhamento sobre estes tipos de afundamentos em suas representações analíticas e diagramas fasoriais poderão ser encontradas na literatura, tais como nas referências [1] e [11].

Tabela 3.7 - Representação analítica de cada tipo de afundamento de tensão

Tipo A	Tipo B
$V_a = hV$	$V_a = hV$
$V_b = -\frac{1}{2}hV - j\frac{\sqrt{3}}{2}hV$	$V_b = -\frac{1}{2}V - j\frac{\sqrt{3}}{2}V$
$V_c = -\frac{1}{2}hV + j\frac{\sqrt{3}}{2}hV$	$V_c = -\frac{1}{2}V + j\frac{\sqrt{3}}{2}V$
Tipo C	Tipo D
$V_a = V$	$V_a = hV$
$V_b = -\frac{1}{2}V - j\frac{\sqrt{3}}{2}hV$	$V_b = -\frac{1}{2}hV - j\frac{\sqrt{3}}{2}V$
$V_c = -\frac{1}{2}V + j\frac{\sqrt{3}}{2}hV$	$V_c = -\frac{1}{2}hV + j\frac{\sqrt{3}}{2}V$
Tipo E	Tipo F
$V_a = V$	$V_a = hV$
$V_b = -\frac{1}{2}hV - j\frac{\sqrt{3}}{2}hV$	$V_b = -\frac{1}{2}hV - j\frac{1}{\sqrt{12}}(2+h)V$
$V_c = -\frac{1}{2}hV + j\frac{\sqrt{3}}{2}hV$	$V_c = -\frac{1}{2}hV + j\frac{1}{\sqrt{12}}(2+h)V$
Tipo G	
$V_a = \frac{1}{3}(2+h)V$	
$V_b = -\frac{1}{6}(2+h)V - j\frac{\sqrt{3}}{2}hV$	
$V_c = -\frac{1}{6}(2+h)V + j\frac{\sqrt{3}}{2}hV$	

O propósito do uso desta fonte geradora do distúrbio é de facilitar a geração do distúrbio, sem a preocupação dos cálculos dos curtos-circuitos, nem quanto à sua localização, tendo em vista as dificuldades de implementação do sistema utilizado para simulações.

Contudo, é necessário então ter conhecimento dos níveis de afundamentos e suas ocorrências nas barras a serem analisadas. Por exemplo, em um determinado sistema há a necessidade de se fazer um estudo dos efeitos dos afundamentos em certos barramentos, tendo o distúrbio com origem em uma barra específica, com isso o procedimento para realizar tal estudo parte do conhecimento das impedâncias do sistema e em seguida da análise dos curtos-circuitos mais comuns na região ou de maior ocorrência registrada.

A forma utilizada é: aplica-se o curto na barra especificada e se analisa seu efeito no barramento onde estão instalados os equipamentos.

Para entender a análise que se deu neste trabalho, o procedimento parte da premissa que o curto já ocorreu. Então o levantamento a ser feito é, qual foi o maior, melhor dizendo, a pior ocorrência de afundamento que já ocorreu neste barramento, por exemplo, o dado levantado é de $h=0,15$; lembrando que se está a trabalhar com tensão remanescente.

De posse deste dado é obtido, em um programa de cálculos matemáticos onde previamente já fora implementada as formulações matemáticas dos curtos-circuitos que podem ser encontrados nas referências [1 e 11] (neste caso o programa usado foi o MatLab), os valores de cada fase – V_a , V_b e V_c – (módulo e ângulo do referido afundamento).

Partindo das equações acima citadas, foi criada uma rotina, em um programa matemático no domínio do tempo, para o cálculo das tensões. Assim a partir de um nível de afundamento desejado, exemplo $h = 0,15$ obtinha-se valores de V_a , V_b e V_c . Veja na tabela 3.8 uma demonstração dos dados de saída desta rotina criada.

Tabela 3.8 – Exemplo dos dados retirados da rotina criada no programa MatLab

Tensão pré Evento V= 138 KV						
Magnitude do Distúrbio $h=0,15$ [pu]						
Níveis de tensão em cada fase						
Tipos de Afundamentos	VA		VB		VC	
	Módulo [V]	Ângulo [°]	Módulo [V]	Ângulo [°]	Módulo [V]	Ângulo [°]
TIPO A	20700	0	20700	-120	20700	120
TIPO B	20700	0	138000	-120	138000	120
TIPO C	138000	0	71291	-165,4	71291	165,44
TIPO D	20700	0	119959	-94,95	119959	94,95
TIPO E	138000	0	20700	-120	20700	120
TIPO F	20700	0	86273	-96,89	86273	96,89
TIPO G	98900	0	52599	-160,1	52599	160,1

De posse desses dados foi criado no ATPDraw o gerador de afundamentos. Utilizando o modelo da fonte monofásica tipo 14 do ATP e representados por chaves seccionadoras foi possível gerar o fenômeno do afundamento de tensão.

A modelagem para a fonte geradora do distúrbio foi escolhida dessa forma, pois havia a necessidade da conexão com o sistema de 14 barras, algo que se tornou muito complexo ao se tentar utilizar as TACs, tendo em vista os inúmeros elementos que compõem o sistema. Assim sendo, optou-se por uma simplificação nessa modelagem através de um modelo da fonte que permite a entrada de dados como o nível de tensão e ângulo.

Baseando-se, pois nos procedimentos anteriores os resultados das simulações geradas pela fonte de distúrbio são apresentados nas figuras 3.6 a 3.12 a seguir, as representações dos afundamentos tipo A, B, C, D, E, F e G respectivamente.

Na figura 3.6, o afundamento gerado pela fonte é a do tipo A com magnitude de $h= 0,15$ e duração de 30 ciclos.

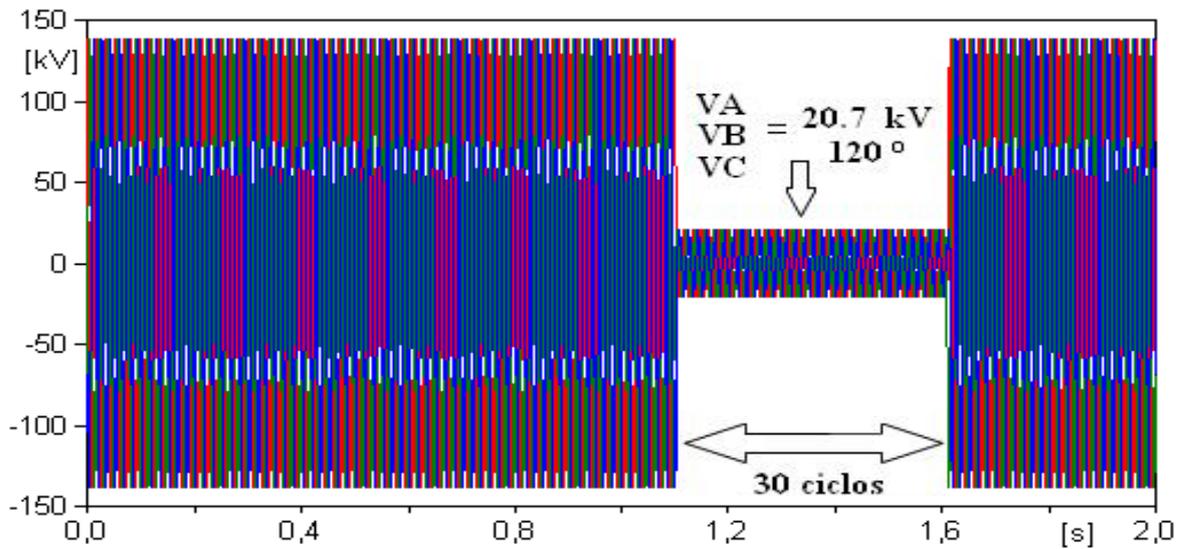


Figura 3.6 – Afundamento do tipo A gerado pela fonte modelada no ATP.

Na figura 3.7 o afundamento gerado é do tipo B com as mesmas características citadas, $h=0,15$ e duração de 30 ciclos.

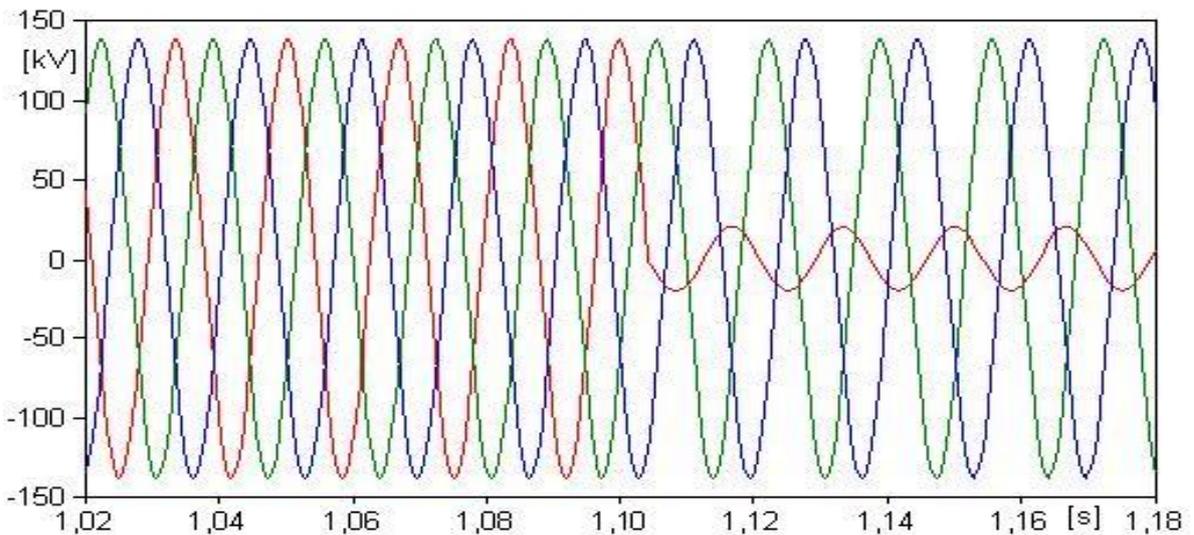


Figura 3.7 – Afundamento do tipo B gerado pela fonte modelada no ATP.

Analogamente aos casos anteriores, na figura 3.8 é apresentado o afundamento do tipo C gerado pela fonte.

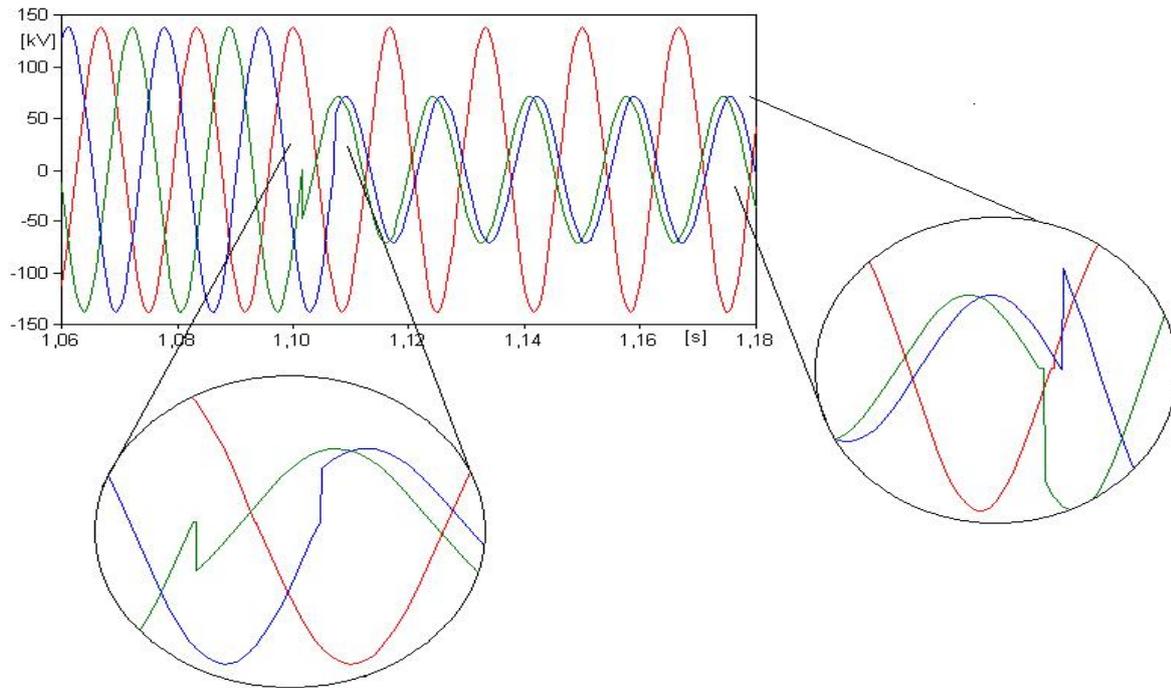


Figura 3.8– Afundamento do tipo C gerado pela fonte modelada no ATP.

A figura 3.9 mostra um afundamento do tipo D, gerado pela fonte modelada no ATP.

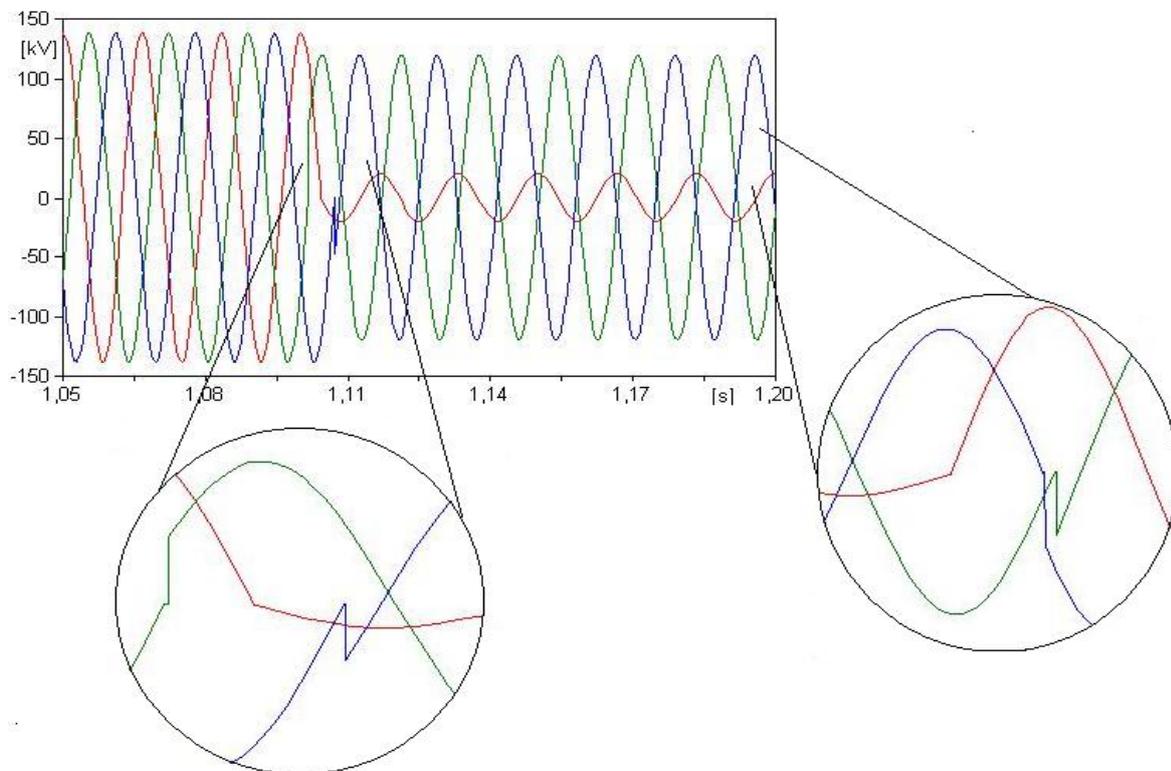


Figura 3.9– Afundamento do tipo D gerado pela fonte modelada no ATP.

A figura 3.10 apresenta um afundamento do tipo E, gerado pela fonte modelada no ATP.

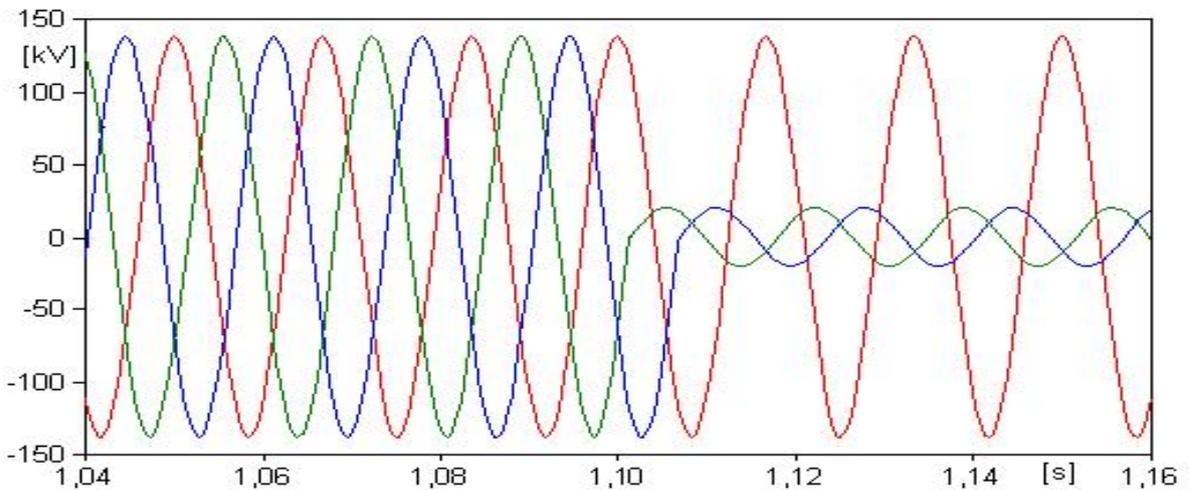


Figura 3.10– Afundamento do tipo E gerado pela fonte modelada no ATP.

A figura 3.11 mostra um afundamento do tipo F, gerado pela fonte modelada no ATP.

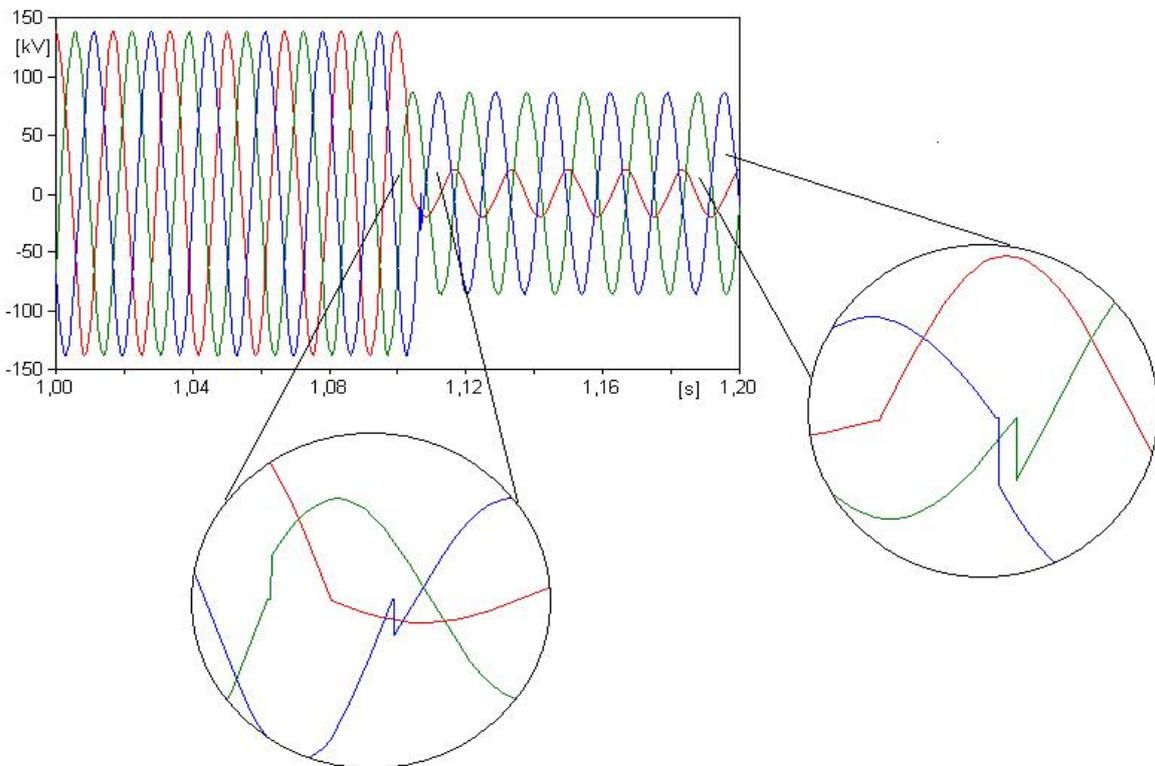


Figura 3.11– Afundamento do tipo F gerado pela fonte modelada no ATP.

E o afundamento do tipo G é apresentado na figura 3.12, juntamente com o phase-angle jump provocado pelo mesmo.

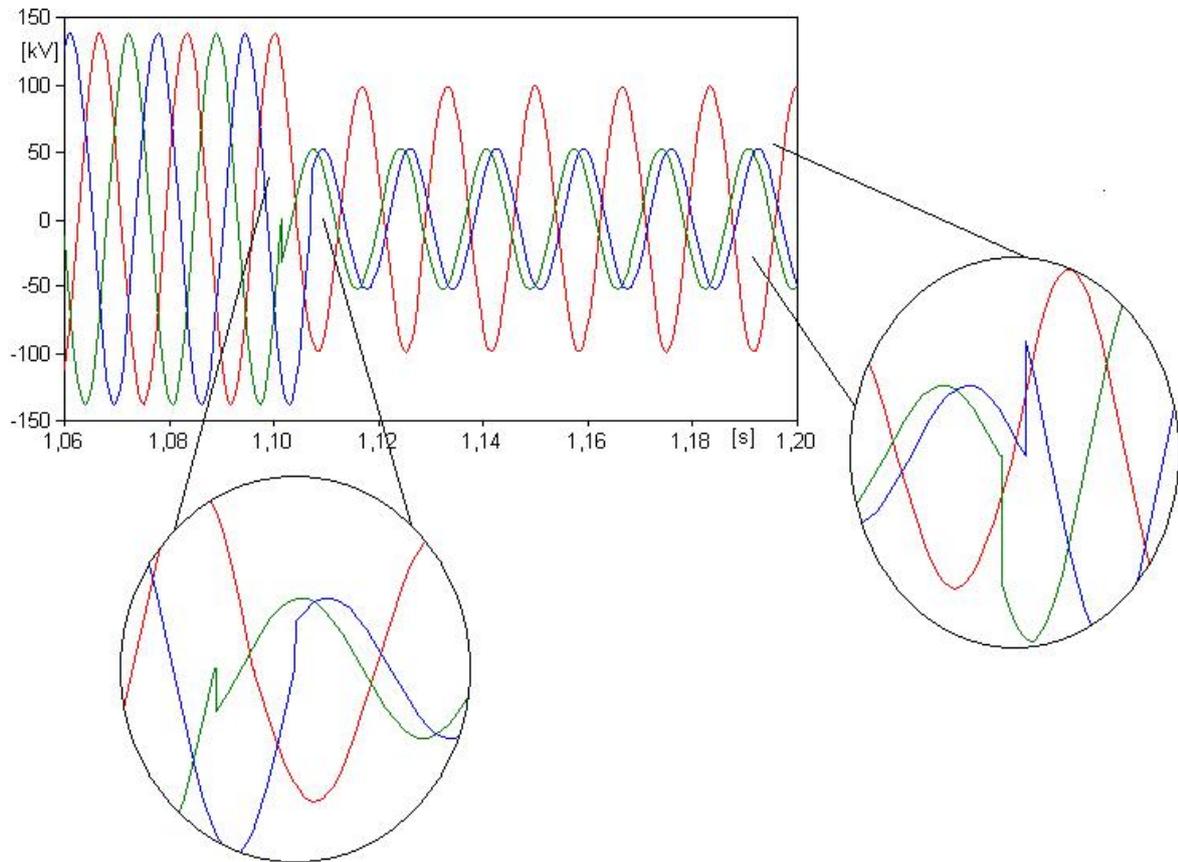


Figura 3.12– Afundamento do tipo G gerado pela fonte modelada no ATP.

Finalmente, as figuras acima apresentadas, mostram os resultados da modelagem da fonte geradora a partir dos dados apresentados na tabela 3.8.

3.6 - CONFIRMAÇÃO DA MODELAGEM DO GERADOR DE AFUNDAMENTOS

Tendo em vista as considerações anteriores para a geração do distúrbio, ou seja, gerar o distúrbio afundamento, sem provocar um curto-circuito, é possível através da lógica criada, utilizando chaves e fontes e de acordo com a necessidade na simulação, gerar qualquer tipo de distúrbio, conforme será apresentado no capítulo 4 dessa dissertação.

O teste de consistência se dará comparando os resultados da simulação digital e os cálculos matemáticos realizados. Neste sentido, é calculado de forma manual os curtos-circuitos fase-terra e fase-fase e um sistema de duas barras em vazio, conforme ilustra a figura 3.13 a seguir.

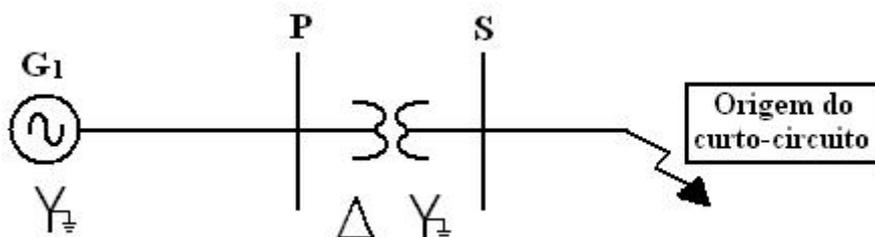


Figura 3.13– Sistema de duas barras para análise de afundamento de tensão gerado por um curto-circuito.

3.6.1 - CÁLCULO DO CURTO-CIRCUITO FASE-TERRA

Para a validação da modelagem da fonte geradora de distúrbio é apresentado a seguir um exemplo de cálculo numérico realizado para um curto fase-terra. A fase escolhida para a análise será de ocorrência do curto fase-terra será a fase A. Assim considerando:

Dados do gerador:

$$\begin{aligned} X_1 &= j0,8 \\ X_2 &= j0,4 \\ X_0 &= j0,1 \end{aligned}$$

Dados do transformador

$$\begin{aligned} X_1 &= j0,05 \\ X_2 &= j0,05 \\ X_0 &= j0,05 \end{aligned}$$

Do lado do secundário do transformador, tem-se que:

a) Cálculo das correntes no lado Y:

$$\dot{I}_{a1} = \dot{I}_{a2} = \dot{I}_{a0} = \frac{1}{Z_1 + Z_2 + Z_0} = \frac{1}{j(0,85 + 0,45 + 0,05)} = -j0,74$$

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{a1} = \dot{I}_{a2} = \dot{I}_{a0} = -j0,74 \times 3 = 2,22 \angle -90 \text{ pu}$$

$$\dot{I}_b = \alpha^2 \dot{I}_{a1} + \alpha \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0} = 0,74 \angle 240 - 90 + 0,74 \angle 120 - 90 + 0,74 \angle -90 = 0$$

$$\dot{I}_c = \alpha \dot{I}_{a1} + \alpha^2 \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0} = 0,74 \angle 120 - 90 + 0,74 \angle 240 - 90 + 0,74 \angle -90 = 0$$

b) Cálculo das tensões correspondentes no lado Y:

$$\dot{V}_{an1} = 1 - \dot{I}_{a1} \dot{Z}_1 = 1 - (-j0,74)(j0,85) = 1 - 0,629 = 0,371 \text{ pu}$$

$$\dot{V}_{an2} = -\dot{I}_{a2} \dot{Z}_2 = -(-j0,74)(j0,45) = -0,333 \text{ pu}$$

$$\dot{V}_{an0} = -\dot{I}_{a0} \dot{Z}_0 = -(-j0,74)(j0,05) = -0,037 \text{ pu}$$

c) Tensões de fase-neutro:

$$\dot{V}_{an} = \dot{V}_{an1} + \dot{V}_{an2} + \dot{V}_{an0} = 0,371 - 0,333 - 0,037 = 0$$

$$\dot{V}_{an} = \alpha^2 \dot{V}_{an1} + \alpha \dot{V}_{an2} + \dot{V}_{an0} =$$

$$\dot{V}_{an} = 0,371 \underline{240^\circ} + 0,333 \underline{180^\circ + 120^\circ} + 0,037 \underline{180^\circ} =$$

$$\dot{V}_{an} = 0,64 \underline{-95^\circ} \text{ pu}$$

$$\dot{V}_{an} = \alpha \dot{V}_{an1} + \alpha^2 \dot{V}_{an2} + \dot{V}_{an0} =$$

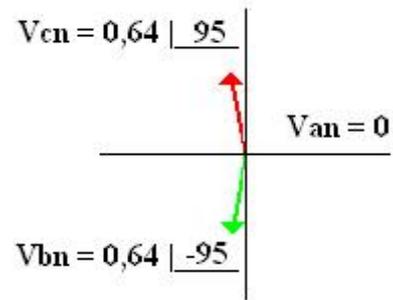
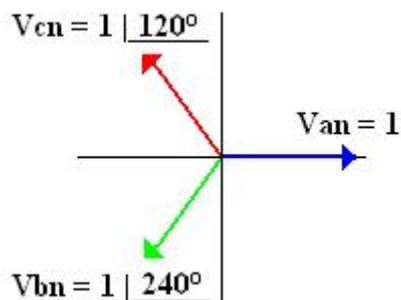
$$\dot{V}_{an} = 0,371 \underline{120^\circ} + 0,333 \underline{180^\circ + 240^\circ} + 0,037 \underline{180^\circ} =$$

$$\dot{V}_{an} = 0,64 \underline{95^\circ} \text{ pu}$$

d) Diagrama fasorial antes e após a falta fase-terra:

Antes da falta no lado Y

Durante a falta no lado Y



a)

b)

Figura 3.14– Diagrama fasorial das tensões no lado Y. a) Antes da falta.

b) Durante a falta.

Do lado primário do transformador, tem-se que:

a) Cálculo das correntes no lado Δ :

$$\dot{I}_{A1} = j\dot{I}_{a1} = j(-j0,74) = 0,74 \text{ pu}$$

$$\dot{I}_{A2} = -j\dot{I}_{a2} = -j(-j0,74) = -0,74 \text{ pu}$$

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A0} = 0,74 - 0,74 + 0 = 0$$

$$\dot{I}_A = \alpha^2 \dot{I}_{A1} + \alpha \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A0} = 0,74 \underline{240^\circ} + 0,74 \underline{180^\circ + 120^\circ} = -j1,28 \text{ pu}$$

$$\dot{I}_A = \alpha I_{A1} + \alpha^2 I_{A2} + I_{A0} = 0,74 \underline{120^\circ} + 0,74 \underline{180^\circ + 240^\circ} = j1,28 \text{ pu}$$

b) Cálculo das tensões no lado Δ :

$$\dot{V}_{AN1} = \dot{E} - \dot{Z}_1 \dot{I}_{A1} =$$

$$\dot{V}_{AN1} = j1 - j0,8 \cdot (0,74) = j0,408 \text{ pu}$$

$$\dot{V}_{AN2} = -Z_2 I_{A2} =$$

$$\dot{V}_{AN2} = -j0,4 \cdot (-0,74) = j0,296 \text{ pu}$$

$$\dot{V}_{AN} = V_{AN1} + V_{AN2} = j0,408 + j0,296$$

$$\dot{V}_{AN} = j0,704 = 0,704 \underline{90^\circ} \text{ pu}$$

$$\dot{V}_{BN} = V_{BN1} + V_{BN2} = \alpha^2 V_{AN1} + \alpha V_{AN2}$$

$$\dot{V}_{BN} = 0,408 \underline{90^\circ + 240^\circ} + 0,296 \underline{90^\circ + 120^\circ}$$

$$\dot{V}_{BN} = 0,36 \underline{-75^\circ} \text{ pu}$$

$$V_{CN} = V_{CN1} + V_{CN2} = \alpha V_{AN1} + \alpha^2 V_{AN2}$$

$$V_{BN} = 0,408 \underline{90^\circ + 120^\circ} + 0,296 \underline{90^\circ + 240^\circ}$$

$$V_{BN} = 0,36 \underline{255^\circ}$$

c) Diagrama fasorial antes e após a falta fase-terra no primário:

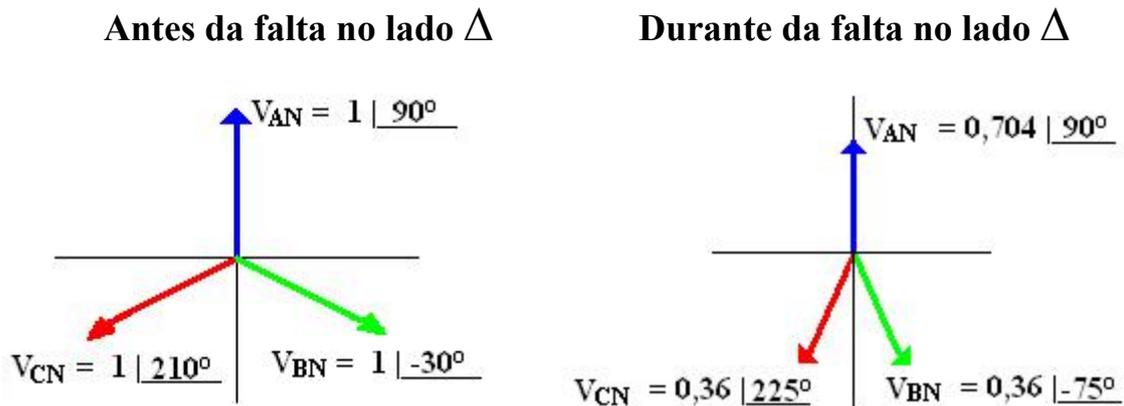


Figura 3.15– Diagrama fasorial das tensões no lado Δ . a) Antes da falta.

b) Durante a falta.

3.6.2 - SIMULANDO UM AFUNDAMENTO CAUSADO POR CURTO-CIRCUITO FASE-TERRA

De acordo com o que já fora dito acerca da fonte geradora de afundamentos, para inserção da mesma no sistema é necessário o cálculo preliminar da tensão durante a falta, que o lado da baixa do transformador ficará submetida e assim importar os dados para o modelo criado no ATP.

Os dados para a modelagem do sistema segue o que já fora considerado e para a tensão de afundamento será usada o que fora encontrada nos cálculos já executados no item anterior, quais sejam:.

Dados do gerador de afundamentos aplicados no local onde ocorreu o curto-circuito fase-terra, lado Y:

$$\dot{V}_{an} = 0|0^\circ \text{ pu}$$

$$\dot{V}_{bn} = 0,64|-95^\circ \text{ pu}$$

$$\dot{V}_{cn} = 0,64|95^\circ \text{ pu}$$

Após a inserção dos dados no modelo, o resultado do distúrbio a ser produzido pela fonte é representado na figura 3.16.

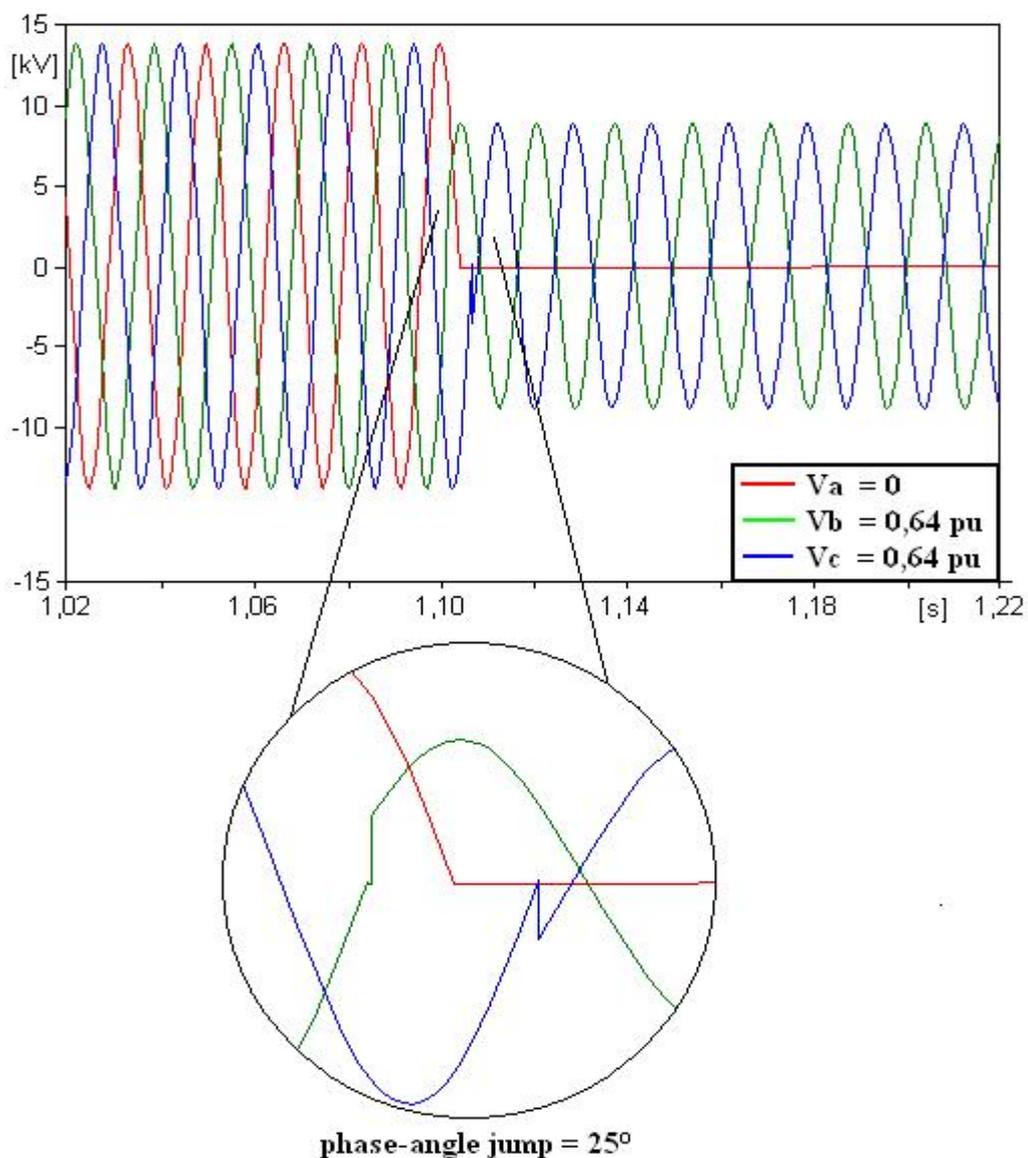


Figura 3.16– Afundamento de tensão gerado pela fonte modelada no ATP

Observa-se nesta figura que o afundamento criado pela fonte é idêntico ao que fora calculado.

Como resultado da aplicação do distúrbio pela fonte, a figura 3.17 apresenta o que o lado Δ enxerga quando o distúrbio se propaga pelos enrolamentos do transformador.

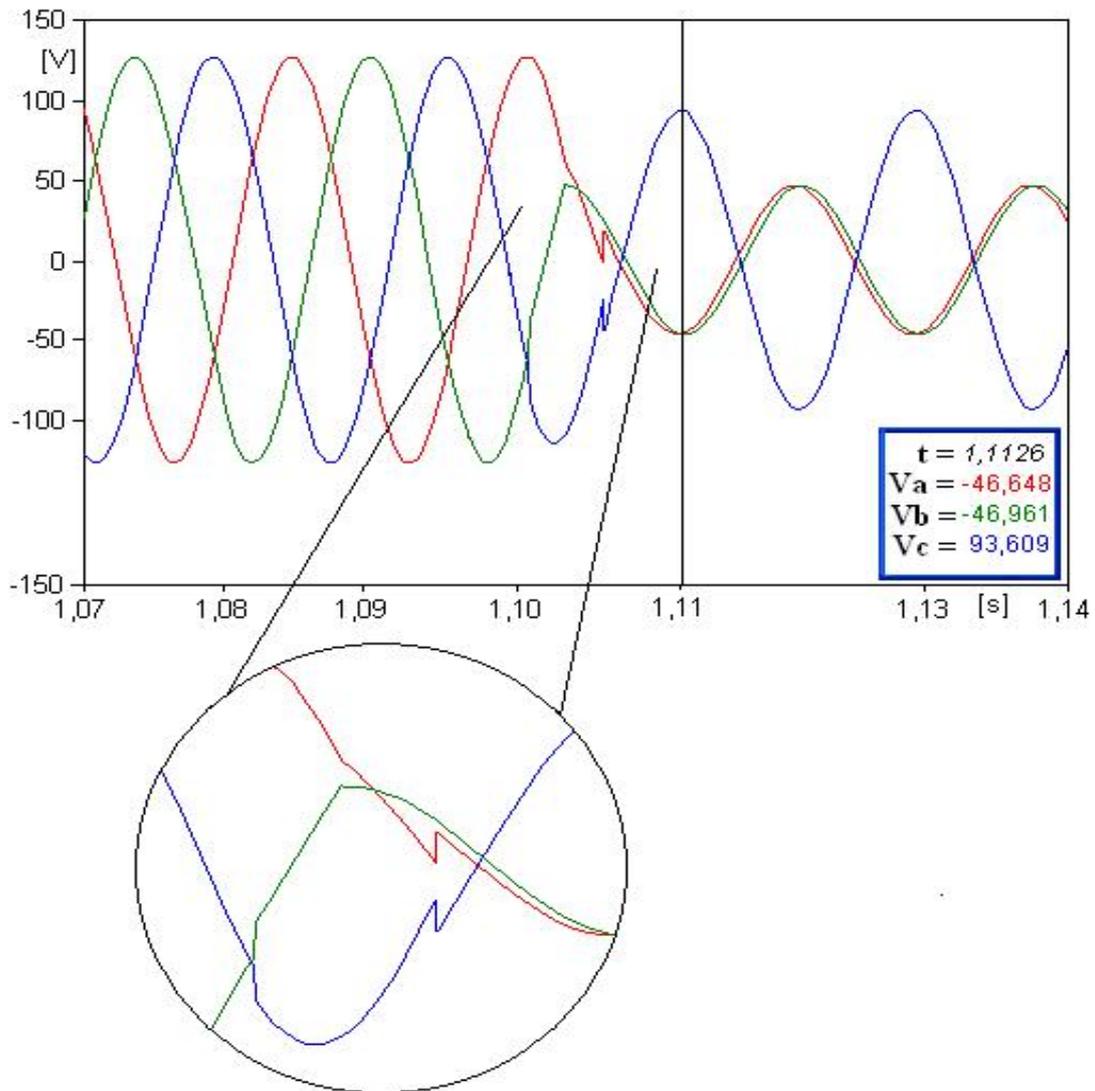


Figura 3.17– Afundamento de tensão visto pelo lado Δ

Utilizando recursos matemáticos do próprio ATP obtêm-se os valores eficazes de cada uma das tensões. Os resultados obtidos são:

3.9 - Tensões das fases durante o afundamento

$V_{an} = 30Vrms$
$V_{bn} = 30Vrms$
$V_{cn} = 60Vrms$

As tensões de pré evento de cada fase pode ser obtida usando a expressão (3.6).

$$V_{xn} = \frac{V_{pré-evento} - V_{afundamento}}{V_{pré-evento}} - 1 \quad (3.6)$$

Onde:

$$V_{xn} = \text{Tensão remanescente em pu.}$$

Ao substituir os valores na equação acima é possível obter as tensões remanescentes da tensão de pré-evento em pu.

Os valores dos ângulos de cada fase podem também ser obtidos utilizando os recursos do ATP, neste caso específico a obtenção é necessário um ajuste fino em relação ao tempo de aquisição dos mesmos.

Sendo assim, os dados coletados das tensões do lado Δ são expressos na tabela 3.10.

3.10 – Afundamento de tensão experimentado pelo lado Δ do transformador

$\dot{V}_{an} = 0,37 -83^\circ pu$
$\dot{V}_{bn} = 0,37 -95^\circ pu$
$\dot{V}_{cn} = 0,73 90^\circ pu$

Para uma melhor visualização dos resultados a figura 3.18 abaixo, mostra as tensões calculadas e simuladas do lado Δ do transformador.

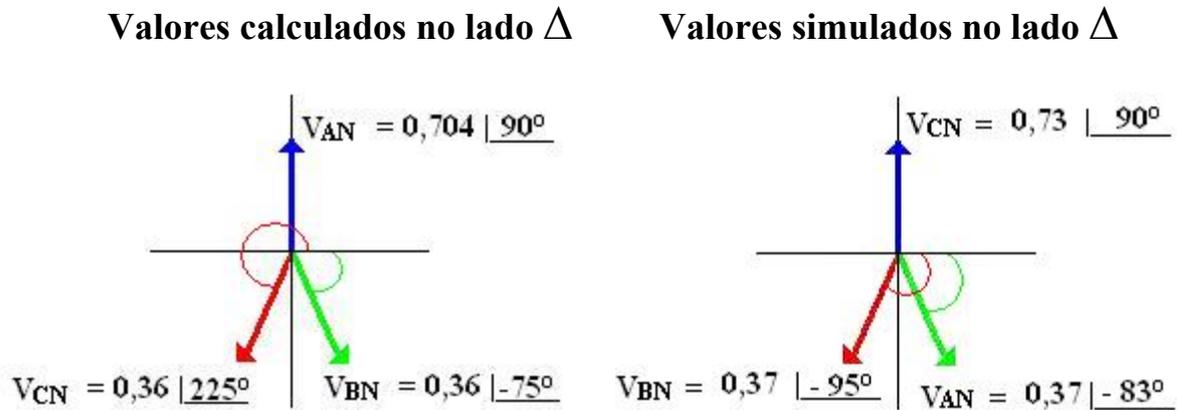


Figura 3.18– Valores calculados e simulados das tensões no lado do Δ .

a) Valores calculados. b) Valores simulados.

Da figura 3.18, acima observa-se pequenas discrepâncias entre os valores calculados e simulados, cuja precisão são compatíveis com os objetivos propostos nesta dissertação.

3.7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

As experiências mostram que a maioria das faltas no sistema elétrico ocorre em linhas de transmissão, de subtransmissão e de distribuição. Enquanto uma linha aérea pode sofrer vários curtos-circuitos em um ano, os barramentos aéreos apresentam, tipicamente, uma taxa de ocorrência de faltas de um defeito a cada dez anos [4].

Face ao exposto, no processo de determinação do desempenho do sistema elétrico diante dos afundamentos de tensão, os principais componentes normalmente considerados são as linhas de transmissão e distribuição, bem como os transformadores.

E para tal estudo de desempenho para que possa prever e minimizar tais distúrbios se faz necessários testes e ensaios para que se possa aprofundar em tal matéria. Mas sendo o estudo em linhas de alta tensão há inviabilidade técnica para tal por conta da complexidade e perigo para que o execute.

Sendo assim, as simulações digitais tomam força e cada dia às diferenças entre os modelos criados e os reais se tornam mais próximos, e com isso, esse capítulo traz a modelagem do sistema e de seus componentes sendo ao máximo fiel as teorias e as práticas já bastantes conceituadas e testadas.

Neste capítulo foi apresentada uma breve descrição dos softwares que geralmente são empregados para estudos do distúrbio de afundamento de tensão, tais como as suas principais características, limitações e particularidades. Por várias razões, dentre elas a de ser um software livre, ou seja, pode ser usado de forma gratuita, optou-se então, pelo ATP já utilizado mundialmente em vários estudos.

Uma vez definido o ATP como plataforma computacional para a modelagem dos componentes do sistema elétrico, tais como: linhas de transmissão, cargas e principalmente os transformadores, foco desta dissertação; realizou-se, ao invés de se modelar o curto-circuito que é a maior causadora de afundamentos de tensão, optou-se aqui nesta dissertação pela sua substituição. Modelando então uma fonte geradora do afundamento de tensão.

Por fim, com aplicação dessa fonte de afundamentos nos locais de interesse, dentro do sistema escolhido; com isso foi possível verificar a validação da fonte através de cálculos analíticos em um exemplo numérico.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

4.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As características do afundamento de tensão podem ser reproduzidas adequadamente através de ferramentas computacionais, baseadas em técnicas no domínio do tempo, juntamente com uma previsão estocástica que pode incorporar a natureza aleatória dos fenômenos dos afundamentos de tensão.

Quando se usa a simulação computacional para avaliar o afundamento momentâneo de tensão, o objetivo é prever a performance deste fenômeno em uma rede de distribuição através da estimativa dos indicadores do mesmo.

Até agora, há experiências significantes nos estudos das Variações de Tensões de Curta Duração (VTCD). Usando simulações digitais, alguns métodos foram desenvolvidos, e diferentes ferramentas de simulação foram aplicadas para a avaliação dos tais índices já mencionados.

Neste sentido, este capítulo busca aplicar uma metodologia para estimação das características desse distúrbio, que tem origem em pontos distantes e que se propaga até o *Ponto de Acoplamento Comum* (PAC), ou seja, até o barramento do consumidor.

Sendo assim, o que se emprega é a verificação das variações ocorridas nas características do afundamento quando esse se propaga através dos componentes do sistema, tais como nos transformadores.

O quão diferentes serão as características do distúrbio desde sua origem, até o PAC e essa será a ótica de avaliação à que esse trabalho se propõe. Toda análise parte do pré-suposto de que o evento, propriamente dito, já esteja constituído, isso quer dizer, que o estudo de curto circuito não será levado em conta como já observado nos capítulos anteriores

Os casos aqui simulados partem do princípio que a falta já ocorreu, e assim o nível de severidade do afundamento já esta estabelecido. Com essa hipótese a modelagem do gerador de afundamentos tornou-se de suma importância para a realização do estudo. Assim, através deste é possível que todos os tipos de afundamentos sejam gerados e injetados nos barramentos de transmissão, conforme descrito anteriormente.

Nesta direção, este capítulo se propõe a avaliar a partir da injeção do distúrbio em uma determinada barra do sistema onde foi gerada, e posterior verificação de sua propagação ao longo do sistema através das diversos tipos de conexões de transformadores presentes.

Será considerada adicionalmente neste capítulo a elaboração e obtenção das áreas de vulnerabilidade de equipamentos para diversos níveis de severidade do evento.

4.2 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO SIMULADO

Para a realização do presente estudo de casos, será tomado como base o sistema elétrico padrão de 14 barras, proposto pelo IEEE, cujos dados foram extraídos das referências [47]. O diagrama unifilar do referido sistema padrão

do IEEE encontra-se apresentado na figura 4.1 abaixo. Originalmente este sistema é alimentado por 2 geradores síncronos (barras 1 e 2) e possui 3 compensadores síncronos estáticos, usados exclusivamente para suprir reativos ao sistema (barras 3, 6 e 8). A este sistema estão ligadas 10 cargas, totalizando 250 MW e 78 MVAR de demanda.

Nos estudos dos casos que se seguirão neste capítulo algumas alterações nas características desse sistema foram necessárias no referido sistema proposto pelo IEEE de 14 barras, conforme ilustra a figura 4.1.

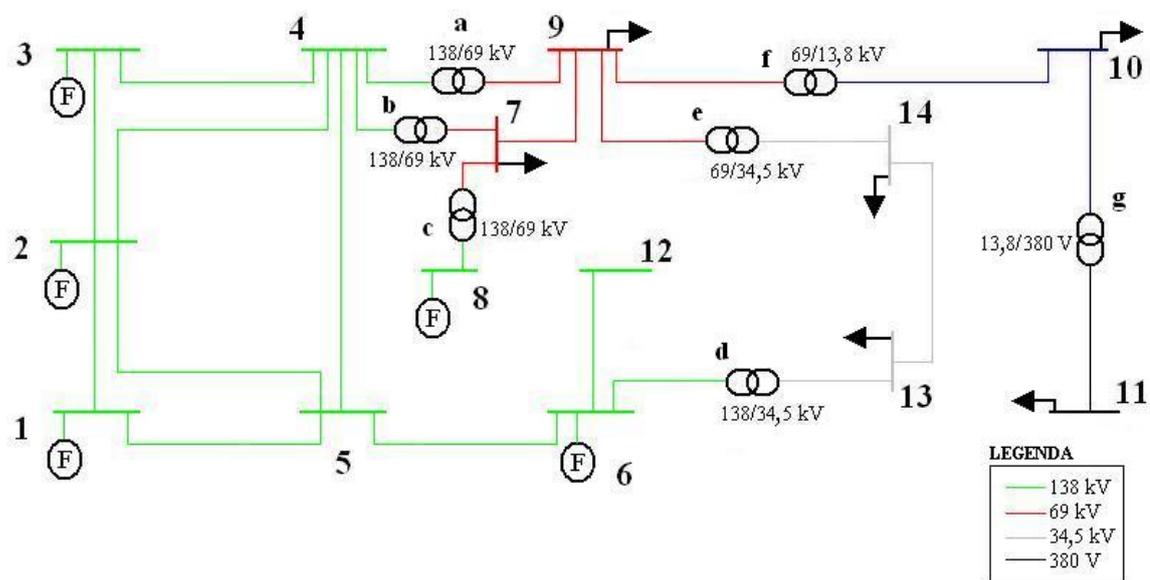


Figura 4.1 – Sistema IEEE utilizado para simulações

Os dados dos componentes do sistema elétrico da figura x são apresentados nas tabelas 4.1 e 4.2, respectivamente.

Estes os dados em pu estão referenciados à potência base de 100 MVA e à tensão base de 138 kV, que é a tensão nominal do gerador de afundamentos que foi modelado para o estudo.

Tabela 4.1 – Dados das barras de transmissão

Nº da Barra	Potência Nominal (MVA)
1	100
2	100
3	100
6	100
8	100

Tabela 4.2 – Dados das cargas do sistema

Nº da Barra	Potência Ativa (MW)	Potência Reativa (MVar)	Resistência (pu)	Reatância (pu)
7	20	10	5,2	2,6
9	12	5	9,2	3,8
10	8	4	0,5	0,25
11	1	0,5	0,003	0,0015
13	7,5	5	3	2
14	7,5	5	3	2

Adicionalmente com os dados que foram apresentados no capítulo anterior sobre os componentes do sistema simulado, os dados apresentados nas tabelas acima, permite que se represente o sistema elétrico da figura 4.1 na forma de um diagrama de impedâncias.

4.3 - PROCEDIMENTOS PARA O ESTUDO

É proposta uma análise mais detalhada do fenômeno variação de tensão de curta duração (VTCD) e suas características quando este se propaga pelo sistema elétrico, sem a preocupação da análise de outro fenômeno, ou melhor,

outro distúrbio, nesse caso a análise de curtos-circuitos não é preocupação dessa dissertação.

Para a investigação da influência das conexões dos transformadores na propagação dos afundamentos de tensão, alguns procedimentos foram adotados.

Considerar-se-ão os afundamentos de tensão dentro de sua conceituação, ou seja, contemplando os afundamentos temporários e momentâneos, com duração entre 1 ciclo e 1 minuto e amplitude compreendida entre 0,1 [pu] e 0,9 [pu] da tensão de referência (nominal), utilizando a tensão remanescente para caracterizar a magnitude do distúrbio.

Foram escolhidos cinco barramentos os quais seriam as origens dos distúrbios, ou seja, para serem os pontos de conexão com as linhas de transmissão do referido sistema. Neste caso a distribuição ocorre tendo em vista o que já existia, de acordo com o sistema original as barras 1, 2 e 3 eram barramentos de geração e as barras 6 e 8 para compensação do sistema. Logo após a escolha dos pontos, estes são substituídos pela fonte geradora dos distúrbios, como aquela que foi modelada no capítulo 3.

Os estudos partem do pressuposto que todos os eventos tiveram sua origem nos níveis de transmissão nesse caso em 138 kV e que o afundamento de tensão já esteja estabelecido. Isso indica que a falta monofásica, bifásica ou trifásica, seja ela qual for, já tenha ocorrido, e o sistema de proteção já tenha operado e eliminado o curto.

Deve-se salientar que todo esse processo será substituído pelo o evento afundamento de tensão propriamente dito, e que se investigue qual a influência dos elementos do sistema na propagação até o barramento do consumidor, conforme será avaliado na figura 4.2.

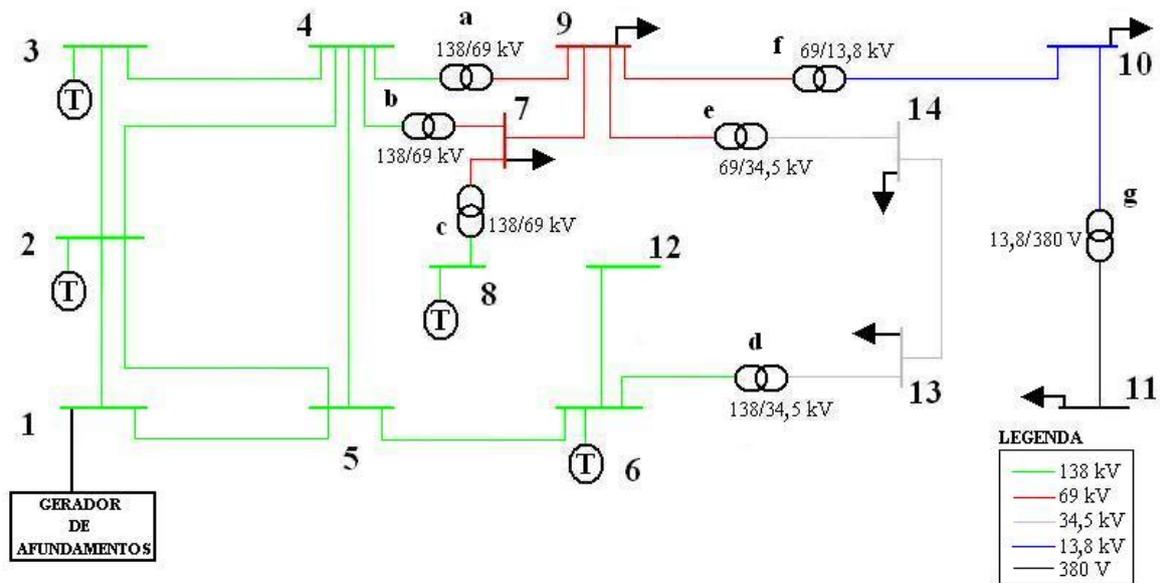


Figura 4.2 - Inserção da fonte geradora do distúrbio no sistema

Com o objetivo, também, de se avaliar a influência de sistemas interconectados na propagação das VTCDs, estas barras foram escolhidas para serem os pontos de interconexão com rede analisada. Obviamente, esta interconexão é uma mera suposição, tendo em vista que cinco pontos de conexão com linhas de transmissão em 138 kV, para um pequeno sistema é exagerada.

Por exemplo, a título de ilustração, caso seja necessário reproduzir um afundamento de tensão de magnitude de 15% do tipo A e com a duração de 30 ciclos. O primeiro passo é obter os valores percentuais dos termos para cada fase, para isso lança-se mão do equacionamento proposto no capítulo 3, nesse caso temos na formulação matemática desenvolvida nas equações (2.1 até 2.7), onde h representa a magnitude do afundamento.

Assim, substituindo a variável h pelo valor de 15%, os correspondentes módulos e ângulos V_A , V_B e V_C são obtidos; e com esses valores implementa-se o gerador de afundamentos de tensão que fora modelado no capítulo anterior. Observe o resultado na figura 4.3 a seguir.

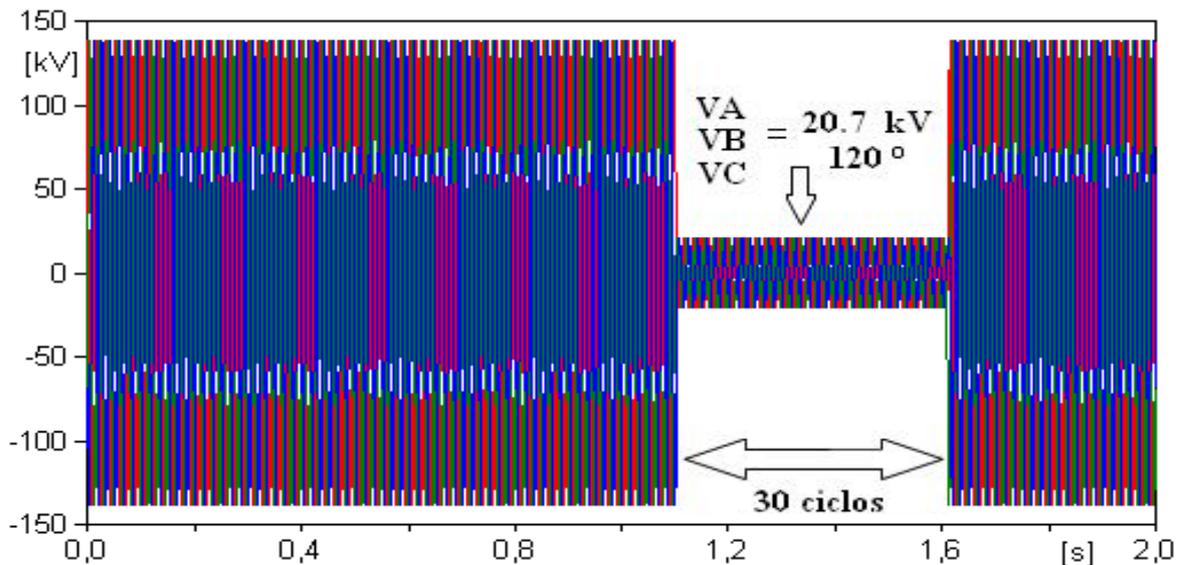


Figura 4.3 - Afundamento tipo A com magnitude 0,15 pu e duração de 30 ciclos

Dessa forma, seguirão todos os casos abaixo estudados, cujas formas de onda já foram vistas nos capítulos anteriores. O que cabe aqui ressaltar é que esses distúrbios gerados serão injetados diretamente nos barramentos já indicados (1, 2, 3, 6 e 8) anteriormente.

4.4 - CASOS SIMULADOS

Os casos que foram aqui escolhidos baseando-se em sua maior e menor severidade, cada um com a abordagem de maior severidade do evento e aqueles com maior número de ocorrências registradas em eventos encontradas na literatura. Para isso foi então simulado 5 casos.

Para sistemas de transmissão nas classes de 69/138/230 e 345 [kV], as concessionárias americanas realizaram estudos com o objetivo de se identificar quais são os percentuais de ocorrência para cada tipo de falta, cujos resultados estão sintetizados na tabela 4.3 [5].

Tabela 4.3 – Percentual de faltas em sistemas elétricos de transmissão americana

Classe de Tensão [kV]	Fase-terra	Fase-Fase-terra	Fase-Fase	Trifásicas
345	91%	7%	1%	1%
230	80%	17%	1,50%	1,5
138	73%	17%	6%	4%
69	65%	22%	7%	6%

Desta tabela pode-se observar que para a classe de tensão de 138 kV a ocorrência chega aos 73% para faltas fase-terra, o qual é a origem de afundamentos do tipo B e os níveis de magnitude de maior ocorrência registrados. Com a análise dessas informações, a escolha dos eventos com o maior número de ocorrências ficou estabelecido.

A norma IEEE 1159-1995 recomenda utilizar eventos com durações de 0,5 ciclos; 0,5 segundos; 3 segundos e 60 segundos, já a norma IEC 61000-4-11 propõe as seguintes durações: 0,5 ciclos; 1,0 ciclo; 5 ciclos; 10 ciclos; 25 ciclos e 50 ciclos; e as seguintes magnitudes: 0%, 40%, 70%. Outra tendência (Norma IEC 61000-2-8 e NRS 048) é apresentar o número de eventos em um determinado intervalo de severidade de afundamentos caracterizados segundo sua magnitude e duração.

Para a definição dos eventos com maior severidade, estas são estipuladas por normas, utilizar-se-á aqui neste caso, a norma sul-africana NRS-048. A norma sul-africana NRS-048, agrega os afundamentos segundo regiões no plano magnitude versus duração. A definição dos limites de tempo entre regiões está associada aos tempos de atuação das proteções da transmissão e da distribuição, conforme análise realizada na referência [4]. Esta forma de particionar o eixo dos tempos é interessante e útil, pois permite relacionar as regiões com os tempos de atuação das proteções da rede básica e dos sistemas regionais de distribuição, conforme ilustra a tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Regiões de agregação dos afundamentos segundo a norma NRS-048

Tensão (%)	Duração (ms)				
	0 - 20	20 - 150	150 - 600	600 - 1000	1000 - 3000
90 - 100					
80 - 90		Y			
40 - 80		X	S	Z	
0 - 40		T			

Onde na tabela tem-se:

Y = maioria das cargas suportadas por tipos especiais de fusíveis;

X = defeitos na transmissão;

S = defeitos na subtransmissão e distribuição;

Z = elevada severidade por duração;

T = alta probabilidade de interrupção.

Para definição do tempo, considera-se que as variações com duração inferior a 20ms não afetam cargas sensíveis e corresponde a defeitos na distribuição eliminados por tipos especiais de fusíveis. O valor de 150 milisegundos adotado como limite para definição do parâmetro de X é relacionado às durações de variações causadas na subtransmissão e na distribuição, onde os tempos de eliminação dos defeitos são maiores. Para um barramento de rede básica é esperado que o valor “Z” seja muito reduzido [4].

Salienta-se que o valor 80% identifica um nível acima do qual a maioria das cargas sensíveis seria capaz de suportar. A faixa de 40% a 80% reflete a maior incidência de variações com risco de impactar as cargas.

Abaixo de 40%, situam-se as variações de grande severidade, para as quais a probabilidade de um consumidor com cargas sensíveis sofrer interrupção é muito alta, mesmo estando conectado na baixa tensão.

A figura 4.4 mostra o histograma das ocorrências, nos Estados Unidos, associadas com afundamentos momentâneos de tensão durante os anos de 1998 e 1999 de acordo com a referência [10]. A figura ratifica informações anteriores que afirmam que o maior número de incidências do fenômeno acontece para afundamentos menos severos. Cerca de 75% dos registros conduziram a afundamentos entre 80% e 90% da tensão nominal e aproximadamente 12% das manifestações para afundamentos compreendidos entre 70% e 80%. Vale observar que o documento consultado destaca que grandes investimentos foram feitos no sistema, o que resultou em substanciais melhorias de desempenho em 1999 [10].

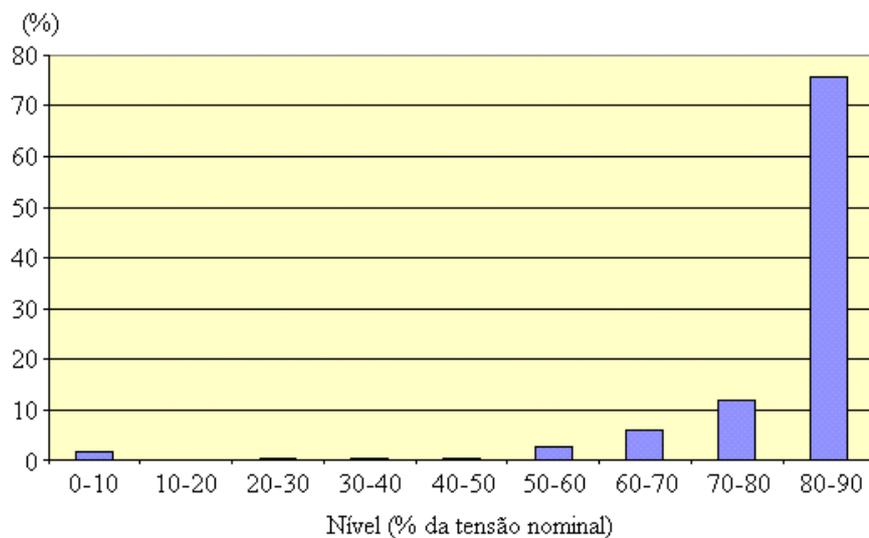


Figura 4.4 - Afundamentos momentâneos de tensão em uma barra de 69 kV - histograma das ocorrências de 1998 e 1999, agregadas por nível.

De forma complementar, a figura 4.5 indica as durações típicas encontradas na literatura, onde se constata que a grande maioria dos afundamentos ficou limitada à região dos 300ms, sendo que fenômenos de até 100ms são predominantes. Este, portanto, será um tempo típico empregado nas simulações que serão realizadas posteriormente, neste capítulo.

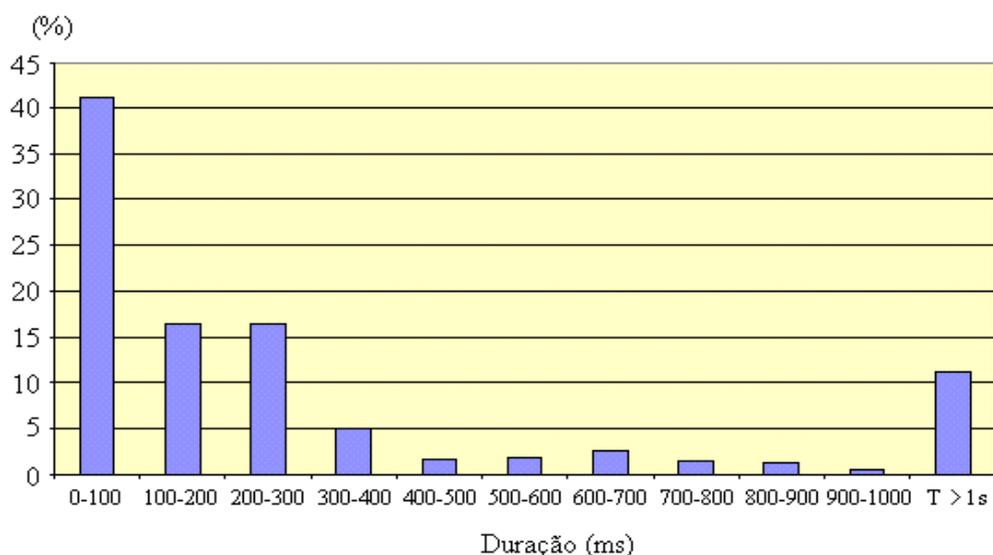


Figura 4.5 - Afundamentos momentâneos de tensão em uma barra de 69 kV - histograma das ocorrências de 1998 e 1999, agregadas por duração.

A duração do afundamento de tensão é dependente do desempenho do sistema de proteção que, por sua vez, é dependente da operação dos dispositivos para eliminação da falta. De fato, quanto mais rápido a falta for eliminada do sistema, ou seja, quanto menor for o tempo gasto pela atuação dos dispositivos, somado ao tempo de abertura dos disjuntores, menor será a duração do afundamento de tensão.

Vale ressaltar que o tempo de atuação dos relés é uma função das suas características e dos ajustes implementados, já o tempo de abertura dos disjuntores é uma função apenas das características destes equipamentos. A título de Ilustração, é apresentado na tabela 4.5 o tempo total de eliminação de faltas pelos equipamentos de proteção para cada classe de tensão [16].

Tabela 4.5 – Tempo típico de eliminação de falta

Classe de Tensão [kV]	Duração do afundamento de tensão
Extra alta tensão (345)	5 a 8 ciclos
Subtransmissão (138 ; 69)	8 a 20 ciclos
Média tensão (34,5 ; 13,8)	15 a 60 ciclos

Com a análise das tabelas 4.4 e 4.5, e também das figuras 4.5 e 4.6 fica evidente estipular a duração do evento VTCD, para aplicação no estudo que se seguirá. Assim, como na tabela 4.6, verifica-se a gama de possibilidades que será adotado para os casos a serem estudados.

Tabela 4.6 – Faixas de magnitudes e duração do distúrbio aplicado

Tipos de Afundamentos	Magnitude do Distúrbio (pu)	Tempo de Duração do Distúrbio (ciclos)
Todos os Sete A B C D E F G	0,15	
	0,3	1
	0,5	10
	0,8	30
	0,9	

As simulações computacionais serão feitas na forma de casos individuais, de forma que se possibilite uma compreensão mais adequada no que diz respeito ao fenômeno da propagação das VTCDs.

Neste sentido os casos simulados na sequência foram os seguintes:

- Caso 1 – Área de vulnerabilidade
- Caso 2 – Influência das correntes do sistema
- Caso 3 – Influência dos transformadores

Como mencionado no capítulo anterior, a inserção de transformadores no sistema elétrico, suas características serão aqui rerepresentadas para melhor compreensão dos casos que se segue, conforme a tabela 4.7 a seguir.

Tabela 4.7 – Dada dos transformadores utilizados nos estudos de casos

Transformador	Potência Nominal (MVA)	Tipo de Conexão	Resistência (%)	Reatância (%)
a	25	Δ - Δ	0	7
b	25	Δ - Δ	0	7
c	25	Δ - Δ	0	7
d	25	Δ - Δ	0	7
e	10	Δ -Y	0	5
f	5	Δ -Y	0	5
g	1	Δ -Y	0	5

Para todos os casos que se seguirão, a tabela acima é utilizada como dados para os parâmetros dos transformadores utilizados nas simulações, ou seja, nos casos 1, 2, 3 e 4. Serão apresentados nos itens a seguir às características e os resultados obtidos em cada caso simulado.

4.4.1 - CASO 1 – ÁREA DE VULNERABILIDADE

O conceito de área de vulnerabilidade foi desenvolvido para auxiliar na avaliação da probabilidade de uma carga específica estar sujeita a afundamentos de tensão de uma determinada amplitude. Assim, a área de vulnerabilidade é definida para um consumidor específico e para um limite de afundamento. Limite de tensão este, estabelecido a partir do tipo de carga existente neste consumidor.

A visualização desta área, usualmente denominada “área de vulnerabilidade”, é muito útil para caracterizar a região do sistema na qual uma falta pode afetar o barramento da carga em questão [8]. A área de vulnerabilidade está associada a um determinado barramento da subestação,

ou ponto de acoplamento comum com um consumidor, e corresponde à região do sistema elétrico em que a ocorrência de curtos-circuitos causa afundamento de tensão abaixo de um valor pré-estabelecido.

Com a medição dos afundamentos através do sistema de monitoramento, é possível usar o mapeamento resultante dos estudos de curtos-circuitos e determinação de áreas de vulnerabilidade, para localização do trecho da rede onde a falta pode estar localizada. Desta forma, é possível mapear toda a rede elétrica em função do tipo e local do curto calculando-se a correspondente variação de tensão vista de um ponto de monitoração.

Ao se considerar que as faltas ocorrerão somente no sistema de transmissão, e que todos os distúrbios de afundamentos de tensão já estão estabelecidos, a área de vulnerabilidade será identificada através da injeção dos distúrbios nas barras de conexão com o sistema de transmissão. Será escolhido um nível de severidade para o afundamento, neste caso a melhor escolha é a pior situação, pois assim fica evidente que todos os outros tipos de afundamentos serão considerados brandos e sua ocorrência não causaria qualquer dano aos equipamentos.

Seja a tabela 4.8 em que o afundamento trifásico escolhido, tendo este sua ocorrência bastante inferior ao gerado pelo curto monofásico, este é escolhido por sua severidade.

Tabela 4.8 – Característica do distúrbio aplicado nos barramentos

Tipo A - 15% - 30 Ciclos	
Tensão [pu]	Ângulo
0,15	0°
0,15	-120°
0,15	120°

Observe que o afundamento aplicado constitui na menor magnitude relatada na literatura, e este será aplicado em todas as barras para ilustrar o

grau de influência que cada ponto exercerá sobre o consumidor, PAC. Assim, o comportamento do sistema perante a este distúrbio é apresentado na tabela 4.9 a seguir.

Tabela 4.9 – Nível de impacto do distúrbio visto no PAC

Barra onde o distúrbio é aplicado	Nível do afundamento visto pelo consumidor – barra 11
1	82%
2	71%
3	81%
6	87%
8	66%

Pode-se observar o nível de severidade entre as barras, tal como aquela entre as barras 6 e 8, que era previsível tendo em vista a proximidade entre as barras 8 e 11 em relação ao barramento 6. Este fato se justifica pela presença de mais elementos entre a barra 6 e o consumidor do que aquela entre a barra 8 e o consumidor.

Esta afirmativa pode ser confirmada pela aplicação do método do divisor de tensão apresentada no capítulo anterior.

A seguir a análise se dará com a injeção do afundamento que ocorre estatisticamente com maior frequência encontrados na literatura. Então, o distúrbio aplicado será o do tipo B, cuja origem são os curtos fase-terra, e com a magnitude de 90%. Observe a tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Nível do distúrbio aplicado nos barramentos

Tipo B - 90% - 30 Ciclos	
Tensão [pu]	Ângulo
0,9	0°
1	-120°
1	120°

Neste caso, o nível do afundamento aplicado é aquele nas barras de conexão com os sistemas de transmissão. Por tanto com este procedimento adotado, a tabela 4.11 mostra os resultados de simulação sobre o comportamento do sistema frente a esse distúrbio aplicado.

Tabela 4.11 – Nível do impacto do distúrbio visto no PAC

Barra onde o distúrbio é aplicado	Nível do afundamento visto pelo consumidor – barra 11
1	98%
2	98%
3	98,6%
6	99%
8	97%

Observa-se da tabela acima, que os níveis de severidade resultantes são considerados brandos, não causando preocupações sobre seus efeitos em equipamentos em geral.

A figura 4.6 resume os resultados encontrados nesta análise, sendo possível identificar áreas de vulnerabilidade definida para uma carga específica situada na barra 11. Isto significa que, de acordo com a proposta deste trabalho, foi possível classificar os barramentos cuja ocorrência do distúrbio de afundamento geraria no barramento da carga uma maior ou menor severidade do fenômeno estudado.

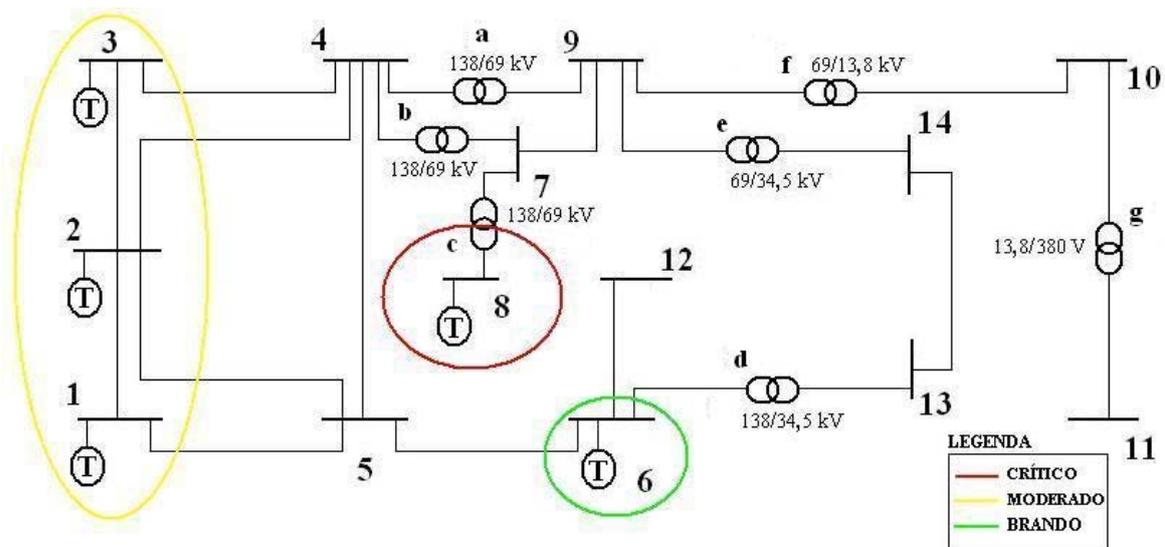


Figura 4.6 – Níveis de vulnerabilidade do sistema, gerada pela aplicação do distúrbio.

De posse dos níveis de sensibilidade da carga, é possível determinar qual valor de afundamento é passível de afetá-la, e consequentemente definem qual a área geográfica (área de vulnerabilidade) do sistema capaz de causá-lo. É importante ressaltar que quanto mais sensível for a carga, maior será a sua área de vulnerabilidade.

4.4.2 - CASO 2 – INFLUÊNCIA DAS CORRENTES DE CARGA

O objetivo deste estudo de caso é verificar o grau de influência da corrente que flui no sistema contribui para a minimização ou maximização do distúrbio. Para isto, a análise considerou o sistema em duas condições operativas: com carga nominal e com apenas 10% de carga.

Neste caso, para quantificar a magnitude dos afundamentos de tensão, a metodologia do divisor de tensão pode ser usado. Em função do seu grau de simplicidade, este método mostra-se adequado para aplicações em sistemas de transmissão e distribuição tipicamente radiais. Seu princípio básico é baseado

na ocorrência de uma da falta no alimentador que vai gerar um valor pré-determinado de afundamento de tensão numa barra de interesse no estudo.

Assim, adotando-se a barra mostrada no diagrama da figura 4.7 como sendo o ponto de acoplamento comum - PAC, tem-se que, o afundamento de tensão neste barramento devido a um defeito trifásico no ponto A, é calculado por intermédio da expressão (4.1).

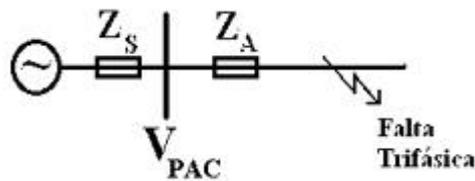


Figura 4.7 – Diagrama unifilar de um sistema elétrico simplificado.

Da figura acima pode retirar a equação:

$$V_{PAC} = \frac{Z_A}{Z_s + Z_A} \quad (4.1)$$

Onde:

- V_{PAC} - afundamento de tensão no PAC [p.u.];
- Z_A - impedância do alimentador entre o PAC e o local de falta;
- Z_s - impedância equivalente da fonte no PAC.

Naturalmente que, na expressão (4.1), foram adotadas tensão pré-falta da fonte igual a 1 (p.u.) e impedância de falta nula. Os dados necessários para executar uma análise completa em um sistema de distribuição são os seguintes:

- Número de alimentadores que se originam na subestação;
- Impedância por unidade de comprimento dos alimentadores;
- Comprimento total dos alimentadores;
- Taxas de falta dos alimentadores.

Vale ressaltar que outros métodos podem ser aplicados, a exemplo do método da distância crítica adequado para a análise de sistemas radiais ou em malha. Contudo, para grandes redes mais complexas, este método não é apropriado e, portanto, deve ser utilizado o método das posições de falta conhecido método do divisor de tensão.

Veja que em nenhum momento, para o cálculo da magnitude do afundamento, o elemento corrente é utilizado, isso já seria razão suficiente para provar a não influência da corrente no grau de severidade do distúrbio.

Neste particular será mostrado, a seguir, através dos resultados das simulações que não existe qualquer influência da corrente para a determinação da magnitude do afundamento visto pelo barramento do consumidor.

Os procedimentos nas simulações serão similares aos procedimentos usados no caso anterior, ou seja, serão aplicados afundamentos de maior severidade e o de maior frequência na barra mais crítica, barra esta encontrada com o estudo da área de vulnerabilidade.

A barra 8 é a considerada mais crítica, conforme já indicada na tabela 4.9, mostrada anteriormente. Para verificação da influência da corrente na propagação do distúrbio, veja o resultado na tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Nível de impacto do distúrbio mais severo visto no PAC com 10% de carga e com carga nominal

Carga Nominal			10 % de Carga		
Fase	Magnitude [pu]	Ângulo	Fase	Magnitude [pu]	Ângulo
A	0,66	120°	A	0,66	120°
B	0,66	0°	B	0,66	0°
C	0,66	-120°	C	0,66	-120°

Observa-se da tabela acima que, não há qualquer diferença entre o sistema com carga nominal ou com 10% de sua capacidade, considerando que o distúrbio é o mais severo.

Estas informações já são suficientes para mostrar que não há qualquer influência entre a corrente do sistema e a magnitude do evento aplicado, pois qualquer outro nível de distúrbio aplicado seria considerado brando, e sem relevância para os efeitos gerados e aqui avaliados.

Contudo serão mostrados a seguir, os resultados da simulação realizada com o distúrbio que, segundo a literatura, ocorre com maior frequência. Assim, recorrendo à tabela 4.10 para utilização do evento que será aplicado no barramento mais crítico, o que se observa é a semelhança dos resultados acima. Os resultados assim obtidos são apresentados na tabela 4.13, abaixo.

Tabela 4.13– Nível do impacto do distúrbio que ocorre com maior frequência observado no PAC com 10% de carga e com carga nominal

Carga Nominal			10 % de Carga		
Fase	Magnitude [pu]	Ângulo	Fase	Magnitude [pu]	Ângulo
A	0,99	121°	A	0,99	120°
B	0,97	0°	B	0,97	0°
C	0,99	-121°	C	0,99	-120°

Observa-se uma diferença entre os ângulos de fase que pode ser atribuído ao ajuste do programa ATP, no momento da aquisição do dado e não tendo nenhuma relevância no resultado.

Os resultados mostram mais uma vez que, não há, portanto, qualquer influência da corrente que flui pelo sistema, para concepção de propagação do evento VTCD no sistema aplicando-se o distúrbio que ocorre com maior frequência.

4.4.3 - CASO 3 – INFLUÊNCIA DOS TRANSFORMADORES

Em geral os afundamentos de tensão tem origem em locais dos sistemas elétricos com níveis de tensão diferentes daqueles onde os equipamentos estão conectados. Portanto, nem sempre as características dos afundamentos trifásicos monitorados nos pontos de acoplamento comum, ou em outras partes do sistema, correspondem às experimentadas pelos equipamentos. Tal fato se deve, principalmente, devido à existência de transformadores entre o sistema da concessionária (e do próprio complexo industrial) e os terminais dos equipamentos propriamente ditos.

Sabe-se que as características dos afundamentos de tensão dependem do tipo da falta ocorrida, da localização e da impedância da falta. Além disso, o tipo de conexão dos transformadores que se encontram entre o ponto de observação e a falta, bem como as características das tensões pré-falta e também dos equipamentos de proteção existentes no sistema elétrico.

A influência das conexões dos enrolamentos dos transformadores na propagação dos afundamentos de tensão pode ser observada quando os

afundamentos contêm componentes de sequência zero e as conexões do transformador bloqueiam este fluxo da referida seqüência.

Para alguns afundamentos de tensão, as de componentes de seqüência zero não são envolvidas, pois esses têm origem em curtos circuitos que não envolvem a terra. Nesses casos, a influência pode ser obtida em consequência dos transformadores que introduzem defasamento no ângulo de fase. Finalmente, a influência pode ocorrer também devido a combinação desses dois tipos de transformadores descritos respectivamente.

Assim, a propagação dos afundamentos de tensão através dos mais diferenciados tipos de conexões dos transformadores resultam em afundamentos com características completamente diferentes daqueles que os originaram.

Apesar da existência de várias formas de conexão dos enrolamentos dos transformadores pode-se agrupá-los em apenas três categorias e, é suficiente para justificar a transferência dos afundamentos de um nível de tensão para outro [11]; quais sejam:

- Transformadores categoria 1: Que não introduzem defasamento angular e nem filtram as componentes de seqüência zero. Fazem parte desta categoria os transformadores com as conexões Y_{NY_n} (estrela-estrela, aterrado em ambos os lados);
- Transformadores categoria 2: São aqueles que somente filtram as componentes de seqüência zero. Exemplos destes tipos são os transformadores com conexões Yy (estrela-estrela), Dd (delta-delta), Y_{NY} (estrela-estrela, aterrado no primário), Yy_n (estrela-estrela, aterrado no secundário) e Dz (delta-zig-zag);
- Transformadores categoria 3: Em que cada tensão em um dos enrolamentos (primário ou secundário) é função da diferença

fasorial entre duas tensões aplicadas ao outro enrolamento. Além de filtrarem a componente de seqüência zero da tensão, estes introduzem ainda, defasamentos angulares entre as tensões primária e secundária. Tais equipamentos são aqueles com conexões Yd (estrela-delta), Dy (delta-estrela), Y_Nd (estrela-delta, aterrado no primário), Dy_n (delta-estrela, aterrado no secundário) e Yz (estrela-zig-zag).

O desenvolvimento analítico para análise dos afundamentos de tensão oriundos de faltas desequilibradas, bem como as simplificações e considerações feitas para classificar os diferentes tipos de afundamentos de tensão, podem ser encontradas com maior detalhe na referência [1].

Assim sendo, já foi apresentada uma síntese dos desenvolvimentos apresentada no capítulo 3. As três categorias de transformadores citadas acima, que introduzem os efeitos mencionados acima podem ser expressas matematicamente pelas seguintes matrizes de transformações:

$$T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$T_2 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$T_3 = \frac{j}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Reportando-se novamente a referência [1], onde a propagação dos afundamentos de tensão através dos transformadores agrupados nas três categorias acima descritas é analisada utilizando-se das matrizes de transformações T_1 , T_2 e T_3 . Podem-se então, sintetizar os resultados dessa análise através da tabela 4.14, a seguir.

Tabela 4.14 – Influência dos transformadores nas características dos afundamentos

Tipo de conexão do transformador	Afundamento de tensão no lado primário						
	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo D	Tipo E	Tipo F	Tipo G
$Y_N Y_n$	A	B	C	D	E	F	G
Y_y, D_d, D_z	A	D*	C	D	G	F	G
Y_d, D_y, Y_z	A	C*	D	C	F	G	F

C* D* - indica que a magnitude do afundamento não é igual a V, mas será igual $\frac{1}{3} + \frac{2}{3}V$.

Pode-se observar a partir da tabela 4.14 que a conexão $Y_N Y_n$ não impõe qualquer alteração no distúrbio afundamento, qualquer que seja o seu tipo, sendo aqui então ignorado, pois este tipo de conexão não terá efeito algum na propagação dos afundamentos.

Como ilustração e validação da afirmativa acima, observa-se na figura 4.8, o resultado da simulação digital para injeção de um afundamento do tipo B propagando-se através de um transformador com a conexão $Y_N Y_n$.

A simulação deste teste ocorre de forma simplificada, ou seja, uma fonte geradora do distúrbio é aplicada na entrada do transformador e o resultado é encontrado no secundário do mesmo.

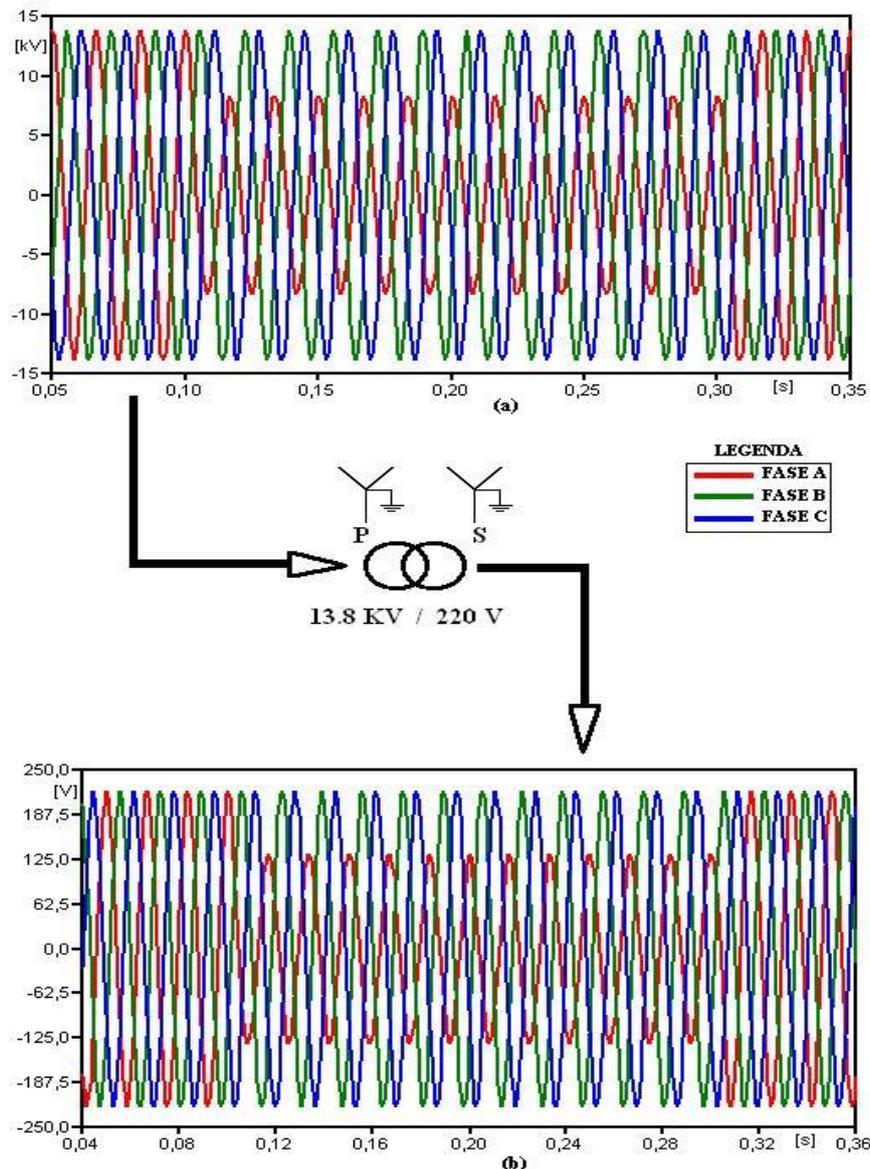


Figura 4.8 – Afundamento do tipo B e transformador tipo 1. a) forma de onda no primário; b) forma de onda no secundário.

Por esta razão, com a exclusão desta categoria de transformador, ou seja, da conexão, $Y_{N}Y_n$, o sistema teste do IEEE de 14 barras foi então modelado e estruturado com apenas as outras duas categorias de conexões, tipo 2 - Dd (delta-delta); e o tipo 3 - Dy (delta-estrela). Assim a, figura 4.9 ilustra a situação atualizada do sistema a ser considerado na modelagem daqui pra frente.

Tal sistema foi então modelado de forma a mostrar o efeito da propagação do afundamento, inclusive no que diz respeito ao ângulo de fase

sendo que os níveis de tensão considerados vão desde o nível da transmissão em 138 kV até o consumidor em 380/220V.

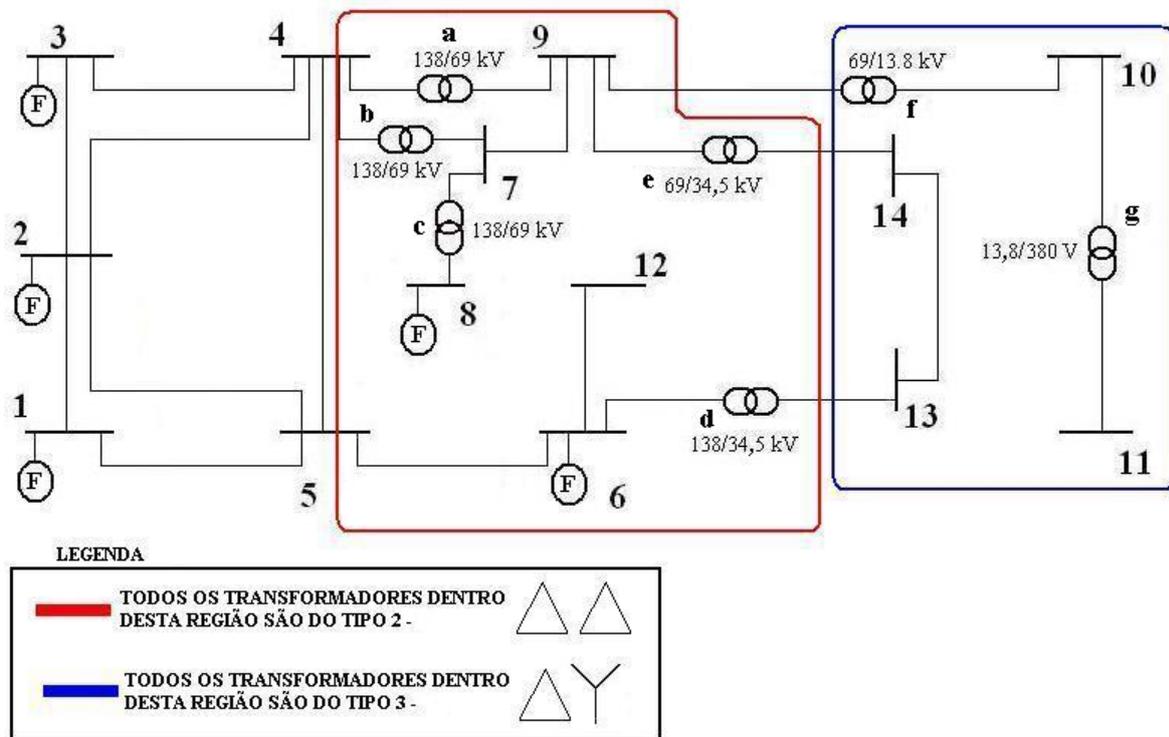
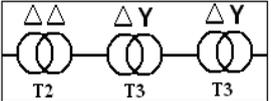
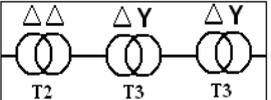
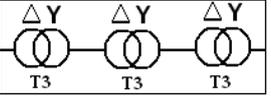
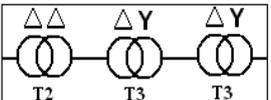


Figura 4.9 – Sistema IEEE com os transformadores do tipo 2 e 3.

O sistema foi propositalmente estruturado para que o afundamento propagasse através de uma configuração de três transformadores, onde os transformadores – a, b e c têm a conexão Dd e os transformadores f e g são Dy.

Uma vez definido o sistema a ser modelado, alguns casos testes considerados mais relevantes sob o ponto de vista da propagação do afundamento, os quais estão sintetizados na tabela 4.15, considerando os casos com a aplicação do distúrbio na barra 1.

Tabela 4.15 – Testes que serão realizados no sistema modelado com distúrbio aplicado na barra 1

Número de fontes de alimentação conectadas ao sistema	Magnitudes do distúrbio	Tipos de afundamentos aplicados	Tipos de conexões transformadores utilizados	Barras analisadas
Caso 4.1 1	15% 90%	A B C D E F G		9 10 11
Caso 4.2 3	15%	B E F G	 	9 10 11
Caso 4.3 5	90%	A B C D E F G		9 10 11

Assim, definidos os casos testes a serem avaliados, cada caso será detalhado a seguir.

4.4.3.1 – CASO 3.1 – DISTÚRBIOS APLICADOS NA BARRA 1 COM MAGNITUDES DE 15% E 90%, COM APENAS UM PONTO DE ALIMENTAÇÃO

Este caso foi gerado com o objetivo de verificar as alterações que os transformadores impõem sobre o fenômeno afundamento ao se propagar desde a barra 1 até a barra 11 do consumidor, aplicando-se os sete tipos de distúrbios, desde o mais brando até o mais severo – 10% até 90%.

Neste sentido, verificar-se-á para seus respectivos ângulos de fase em cada fase nos barramentos 9, 10 e 11, onde se encontram conectadas as cargas sob avaliação.

Assim, com o uso do sistema simulado e a aplicação distúrbios, tipos A até o G, obtém-se os resultados em termos de tensões e ângulos de fase nas diversas barras de interesse apresentados nas tabelas 4.16-1 até 4.16-7, a seguir.

Tabela 4.16-1 – Resultados obtidos nas barras 9, 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo A na barra 1, com duração de 30 ciclos

AFUNDAMENTO APLICADO NA BARRA 1			TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 09		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 10		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 11	
Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	
FASE A	0,15	0°	0,15	0°	0,15	-120°	0,15	120°
FASE B	0,15	-120°	0,15	-121°	0,15	121°	0,15	0°
FASE C	0,15	120°	0,15	121°	0,15	0°	0,15	-121°

Como era esperado observa-se da figura 4.16-1, que os afundamentos provocados por curto-circuito trifásico, tipo A, não sofre qualquer alteração

em sua característica no que tange ao ângulo de fase, conforme relatado na literatura.

Prosseguindo, a tabela 4.16-2 onde o fenômeno aplicado é o do tipo B, distúrbio este provocado por curto-circuito fase-terra, fica evidente, as alterações sofridas nas características do afundamento aplicado.

Tabela 4.16-2 – Resultados obtidos nas barras 9, 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo B aplicado na barra 1, com 30 ciclos de duração

AFUNDAMENTO APLICADO NA BARRA 1			TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 09		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 10		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 11	
Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	
FASE A	0,15	0°	0,43	0°	0,62	-151°	0,89	104°
FASE B	1	-120°	0,89	-103°	0,62	153°	0,43	0°
FASE C	1	120°	0,89	103°	1	0°	0,89	-103°

Observar que o afundamento do tipo B ao fluir pelo primeiro transformador, que possui a conexão Dd, bloqueia componente de sequência zero, transforma este evento em outro completamente diferente. Neste caso, o distúrbio adquiriu características do tipo D*, conforme a tabela 4.14.

A influência das conexões dos enrolamentos do transformador do tipo 2 bloqueiam o fluxo da referida seqüência, provocando assim uma transformação nas tensões de fase.

Por outro lado, o afundamento livre da componente de sequência zero, se propaga em direção à barra 10, no trecho entre a barra 9 e a 10 existe um transformador do tipo 3, Dy, cuja influência pode ser observada na inserção de um defasamento angular. Assim, um afundamento do tipo D* se torna um do tipo C* completamente distinto daquele da origem do distúrbio, conforme mais uma vez resultados concordantes com os apresentados na tabela 4.14.

Finalmente, caminhando da barra 10 até a barra 11, observa-se novamente alterações significantes nas características do afundamento aplicado.

Analogamente aos casos de aplicação dos afundamentos, ou seja, os tipos A e B, as tabelas 4.16-3 e 4.16-4 apresentam agora os resultados da simulação digital ao se aplicar os afundamentos C e D na barra 1 e os seus respectivos resultados da propagação nas barras 9, 10 e 11 respectivamente.

Tabela 4.16-3 – Resultados obtidos nas barras 9, 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo C na barra 1 e com 30 ciclos de duração

AFUNDAMENTO APLICADO NA BARRA 1			TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 09		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 10		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 11	
Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]		Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]
FASE A	1	0°	1	0°	0,87	-98°	0,51	163°
FASE B	0,51	-165°	0,51	-165°	0,87	98°	1	0°
FASE C	0,51	165°	0,51	165°	0,15	0°	0,51	-163°

Tabela 4.16-4 – Resultados obtidos nas barras 9, 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo D na barra 1 e com 30 ciclos de duração

AFUNDAMENTO APLICADO NA BARRA 1			TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 09		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 10		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 11	
Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]		Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]
FASE A	0,15	0°	0,15	0°	0,51	-169°	0,87	94°
FASE B	0,87	-95°	0,87	-95°	0,51	168°	0,15	0°
FASE C	0,87	95°	0,87	95°	1	0°	0,87	-93°

Neste caso em que existem três transformadores entre a origem do evento e o consumidor, e um deles é um Dd, o afundamento que o consumidor, barra 11, enxergará é o mesmo que foi introduzido na barra 1.

A observação destas tabelas traz que primeiro o transformador do tipo 2, o que antecede o barramento 9 em nada contribui, ou melhor, influência nos ângulos de fase das tensões. Mas por outro lado o do tipo 3 e o que tem mais influência neste tipo de distúrbio, pois o mesmo aplica uma defasagem angular nas tensões que por ele passa defasagem essa de 30° e já explicada no capítulo 3.

O que se nota nestas tabelas é a alternância entre os dois tipos de afundamentos ora tipo C ora tipo D, e assim será por todo o sistema, não importando quantos elementos – transformadores – existam entre a fonte da origem do fenômeno e a carga.

Agora será tratado mais um caso particular, um distúrbio que envolve a terra e conseqüentemente o aparecimento de componentes de sequência zero será injetado na barra 1 o afundamento do tipo E acompanhe na tabela 4.16-5.

Tabela 4.16-5 – Resultados obtidos nas barras 9, 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo E na barra 1 e com 30 ciclos de duração

AFUNDAMENTO APLICADO NA BARRA 1			TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 09		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 10		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 11	
Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]		Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]
FASE A	1	0°	0,71	0°	0,62	-96°	0,38	159°
FASE B	0,15	-120°	0,38	-160°	0,62	96°	0,71	0°
FASE C	0,15	120°	0,38	161°	0,15	0°	0,38	-161°

Como era de se esperar tal distúrbio ao passar pelo transformador que antecede o barramento 9, sofre uma transformação tanto em seu módulo como em seu ângulo de fase. O que era uma defasagem de 120° passa aos 160° só pelo fato de ter se propagado através do transformador do tipo 2, que como já se sabe impede a propagação das componentes de sequência zero e com isso impondo uma grande transformação nas características do distúrbio.

E, ao continuar a se propagar, o evento passa pelo transformador que antecede a barra 10, esse do tipo 3, onde sua influência esta na introdução de uma defasagem de 30° e com isso produzindo mais uma mudança nas características do fenômeno, e por fim, outra mudança decorrente de mais um transformador do tipo 3 que antecede a barra 11.

De acordo com as teorias existentes, resta ainda apresentar os afundamentos do tipo F e do tipo G, que são distúrbios cuja ocorrência advinda de faltas no sistema é quase nula. A maneira mais comum de serem encontradas é através das modificações impostas pelos transformadores ao distúrbio do tipo E. Acompanhe as tabelas 4.16-6 e 4.16-7.

Tabela 4.16-6– Resultados obtidos nas barras 9, 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo F na barra 1 e com 30 ciclos de duração

AFUNDAMENTO APLICADO NA BARRA 1			TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 09		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 10		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 11	
	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]
FASE A	0,15	0°	0,15	0°	0,62	-167°	0,62	97°
FASE B	0,62	-97°	0,62	-98°	0,62	167°	0,15	0°
FASE C	0,62	97°	0,62	97°	0,15	0°	0,62	-97°

Tabela 4.16-7– Resultados obtidos nas barras 9, 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo G na barra 1 e com 30 ciclos de duração

AFUNDAMENTO APLICADO NA BARRA 1			TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 09		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 10		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 11	
	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]
FASE A	0,71	0°	0,71	0°	0,62	-100°	0,38	158°
FASE B	0,38	-160°	0,38	-161°	0,62	101°	0,71	0°
FASE C	0,38	160°	0,38	158°	0,15	0°	0,38	-161°

O que se observa nestas últimas tabelas é algo semelhante ao ocorrido com as tabelas 4.16-4 e 4.16-5, onde os distúrbios se alternam entre o tipo F e tipo G. É também possível ver que o transformador que antecede o barramento 9 não influencia em nada as características desse evento, da mesma forma que também não alterou em nada os afundamentos do tipo C e tipo D.

Para os experimentos com os eventos de magnitude igual a 90% os dados apresentados serão apenas os distúrbios do tipo B e do tipo E, pois os resultados são semelhantes ao anterior já apresentados com a única diferença em sua magnitude. A partir dos afundamentos do tipo B e tipo E é possível representar todos os outros tipos de afundamentos e assim enxugar os dados que estão sendo mostrados. Observe as tabelas 4.17-1 e 4.17-2, abaixo.

Tabela 4.17-1 – Resultados obtidos nas barras 9, 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo B na barra 1 e com 30 ciclos de duração

AFUNDAMENTO APLICADO NA BARRA 1			TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 09		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 10		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 11	
Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]		Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]
FASE A	0,9	0°	0,93	0°	0,95	-122°	0,98	121°
FASE B	1	-120°	0,98	-120°	0,95	123°	0,93	0°
FASE C	1	120°	0,98	120°	1	0°	0,98	-120°

Tabela 4.17-2 – Resultados obtidos nas barras 9, 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo E na barra 1 e com 30 ciclos de duração

AFUNDAMENTO APLICADO NA BARRA 1			TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 09		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 10		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 11	
Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]		Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]
FASE A	1	0°	0,96	0°	0,95	-118°	0,92	122°
FASE B	0,9	-160°	0,92	-122°	0,95	119°	0,96	0°
FASE C	0,9	160°	0,92	123°	0,9	0°	0,92	-122°

A influência dos transformadores nesse experimento foi insignificante, onde os ângulos de fase de cada tensão gira em torno de 120° e as magnitudes próximas de 95%. E o mesmo acontece para todos os outros tipos de afundamentos.

4.4.3.2 – CASO 3.2 – DISTÚRBIOS APLICADOS NA BARRA 1 COM MAGNITUDES DE 15%, COM TRÊS PONTOS DE ALIMENTAÇÃO E A TROCA DO TRANSFORMADORES TIPO 2 PELO TIPO 3

Este experimento ilustrará o que ocorre com o distúrbio caso este se propague por um sistema constituído apenas de transformadores com conexão Dy – tipo 3 – em comparação com o mesmo evento se propagando através do sistema inicial, já comentado.

O objetivo deste é apresentar se a influência dos transformadores do tipo 3 é significativa frente aos afundamentos desde sua origem até o consumidor. As tabelas a seguir esclarecerão de certa forma, estas dúvidas acerca desta influência.

As tabelas 4.18-1 até 4.18-4, o referido distúrbio e suas conseqüências nos sistema com transformadores do tipo 2 e tipo 3. Os dados expressos nessas tabelas são referentes aos acontecimentos que 3 barramentos sofrem isso porque a apresentação de todos os dados de todas as barras seria impraticável.

Afundamentos provocados por curto-circuito trifásico, tipo A, não sofre qualquer alteração em suas características no que se refere ao ângulo de fase. O salto do ângulo – phase-angle jumps – de fase não ocorre para este tipo de evento. Sendo assim não será necessária a apresentação dos dados.

Agora serão tratados mais dois casos particulares, distúrbios que envolvem a terra e conseqüentemente o surgimento de componentes de seqüência zero.

Conforme a tabela 4.18-1, onde o fenômeno simulado é o do tipo B distúrbio este provocado por curto-circuito fase-terra, bem como a tabela 4.18-2 que ilustra o evento simulado do tipo E. Por tanto, ilustrarão a influência dos transformadores do tipo 2.

Tabela 4.18-1 – Resultados obtidos nas barras 9, 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo B, com sistema sem modificações, na barra 1 e com 30 ciclos de duração

AFUNDAMENTO APLICADO NA BARRA 1			TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 09		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 10		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 11	
Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	
FASE A	0,15	0°	0,74	0°	0,81	-142°	0,94	113°
FASE B	1	-120°	0,94	-114°	0,81	142°	0,74	0°
FASE C	1	120°	0,94	114°	1	0°	0,94	-113°

Tabela 4.18-2 – Resultados obtidos nas barras 9, 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo E, sistema sem modificações, na barra 1 e com 30 ciclos de duração

AFUNDAMENTO APLICADO NA BARRA 1			TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 09		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 10		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 11	
Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	
FASE A	1	0°	0,87	0°	0,82	-113°	0,7	131°
FASE B	0,15	-120°	0,7	-130°	0,82	113°	0,87	0°
FASE C	0,15	120°	0,7	130°	0,62	0°	0,7	-130°

Nas duas tabelas acima os distúrbios sofrem uma transformação ao transpor o transformador do tipo 2, observe que no barramento 9 ambos estão livres da componente de seqüência zero. E de acordo com a tabela 4.14 o

afundamento do tipo B muda para D* e do tipo E transforma em tipo G; livres desta componente os dois eventos só sofrerão alguma transformação caso se propaguem através de transformadores do tipo 3. Os valores de magnitude e ângulo de fase estão mais brandos do que no caso 4.1 em decorrência das outras fontes de alimentação conectadas no sistema.

De acordo com as teorias encontradas no Bollen [1] e as tabelas acima provam os distúrbios sem a presença da componente de sequência zero irá alternar entre o tipo C* e tipo D* se estes se propagarem apenas por transformadores do tipo 3. E assim será também com os afundamentos do tipo F e tipo G, originados do evento tipo E. Nas tabelas a seguir, 4.18-3 e 4.18-4, traz essa alternância entre os tipos F e G.

Tabela 4.18-3 – Resultados obtidos nas barras 9, 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo F, com sistema original, na barra 1 e com 30 ciclos de duração

AFUNDAMENTO APLICADO NA BARRA 1			TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 09		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 10		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 11	
Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]		Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]
FASE A	0,15	0°	0,62	0°	0,7	-130°	0,82	114°
FASE B	0,62	-97°	0,82	-113°	0,7	130°	0,62	0°
FASE C	0,62	97°	0,82	113°	0,87	0°	0,82	-113°

Tabela 4.18-4 – Resultados obtidos nas barras 9, 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo G, com sistema original, na barra 1 e com 30 ciclos de duração

AFUNDAMENTO APLICADO NA BARRA 1			TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 09		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 10		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 11	
Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]		Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]
FASE A	0,71	0°	0,87	0°	0,82	-113°	0,7	130°
FASE B	0,38	-160°	0,7	-130°	0,82	113°	0,87	0°
FASE C	0,38	160°	0,7	130°	0,62	0°	0,7	-131°

Veja os valores encontrados das tensões, módulo e ângulo, de cada fase são iguais aos valores encontrados nessa mesma barra na tabela 4.18-2, o que indica que o afundamento do tipo G ao passar pelo transformador do tipo 2 não sofre alteração alguma e que o distúrbio do tipo E ao passar pelo mesmo transformador é transformado em outro tipo de distúrbio, nesse caso passa a ser considerado do tipo G. Acompanhe o resumo destas três últimas tabelas, a tabela 4.19 ilustra o comportamento dos distúrbios e suas semelhanças.

Tabela 4.19 – Resumo dos dados das tabelas 4.18-2 até 4.18-4

Afundamentos aplicados na barra 1	Tipos de afundamentos encontrados na barra 9	Tipos de afundamentos encontrados na barra 10	Tipos de afundamentos encontrados na barra 11
E	G	F	G
F	F	G	F
G	G	F	G

Os dois eventos em destaque a única diferença esta no tipo de distúrbio que o originou. Com isso pode ser a idéia de quanto imprevisível o afundamento de tensão pode se tornar, quando este se propaga pela rede elétrica. Casos em que se tomam como base apenas a fonte de origem para determinar qual a severidade do evento tornam as análises comprometida.

Fica evidente que os elementos que compõem todo sistema elétrico devem ser levados em consideração para o estudo.

Será apresentado nas tabelas que se seguirão o que acontece com os fenômenos caso estes se propaguem por um sistema que possua apenas transformadores Dy, tipo 3. Para que a análise não se prolongue os dados apresentados se limitarão em apenas três tipos de afundamentos; o tipo B por possuir as componentes de sequência zero; tipo C e tipo D não possuem componentes de sequência zero. Veja nas tabelas 4.20-1 até 4.20-3.

Tabela 4.20-1 – Resultados obtidos nas barras 9, 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo B, com sistema modificado, na barra 1 e com 30 ciclos de duração

AFUNDAMENTO APLICADO NA BARRA 1			TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 09		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 10		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 11	
Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]		Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]
FASE A	0,1	0°	0,83	-130°	0,95	113°	1	0°
FASE B	1	-120°	0,83	133°	0,74	0°	0,83	-130°
FASE C	1	120°	1	0°	0,95	-114°	0,83	132°

Tabela 4.20-2 – Resultados obtidos nas barras 9, 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo C, sistema sem modificações, na barra 1 e com 30 ciclos de duração

AFUNDAMENTO APLICADO NA BARRA 1			TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 09		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 10		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 11	
Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]		Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]
FASE A	1	0°	0,93	-108°	0,75	132°	0,62	0°
FASE B	0,51	-165°	0,93	105°	1	0°	0,93	-107°
FASE C	0,51	165°	0,62	0°	0,75	-133°	0,93	-104°

Tabela 4.20-3 – Resultados obtidos nas barras 9, 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo D, com sistema original, na barra 1 e com 30 ciclos de duração

AFUNDAMENTO APLICADO NA BARRA 1			TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 09		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 10		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 11	
Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]		Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]
FASE A	0,15	0°	0,75	-130°	0,93	103°	1	0°
FASE B	0,87	-95°	0,75	132°	0,62	0°	0,75	-132°
FASE C	0,87	95°	1	0°	0,93	-108°	0,75	130°

O que se percebe nestas três tabelas é que todos os distúrbios sofreram alterações, o que não ocorre que o sistema possui transformadores Dd, tipo 2, conforme a tabela 4.19 ilustrou. Evidenciando assim a forte influência que os transformadores do tipo 3 possuem sobre os afundamentos de tensão. Observe as tabelas 4.21.

Tabela 4.21 – Resumo dos dados das tabelas 4.20-1 até 4.20-3

Afundamentos aplicados na barra 1	Tipos de afundamentos encontrados na barra 9	Tipos de afundamentos encontrados na barra 10	Tipos de afundamentos encontrados na barra 11
B	C*	D*	C*
C	D	C	D
D	C	D	C

4.4.3.3 – CASO 3.3 – DISTÚRBIOS APLICADOS NA BARRA 1 COM MAGNITUDES DE 90%, COM TODOS OS PONTOS DE ALIMENTAÇÃO

Esta análise servirá para comparação com o caso 4.1, e demonstrará a pouca influência dos transformadores exerce sobre os distúrbios quando estes são brandos. Tendo em vista que a maior parcela dos distúrbios, registrados, esta em torno dos 90% de magnitude.

Sendo assim os dados a seguir seguirão o mesmo procedimento que se teve com o caso 4.1. A apresentação de todos os tipos de afundamentos e assim estabelecer uma base de comparação. Acompanhe nas tabelas 4.22-1 que apresenta o afundamento do tipo A e sua característica de não se alterar frente a qualquer tipo de elemento do sistema.

Tabela 4.22-1 – Resultados obtidos nas barras 9, 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo A e com todas as fontes de alimentação conectadas, com duração de 30 ciclos

AFUNDAMENTO APLICADO NA BARRA 1			TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 09		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 10		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 11	
Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]		Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]
FASE A	0,9	0°	0,98	0°	0,98	-120°	0,98	120°
FASE B	0,9	-120°	0,98	-120°	0,98	120°	0,98	0°
FASE C	0,9	120°	0,98	120°	0,98	0°	0,98	120°

Como era de se esperar os níveis de tensão próximos de 1[pu] e os ângulos de fase em 120°

Tabela 4.22-2 o afundamento aplicado é do tipo B e como pode se notar não há qualquer alteração significativa nas tensões de cada fase. O tipo B, conforme esquema apresentado anteriormente com o sistema possuindo um transformador do tipo 2 e dois do tipo 3, sofre três alterações, o que é imperceptível como mostra a tabela.

Tabela 4.22-2 – Resultados obtidos nas barras 9, 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo B e com todas as fontes de alimentação conectadas, com duração de 30 ciclos

AFUNDAMENTO APLICADO NA BARRA 1			TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 09		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 10		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 11	
Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]		Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]
FASE A	0,9	0°	0,98	0°	0,985	-122°	0,995	123°
FASE B	1	-120°	0,995	-121°	0,985	122°	0,98	0°
FASE C	1	120°	0,995	120°	1	0°	0,995	-123°

Casos da tabela 4.22-3 e 4.22-4, também não têm muito que se possa explicar a tabela já diz por si só que ocorre, quando ao sistema é introduzido um distúrbio com essas características.

Tabela 4.22-3 – Resultados obtidos nas barras 9, 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo C e com todas as fontes de alimentação conectadas, com duração de 30 ciclos

AFUNDAMENTO APLICADO NA BARRA 1			TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 09		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 10		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 11	
Magnitude [pu]		Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]
FASE A	1	0°	1	0°	0,99	-121°	0,98	122°
FASE B	0,93	-123°	0,98	-122°	0,99	121°	1	0°
FASE C	0,93	123°	0,98	121°	0,98	0°	0,98	-122°

Tabela 4.22-4 – Resultados obtidos nas barras 9, 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo D e com todas as fontes de alimentação conectadas, com duração de 30 ciclos

AFUNDAMENTO APLICADO NA BARRA 1			TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 09		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 10		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 11	
Magnitude [pu]		Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]
FASE A	0,9	0°	0,98	0°	0,98	-122°	0,99	121°
FASE B	0,97	-117°	0,99	-121°	0,98	122°	0,98	0°
FASE C	0,97	117°	0,99	120°	1	0°	0,99	-121°

Tabela 4.22-5 segue os moldes do evento já comentado acima na tabela 4.22-2 e o que ocorre é insignificante frente à alguns casos já tratados aqui.

Tabela 4.22-5 – Resultados obtidos nas barras 9, 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo E e com todas as fontes de alimentação conectadas, com duração de 30 ciclos

AFUNDAMENTO APLICADO NA BARRA 1			TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 09		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 10		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 11	
Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]		Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]
FASE A	1	0°	0,99	0°	0,99	-121°	0,98	122°
FASE B	0,9	-120°	0,98	-121°	0,99	121°	0,99	0°
FASE C	0,9	120°	0,98	121°	0,98	0°	0,98	-122°

Tipos F e G, não se diferenciam em nada sua ocorrência com a dos tipos C e D. Nem uma mudança que venha trazer maiores transtornos para equipamentos sensíveis. Conforme mostra as tabelas 4.22-6 e 4.22-7.

Tabela 4.22-6 – Resultados obtidos nas barras 9, 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo F e com todas as fontes de alimentação conectadas, com duração de 30 ciclos

AFUNDAMENTO APLICADO NA BARRA 1			TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 09		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 10		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 11	
Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]		Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]
FASE A	0,9	0°	0,98	0°	0,98	-122°	0,99	121°
FASE B	0,95	-118°	0,99	-121°	0,98	121°	0,98	0°
FASE C	0,95	118°	0,99	120°	0,99	0°	0,99	-121°

Tabela 4.22-7 – Resultados obtidos nas barras 9, 10 e 11 ao aplicar o afundamento tipo G e com todas as fontes de alimentação conectadas, com duração de 30 ciclos

AFUNDAMENTO APLICADO NA BARRA 1			TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 09		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 10		TENSÃO RESULTANTE NA BARRA 11	
Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]		Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]	Magnitude [pu]	Ângulo de fase [graus]
FASE A	0,96	0°	0,99	0°	0,99	-121°	0,98	122°
FASE B	0,92	-122°	0,98	-122°	0,99	121°	0,99	0°
FASE C	0,92	122°	0,98	121°	0,98	0°	0,98	-122°

As tabelas deste experimento, 4.3, ilustram até que ponto chega o grau de influência dos transformadores qualquer seja o tipo, na propagação dos afundamentos de tensão. E que as maiores preocupações devem estar no que diz respeito a distúrbios com características mais severas.

4.5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos tanto da abordagem teórica como das simulações computacionais, constata-se a forte influência dos tipos de conexões dos transformadores na propagação do afundamento de tensão ao longo da rede.

Observa-se uma influência mais significativa quando os afundamentos de tensão possuem componentes de sequência zero e os transformadores não permitem o fluxo dessas componentes. Todavia, quando a componente de sequência zero não está presente, originários de curtos-circuitos que não envolvem a terra, sendo neste caso a influência devida à defasagem imposta pelos transformadores de tipo 3.

A conexão tipo Dy do transformador tem uma forte influência se comparado a outros tipos de conexões, ou seja, o Dy – tipo 3 – é capaz de minimizar os afundamentos severos. Os resultados das simulações mostram que a conexão Dd – tipo 2 – é capaz de minimizar o número de interrupções momentâneas.

Constatou-se também que, nem sempre os transformadores interferem com a propagação do evento, uma vez que casos mostrados aqui com a aplicação de distúrbios mais brandos com magnitudes de 90%, mostraram que o transformador não causa qualquer efeito significativo, quando comparado com afundamentos com nível de severidade mais acentuado.

Finalmente, para minimizar os custos tanto para as concessionárias quanto para os consumidores em geral, decorrentes dos afundamentos de tensão, se faz necessário então, adotar medidas corretivas, tais como a inserção de dispositivos mitigadores, a exemplo do restaurador dinâmico de tensão (DVR), compensadores estáticos e etc.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES GERAIS

Não obstante os comentários conclusivos realizados ao término de cada capítulo, considera-se essencial que neste momento sejam enfocadas as principais constatações passíveis de extração deste trabalho como um todo e sugerindo investigações complementares em futuros trabalhos.

Neste sentido, o Capítulo 1 abordou, de uma maneira geral, a motivação principal dos estudos de afundamentos de tensão, que são os problemas causados a uma grande variedade de equipamentos sensíveis ao fenômeno. Alguns equipamentos, como aqueles onde o controle de velocidade variável, sistemas controlados por computadores, podem ser desligados durante os afundamentos de tensão, provocando perdas econômicas significativas.

Em seguida foi estabelecida a contextualização dos objetivos gerais e da estrutura do presente trabalho, bem como o levantamento da literatura atual sobre o fenômeno da propagação do afundamento de tensão.

No Capítulo 2, aborda-se os fenômenos que contribuem para a perda de qualidade da energia de um determinado suprimento elétrico; em particular, os afundamentos de tensão destacando-os como os mais preocupantes pelo fato destes quer sejam momentâneos ou temporários serem os que mais notadamente se fazem presentes na operação dos complexos elétricos; gerados por situações operativas anormais, tais como os curto-circuitos. Além de apresentar características econômicas, pois os prejuízos causados pelos

afundamentos de tensão podem ser extremamente elevados, dependendo da sensibilidade dos equipamentos e dos processos afetados. É também apresentado neste capítulo a caracterização dos afundamentos de tensão bem como sua normatização, segundo as regulamentações do IEEE, IEC e ONS.

No capítulo 3, são consideradas as técnicas para realização de análise do distúrbio afundamento de tensão, através de metodologias para a determinação das causas e das influências que o distúrbio pode vir a ter. Realiza-se também um comparativo entre os softwares existentes para análise de afundamentos de tensão, tanto em âmbito nacional quanto internacional.

No que tange as metodologias de predição toma-se como base a utilização de programas computacionais para o cálculo das intensidades dos afundamentos de tensão, a utilização dos tempos de sensibilização, a atuação de relés de proteção para estimar a duração dos VTCDs.

Adicionalmente, são considerados neste capítulo os procedimentos para a modelagem da fonte geradora de afundamentos desenvolvida no ATP. Por fim, com a aplicação dessa fonte de afundamentos nos locais de interesse, dentro do sistema escolhido foi possível verificar a validação do desempenho da fonte de injeção do distúrbio.

Já o Capítulo 4, teve como enfoque principal a análise e o estudo de casos, simulados no programa computacional ATP. A propagação do distúrbio nos sistemas elétricos é investigada neste capítulo, através de simulações utilizando a modelagem matemática e cada componente do sistema.

Apesar de uma série de comentários conclusivos já terem sido realizados nas considerações finais de cada capítulo, uma abordagem global enfocando as principais contribuições efetuadas por este trabalho se faz necessária. Dessa forma, as principais contribuições técnicas desta pesquisa são descritas a seguir:

- Realização do estado da arte e revisão bibliográfica em relação ao distúrbio da propagação do afundamento de tensão.
- A relação existente entre os transformadores, com conexões enquadradas como tipos T2 e T3, mais a teoria sobre a eliminação das componentes de sequência zero, fica aqui então estabelecido seu grau de relevância para o estudo da propagação do afundamento de tensão.
- Observa-se uma influência significativa quando os afundamentos de tensão possuem componentes de sequência zero e os transformadores não permitem o fluxo dessas componentes, que é função do seu tipo de conexão.
- Nem sempre os transformadores interferem com a propagação do evento, uma vez que casos mostrados aqui com a aplicação de distúrbios mais frequentes com magnitudes de 90%.
- As características dos afundamentos de tensão nos terminais da carga variam de acordo com o tipo de conexão do transformador, tipo de conexão da carga e das impedâncias envolvidas desde o local onde foi gerado o distúrbio até a carga, sob avaliação.

Tendo em vista que os principais objetivos do trabalho foram atingidos, como para qualquer outra área de conhecimento, investigações complementares ainda se fazem necessárias. Destas, podem-se citar:

- Investigações laboratoriais para validação da simulação, através de medições do distúrbio em uma rede real.
- Influência de bancos monofásicos de transformadores na propagação do referido evento
- Qual a real contribuição do defasamento angular para a minimização ou maximização dos afundamentos de tensão.
- Análise sobre a influência que os transformadores com a conexão Dz teria sobre a propagação do afundamento de tensão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BOLLEN, M. H. J., Understanding Power Quality – Voltages Sags and Interruptions. Editora IEEE Press Series on Power Engineering, EUA – 1999.

- [2] DUGAN, R. C., Mc GRANAGHAN, M. F., Electrical Power Systems Quality. Editora Mc-Graw Hill, EUA – 1995.

- [3] OLIVEIRA, T. C., Desenvolvimento e Aplicação de um Sistema de Software para Estudos de Afundamentos de Tensão. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá. Outubro, 2004.

- [4] SILVA, J. A. M., Análise Comparativa de Resultados de Simulação de Afundamentos de Tensão Utilizando Programas de Curto-Circuito e de Transitórios Eletromagnéticos. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá. Outubro. 2004.

- [5] CANGUÇU, N. A., Contribuições para Avaliação dos Impactos Econômicos Causados por Mergulho de Tensão em Sistema Elétrico Industrial. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista – Ilha Solteira, Fevereiro, 2006.

- [6] CARVALHO, P. L., Uma Contribuição ao Estudo da Depressão de Tensão. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá. Dezembro, 1997.

- [7] LEBORGNE, R. C., Uma Contribuição à Caracterização da Sensibilidade de Processos Industriais Frente a Afundamentos de Tensão. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá. Maio, 2003.
- [8] FONSECA, V. R. C., Cálculo Estocástico do Afundamento de Tensão. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 1999.
- [9] SILVA, S. M., Estudo e Projeto de um Restaurador Dinâmico de Tensão. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, 1999.
- [10] FILHO, F. C. S., Proposta de Recuperador Dinâmico para Correção de Afundamentos de Tensão. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2002.
- [11] PESQUER, L. G., Efectos de los Huecos de Tensión en las Máquinas de Inducción y en los Transformadores Trifásicos. Tese de Doutorado. Universitat Politècnica de Catalunya, Janeiro, 2006.
- [12] Mc GRANAGHAN, M. F., MULLER, D. R., SAMOTYJ, M. J., Voltage Sags in Industrial Systems. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 29, N° 2; pp 397 – 402. March, 1993.

- [13] DJOKIC, S. Z., MILANOVIC, J. V., CHAPMAN, D. J., Mc GRANAGHAN, M. F., Shortfalls of Existing Methods for Classification and Presentation of Voltage Reduction Events. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, N°.2; pp 1640 – 1649. April, 2005.
- [14] MILANOVIC, J. V., AUNG, M. T., GUPTA, C. P., The Influence of Fault Distribution on Stochastic Prediction of Voltage Sags. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, N°.1; pp 278 – 285. January, 2005.
- [15] MILANOVIC, J. V., GUPTA, C. P., Probabilistic Assessment of Financial Losses due to Interruptions and Voltage Sags – Part I : The Methodology. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, N°.2; pp 918 – 924. April, 2006.
- [16] ALVES, M. F., COSTA, J. G., FONSECA, V. R. C., Impacto Econômico do Afundamento de Tensão na Indústria: Uma Metodologia Aplicada a Grandes Redes Elétricas. V SBQEE – Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica. Aracaju. Agosto, 2003.
- [17] MARTINEZ, J. A., ARNEDO, J. M., MILANOVIC, J. V., Load Modeling for Voltage Sag Studies. IEEE Transactions, pp 2508 – 2513. June, 2003.
- [18] MILANOVIC, J. V., GNATIV, R., Characteristics of Voltage Sags in Radial Networks with Dynamic Loads and Embedded Generators. IEEE Porto Power Tech Conference. Portugal. September, 2001.

- [19] KAGAN, N. CASTELLANO, U. F., VASCONCELOS, G. F., Procedimentos para Diagnosticar e Mitigar Efeitos Provocados por VTCDs em Processos Industriais. VI SBQEE – Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica. Belém. Agosto, 2005.
- [20] CARVALHO, A. J. B., NUNES, M. V. A., JUNIOR, G. C., Análise do Comportamento das Variações de Tensão de Curta Duração (VTCDs) Utilizando Comparação entre os Programas ATP e ANAFAS. VI SBQEE – Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica. Belém. Agosto, 2005.
- [21] AUNG, M. T., MILANOVIC, J. V., The Influence of Transformer Winding Connections on the Propagation of Voltage Sags. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, N°1; pp 262 – 269. January, 2006.
- [22] MILANOVIC, J. V., GNATIV, R., CHOW, K. W. M., The Influence of Loading Conditions and Network Topology on Voltage Sags. IEEE Transactions, pp 757 – 762. June, 2000.
- [23] AUNG, M. T., MILANOVIC, J. V., GUPTA, C. P., Propagation of Asymmetrical Sags and the Influence of Boundary Crossing Lines on Voltage Sag Prediction. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, N°4; pp 1819 – 1827. October, 2004.

- [24] NOVAES, E. G. C., FILHO, J. M. C., ABREU, J. P. G., Análise da Propagação de Afundamento de Tensão Estudo de Caso. VI SBQEE – Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica. Belém. Agosto, 2005.
- [25] AJODHIA, V., FRANKEN, B., Regulation of Voltage Quality. KEMA Consulting. European Copper Institute.
- [26] OLIVEIRA, T. C., FILHO, J. M. C., ABREU, J. P. G., LEBORGNE, R. C., Análise da Influência da Conexão de Transformadores D/Yaterrado na Propagação de Afundamentos de Tensão. V SBQEE – Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica. Aracaju. Agosto, 2003.
- [27] STEPHENS, M., Power Quality and Utilization Guide: Power Quality in Continuous Manufacturing. EPRI Solutions – Leonardo Power Quality Initiative. 2006.
- [28] CHAPMAN, D., Guia de Aplicação de Qualidade de Energia: Os Custos da Má Qualidade de Energia. Copper Development Association, Versão 2. Abril 2002.
- [29] MARTINEZ, J. A., ARNEDO, Voltage Sag Studies in Distribution Networks – Part I: System Modeling. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, N°3; pp 1670 – 1678. July, 2006.

- [30] Becker c., JUNIOR, W. B., Carrick, K., Diliberti, T., Grigg, c., Groesch, j., Hazen, b., Imel, t., Koval, d., Mueller, d., St. John, t., and Conrad, l. e. Proposed Chapter 9 for Predicting Voltage Sags (Dips) in Revision to IEEE Std 493, the Gold Book. IEEE Transactions on Industry Applications. Vol.30, N°.3; pp 805 – 821. May, 1994.
- [31] BOLLEN, M. H. J., YALÇINKAYA, G., HAZZA, G. The use of Electromagnetic Transient Programs for Voltage Sag Analysis. ICHQP' 98 - International Conference on Harmonics and Quality of Power. Pp 598 – 603. Athens. October, 1998.
- [32] XU, J., ANNAMRAJU, R. V., RAJAGOPALAN, V., Propagation Characteristics of Sag and Harmonics in Medium Voltage Distribution Systems. IEEE Transactions. Pp 2582 – 2587. June, 2000.
- [33] NIMPITIWAN, N., HEYDT, G. AYYANAR, R. BLEVINS, J., KOELLNER K., The Propagation of Disturbances in Power Distribution Systems. IEEE Transmission and Distribution Show. Dallas. September, 2003.
- [34] DJOKIC, S. Z., MILANOVIC, J. V., CHAPMAN, D. J., Mc GRANAGHAN, M. F., KIRSCHEN, D. S., A New Methods for Classification and Presentation of Voltage Reduction Events. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, N°.4; pp 2576 – 2584. October, 2005.

- [35] ZHANG, L., BOLLEN, M. H. J. Characteristic of Voltage Dips (Sags) in Power Systems. ICHQP' 98 - International Conference on Harmonics and Quality of Power. Pp 598 – 603. Athens. October, 1998.
- [36] VELASCO, J. A. M., ARNEDO, J. M., Voltage Sag Index Calculation Using an Electromagnetic Transients Program. IPST 2003 - International Conference on Power Systems Transients. New Orleans, 2003.
- [37] VELASCO, J. A. M., ARNEDO, J. M. Stochastic Prediction of Voltage Dips Using an Electromagnetic Transients Program. 14th PSCC. Sevilla. June, 2002.
- [38] DJOKIC, S. Z., MILANOVIC, J. V., CHARALAMBOUS, K. A., Computer Simulation of Voltage Sag Generator. IEEE Transactions, 2002.
- [39] CHUNG, Y. H., KWON, G. H., PARK, T. B., LIM, K. Y., Voltage Sag and Swell Generator for the Evaluation of Custom Power Devices. IEEE Transactions, 2003.
- [40] NHO, E. C., KIM, I. D., CHUM, T. W., KIM, H. G., Cost Effective Power Quality Disturbance Generator for the Performance Test of Custom Power Devices. The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. pp 1606 – 1610. Korea. November, 2004.
- [41] IEEE, “IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality”, IEEE Standard 1159 - 1995.

- [42] IEC, International Electrotechnical Commission, “Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Distribution Systems”, European Standard, 06 November 1994.
- [43] ONS – Procedimentos de Rede, Submódulo 2.2 – “Padrões de Desempenho da Rede Básica e Requisitos Mínimos para suas Instalações”, Agosto 2002, www.ons.org.br.
- [44] ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica, “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST”, Módulo 8 Qualidade de Energia Elétrica. 2005.
- [45] IEEE, “IEEE recommended practice for evaluating electric power system compatibility with electronic process equipment”, IEEE Standard 1346. 1998.
- [46] IEC - International Electrotechnical Commission, “Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-8: Environment - Voltage dips and short interruptions on public electric power supply systems with statistical measurement results”, IEC Standard 61000-2-8. 2002.
- [47] CAÑIZARES, C. A., KODSI, S. K. M., Modeling and simulation of IEEE 14 bus system with FACTS controllers. IEEE Technical Report, 2003 – 3.