

TESE

47391

FEI - UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE UM
SISTEMA DE SOFTWARE PARA ESTUDOS DE
AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

THIAGO CLÉ DE OLIVEIRA

ITAJUBÁ, OUTUBRO DE 2004

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE UM
DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE UM
SISTEMA DE SOFTWARE PARA ESTUDOS DE
AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

THIAGO CLÉ DE OLIVEIRA

Dissertação submetida à Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica - (CPG-E) da Universidade Federal de Itajubá, como requisito para
a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

THIAGO CLÉ DE OLIVEIRA

ORIENTAÇÃO: DR. JOSÉ MARTA DE CARVALHO FILHO

Universidade Federal de Itajubá

CO-ORIENTAÇÃO: DR. JOSÉ POLICARPO GONÇALVES DE ABREU

Universidade Federal de Itajubá

Itajubá, outubro de 2004

Itajubá, outubro de 2004

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE UM SISTEMA DE SOFTWARE PARA ESTUDOS DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

THIAGO CLÉ DE OLIVEIRA

Dissertação submetida à Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – CPG-E da Universidade Federal de Itajubá, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

ORIENTAÇÃO: Dr. JOSÉ MARIA de CARVALHO FILHO

Universidade Federal de Itajubá

CO-ORIENTAÇÃO: Dr. JOSÉ POLICARPO GONÇALVES de ABREU

Universidade Federal de Itajubá

Itajubá, outubro de 2004

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –
Bibliotecária Margareth Ribeiro- CRB_6/1700

O48d

Oliveira, Thiago Clé de

Desenvolvimento e aplicação de um sistema de software para estudos de afundamentos de tensão / por Thiago Clé de Oliveira.

– Itajubá,(MG) : UNIFEI, 2004.

135 p. : il.

Orientador : Prof. Dr. José Maria de Carvalho Filho.

Co-orientador : Prof. Dr. José Policarpo Gonçalves de Abreu.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Qualidade de energia elétrica. 2. Desempenho do sistema elétrico. 3. Variações de tensão de curta duração. 4. Afundamentos de tensão. I. Carvalho Filho, José Maria, orient. II. Abreu, José Policarpo Gonçalves de, co-orient. III. Universidade Federal de Itajubá. IV. Título.

CDU 621.3:658.56(043)



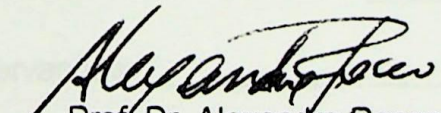
Ministério da Educação
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
Criada pela Lei nº 10.435, de 24 de abril de 2002

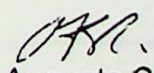
ANEXO I

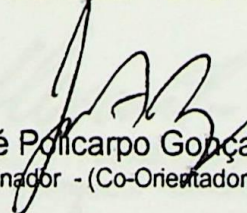
PRONUNCIAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

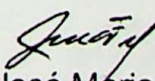
A Banca Examinadora, abaixo assinada, nomeada pela Portaria nº 395 de 05 de outubro de 2004, considerando o resultado do Julgamento da Prova de Defesa Pública da Dissertação de Mestrado intitulada: **“Desenvolvimento e Aplicação de um Sistema de Software para Estudos de Afundamentos de Tensão”** apresenta pronunciamento no sentido de que o Coordenador dos Cursos de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Itajubá solicite ao DRA (Departamento de Registro Acadêmico) a expedição do título de **Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica, na Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência**, satisfeitas as demais exigências regimentais, a **Thiago Clé de Oliveira**.

Itajubá, 08 de novembro de 2004.


Prof. Dr. Alexandre Rocco
1º Examinador - UNISANTA


Prof. Dr. Otávio Augusto Salgado Carpinteiro
2º Examinador - UNIFEI


Prof. Dr. José Policarpo Gonçalves de Abreu
3º Examinador - (Co-Orientador) - UNIFEI


Prof. Dr. José Maria de Carvalho Filho
4º Examinador - (Orientador) - UNIFEI



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
Criada pela Lei nº 10.435, de 24 de abril de 2002

A N E X O II

FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

Título da Dissertação: “Desenvolvimento e Aplicação de um Sistema de Software para Estudos de Afundamentos de Tensão”

Autor: **Thiago Clé de Oliveira**

JULGAMENTO

Examinadores	Conceito	Rubrica
	A = Aprovado R = Reprovado	
1º	A	
2º	A	
3º	A	
4º	A	

Observações:

- 1) O Trabalho será considerado Aprovado se todos os Examinadores atribuírem conceito A.
- 2) O Trabalho será considerado Reprovado se forem atribuídos pelos menos 2 conceitos R.
- 3) O Trabalho será considerado Insuficiente (I) se for atribuído pelo menos um conceito R. Neste caso o candidato dever apresentar novo trabalho. A banca deve definir como avaliar a nova versão da Dissertação.

Resultado Final: Conceito: A , ou seja, aprovado

Observações: _____

Itajubá, 08 de outubro de 2004.

Prof. Dr. Alexandre Rocco
1º Examinador - UNISANTA

Prof. Dr. Otávio Augusto Salgado Carpinteiro
2º Examinador - UNIFEI

Prof. Dr. José Policarpo Gonçalves de Abreu
3º Examinador - (Co-Orientador) - UNIFEI

Prof. Dr. José Maria de Carvalho Filho
4º Examinador - (Orientador) - UNIFEI

DEDICATÓRIA

• Aos professores José Maria da Carvalho Filho e José Roberto Gasparini da Albu, pelo trabalho de orientação, apoio e encorajamento durante o processo.

• Ao professor Uliano Augusto Salgado Carpinheiro e aos colegas Carlos Semizinho Rosa-Nunes e Fábio Augusto de Oliveira, compartilhados na árdua jornada de desenvolvimento do estudo desta dissertação.

• Aos demais colegas e professores do GQEE, pelos momentos de trabalho e descontração vividos juntos.

• Às minhas irmãs Amanda e Karina pela compreensão nos momentos em que me fiz ausente.

• À meu pai Luiz, minha mãe Maria do Carmo pela minha criação e educação.

• Ao meu irmão Guilherme pela amizade e compartilhamento em todos os momentos.

• Aos funcionários do Instituto de Engenharia Elétrica, do Pro-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação e do Departamento de Registro Acadêmico, pela generosa colaboração.

• À Light Serviços de Energia S.A. pela parceria no âmbito de pesquisa e desenvolvimento nos programas de trabalho executados neste trabalho.

*Este trabalho é dedicado a meus pais,
minha avó D. Maria (in memoriam) e, em especial,
minha esposa Amanda e filha Karina.*

• À CAPES e ao GQEE, pelo apoio financeiro.

AGRADECIMENTOS

- Aos professores José Maria de Carvalho Filho e José Policarpo Gonçalves de Abreu, pelo trabalho de orientação, apoio e ensinamentos dispensados.
- Ao professor Otávio Augusto Salgado Carpinteiro e aos colegas Carlos Bernardes Rosa Júnior e Fábio Augusto de Oliveira, companheiros na árdua jornada de desenvolvimento do objeto desta dissertação.
- Aos demais colegas e professores do GQEE, pelos momentos de trabalho e descontração vividos juntos.
- A minha esposa Amanda e filha Karina pela compreensão nos momentos em que me fiz ausente.
- A meu pai Luiz, minha mãe Marinez, pela minha criação e educação.
- Ao meu irmão Guilherme pela amizade e companheirismo em todos os momentos.
- Aos funcionários do Instituto de Engenharia Elétrica, da Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação e do Departamento de Registro Acadêmico, pela generosa colaboração.
- À Light Serviços de Eletricidade S.A., pela parceria no projeto de pesquisa e desenvolvimento que proporcionou o trabalho apresentado nesta dissertação.
- À CAPES e ao GQEE, pelo apoio financeiro.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	V
LISTA DE TABELAS	VII
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	VIII
I - INTRODUÇÃO.....	1
I.1. RELEVÂNCIA DO TEMA	1
I.2. ESTADO DA ARTE	2
I.3. OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO.....	5
I.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	7
II. AFUNDAMENTOS DE TENSÃO	9
II.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	9
II.2. CONCEITOS E DEFINIÇÕES.....	9
II.3. PARÂMETROS PARA ANÁLISE DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO	10
II.4. ORIGEM DOS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO	11
II.5. VARIÁVEIS DE INFLUÊNCIA	12
II.5.1. <i>Tipo de Falta</i>	12
II.5.2. <i>Localização da Falta</i>	12
II.5.3. <i>Resistência de Falta</i>	13
II.5.4. <i>Tensão Pré-Falta</i>	13
II.5.5. <i>Conexão dos Transformadores</i>	14
II.5.6. <i>Sistema de Proteção</i>	15
II.5.7. <i>Sistemas de Religamento</i>	16
II.6. CARACTERIZAÇÃO DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO	17
II.6.1. <i>Método Convencional de Caracterização</i>	17
II.6.2. <i>Método Proposto por Bollen</i>	20
II.6.3. <i>Caracterização Através de um Parâmetro</i>	21
II.6.4. <i>Indicadores para Afundamentos de Tensão</i>	23
II.7. SENSIBILIDADE DE CARGAS E PROCESSOS INDUSTRIAIS	28
II.7.1. <i>Efeitos Diversos</i>	28
II.7.2. <i>Acionamentos em Corrente Alternada e Corrente Contínua</i>	29
II.7.3. <i>Contatores</i>	31
II.7.4. <i>Curvas CBEMA e ITIC</i>	31
II.7.5. <i>Motores de Indução</i>	33
II.8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
III. CÁLCULO DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO	35
III.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	35
III.2. MÉTODO DA DISTÂNCIA CRÍTICA.....	36
III.3. MÉTODO DAS POSIÇÕES DE FALTA.....	38
III.4. SOFTWARES PARA ANÁLISE DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO – ESTADO DA ARTE	44
III.4.1. <i>Considerações Iniciais</i>	44
III.4.2. <i>Programa CREUTENSI da EdF</i>	44
III.4.3. <i>Programa CALIFE da EdF</i>	45
III.4.4. <i>Programa VSAT do EPRI/ELECTROTEK</i>	45
III.4.5. <i>Programa VSAG da Pacific Gas and Electric Company</i>	47
III.4.6. <i>Programa do PTI - Power Technologies Inc.</i>	49

III.4.7. Programa ANAQUALI do Cepel	50
III.4.8. Programa VISAGE do GQEE.....	50
III.4.9. Programa SCEAT da PUC-BH.....	53
III.5. – ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS SOFTWARES APRESENTADOS	55
III.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
IV. PROPOSIÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE SOFTWARE	59
IV.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	59
IV.2. PROPOSTA DO SISTEMA DE SOFTWARE	60
IV.3. METODOLOGIA DE CÁLCULO	65
IV.3.1. Estudos Retrospectivos	65
IV.3.2. Estudos Prospectivos	65
IV.3.3. Cálculo da Magnitude.....	68
IV.3.4. Cálculo da Duração.....	68
IV.3.5. Cálculo da Frequência de Ocorrência	74
IV.3.6. Cálculo dos Indicadores	79
IV.4. ESTRUTURA DO SISTEMA DE SOFTWARE.....	79
IV.4.1. Dados de Entrada	79
IV.4.2. Importação dos Resultados de Curto-Circuito	81
IV.4.3. Dados de Entrada Adicionais	82
IV.5. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS	85
IV.5.1. Formulário Principal.....	86
IV.5.2. Formulário “Grandezas versus Posição”	96
IV.5.3. Formulário “Diagrama Fasorial”	97
IV.5.4. Gráfico da Frequência de Ocorrência Anual de Afundamentos	98
IV.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	99
V. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO	101
V.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	101
V.2. DADOS DO SISTEMA ELÉTRICO	101
V.3. ESTUDOS PROSPECTIVOS DO TIPO CURTO-CIRCUITO DESLIZANTE	103
V.3.1. Caso 1: Caso Base	104
V.3.2. Caso 2: Alteração da Sensibilidade da Carga.....	115
V.3.3. Caso 3: Melhoria no Sistema de Proteção nas Linhas 20, 22, 25 e 26.	118
V.3.4. Caso 4: Instalação de Condicionadores de Energia.....	119
V.3.5. Caso 5: Análise da Influência do Passo do Curto-circuito Deslizante.....	120
V.4. ESTUDOS PROSPECTIVOS BASEADOS NA METODOLOGIA PARA CÁLCULOS ESTOCÁSTICOS.....	123
V.5. ESTUDOS RETROSPECTIVOS	128
V.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	129
VI. CONCLUSÕES	132
VI.1. CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÕES.....	132
VI.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	135
VII. REFERÊNCIAS.....	136
ANEXO A – CARACTERÍSTICAS DO SOFTWARE ANAFAS	142
ANEXO B – ARQUIVO DE DADOS DE CURTO-CIRCUITO.....	148

LISTA DE FIGURAS

Figura II.1 – Caracterização de afundamentos de tensão monofásicos.....	17
Figura II.2 – Caracterização de afundamentos de tensão segundo a UNIPEDE.....	19
Figura II.3 – Caracterização de um afundamento de tensão segundo o EPRI/ELECTROTEK.....	20
Figura II.4 – Caracterização segundo Bollen [BOLLEN, 2000b].....	21
Figura II.5 – Desempenho de um local em função da sensibilidade das cargas.....	28
Figura II.6 – Sensibilidade dos AVVs [CARVALHO FILHO, 1997].....	30
Figura II.7 – Curva de sensibilidade de contadores [POHJANHEIMO, 2002].....	31
Figura II.8 – Curva de tolerância CBEMA [ITIC, 2000].....	32
Figura II.9 – Curva de tolerância ITIC.....	32
Figura III.1 – Diagrama unifilar de um sistema de distribuição típico.....	37
Figura III.2 – Diagrama unifilar- método do curto- deslizante.....	39
Figura III.3 – Tensão aproximada em função da distância da falta.....	41
Figura III.4 – Análise da intensidade do afundamento para uma falta específica [QADER, 1999].....	42
Figura III.5 – Áreas de vulnerabilidade para duas determinadas barras [QADER, 1999].....	43
Figura III.6 – CALIFE: Release 3.....	45
Figura IV.1 – Fluxograma básico do sistema de <i>software</i>	64
Figura IV.2 – Função densidade de probabilidades das posições de falta.....	67
Figura IV.3 – Curvas de atuação da família normal inversa para relés de sobrecorrente.....	72
Figura IV.4 – Funções distribuição normal e “ <i>t student</i> ”.....	75
Figura IV.5 – Formulário para cálculo de curto-circuito.....	80
Figura IV.6 – Formulário dos parâmetros de proteção.....	82
Figura IV.7 – Formulário dos dados de barras.....	83
Figura IV.8 – Formulário de dados de linhas.....	84
Figura IV.9 – Formulário de dados de cargas.....	85
Figura IV.10 – Formulário principal dos estudos retrospectivos.....	87
Figura IV.11 – Formulário principal dos estudos estocásticos.....	87
Figura IV.12 – Formulário principal dos estudos para o curto-circuito deslizante.....	88
Figura IV.13 – Relatórios disponíveis na opção “Magnitude”.....	90
Figura IV.14 – Histogramas para magnitude.....	90
Figura IV.15 – Frequência acumulada para magnitude.....	91
Figura IV.16 – Histogramas para duração.....	91
Figura IV.17 – Frequência acumulada para duração.....	92
Figura IV.18 – Gráfico de contribuição das linhas.....	92
Figura IV.19 – Tabela de contribuição das linhas.....	93
Figura IV.20 – Relatório de área de vulnerabilidade.....	93
Figura IV.21 – Histograma tridimensional.....	94
Figura IV.22 – Curvas iso-sags.....	94
Figura IV.23 – Relatório de indicadores de desempenho.....	95
Figura IV.24 – Formulário para os gráficos “Estatísticos”.....	96
Figura IV.25 – Distribuição percentual dos tipos de falta.....	96
Figura IV.26 – Formulário para relatórios das grandezas versus posição de falta.....	97
Figura IV.27 – Gráfico de magnitude versus posição de falta.....	97
Figura IV.28 – Formulário para diagrama fasorial.....	98
Figura IV.29 – Gráfico de apresentação da frequência de ocorrência anual dos sorteios.....	99
Figura V.1 – Diagrama unifilar do sistema elétrico.....	102

Figura V.2 – Tensões fase-neutro na barra 119 devido a curtos-circuitos fase-terra ao longo da linha 62 – caso base.	105
Figura V.3 – Diagrama fasorial – caso base.	105
Figura V.4 – Histograma das tensões fase-fase na barra 41 – caso base.	106
Figura V.5 – Histograma das contribuições por tipo de falta – caso base.	106
Figura V.6 – Histograma por classe de tensão das linhas – caso base.	106
Figura V.7 – Frequência acumulada das tensões na barra 41 – caso base.	107
Figura V.8 – Histograma das durações dos eventos – caso base.	107
Figura V.9 – Histograma tridimensional para a barra 95 – caso base.	108
Figura V.10 – Gráfico de contribuição das linhas para desligamentos na barra 113 – caso base.	108
Figura V.11 – Curvas iso-sags para barra 119 – caso base.	113
Figura V.12 – Distribuição percentual dos tipos de falta nos desligamentos da barra 41 – caso base.	114
Figura V.13 – Distribuição percentual das classes de tensão das linhas nos desligamentos da barra 41 – caso base.	114
Figura V.14 – Distribuição percentual dos tipos de afundamentos nos desligamentos da barra 41 – caso base.	115
Figura V.15 – Curvas iso-sags para barra 119 – sensibilidade 0,70 p.u. x 120 ms.	116
Figura V.16 – Curvas iso-sags para barra 119 – sensibilidade 0,75 p.u. x 120 ms.	117
Figura V.17 – Curvas iso-sags para barra 119 – sensibilidade 0,85 p.u. x 120 ms.	117
Figura V.18 – Frequência acumulada das tensões na barra 41 – caso 5.	122
Figura V.19 – Evolução da frequência de ocorrência de afundamentos na barra 119.	124
Figura V.20 – Evolução da frequência de ocorrência de afundamentos na barra 41.	124
Figura V.21 – Evolução da frequência de ocorrência de afundamentos na barra 95.	125
Figura V.22 – Evolução da frequência de ocorrência de afundamentos na barra 113.	125
Figura V.23 – Evolução da frequência de AMT na barra 119 para três séries de sorteios.	126
Figura V.24 – Linha de tendência da frequência de ocorrência média de AMT na barra 119.	126

LISTA DE TABELAS

Tabela II.1 – Número de afundamentos de tensão anuais.	28
Tabela III.1 – Análise comparativa dos <i>softwares</i> analisados.	57
Tabela IV.1 – Tempos típicos para proteção de distância.	71
Tabela IV.2 – Parâmetros para equação da proteção de sobrecorrente.	73
Tabela IV.3 – Coeficientes para a distribuição de t student.	78
Tabela V.1 – Tempos de atuação da proteção.	101
Tabela V.2 – Taxas de falta nas linhas.	103
Tabela V.3 – Características da carga.	103
Tabela V.4 – Contribuição das linhas para desligamentos das cargas – caso base.	110
Tabela V.5 – Contribuição das linhas para a área de vulnerabilidade para faltas trifásicas – caso base.	111
Tabela V.6 – Área de vulnerabilidade total por tipo de falta – caso base.	112
Tabela V.7 – Indicadores de desempenho – caso base.	112
Tabela V.8 – Número esperado de desligamentos para diferentes sensibilidades (desligamentos / ano) – caso 2.	116
Tabela V.9 – Número esperado de desligamento das cargas – caso 3.	118
Tabela V.10 – Área de vulnerabilidade total por tipo de falta – caso 3.	118
Tabela V.11 – Indicadores de desempenho – caso 3.	119
Tabela V.12 – Indicadores de desempenho – caso 4.	120
Tabela V.13 – Espaço de memória utilizado pelo banco de dados em função do passo do curto-circuito deslizante.	121
Tabela V.14 – Número esperado de desligamento das cargas – caso 5.	122
Tabela V.15 – Número esperado de AMT segundo dois tipos de estudos prospectivos.	127
Tabela V.16 – Registros de ocorrências para um ano de operação do sistema.	128
Tabela V.17 – Número esperado de desligamento das cargas – estudos retrospectivos.	129
Tabela V.18 – Indicadores de desempenho – estudos retrospectivos.	129

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Ω	Ohms
AMT	Afundamento Momentâneo de Tensão
AT	Alta Tensão
AVV	Acionamento de Velocidade Variável
BT	Baixa Tensão
CA	Corrente Alternada
CAD	Computer Aided Drawing
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CBEMA	Computer and Business Equipment Manufactures Association
CC	Corrente Contínua
CLP	Controlador Lógico Programável
DVR	Dynamic Voltage Restorer
EdF	Electricité de France
ELECTROTEK	Electrotek Concepts, Inc.
EPRI	Electric Power Research Institute
GQEE	Grupo de Estudos em Qualidade de Energia Elétrica
GRES	Grupo de Redes de Computadores e Engenharia de Software
GUI	Graphical User Interface
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ITIC	Information Technology Industry Curve
LD	Linha de Distribuição
LT	Linha de Transmissão
m	metros
ms	milisegundos
MT	Média Tensão
NRS	National Rationalized Specification
p.u.	por unidade
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PECO	Philadelphia Electric Company
PG&E	Pacific Gas and Electric Company
PTI	Power Technologies, Inc.
PUC	Pontifícia Universidade Católica
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
RMS	Root Mean Square (valor eficaz)
s	segundos
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SE	Subestação
UNIPEDE	Union of International Producers and Distributors of Electrical Energy
V	Volts
VTCD	Variação de Tensão de Curta Duração
W	Watts
Wh	Watt-hora

RESUMO

Esta dissertação apresenta o desenvolvimento e aplicação de um sistema de *software* para a execução de estudos estratégicos envolvendo afundamentos de tensão.

A proposta deste novo sistema de *software* visa suprir algumas das principais lacunas identificadas nos *softwares* existentes, vindo ao encontro das necessidades atuais do setor elétrico, tanto em nível das concessionárias quanto dos consumidores, principalmente os industriais. Dentre as lacunas contempladas neste desenvolvimento, pode-se citar:

- Integração das metodologias de análise prospectiva e retrospectiva;
- Possibilidade de realização de estudos prospectivos através do método do curto-circuito deslizante e/ou da metodologia estocástica;
- Implementação das proteções de sobrecorrente a tempo definido e tempo inverso, distância e teleproteção;
- Caracterização dos afundamentos de tensão segundo metodologias alternativas, tais como, perda de energia e perda de tensão.

Este sistema de *software* permite que, tanto concessionárias quanto consumidores, avaliem o impacto dos afundamentos de tensão no sistema elétrico, representando um passo importante no estabelecimento de medidas mitigadoras economicamente viáveis.

Finalmente, estudos de caso são realizados com o objetivo de mostrar a aplicabilidade, avaliar e validar o sistema de *software* desenvolvido.

ABSTRACT

This thesis describes the development and application of a software for strategic studies about voltage sags.

This new proposal aims at filling in some gaps found in current softwares, allowing the analysis of several scenarios taking into account both the supply system and the industrial process, as well. It also can guide investments in increasing the efficiency of the electric system. Some important needs are:

- Integration of retrospective and prospective methodologies;
- Possibility of performing prospective studies through the fault position or stochastic method;
- Improvement of the definite and inverse time overcurrent and distance protective functions, as well as teleprotection;
- Voltage sags characterization covering the alternatives methodologies as loss of energy and loss of voltage.

This new software allows both the utility and the end-user to, objectively and accurately, assess the impact of voltage sag on electric systems. It is the first important step in determining the correct and economically feasible mitigating measures.

Finally, case studies based upon an actual utility data are performed to demonstrate that the software developed is functional indeed.

I - INTRODUÇÃO

I.1. RELEVÂNCIA DO TEMA

A Qualidade da Energia Elétrica - QEE tem-se tornado uma preocupação crescente e comum às empresas de energia elétrica e aos consumidores, de modo geral. O progressivo interesse pela QEE deve-se, principalmente, à evolução tecnológica dos equipamentos eletro-eletrônicos, hoje amplamente utilizados nos diversos segmentos de atividade, seja ele industrial, comercial ou residencial. Com a vasta aplicação da eletrônica de potência, da microeletrônica e dos microprocessadores em uma infinidade de equipamentos – desde relógios digitais domésticos a linhas automatizadas de processos – tem aumentado, consideravelmente, a sensibilidade dos equipamentos em relação a QEE.

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 resultantes de curtos-circuitos em extensas áreas, mesmo que localizadas em pontos remotos do sistema elétrico.

Tais distúrbios, conhecidos na literatura internacional como “*voltage sags*” ou “*voltage dips*”, e neste trabalho denominados “afundamentos de tensão” representam, atualmente, o principal desafio a ser 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 equipamentos modernos, têm resultado em um número expressivo de interrupções de processos industriais.

Dentro deste contexto, citam-se algumas razões fundamentais que colocam em posição de destaque, os afundamentos de tensão, dentro do cenário da QEE:

- Devido à vasta extensão e à vulnerabilidade das linhas aéreas de transmissão, subtransmissão e distribuição, estes distúrbios são inevitáveis e inerentes à operação do sistema elétrico;

- Os consumidores estão tendo prejuízos substanciais devido a interrupções de processos, quantificados pelas perdas de produção, perdas de insumos e custos associados à mão-de-obra e a reparos de equipamentos danificados;
- As concessionárias de energia elétrica estão tendo perda de imagem empresarial e, inevitavelmente, passarão a ter maiores custos com prováveis ressarcimentos de prejuízos aos consumidores, decorrentes de falta de qualidade da energia;
- A qualidade da energia tem se transformado em um fator determinante para a competitividade entre as empresas concessionárias de energia, sendo que as mesmas deverão, em um horizonte muito próximo, oferecer contratos diferenciados, de acordo com os requisitos de qualidade da energia exigidos pelos processos dos consumidores;
- Além deste fato, a qualidade da energia vem se tornando um fator diferencial para promover desenvolvimentos regionais, sendo analisada em conjunto com incentivos fiscais, meios de transporte, proximidade entre matéria prima e centros consumidores.

I.2. ESTADO DA ARTE

Atualmente se encontram disponíveis na literatura oito ferramentas computacionais que, através de diversas metodologias, estimam os parâmetros dos afundamentos de tensão. São elas: CREUTENSI, CALIFE, VSAT, VSAG, Programa da PTI, ANAQUALI, VISAGE e SCEAT.

O programa CREUTENSI [EDF, 1993], desenvolvido pela “*Electricité de France*”, tem o objetivo de fornecer uma boa estimação das características dos afundamentos de tensão e das interrupções para sistemas de média tensão. Para tal, utiliza registros de medição e chaveamentos de disjuntores para determinar as condições dos defeitos a serem simulados, e assim calcula a amplitude dos afundamentos para os defeitos selecionados. De posse dos tempos típicos de religamentos dos disjuntores, o programa estima o tempo de extinção da falta e, conseqüentemente, obtém uma estimativa da duração do distúrbio.

O programa CALIFE [DOUQUET, 1992], também desenvolvido pela “*Electricité de France*”, é descrito como uma ferramenta para planejamento de sistemas de subtransmissão que permite a análise de afundamentos de tensão, interrupções de curta e longa duração. Com este fim, considera ocorrências de curtos-circuitos em linhas de transmissão, barramentos e transformadores e permite analisar certas falhas de operação de equipamentos como falha na abertura de disjuntores. Também é possível realizar análises de afundamentos de tensão, interrupções de curta e longa duração.

O programa VSAT [ELECTROTEK, 1997], desenvolvido em parceria entre o EPRI – “Electric Power Research Institute” - e a “Electrotek Concepts Inc.”, possui, como principal atrativo, a previsão de desempenho de uma determinada barra do sistema sob o enfoque dos afundamentos de tensão, com base em resultados de cálculos de curto-circuito e dados de sensibilidade da carga.

O programa VSAG [LIU, 1997], desenvolvido e implementado em um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento da “Pacific Gas and Electric Company”, analisa afundamentos de tensão associados a curtos-circuitos ocorridos em alimentadores de distribuição, integrando dados históricos de interrupções com algoritmos de cálculo de avançada capacidade gráfica.

O programa da “Power Technologies Inc.” [STECIUK, 1996], contempla a integração das ferramentas de cálculo de fluxo de potência e curto-circuito deslizante. De posse das tensões pré-falta resultantes do fluxo de potência, o cálculo da intensidade e da frequência de ocorrência dos afundamentos de tensão fornece soluções de comprovada precisão.

O programa ANAQUALI [ROMERO, 2003], desenvolvido pelo Cepel, tem como base a simulação de faltas ao longo das linhas e barramentos existentes dentro de uma área de influência pré-definida, associada à monitoração das tensões nas barras de interesse, onde se deseja obter os índices de qualidade.

O programa computacional VISAGE [NORONHA, 1999], desenvolvido pelo GQEE - Grupo de Estudos em Qualidade de Energia Elétrica da Universidade Federal de Itajubá, destina-se à análise de afundamentos de tensão devido à ocorrência de faltas em sistemas elétricos, calculando índices de desempenho para barras individuais e para o sistema global, entre outras funcionalidades.

Finalmente, o programa SCEAT [FONSECA, 1999], desenvolvido pela PUC-MG, Pontifícia Universidade Católica - Belo Horizonte, integra um programa de curto-circuito a um banco de dados para efetuar os cálculos estatísticos necessários à estimativa dos parâmetros dos afundamentos de tensão: intensidade, duração e frequência de ocorrência.

Com base neste levantamento bibliográfico acerca do estado da arte no desenvolvimento de ferramentas para análise de afundamentos de tensão, algumas necessidades de desenvolvimentos adicionais devem ser ressaltadas, tais como:

- Integração, em uma única ferramenta, das análises retrospectivas baseadas em históricos operacionais e das análises prospectivas, onde se estima o comportamento futuro do sistema;
- Possibilidade de análises prospectivas executadas de maneira analítica, através do curto-circuito deslizante ou através de simulações, utilizando o Método de Monte Carlo, onde a aleatoriedade inerente a curtos-circuitos é retratada;
- Definição das variáveis a serem tratadas como variáveis aleatórias (localização da falta, impedância de falta, tipo de falta, taxa de falta) permitindo, também, a escolha do tipo de distribuição a ser adotado para cada uma das variáveis aleatórias escolhidas;
- Simulação de curtos-circuitos, tanto em linhas de transmissão e distribuição quanto em barramentos;
- Análise das diversas filosofias adotadas nos sistemas de proteção a fim de melhor caracterizar o tempo de extinção das faltas. Deve-se atentar para as distintas práticas utilizadas, tanto em sistemas de transmissão quanto em sistemas de distribuição;
- Integração das ferramentas de cálculo de fluxo de potência, curto-circuito e análise de afundamentos de tensão, em um único pacote, permitindo a análise da influência dos diversos regimes de carga nas características dos afundamentos de tensão;
- Consideração das impedâncias de falta nas análises de curto-circuito;

I.3. OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO

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

A monitoração pode fornecer resultados representativos somente quando a frequência de ocorrência do fenômeno monitorado é alta. Para distúrbios como afundamentos de tensão, onde se pode encontrar frequências de ocorrências da ordem de um evento por mês, o período de monitoração deve ser da ordem de 30 anos, admitindo-se um grau de confiança de 90% [BOLLEN, 1998a]. Portanto, para contornar tal dificuldade, a melhor alternativa é a utilização de métodos de predição.

As metodologias de predição têm, como base, a utilização de programas computacionais para cálculo de tensões e correntes pós falta, a utilização dos tempos de sensibilização e atuação de relés de proteção e, finalmente, a utilização de dados estatísticos de faltas em linhas de transmissão e de distribuição.

As informações obtidas, tanto a partir da monitoração como a partir de simulação, podem ser confrontadas com a sensibilidade da carga para estimar o número de paradas anuais de produção, quantificar as perdas associadas e avaliar as medidas de mitigação.

Neste contexto, a proposta de um sistema de *software* para execução de estudos envolvendo afundamentos de tensão, vem ao encontro das necessidades atuais do setor elétrico e também de seus consumidores, sobretudo os industriais. O desenvolvimento de um sistema de *software* que contemple técnicas efetivas para estudo e análise do sistema elétrico da concessionária e de seus clientes, frente a afundamentos de tensão, representa um grande passo na busca da compatibilidade entre a qualidade de energia fornecida pelas concessionárias e as necessidades dos modernos processos industriais.

O *software* ora proposto, permite analisar diversos cenários do conjunto suprimento-processo industrial, orientar a priorização de investimentos para aumentar a eficiência do setor elétrico, estabelecer estudos de viabilidade técnico-econômica de alternativas para solução ou minimização de problemas

identificados.

Conforme brevemente apresentado na seção 1.2, mesmo já tendo sido desenvolvidas diversas ferramentas para análise de afundamentos de tensão, ainda persistem algumas necessidades de desenvolvimentos complementares, de forma a retratar com maior fidelidade as características deste fenômeno. Assim sendo, a proposição de um novo sistema de *software* para análise de afundamentos de tensão, objeto desta dissertação, tem o objetivo de preencher algumas das lacunas supracitadas. Os principais aspectos deste novo *software* são:

- Cálculos de curto-circuito como base para a estimativa da intensidade dos afundamentos de tensão, conforme demais ferramentas;
- Integração das ferramentas de análise retrospectiva e prospectiva em um único sistema, tomando este um sistema de *software* que proporciona, em um único pacote computacional, a possibilidade de se executar as mais diversas análises envolvendo afundamentos de tensão;
- Utilização dos tempos de atuação do sistema de proteção para a estimativa da duração dos afundamentos, conforme procedimento de alguns *softwares* consultados;
- Ampliação do leque de filosofias de proteção contempladas nos estudos de afundamentos de tensão, incorporando rotinas de cálculo para as proteções de sobrecorrente a tempo dependente e distância, além do tipo tempo definido já implementado em alguns *softwares* consultados;
- Análise estatística da localização dos curtos-circuitos, uma importante variável aleatória a ser considerada nas análises e ainda não completamente difundida entre os demais *softwares* consultados;
- Cálculo de indicadores de desempenho para barras individuais e para o sistema global a partir da convolução entre os dados dos afundamentos de tensão e os dados de sensibilidade das cargas analisadas, conforme já apresentado em um dos *softwares* consultados;
- Caracterização dos afundamentos de tensão de acordo com metodologias alternativas à maneira clássica de caracterização normalmente

contemplada nos documentos consultados.

O sistema de software foi desenvolvido através de uma parceria entre o Grupo de Estudos da Qualidade de Energia Elétrica – GQEE, Grupo de Redes de Computadores e Engenharia de Software – GRES, e a Light Serviços de Eletricidade S.A. em um programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D).

I.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O primeiro capítulo apresenta a introdução ao tema da dissertação, abordando a sua relevância, o estado da arte acerca dos principais *softwares* disponíveis no mercado, os objetivos, as contribuições e a estrutura da dissertação.

O segundo capítulo trata dos conceitos e definições relacionados a afundamentos de tensão, fornecendo a base necessária para o entendimento do restante do documento. Inicialmente são descritos os parâmetros utilizados nas análises deste distúrbio, suas principais causas e variáveis de influência. Em seguida são discutidas as principais formas de caracterização dos afundamentos de tensão, englobando as metodologias clássicas e algumas propostas alternativas de caracterização. Finalmente, este capítulo aborda algumas características da sensibilidade dos principais equipamentos utilizados em processos industriais, destacando os contadores, acionamentos de velocidade variável (AVVs) e motores de indução.

O terceiro capítulo enfoca as metodologias utilizadas nos cálculos de afundamentos de tensão destacando os métodos da distância crítica e posições de falta. Na seqüência, são apresentados alguns aspectos relativos às principais ferramentas computacionais disponíveis para análise de afundamentos de tensão, destacando as funcionalidades mais importantes em cada uma delas.

Vale ressaltar que estes três capítulos iniciais representam uma contribuição didática ao tema, pois descrevem, de maneira sucinta, os principais tópicos relacionados a afundamentos de tensão.

No quarto capítulo encontra-se a principal contribuição desta dissertação, a qual consiste na proposta de implementação de um sistema de *software* para execução de estudos estratégicos envolvendo afundamentos de tensão. Em

seguida é apresentada a metodologia implementada, descrevendo-se todos os cálculos utilizados e finalmente a estrutura da base de dados e os principais relatórios de apresentação de resultados.

Visando demonstrar a potencialidade do sistema de *software* desenvolvido, o quinto capítulo apresenta alguns exemplos de aplicação utilizando dados baseados em um sistema elétrico real. São demonstrados alguns exemplos de estudos, passíveis de serem aplicados, tanto em sistemas das concessionárias quanto em sistemas de consumidores industriais de qualquer porte. Finalizando, é demonstrada a execução de estudos de algumas práticas de mitigação dos efeitos dos afundamentos e a influência de cada uma delas no comportamento da carga dos consumidores de interesse.

No sexto capítulo encontram-se as principais conclusões extraídas no decorrer do desenvolvimento deste trabalho. Também são apresentadas algumas sugestões para execução de trabalhos futuros, dando continuidade às implementações de melhorias no sistema de *software*.

No sétimo capítulo estão as referências bibliográficas utilizadas na elaboração desta dissertação.

No Anexo A são apresentadas as principais características do *software* ANAFAS, utilizado como ponto de partida para a geração de dados para o sistema de *software* desenvolvido. No Anexo B é apresentado o arquivo de dados utilizado para o processamento dos exemplos de aplicação.

II. AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

II.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo são abordados os principais conceitos e definições relacionados ao tema - afundamentos de tensão - visando oferecer ao leitor os requisitos fundamentais para a compreensão dos capítulos subseqüentes. Dentre os tópicos apresentados, destacam-se:

- Conceitos e definições;
- Parâmetros para análise de afundamentos de tensão;
- Origem dos afundamentos de tensão;
- Variáveis de influência;
- Caracterização de afundamentos de tensão;
- Sensibilidade de cargas e processos industriais.

II.2. CONCEITOS E DEFINIÇÕES

Atualmente existem duas definições aplicáveis a afundamentos de tensão. A primeira, estabelecida pelo "*Institute of Electric and Electronics Engineers*" – IEEE (EUA); e a segunda, pela "*International Electrotechnical Commission*" – IEC (Europa).

O IEEE, através da Norma IEEE 1159 - 1995 [IEEE, 1995] que trata da monitoração dos fenômenos de qualidade de energia elétrica, define afundamento de tensão como sendo a redução do valor RMS da tensão para um valor entre 0,1 e 0,9 p.u., durante um período de tempo compreendido entre 1/2 ciclo e 60 segundos. A intensidade do afundamento, segundo o IEEE, é definida pela menor tensão remanescente durante a ocorrência do distúrbio. Um evento cuja intensidade é inferior a 0,10 p.u. é considerado pelo IEEE como sendo uma interrupção. Adicionalmente, o IEEE classifica os afundamentos de tensão, segundo a sua duração, em três categorias:

- Instantâneos: entre 0,5 ciclo e 30 ciclos;
- Momentâneos: entre 30 ciclos e 3 segundos;

- Temporários: entre 3 segundos e 1 minuto.

A IEC [IEC, 1996], por outro lado, avalia a intensidade do afundamento de tensão pela ótica da queda do valor RMS da tensão. A recomendação desta norma classifica, como afundamento, um evento onde ocorre uma queda do valor RMS da tensão entre 0,10 e 0,99 p.u., durante um período de tempo compreendido entre 1/2 ciclo e alguns segundos. Distúrbios com queda de tensão acima de 0,99 p.u., o que equivale a tensões remanescentes abaixo de 0,01 p.u., são considerados pela IEC como interrupções.

Outras referências [MCGRANAGHAN, 1993], [CONRAD, 1997] caracterizam o afundamento como sendo a redução do valor eficaz da tensão de suprimento para o limite abaixo de 0,9 p.u., contemplando inclusive o intervalo de 0,0 a 0,1 p.u., considerado pelo IEEE como sendo uma interrupção. Este último entendimento é o que será adotado para os propósitos desta dissertação, ou seja, uma interrupção momentânea será considerada como sendo um afundamento de tensão de 0% (IEEE).

Nos próximos itens serão apresentados maiores detalhes acerca de outras propostas para caracterização dos afundamentos.

II.3. PARÂMETROS PARA ANÁLISE DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

Os principais parâmetros que caracterizam um afundamento de tensão monofásico são a intensidade e a duração, os quais, somados à frequência de ocorrência, fornecem informações satisfatórias sobre o fenômeno [CARVALHO FILHO, 2000].

No entanto, quando se trata de afundamentos de tensão trifásicos, outros parâmetros também devem ser incorporados, sendo eles a assimetria e o desequilíbrio. Adicionalmente, o comportamento dinâmico associado à evolução da forma de onda, também pode ser empregado para caracterizar tanto os afundamentos de tensão monofásicos como os trifásicos.

Outra consideração importante e necessária no tratamento de eventos trifásicos é a necessidade de relacionar apenas um conjunto de parâmetros (intensidade, duração, etc.) a cada evento. Este processo é denominado agregação de fases e será discutido mais adiante.

Segundo [CONRAD, 1997], a intensidade e duração dos afundamentos não caracterizam completamente um evento, porém elas são, certamente, as características indispensáveis na determinação do comportamento dos equipamentos.

II.4. ORIGEM DOS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

Os afundamentos de tensão no sistema elétrico são provenientes da partida de motores de grande porte [BOLLEN, 1994], energização de transformadores e ocorrência de curtos-circuitos [AYELLO, 1999], [CONRAD, 1991], [ORTMEYER, 1996].

As faltas no sistema elétrico, sem sombra de dúvida, são a principal causa dos afundamentos de tensão, sobretudo no sistema da concessionária, devido à existência de milhares de quilômetros de linhas aéreas de transmissão e de distribuição, sujeitas a toda a sorte de fenômenos naturais. Curtos-circuitos também ocorrem em subestações terminais de linhas e em sistemas industriais, porém, com menor frequência. Em sistemas industriais, por exemplo, a distribuição primária e secundária é tipicamente realizada através de cabos isolados que possuem reduzida taxa de falta se comparados às linhas aéreas.

As faltas em linhas aéreas ocorrem, principalmente, devido à incidência de descargas atmosféricas. Nos sistemas de distribuição o problema é mais crítico porque são, em geral, desprovidos de cabos guarda. Portanto, pode-se deduzir que a ocorrência de afundamentos de tensão está fortemente correlacionada com o nível cerâmico da região onde as linhas aéreas se encontram instaladas. No entanto, é bom lembrar que nem todas as descargas atmosféricas resultam em curtos-circuitos e, conseqüentemente, em afundamentos de tensão. Os sistemas são projetados para suportar cerca de 95% das sobretensões de origem atmosférica e as linhas aéreas, sobretudo as de transmissão, são providas de cabos-guarda. Outras causas de ocorrência de curtos-circuitos são as queimadas em plantações, vendavais, contatos por animais e aves, contaminação de isoladores, falhas humanas, etc.

Quando da ocorrência do curto-circuito, o afundamento de tensão transcorre durante o tempo de permanência da falta, ou seja, desde o instante inicial do

defeito até sua completa eliminação.

II.5. VARIÁVEIS DE INFLUÊNCIA

A análise dos afundamentos de tensão pode ser considerada complexa, pois envolve uma diversidade de fatores, em geral aleatórios, que afetam as suas características [CARVALHO FILHO, 2002a], [CARVALHO FILHO, 2002b], [CARVALHO FILHO, 2000], dentre eles:

- 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.

II.5.1. Tipo de Falta

As faltas no sistema elétrico podem ser: trifásicas (FFF), trifásicas à terra (FFFT), bifásicas (FF), bifásicas à terra (FFT), e fase-terra (FT).

As faltas trifásicas e trifásicas à terra são simétricas e geram, portanto, afundamentos de tensão também simétricos. Elas produzem afundamentos de tensão mais severos, contudo, com menor frequência de ocorrência quando comparadas com as demais faltas.

As faltas bifásicas, bifásicas à terra e, sobretudo, as fase-terra, apresentam as maiores frequências de ocorrência, gerando afundamentos de tensão menos severos, porém, desequilibrados e assimétricos.

II.5.2. Localização da Falta

A localização da falta no sistema elétrico influencia, significativamente, o impacto dos afundamentos de tensão sobre os consumidores. As faltas no sistema

de transmissão e subtransmissão afetam, certamente, um número maior de consumidores do que as faltas no sistema de distribuição. Este fato deve-se, principalmente, às características dos sistemas de transmissão e subtransmissão que são normalmente malhados e abrangem uma grande extensão geográfica. Os sistemas de distribuição são mais concentrados geograficamente e possuem, geralmente, configuração radial, sendo que curtos-circuitos nos ramais de uma subestação de distribuição causam impacto apenas nos consumidores alimentados pelos ramais adjacentes e, dificilmente, provocarão afundamentos de tensão significativos no sistema de transmissão, principalmente naqueles dotados de alta capacidade de curto-circuito.

II.5.3. Resistência de Falta

Raramente os curtos-circuitos no sistema possuem resistência de falta nula. Desprezar a resistência de falta significa obter valores de afundamentos de tensão mais severos, sobretudo em sistema de distribuição onde este efeito é mais pronunciado [BLACKBURN, 1987]. Normalmente estes defeitos ocorrem através da resistência de falta, que é constituída pela associação dos seguintes elementos:

- Resistência do arco elétrico entre o condutor e a terra, para defeitos fase-terra ou entre dois ou mais condutores, para defeitos envolvendo fases;
- Resistência de contato devido à oxidação no local da falta;
- Resistência do pé-de-torre, para defeitos englobando a terra.

Existem poucas referências abordando o assunto. Contudo, valores de resistência de falta da ordem de 1 a 5 Ω são mencionados em [CARVALHO FILHO, 2002a], [ORTMEYER, 1996], [BLACKBURN, 1987], observando em casos extremos valores de até 70 Ω .

II.5.4. Tensão Pré-Falta

Geralmente, nos estudos de curto-circuito em sistemas elétricos adota-se tensão pré-falta igual a 1,0 p.u.. No entanto, em função da curva de carga do sistema, esta premissa pode não ser verdadeira, incorrendo-se em erros de cálculo.

Em [MILANOVIC, 2000] são apresentados resultados de simulações que mostram diferenças de até 26% no número esperado de afundamentos para uma carga, quando se utiliza tensão pré-falta diferente de 1p.u. Segundo os autores, a consideração das tensões pré-falta é particularmente importante na análise de sistemas de distribuição, onde os valores das tensões podem ser muito diferentes de 1 p.u..

II.5.5. Conexão dos Transformadores

Na análise e no cálculo dos afundamentos de tensão, o tipo de conexão dos transformadores existentes entre o ponto de falta e o barramento do consumidor irá influenciar, sobremaneira, as características do distúrbio percebido pela carga. Basicamente, os transformadores podem ser agrupados em três categorias [BOLLEN, 1997]

- Primeira: aqueles cujas tensões nas bobinas em um dos enrolamentos é função da diferença fasorial (tensão composta) entre duas tensões aplicadas nas bobinas do outro enrolamento. Esta classe de transformadores, os de conexão $Y-\Delta$, $\Delta-Y$, $Y_{\text{aterrado}}-\Delta$ e $\Delta-Y_{\text{aterrado}}$, além de filtrar a componente de seqüência zero da tensão de freqüência fundamental, introduz defasamento angular nas componentes de seqüência positiva e negativa;
- Segunda: são os transformadores que somente filtram as componentes de seqüência zero da tensão de freqüência fundamental e que, geralmente, do ponto de vista construtivo, são fabricados de modo a não introduzir defasamento angular nas demais seqüências, ou seja, são aqueles com conexões $Y-Y$, $\Delta-\Delta$, $Y_{\text{aterrado}}-Y$ e $Y-Y_{\text{aterrado}}$;
- Terceira: são aqueles que não filtram as componentes de seqüência zero e, geralmente, devido às mesmas razões citadas anteriormente, não introduzem defasamento angular nas demais seqüências. Pertencem a esta categoria os transformadores com as conexões $Y_{\text{aterrado}}-Y_{\text{aterrado}}$, $Y_{\text{aterrado}}-\Delta-Y_{\text{aterrado}}$.

Em [CARVALHO FILHO, 2000], [OLIVEIRA, 2003] os autores enfatizam que os valores dos afundamentos de tensão, vistos pela carga em decorrência de uma falta no sistema elétrico, dependem do efeito combinado da forma de conexão

tanto do transformador como da carga.

II.5.6. Sistema de Proteção

A duração dos afundamentos de tensão é dependente do desempenho do sistema de proteção, caracterizado pelo tempo de sensibilização e de atuação dos relés, somado ao tempo de abertura e extinção de arco dos disjuntores.

O tempo de atuação dos relés é função de suas características de resposta (distância, tempo dependente e tempo definido), bem como da filosofia e dos ajustes implantados para se obter a seletividade desejada. O tempo de abertura e de extinção da corrente de curto-circuito dos disjuntores é função das características construtivas destes equipamentos.

Nos sistemas de transmissão (230, 345, 440, 500 kV, etc), as linhas são tipicamente protegidas por meio de relés de distância, associados ou não às lógicas de teleproteção [AYELLO, 1999]. Quando a teleproteção não é aplicada, utilizam-se proteções de distância com duas ou três zonas. A primeira zona é, normalmente, ajustada para atuar instantaneamente em defeitos localizados em até 85% do comprimento da LT. Já a segunda zona é ajustada com temporização intencional, para proteger o trecho restante da primeira linha e também para oferecer proteção de retaguarda para a linha de transmissão subsequente. Como desvantagens, ressalta-se que esta prática de proteção introduz um retardo no tempo de atuação da proteção para defeitos próximos às extremidades da linha, não cobertos pela proteção de primeira zona. Outra particularidade é que, para estes pontos de defeito, os terminais da linha serão abertos em instantes diferentes.

Nos sistemas de subtransmissão (69, 88 e 138 kV), tradicionalmente, são utilizados os seguintes esquemas:

- Sobrecorrente de fase e de neutro para linhas radiais que alimentam SEs de distribuição, SEs industriais e também no lado da fonte em circuitos paralelos;
- Direcional de fase e de neutro no lado da carga quando os circuitos são paralelos e também em circuitos operando com configuração em anel;
- Distância de fase e de neutro em circuitos paralelos e em anel de linhas

de 138 kV. Em linhas de 69 e 88 kV estes esquemas são raramente utilizados.

Nos sistemas de distribuição, as concessionárias adotam, geralmente, relés de sobrecorrente de fase e de neutro. Nos alimentadores primários são utilizados religadores e, normalmente, nos ramais de distribuição, são utilizadas chaves seccionadoras - fusíveis.

No capítulo 9 da norma IEEE 493-1997 [IEEE, 1997] são mostrados os resultados de vários trabalhos, os quais apresentam as durações de afundamentos de tensão sob a forma de distribuição de probabilidade acumulada. Tais resultados mostram que, a grande maioria dos eventos, apresenta duração inferior a 0,2 segundos.

II.5.7. Sistemas de Religamento

A frequência de ocorrência de afundamentos de tensão está intimamente relacionada com a existência de sistema de religamento no sistema de proteção e com os tipos de curtos-circuitos no sistema elétrico, ou seja, se são temporários ou permanentes.

Do ponto de vista de quantificação existem duas metodologias para contabilizar os afundamentos de tensão quando ocorrem religamentos. A primeira metodologia considera todos os afundamentos registrados, resultando em um número sobreestimado de eventos. A segunda metodologia consiste em utilizar o procedimento conhecido por agregação temporal.

Muitos equipamentos e processos industriais desligam durante a ocorrência do primeiro evento registrado. Uma vez que o processo parou, os eventos subsequentes não causam nenhum efeito sobre a carga. Conseqüentemente, a contabilização de todos os eventos, leva a um erro estatístico na avaliação do desempenho do suprimento da concessionária, sobreestimando o número de ocorrências de afundamentos de tensão.

Uma das maneiras de sanar este problema é a utilização da agregação temporal com uma janela de tempo pré-definida, ou seja, a partir da ocorrência do primeiro evento, todos os que o sucederem dentro daquele intervalo de tempo pré-estabelecido serão considerados como um mesmo evento. Embora o intervalo de tempo possa ser escolhido arbitrariamente, a norma IEEE 1159-1995 [IEEE, 1995]

recomenda o intervalo de um minuto. Algumas concessionárias, contudo, têm adotado janelas entre 15 e 30 minutos para considerar o impacto de afundamentos de tensão em processos industriais, adotando como premissa que este é o tempo mínimo para restabelecimento de tais processos.

Um evento agregado representa o conjunto de todos os registros associados à ocorrência de uma falta na rede, sintetizando as informações da série de registros em um único conjunto de características, tais como; intensidade, duração, tipo de afundamento, etc. Normalmente, os parâmetros associados ao evento agregado, são definidos pelas características do evento mais severo, ou seja, aquele que apresenta a menor tensão remanescente.

II.6. CARACTERIZAÇÃO DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

II.6.1. Método Convencional de Caracterização

II.6.1.1. Eventos Monofásicos

A partir da evolução do valor RMS da tensão em função do tempo pode-se determinar a magnitude e a duração do evento. A magnitude do afundamento de tensão, seguindo a filosofia do IEEE, é o menor valor da tensão remanescente durante a ocorrência do evento [IEEE, 1995]. A duração, por outro lado, é o tempo durante o qual o valor RMS da tensão permanece abaixo do patamar de 0,90 p.u. da tensão de referência (nominal, pré-falta, operativa, etc.). Os conceitos de intensidade e duração do afundamento de tensão são mostrados na Figura II.1.

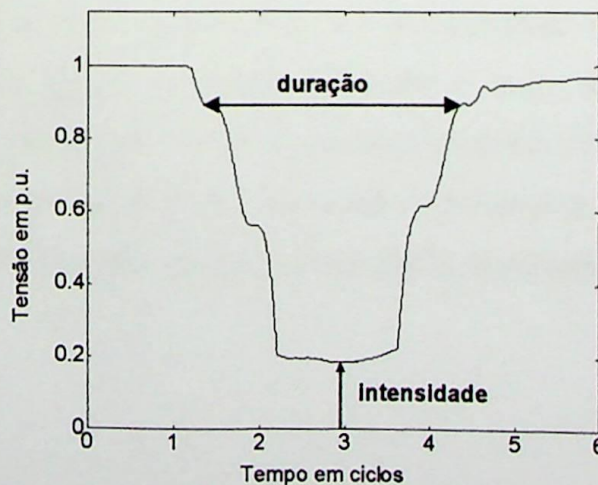


Figura II.1 – Caracterização de afundamentos de tensão monofásicos.

II.6.1.2. Eventos Trifásicos

Uma ocorrência 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 pode diferenciar-se substancialmente, sobretudo em sistemas de distribuição onde podem ocorrer curtos-circuitos evolutivos. Na análise de afundamentos de tensão deve-se definir como os eventos trifásicos são medidos, sendo que até a presente data, estes pontos ainda não estão padronizados e bem definidos por normas, segundo consta na versão preliminar do documento “*Voltage Sags Indices*” do IEEE [IEEE, 2000].

Para fins de cálculo de indicadores e avaliação do impacto dos fenômenos sobre equipamentos, utiliza-se o procedimento chamado de agregação de fases, que consiste em atribuir um único conjunto de parâmetros (amplitude, duração, etc.) a uma ocorrência que provoque registro em mais de uma fase. Algumas propostas de agregação de fases são descritas na seqüência.

II.6.1.3. Metodologia UNIPEDA (Europa)

A intensidade de um afundamento de tensão trifásico é definida como a maior queda de tensão ocorrida nas três fases. Neste caso, os desvios percentuais são tomados em relação à tensão nominal. Por sua vez, a duração do afundamento de tensão é dada pelo período de tempo decorrido a partir do instante em que a tensão de uma das fases fica inferior ao limite de 0,90 p.u., até o instante em que a tensão de todas as fases seja superior a este limite. A Figura II.2 ilustra esta situação onde se observa um afundamento de tensão cuja duração corresponde a $T_{afundamento}$, e intensidade de 1 p.u., segundo a metodologia UNIPEDA. Vale ressaltar que, neste caso em específico, não está sendo utilizado o conceito de tensão remanescente conforme estabelecido pela IEEE 1159 – 1995 [IEEE, 1995] e adotado para os propósitos desta dissertação.

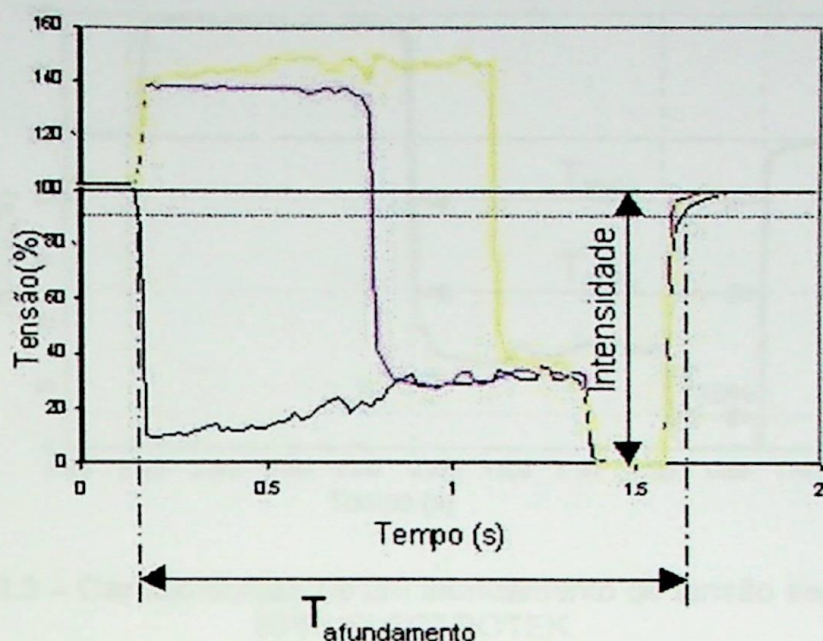


Figura II.2 – Caracterização de afundamentos de tensão segundo a UNIPEDÉ.

II.6.1.4. Metodologia do EPRI / ELECTROTEK (EUA)

De acordo com a metodologia proposta pelo EPRI / ELECTROTEK [SABIN, 2001], a intensidade do afundamento de tensão é caracterizada pela mínima tensão remanescente registrada durante o evento. Já a duração, corresponde ao período de tempo em que o valor RMS da tensão viola um limite específico de tensão indicado para avaliar o distúrbio, por exemplo, 0,9 p.u.

Nos casos de afundamentos que não possuem forma retangular, esta metodologia atribui durações conforme limiares específicos. Assim, a um único evento, pode ser atribuído mais de um valor de duração. A fim de ilustrar esta abordagem, considere-se o evento apresentado na Figura II.3, sendo que a duração do afundamento é avaliada segundo três limiares: 80%, 50% e 10%. Os valores $T_{80\%}$, $T_{50\%}$ e $T_{10\%}$ representam as durações para os afundamentos cujas intensidades atingem 80%, 50% e 10%, respectivamente. Observa-se também que o valor de $T_{80\%}$ é igual ao valor de $T_{50\%}$, uma vez que neste intervalo de tempo o formato do afundamento é retangular.

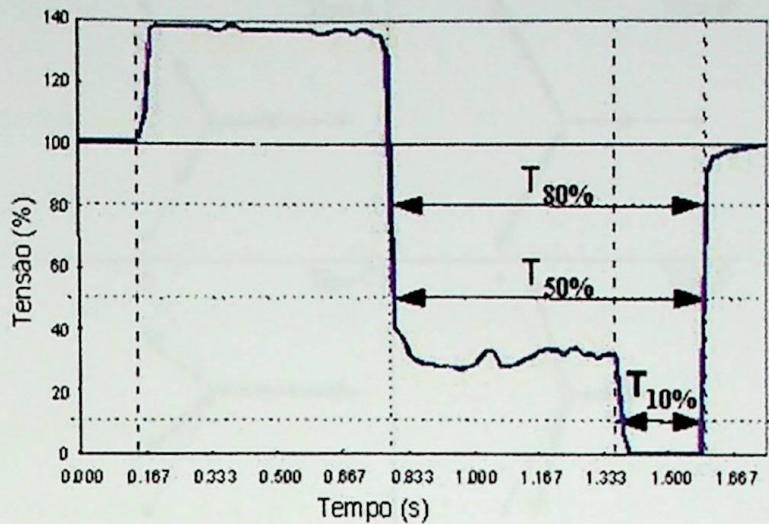


Figura II.3 – Caracterização de um afundamento de tensão segundo o EPRI/ELECTROTEK.

II.6.2. Método Proposto por Bollen

Ao contrário das outras propostas, este método leva em conta a assimetria e o desequilíbrio dos fasores de tensão durante a ocorrência do distúrbio [BOLLEN, 2000b]. Com isto, evita-se desprezar efeitos importantes, permitindo que o comportamento dos equipamentos sensíveis, principalmente os trifásicos, possa ser avaliado perante outros parâmetros dos afundamentos de tensão.

Baseado na teoria das componentes simétricas, o método considera os diversos tipos de falta, todos os tipos de conexões dos transformadores e as conexões estrela ou delta utilizadas nos equipamentos elétricos. Assume-se, também, que as impedâncias de seqüência positiva e negativa da fonte são iguais, resultando em quatro tipos principais de afundamentos de tensão mostrados na Figura II.4.

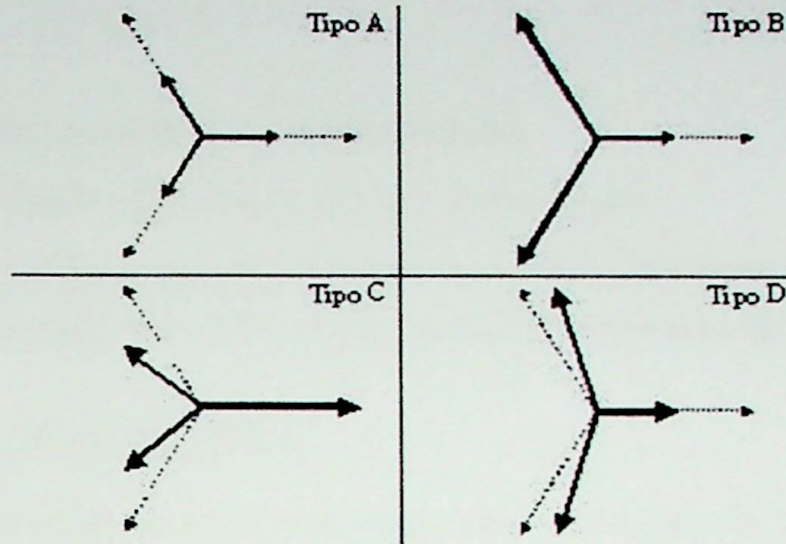


Figura II.4 – Caracterização segundo Bollen [BOLLEN, 2000b].

O tipo A é devido às faltas trifásicas e os tipos B, C e D às faltas bifásicas e monofásicas. Os afundamentos tipo B contêm componente de seqüência zero, raramente percebida nos terminais das cargas devido à filtragem introduzida pelos transformadores com conexão Δ / Y . Os afundamentos tipo C são devido às faltas FT, FF e FFT e podem se transformar, sucessivamente, em afundamentos tipo D e C quando se propagam através de transformadores com conexão Δ / Y ; assim, geralmente os afundamentos percebidos pela carga do consumidor são dos tipos C e D.

II.6.3. Caracterização Através de um Parâmetro

Conforme mostrado, o método clássico para a caracterização do evento, utiliza dois parâmetros; entretanto, várias outras propostas têm sido apresentadas para caracterizar os eventos através de um único parâmetro. Embora isto leve à perda de informação, o método a um parâmetro simplifica a comparação entre eventos, sobretudo para afundamentos de tensão não-retangulares.

II.6.3.1. Perda de Tensão

A perda da tensão (L_V) é definida [IEEE, 2000] como a integral da queda de tensão durante o afundamento, de acordo com (2.1).

$$L_V = \int \left\{ 1 - \frac{V(t)}{V_{nom}} \right\} dt \quad (2.1)$$

onde:

V_{nom} – tensão nominal no local de medição;

$V(t)$ – valor RMS da tensão durante o afundamento.

Deve-se ressaltar que, para eventos com lento restabelecimento da tensão, intervalos de integração diferentes podem fornecer resultados divergentes.

II.6.3.2. Perda de Energia

A perda de energia (L_E) é definida como a integral da queda de energia durante o evento [IEEE, 2000] considerando a carga como sendo do tipo impedância constante, conforme (2.2).

$$L_E = \int \left\{ 1 - \left[\frac{V(t)}{V_{nom}} \right]^2 \right\} dt \quad (2.2)$$

II.6.3.3. Detroit Edison - Sag Score

A metodologia empregada pela empresa “Detroit Edison” baseia-se na caracterização do afundamento através de uma grandeza chamada de “Sag Score” [THALLAM, 2000]. A severidade do afundamento é calculada através da média das quedas de tensão individuais por fase, conforme equação (2.3).

$$Sag\ Score = 1 - \frac{V_A + V_B + V_C}{3} \quad (2.3)$$

onde:

V_A, V_B, V_C – intensidades dos afundamentos de tensão registrados em cada fase.

Quanto mais severo for o afundamento trifásico, o seu “Sag Score” se aproxima do valor unitário. A Detroit Edison não considera a variação da intensidade do afundamento no tempo. No entanto, não há inconveniente em trabalhar com funções $V(t)$ e obter o “Sag Score” como função do tempo.

Algumas premissas importantes acerca deste método devem ser ressaltadas:

- Não considera a duração do afundamento;
- Considera uma janela de 15 minutos para agregação temporal;
- Se alguma das fases apresenta tensão superior a 1,0 p.u., deve ser considerada a tensão de 1,0 p.u. para o cálculo do “Sag Score”;
- Um afundamento será computado somente se alguma das fases apresentar tensão remanescente inferior a 0,75 p.u..

II.6.4. Indicadores para Afundamentos de Tensão

II.6.4.1. Metodologia EPRI/ELECTROTEK

O EPRI / Electrotek propôs um conjunto de índices para avaliar o desempenho de um sistema [BROOKS, 2000]. Estes indicadores fazem referência à intensidade e à duração dos eventos.

O índice $SARFI_x$ (*System Average RMS Variation Frequency Index*) representa o número médio de ocorrências de afundamentos de tensão por cliente, calculado através de (2.4).

$$SARFI_x = \frac{\sum N_i}{N_T} \quad (2.4)$$

onde:

x - tensão RMS de referência: 0,9; 0,8; 0,7; 0,5 e 0,1 p.u.;

N_i - número de clientes que são afetados por variações cuja magnitude é menor que o valor de referência x ;

N_T - número de clientes supridos pelo alimentador, barra ou sistema analisado.

O índice $SARFI_x$ não faz referência à duração dos eventos. Para atender esta questão são apresentados três sub-índices que contemplam as durações definidas na norma IEEE 1159-1995 [IEEE, 1995], ou seja, instantâneas ($SIARFI_x$), momentâneas ($SMARFI_x$) e temporárias ($STARFI_x$).

Algumas concessionárias estão utilizando estes indicadores para comparar o desempenho das diversas barras e subestações e, desta maneira, otimizar os

investimentos em manutenção e realizar estudos de viabilidade para mitigação dos afundamentos de tensão.

II.6.4.2. Proposta de Indicadores GQEE

O GQEE propôs alguns indicadores para possibilitar a avaliação do desempenho tanto de barras individuais com cargas sensíveis como indicadores globais do sistema [CARVALHO FILHO, 2000].

A metodologia utilizada para o cálculo dos indicadores é baseada no conceito de perda de carga, classificando os estados operativos da planta industrial em estados de falha (que implicam em paradas de processo) e estados de sucesso (operação normal).

Em linhas gerais, a metodologia é dividida em quatro etapas:

Etapa 1 - Obtenção do modelo da tensão disponível nos barramentos de interesse, considerando curtos-circuitos deslizantes ao longo das linhas de transmissão;

Etapa 2 - Obtenção do modelo da sensibilidade da carga nos barramentos dos consumidores sensíveis;

Etapa 3 - Combinação dos modelos obtidos nas etapas 1 e 2 para obter o modelo de risco de interrupção do processo;

Etapa 4 - Determinação dos indicadores de desempenho para os barramentos de carga e, finalmente, os indicadores globais do sistema.

Como uma grande parte dos processos industriais modernos é contínua, ou seja, cada unidade produtiva é interdependente da outra, o modelo da sensibilidade da carga nos barramentos dos consumidores é considerado como sendo um modelo de 2 estados (um estado de sucesso e outro de falha).

Além da curva de sensibilidade, a cada consumidor (i) serão associadas as seguintes variáveis:

- $T(i)$ - tempo médio, em horas, necessário para o consumidor (i) retomar a plena produção;
- $C(i)$ - custo de interrupção do consumidor (i) por parada de processo, contabilizando os prejuízos associados a perdas de produção, insumos e custos

relativos à mão-de-obra e a reparos de equipamentos [US\$/parada];

- $D(i)$ - demanda do consumidor (i) [MW];
- $F_c(i)$ - fator de carga do consumidor (i).

A taxa de transição do estado E1 para o estado E2 (λ_{12}), é igual ao número anual esperado de ocorrências de afundamentos de tensão que provoca a parada do processo industrial. A taxa de transição do estado E2 para o estado E1 (λ_{21}), é calculada em função do tempo necessário para o consumidor i retomar a plena produção, ou seja:

$$\lambda_{12}(i) = N_i = \sum_{J \in SF} \Delta L_J \cdot \lambda_J \quad (2.5)$$

$$\lambda_{21}(i) = 8760/T(i) \quad (2.6)$$

onde:

- $N(i)$ - número anual de paradas do processo industrial do consumidor (i) [eventos/ano];
- 8760 - número de horas disponíveis durante o período de um ano [horas]
- ΔL_J - incremento do curto-circuito deslizando [km];

As probabilidades limites do consumidor (i) considerando o modelo de 2 estados, são calculadas segundo as expressões (2.7) e (2.8), respectivamente.

$$P_i(1) = \lambda_{21}/(\lambda_{21} + \lambda_{12}) \quad (2.7)$$

$$P_i(2) = \lambda_{12}/(\lambda_{21} + \lambda_{12}) \quad (2.8)$$

onde:

- $P_i(1)$ - probabilidade do consumidor (i) encontrar-se operante;
- $P_i(2)$ - probabilidade do consumidor (i) encontrar-se inoperante.

Os índices $P_i(1)$ e $P_i(2)$, correspondem, respectivamente, a disponibilidade $A_P(i)$, e indisponibilidade $U_P(i)$ do processo.

Os cálculos dos demais indicadores por barra de carga, são obtidos mediante a aplicação das equações (2.9) a (2.11).

$$DND(i) = P_i(2) \cdot D(i) \quad (2.9)$$

$$END(i) = 8760 \cdot DND(i) \cdot F_C(i) \quad (2.10)$$

$$C_{afund}(i) = N(i) \cdot C(i) \quad (2.11)$$

onde:

- $DND(i)$ - demanda não distribuída para o consumidor (i) [MW];
- $END(i)$ - energia não distribuída para o consumidor (i) [MWh];
- $C_{afund}(i)$ - custo anual de interrupção do consumidor (i) [US\$/ano].

De posse dos indicadores individuais, pode-se também calcular os índices globais do sistema, conforme equações (2.12) a (2.17).

$$P_S(1) = \frac{\sum_{i=1}^n P_i(1)}{n} \quad (2.12)$$

$$P_S(2) = 1 - P_S(1) \quad (2.13)$$

$$N(S) = \frac{\sum_{i=1}^n N(i)}{n} \quad (2.14)$$

$$DND(S) = \frac{\sum_{i=1}^n DND(i)}{n} \quad (2.15)$$

$$END(S) = \frac{\sum_{i=1}^n END(i)}{n} \quad (2.16)$$

$$C_{afund}(S) = \frac{\sum_{i=1}^n C_{afund}(i)}{n} \quad (2.17)$$

onde:

- $P_S(1)$ - disponibilidade média por consumidor
- $P_S(2)$ - indisponibilidade média por consumidor

- $N(S)$ - número anual médio de parada por consumidor
- $DND(S)$ - demanda não distribuída média do sistema por consumidor [MW];
- $END(S)$ - energia não distribuída média do sistema por consumidor [MWh];
- $C_{afund}(S)$ - custo anual médio de interrupção por consumidor [US\$/ano]

Vale ressaltar que a carga do consumidor, além do modelo de 2 estados, também pode ser associada ao modelo de n estados [CARVALHO FILHO, 2000].

II.6.4.3. Outras Maneiras de Avaliar o Desempenho das Barras

Outra metodologia para avaliação do desempenho de um determinado barramento a partir dos dados da magnitude e duração dos eventos individuais é descrita nas normas IEEE 1346 - 1998 e IEEE 493 - 1997 [IEEE, 1998a], [IEEE, 1997].

A Figura II.5 mostra, de forma gráfica, o número anual esperado de eventos em função da intensidade e duração dos afundamentos de tensão; esta representação fornece completa informação do desempenho da barra a partir da qual pode-se, facilmente, estimar o número esperado de paradas / ano, uma vez conhecida a sensibilidade da carga conectada naquele barramento. Por exemplo, esperam-se 5 desligamentos / ano para a carga A devido a afundamentos de tensão com intensidade abaixo de 0,65 p.u. e duração maior que 0,2 s.

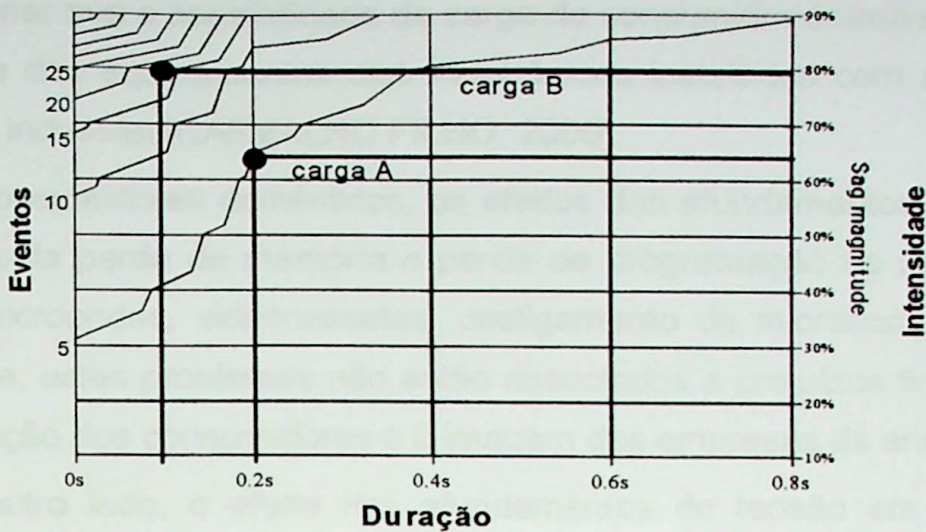


Figura II.5 – Desempenho de um local em função da sensibilidade das cargas.

Para eventos desequilibrados pode-se construir um gráfico contendo as curvas correspondentes a cada tipo de afundamento, A, B, C ou D.

Uma outra maneira de apresentar os dados da Figura II.5 é através da Tabela II.1, na qual é representada a quantidade de ocorrências de afundamentos de tensão, para um período anual de monitoração ou simulação.

Tabela II.1 – Número de afundamentos de tensão anuais.

	>0.01 s	>0.1 s	>0.5 s	>1 s	>3 s	>20 s
<90%	338	126	36	9	0	0
<70%	99	28	0	0	0	0
<40%	55	14	0	0	0	0
<1%	14	0	0	0	0	0

Vale dizer que os valores utilizados para subdividir a Tabela II.1 ainda são um ponto de controvérsia, havendo várias publicações com recomendações diversas.

II.7. SENSIBILIDADE DE CARGAS E PROCESSOS INDUSTRIAIS

II.7.1. Efeitos Diversos

O impacto dos afundamentos de tensão sobre os consumidores industriais ocorre de forma diferenciada em função da sensibilidade dos equipamentos eletroeletrônicos instalados, das particularidades inerentes a cada processo industrial (indústrias têxteis, alumínio, plástico, cimento, papel, metalúrgica, siderúrgica, química, etc.) e também dos sistemas de controle de processo envolvidos. Logo,

pode-se afirmar que a sensibilidade da carga do consumidor é uma combinação da sensibilidade dos equipamentos eletro-eletrônicos instalados com a sensibilidade do processo industrial [CARVALHO FILHO, 2000].

Em consumidores domésticos, os efeitos dos afundamentos de tensão são percebidos pela perda de memória e perda de programação de relógios digitais, fornos de microondas, videocassetes, desligamento de microcomputadores, etc. Normalmente, estes problemas não estão associados a prejuízos financeiros, mas sim à satisfação dos consumidores e à imagem das empresas de energia elétrica.

Por outro lado, o efeito dos afundamentos de tensão em consumidores industriais, dá-se sob a forma de interrupção parcial ou total de processos produtivos, com os conseqüentes prejuízos associados à parada de produção, perda de produtividade, perda de insumos, reparo e reposição de equipamentos danificados [CARVALHO FILHO, 2000]. Os efeitos dos afundamentos de tensão sobre os principais equipamentos eletro-eletrônicos utilizados nas indústrias manifestam-se sob a forma de:

- Desligamento de lâmpadas de descarga, como as de vapor de mercúrio, que levam cerca de alguns minutos para reacenderem;
- Perda de programação de CLPs;
- Desligamento de acionamentos devido à atuação de dispositivos de proteção associados, que quando detectam condições de risco, promovem o bloqueio do disparo de tiristores ou até mesmo o desligamento imediato da fonte de alimentação;
- Falhas de comutação em pontes controladas, afetando os disparos dos gatilhos de tiristores;
- Queima de fusíveis e outros componentes, principalmente nos acionamentos CC operando no modo regenerativo.

II.7.2. Acionamentos em Corrente Alternada e Corrente Contínua

Geralmente, a sensibilidade dos equipamentos é representada a dois parâmetros (magnitude e duração) no plano cartesiano. Assim, a sensibilidade dos acionamentos de velocidade variável (AVVs), como de todos os demais

equipamentos eletro-eletrônicos, pode ser caracterizada por uma região dentro do plano tensão versus tempo, conforme mostra a Figura II.6.

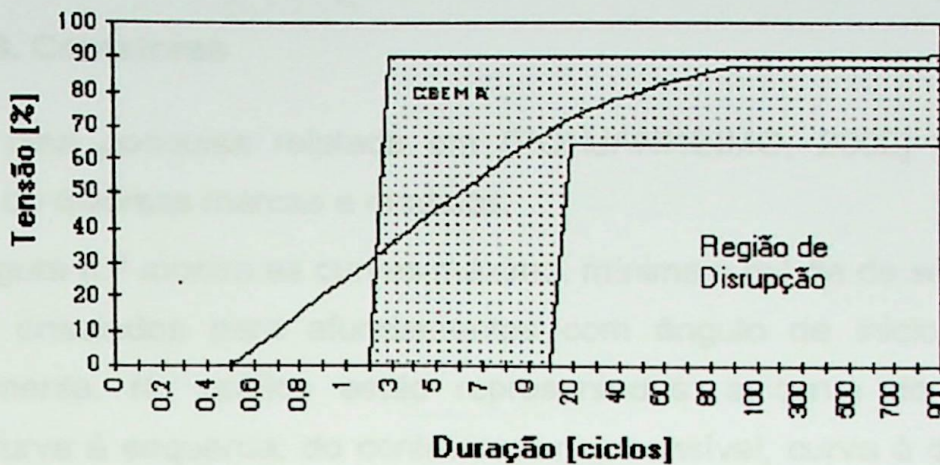


Figura II.6 – Sensibilidade dos AVVs [CARVALHO FILHO, 1997].

A região denominada de interrupção é onde o equipamento, certamente, irá falhar, independentemente do modelo ou fabricante; a área sombreada representa a região de incerteza, em que o equipamento poderá falhar ou não, e a região à esquerda e acima da área sombreada é considerada como sendo uma região normal de operação, também denominada de imunidade. Nesta última região os equipamentos não apresentam sensibilidade a afundamentos de tensão.

Um fato a ser observado nos acionamentos de velocidade variável é que, geralmente, os acionamentos de corrente contínua (CC) são mais sensíveis a afundamentos de tensão que os acionamentos de corrente alternada (CA) [BOLLEN, 1997]. Isto ocorre devido aos seguintes fatores:

- Os acionamentos CC são normalmente desprovidos de dispositivos de armazenamento de energia (capacitor no lado CC);
- Os sistemas de comando bloqueiam o sistema de disparo da ponte controlada devido ao desequilíbrio e assimetria detectados nos fasores da tensão.

O impacto dos afundamentos de tensão sobre acionamentos de corrente alternada pode-se manifestar de duas maneiras, ambas resultando em parada do acionamento [BOLLEN, 1997], [BOLLEN, 2000a]:

- Quando o capacitor no barramento CC não consegue manter a tensão mínima nos terminais do inversor durante o período de permanência do afundamento de tensão;

- Quando é violada a capacidade dos componentes responsáveis pela eletrônica de controle de operar com níveis reduzidos de tensão.

II.7.3. Contatores

Em uma pesquisa relatada em [POHJANHEIMO, 2002] foram testados contatores de diversas marcas e modelos.

A Figura II.7 mostra as curvas máxima, mínima e média de sensibilidade dos contatores ensaiados para afundamentos com ângulo de início de 0° e 90° , respectivamente. No gráfico estão representadas: a curva do contator mais sensível, curva à esquerda; do contator menos sensível, curva à direita; e de um contator de sensibilidade média.

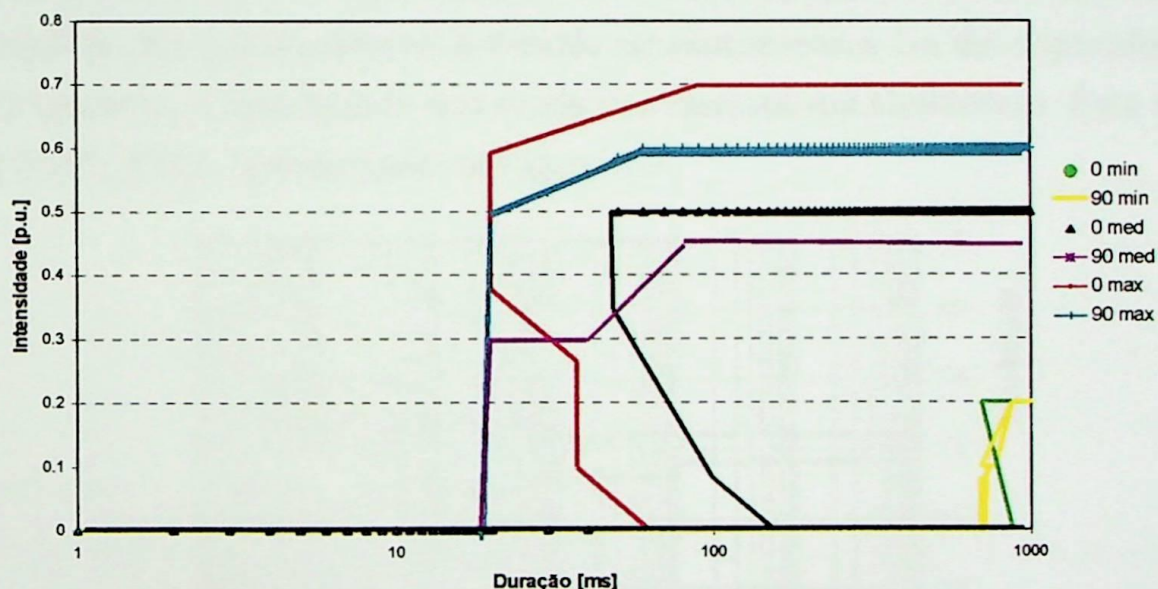


Figura II.7 – Curva de sensibilidade de contatores [POHJANHEIMO, 2002].

Os valores de tolerância obtidos estão de acordo com os limites estabelecidos na norma IEC 60947-4-1 [IEC, 2000], e também com valores obtidos em trabalhos semelhantes [PEDRA, 2002], [MCGRANAGHAN, 1993].

II.7.4. Curvas CBEMA e ITIC

Apesar da curva CBEMA [ITIC, 2000], apresentada na Figura II.8, ter sido originalmente proposta para caracterizar a sensibilidade de computadores "mainframe", atualmente ela também tem sido utilizada para outros componentes eletro-eletrônicos como: microcomputadores (PCs), equipamentos

microprocessados, etc.

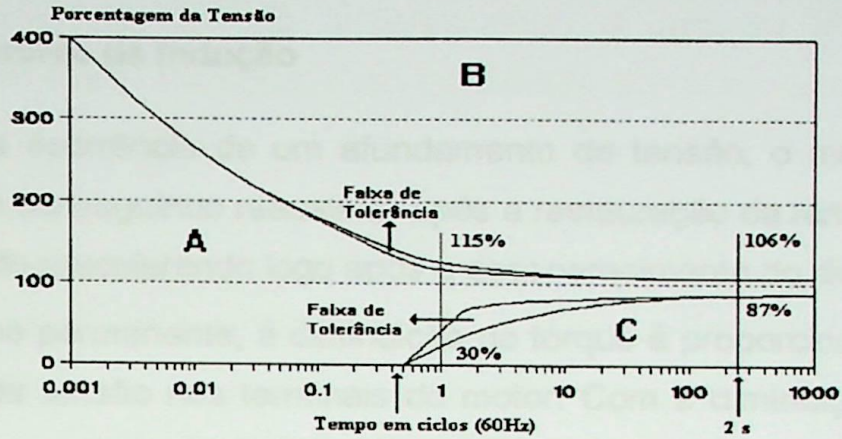


Figura II.8 – Curva de tolerância CBEMA [ITIC, 2000].

Recentemente, a curva CBEMA foi modificada para melhor caracterizar a sensibilidade dos computadores e demais equipamentos a fim de acomodar, mais adequadamente, a diversidade dos modernos dispositivos eletrônicos. Esta curva é a ITIC [ITIC, 2000], apresentada na Figura II.9.

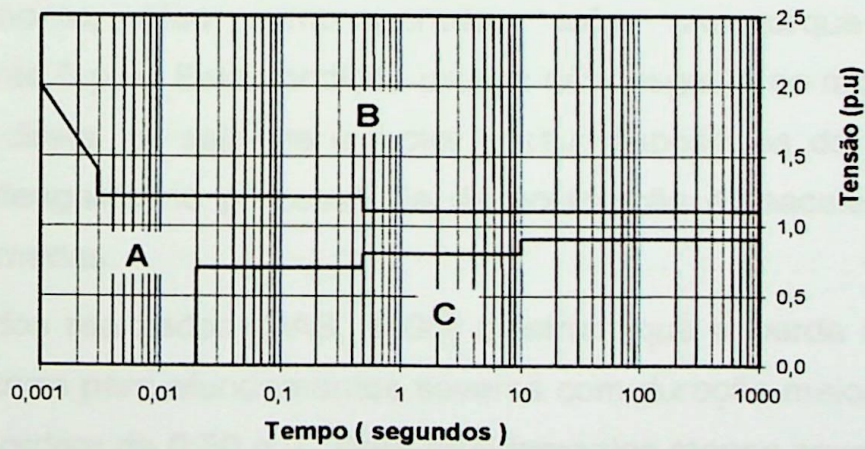


Figura II.9 – Curva de tolerância ITIC.

As Figuras II.8 e II.9 mostram três regiões distintas de operação que representam:

- Região A - região de imunidade;
- Região B - região de susceptibilidade, com possibilidade de ruptura da isolamento dos equipamentos (perda de *hardware*), devido à ocorrência de sobretensões transitórias e elevações de tensão;
- Região C - região de susceptibilidade, com possibilidade de parada de

operação dos equipamentos, em virtude da ocorrência de afundamentos de tensão, juntamente com as interrupções momentâneas.

II.7.5. Motores de Indução

Diante da ocorrência de um afundamento de tensão, o motor de indução pode travar, não conseguindo reacelerar após a restauração da tensão ou somente perder velocidade reacelerando logo após o desaparecimento do distúrbio.

Em regime permanente, a diminuição do torque é proporcional ao quadrado da diminuição da tensão nos terminais do motor. Com a diminuição da tensão o escorregamento aumenta elevando também a corrente absorvida pelo motor.

Cargas com baixa inércia irão desacelerar rapidamente com o motor podendo ocasionar a parada do processo. Em contrapartida, uma carga de maior inércia irá desacelerar mais lentamente, podendo manter o processo em operação.

Quando da ocorrência de um curto-circuito no sistema, o motor contribuirá para a corrente de falta com um valor bastante elevado. Ao mesmo tempo o motor, que, no momento, atua como gerador, sofre um torque negativo de aproximadamente 5 p.u.. Esta condição produz um desgaste no motor equivalente a uma partida direta, ou seja, se o motor possui dispositivos de partida indireta sofrerá maior desgaste no processo de desaceleração e reaceleração que nas partidas programadas.

Os estudos realizados [DAS, 1990] mostram que a perda de estabilidade dos motores ocorre para afundamentos severos com duração maior que 350 ms e intensidade da ordem de 0,50 p.u.. Para afundamentos menos severos os motores podem se manter estáveis, inclusive para eventos cuja duração supera 350 ms.

II.8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados os conceitos básicos sobre os afundamentos de tensão, seus principais parâmetros (intensidade, duração e frequência de ocorrência), e os principais fatores de influência sobre estes parâmetros. Esta conceituação fornecerá subsídios para a compreensão dos assuntos abordados nos capítulos subseqüentes.

As principais metodologias convencionais de análise e tratamento de medições de afundamentos de tensão caracterizam os distúrbios através de dois parâmetros: intensidade (tensão remanescente) e duração. Alternativamente, alguns autores propõem métodos a um parâmetro, como por exemplo, perda de tensão, perda de energia, etc.

Os métodos convencionais mais difundidos possuem diferenças significativas nas formas de caracterização, de agregação e de contabilização dos eventos, não havendo ainda uma padronização de procedimentos.

Os métodos baseados na intensidade e duração para caracterizar um evento envolvendo mais de uma fase, apresentam algumas restrições, pois as grandezas associadas não refletem plenamente os efeitos dos distúrbios sobre equipamentos trifásicos, considerando-se que, na grande maioria dos casos, os afundamentos de tensão registrados são de natureza desequilibrada e assimétrica. Para suprir esta deficiência, o método proposto por Bollen permite diferenciar eventos assimétricos com a mesma amplitude e duração.

Por fim, foram apresentados os impactos dos afundamentos de tensão nos processos industriais. Pode-se observar, para cada equipamento apresentado, a particularidade dos efeitos sofridos quando da redução brusca da tensão de alimentação.

No próximo capítulo serão apresentadas as metodologias para cálculo dos parâmetros dos afundamentos, bem como alguns *softwares* de análise de afundamentos pesquisados.

III. CÁLCULO DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

III.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Em função da aleatoriedade das ocorrências de afundamentos de tensão (AMTs), os métodos de simulação apresentam-se como uma boa alternativa para se obter, estatisticamente, os parâmetros destes distúrbios, evitando-se despender grandes recursos financeiros e longos períodos de medição [QADER, 1999].

Visto que as análises de AMTs estão interessadas, principalmente, nas variações do valor eficaz das tensões, um método de solução baseado na frequência fundamental pode ser utilizado. Porém, se for necessário obter as variações da forma de onda durante o distúrbio, uma simulação mais detalhada torna-se indispensável. As ferramentas computacionais utilizadas para se determinar os parâmetros e as estatísticas dos afundamentos de tensão são bem conhecidas e podem ser agrupadas em três classes [XU, 2001]:

- Simulação da forma de onda;
- Simulação dinâmica;
- Simulação de faltas.

O método de simulação da forma de onda trata o afundamento de tensão como um transitório; utiliza a simulação no domínio do tempo para obter a oscilografia do distúrbio. Neste caso, as ferramentas normalmente utilizadas são os programas de transitórios eletromagnéticos. Este método deve ser utilizado quando se deseja avaliar, detalhadamente, os efeitos dinâmicos de motores e geradores através da observação da evolução no tempo da forma de onda dos afundamentos de tensão [BOLLEN, 1998b]. Em contrapartida, nesta modalidade de simulação, agrega-se maior esforço computacional em função da complexidade da modelagem do sistema e de seus componentes.

A simulação dinâmica é utilizada, principalmente, na análise da tensão durante partidas de motores e saída de geradores. As ferramentas utilizadas são as de análise de estabilidade transitória ou estabilidade em médio prazo, onde é necessária a modelagem dinâmica dos componentes. A principal vantagem desta

abordagem é a exibição das curvas de comportamento do valor eficaz da tensão durante o distúrbio. Estas curvas são menos precisas que as oferecidas pelos programas de simulação transitória, mas são suficientes para avaliar muitos afundamentos, especialmente aqueles causados por partidas de motores.

Dado que a maioria dos afundamentos de tensão se deve a faltas no sistema de potência, é natural que para o cálculo da intensidade de afundamentos de tensão sejam utilizados programas de análise de curto-circuito convencionais, cujo modelo é linearizado, permitindo solução direta (não iterativa) e com baixo esforço computacional. Esta metodologia fornece a intensidade mínima do afundamento, mas não fornece o comportamento dinâmico da tensão eficaz e nem a duração do evento. Normalmente, a duração dos afundamentos é estimada a partir da parametrização dos relés juntamente com o tempo de operação dos disjuntores [AYELLO, 1999].

A experiência tem mostrado 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 da ordem de um defeito a cada dez anos [AYELLO, 1999].

Face ao exposto, no processo de determinação do desempenho do sistema elétrico diante de afundamentos de tensão, os únicos componentes normalmente considerados são as linhas de transmissão e distribuição. Portanto, para estimar o número de ocorrências anuais dos afundamentos de tensão, são utilizadas as estatísticas de taxas médias de falta em linhas de transmissão e distribuição.

Neste contexto, os itens subseqüentes são dedicados à descrição dos dois principais métodos de cálculo utilizados para se obter a intensidade dos afundamentos de tensão: o método da distância crítica e o método das posições de falta.

Para finalizar este capítulo, é apresentada uma síntese das principais ferramentas disponíveis para análise de afundamentos de tensão.

III.2. MÉTODO DA DISTÂNCIA CRÍTICA

Devido a seu grau de simplicidade, este método mostra-se adequado para

aplicações em sistemas de transmissão e distribuição tipicamente radiais. Seu princípio está baseado na determinação da posição da falta no alimentador que vai gerar um valor pré-determinado de afundamento de tensão numa barra de interesse. O cálculo é realizado de forma analítica. Esta posição, uma vez encontrada, é denominada distância crítica, sendo que os afundamentos de tensão de menor amplitude, ou seja, mais severos, estarão associados à ocorrência de curtos-circuitos aquém da distância crítica calculada.

Adotando-se a barra mostrada no diagrama da Figura III.1 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 (3.1).

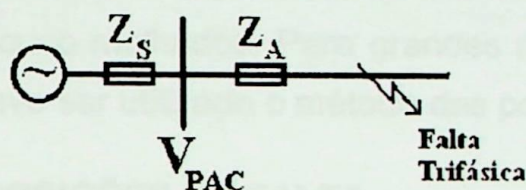


Figura III.1 – Diagrama unifilar de um sistema de distribuição típico.

$$V_{PAC} = \frac{Z_A}{Z_S + Z_A} \quad (3.1)$$

onde:

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

Naturalmente que, na expressão (3.1), foram adotadas tensão da fonte igual a 1 p.u. e impedância de falta nula.

A distância crítica ($L_{CRÍTICA}$) pode ser determinada em função da tensão crítica desejada ($V_{CRÍTICA}$), de acordo com a equação (3.2).

$$L_{CRÍTICA} = \frac{Z_S}{z} \cdot \frac{V_{CRÍTICA}}{1 - V_{CRÍTICA}} \quad (3.2)$$

onde:

- $L_{CRÍTICA}$ - distância crítica [km];
- z - impedância do alimentador por unidade de comprimento [Ω/km].

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 de cada um dos alimentadores;
- Comprimento total dos alimentadores;
- Taxas de falta dos alimentadores e sua composição (3F, FF, FT e FFT).

Vale ressaltar que o método da distância crítica é adequado para a análise de sistemas radiais ou pouco malhados. Para grandes redes, este método não é apropriado e, portanto, deve ser utilizado o método das posições de falta.

III.3. MÉTODO DAS POSIÇÕES DE FALTA

O método das posições de falta [CONRAD, 1991], [BECKER, 1994], também conhecido como curto-circuito deslizante, tem sido amplamente utilizado no cálculo de afundamentos de tensão em sistemas elétricos de potência de grande porte, contemplando tanto sistemas radiais como malhados. Seu princípio está baseado na sistemática de simular faltas em posições diferentes ao longo do sistema elétrico, principalmente nas linhas de transmissão e distribuição e observar o comportamento da tensão nos barramentos de interesse. Desta maneira, pode-se avaliar a influência da posição da falta tanto na amplitude como na duração dos afundamentos de tensão. A Figura III.2 ilustra esta situação onde pode-se observar diversos pontos de simulação de curto-circuito ao longo da linha L1. Neste caso, deseja-se conhecer a tensão na barra do consumidor i à medida que o ponto de defeito é deslocado de posição.

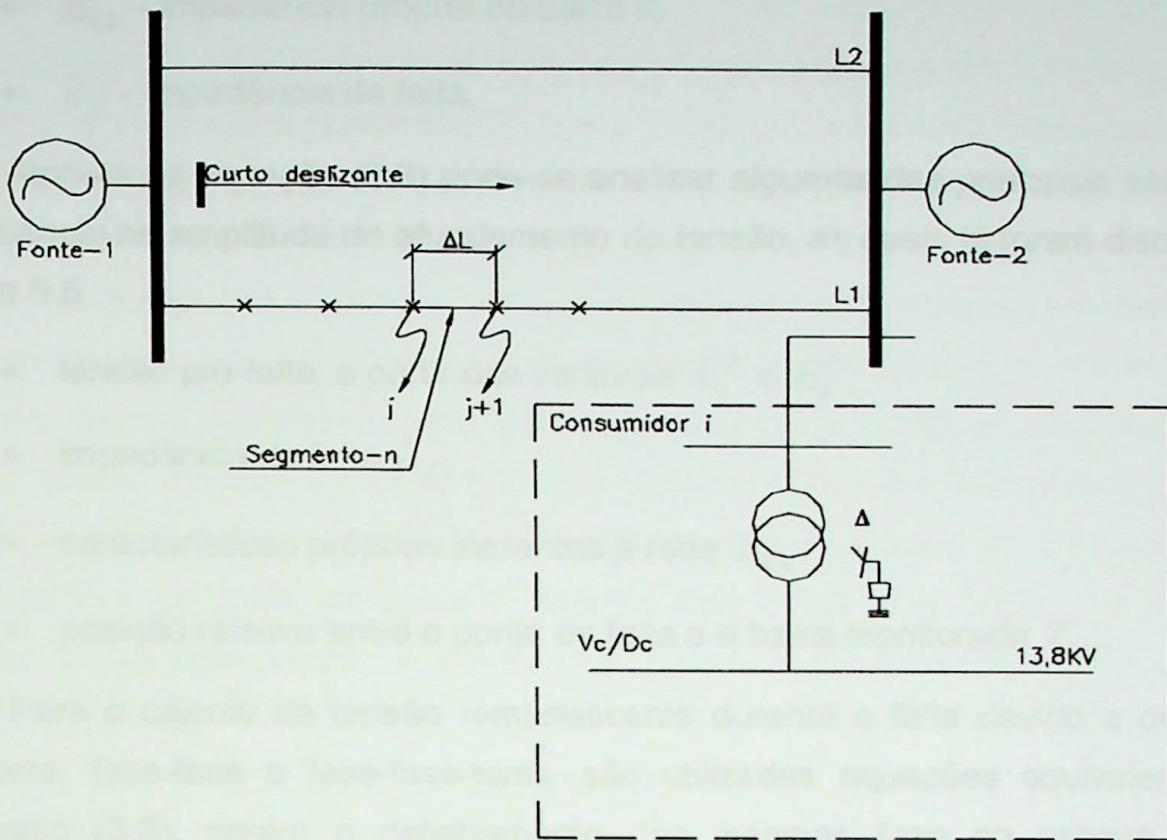


Figura III.2 – Diagrama unifilar- método do curto- deslizante.

A magnitude do afundamento de tensão (tensão remanescente durante a falta) na barra do consumidor i , assim como para qualquer outra barra de interesse, é calculada a partir da utilização de um programa de cálculo de curto-circuito, mediante a aplicação da equação (3.3) para defeitos trifásicos.

$$E_{i,k} = E_i^P - \frac{E_k^P}{Z_{k,k} + Z_f} \cdot Z_{i,k} \quad (3.3)$$

onde:

- $E_{i,k}$ - tensão remanescente na barra i devido a curto-circuito trifásico na barra k ;
- E_i^P - tensão pré-falta na barra i ;
- E_k^P - tensão pré-falta na barra k ;
- $Z_{i,k}$ - impedância de transferência entre as barras $i - k$;

- $Z_{k,k}$ - impedância própria da barra k ;
- Z_f - impedância de falta.

Através da equação (3.3) pode-se analisar algumas das principais variáveis de influência na amplitude do afundamento de tensão, as quais já foram discutidas no item II.5:

- tensão pré-falta, a partir das variáveis E_i^P e E_k^P ;
- impedância de falta Z_f ;
- características próprias inerentes à rede $Z_{k,k}$;
- posição relativa entre o ponto da falta e a barra monitorada $Z_{i,k}$.

Para o cálculo da tensão remanescente durante a falta devido a defeitos fase-terra, fase-fase e fase-fase-terra, são utilizadas equações equivalentes à expressão (3.3), porém o detalhamento das mesmas foge ao escopo deste trabalho.

Dessa forma, o método das posições de falta pode ser, basicamente, descrito pelo seguinte procedimento [BOLLEN, 2000a]:

- Determinar a área do sistema onde os curtos-circuitos serão aplicados;
- Dividir esta área em pequenas porções; cada um destes segmentos será representado por apenas uma posição de falta, visto que curtos-circuitos dentro do mesmo segmento irão causar AMTs com características semelhantes;
- Determinar o número de curtos-circuitos por ano em cada segmento;
- Calcular as características do AMT para cada posição de falta, tendo como base o modelo elétrico do sistema em questão;
- Combinar os dois passos anteriores para se obter informações estocásticas acerca do número de AMTs.

Dentro do processo de cálculo, alguns fatores podem afetar os resultados de forma relevante, tais como a distância entre as posições de falta e a extensão da área de aplicação das faltas. A influência do primeiro destes fatores pode ser observada na curva de tensão exata na Figura III.3 que mostra as intensidades de

AMTs em função do local de aplicação da falta.

A escolha de apenas uma posição de falta para representar um conjunto de possíveis faltas, parte do pressuposto que a magnitude do afundamento para todo o conjunto é igual àquela correspondente à posição escolhida. Na Figura III.3 é possível notar que o erro cometido é maior quando a falta é próxima da barra que está sendo monitorada. Portanto, nesta região é necessária uma alta densidade de posições de falta. Para faltas em pontos remotos, a curva se torna menos inclinada e o erro diminui, permitindo uma baixa densidade de posições de falta nesta região. Assim, deve-se escolher uma ou duas posições de falta para todas as linhas que estejam remotamente localizadas em relação à barra de interesse. Nos alimentadores da barra de carga e também nas linhas com origem na mesma subestação do consumidor, o número de posições de falta deve ser superior [BOLLEN, 2000a].

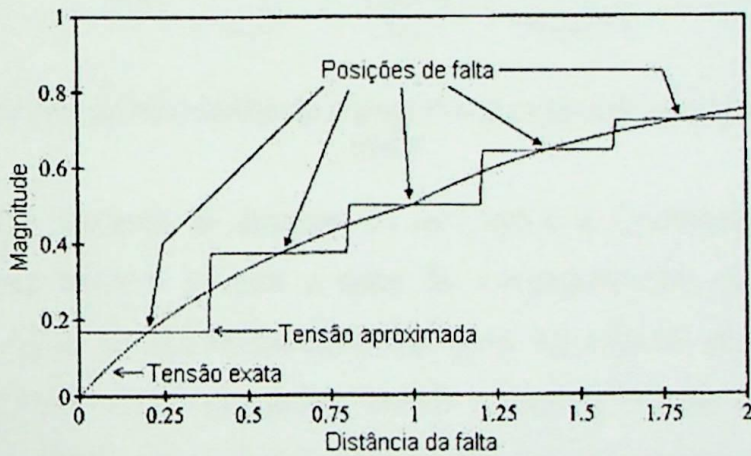


Figura III.3 – Tensão aproximada em função da distância da falta.

O segundo fator de influência deste método está relacionado à fronteira das posições de falta, ou seja, o quão longe se precisa ir com a aplicação das faltas no sistema elétrico mantendo-se a precisão dos cálculos, mas sem desperdício de tempo de processamento. Uma alternativa é iniciar a aplicação de faltas em uma região restrita, próxima à carga, observando-se as magnitudes dos afundamentos nos barramentos da área de fronteira. Caso as mesmas sejam muito inferiores a 90%, esta área deve ser expandida.

Uma das maneiras possíveis de analisar os resultados é realizar um estudo de influência de uma determinada falta nas demais barras do sistema, identificando a área de influência do defeito simulado, conforme pode ser observado na Figura

III.4. Analisando-se tal figura, conclui-se que uma grande área experimenta tensão durante a falta com intensidade superior ou igual a 0.9 p.u. Afundamentos mais severos, ou seja, com amplitude inferior a 0,70 p.u., ficam restritos às proximidades da região onde ocorre a falta. É importante lembrar que regiões onde há maior concentração de fontes geradoras experimentam afundamentos menos severos.

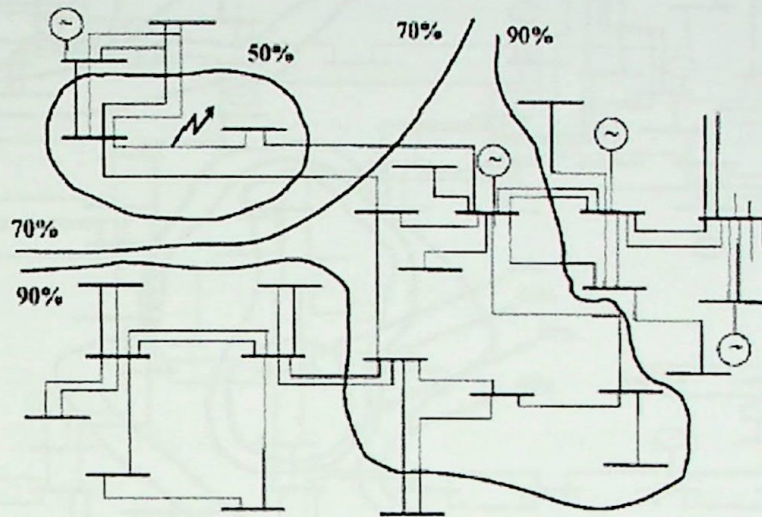


Figura III.4 – Análise da intensidade do afundamento para uma falta específica [QADER, 1999].

Uma outra maneira de analisar os resultados é focalizando a atenção em uma determinada barra e calcular a área de vulnerabilidade, conforme mostra a Figura III.5. A área de vulnerabilidade demarca as regiões do sistema elétrico onde, se ocorrerem curtos-circuitos, haverá a ocorrência de afundamentos de tensão abaixo de limites críticos que possam resultar em desligamentos de cargas sensíveis. As áreas de vulnerabilidade são afetadas pela concentração de fontes geradoras, sendo deformadas na direção destas, ou seja, o contorno da área de vulnerabilidade se desloca na direção das fontes geradoras, como se observa na Figura III.5.

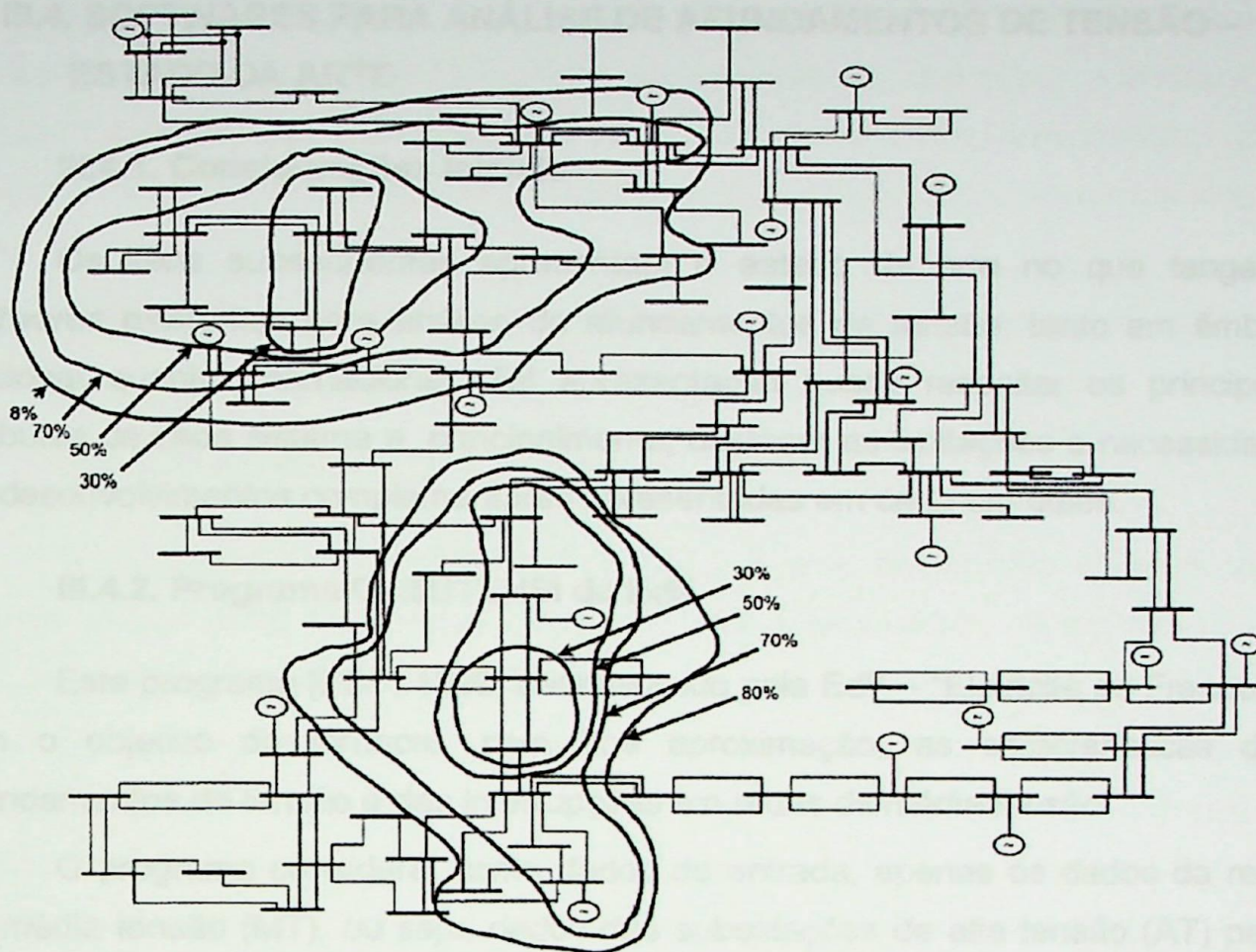


Figura III.5 – Áreas de vulnerabilidade para duas determinadas barras [QADER, 1999].

Uma vez conhecida a extensão da área de vulnerabilidade, representada pela quilometragem de linhas de transmissão e de distribuição pode-se, a partir das taxas de falta nas linhas, estimar o número esperado de desligamentos anuais de um determinado consumidor sensível.

Para finalizar, em [QADER, 1999] os autores descrevem uma análise comparativa dos resultados obtidos considerando os métodos da distância crítica e das posições de falta para um mesmo sistema, concluindo que é possível se utilizar o método da distância crítica em grandes sistemas de transmissão desde que sejam aceitos resultados aproximados. Quando se requer maior precisão, o método do curto-deslizante é o mais recomendado.

III.4. SOFTWARES PARA ANÁLISE DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO – ESTADO DA ARTE

III.4.1. Considerações Iniciais

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 um deles.

III.4.2. Programa CREUTENSI da EdF

Este programa [EDF, 1993] desenvolvido pela EdF – “Electricité de France” – tem o objetivo de fornecer, com boa aproximação, as características dos afundamentos de tensão e das interrupções em redes 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) para média tensão, transformadores AT / MT, cabos de média tensão (comprimento, seção, natureza, etc.) e subestações de média tensão para baixa tensão. Desta forma, é desconsiderada na análise a possibilidade de faltas na baixa tensão ou em sistemas de média tensão adjacentes.

Como fontes de informação, o *software* utiliza, basicamente, dois tipos de dados:

- Faltas na Alta Tensão: a Divisão de Transmissão da EdF fornece os dados dos registros de medição e o número de chaveamentos dos disjuntores;
- Faltas na Média Tensão: deve-se dispor dos diagramas de tempo dos ciclos de religamentos, do número anual de religamentos e número final de desligamentos por alimentador (números fornecidos pelos contadores de chaveamentos dos disjuntores);

O cálculo da amplitude dos afundamentos é baseado no método das posições de falta. Uma grande dificuldade comentada pelo autor é propor a distribuição das posições das faltas ao longo de cada alimentador a fim de retratá-

las adequadamente. Quando as faltas são temporárias, não há como saber esta localização. A solução adotada é utilizar alguns padrões, tais como: a distribuição uniforme; extrapolação destes locais a partir dos registros das faltas permanentes, os quais são conhecidos; distribuição aleatória ou segundo conhecimento prévio da rede.

Para o cálculo da duração dos AMTs são utilizados os tempos de extinção da falta.

III.4.3. 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 intermediárias, correspondentes às progressivas implementações da arquitetura do *software*. A versão final do programa, conforme mostrado na Figura III.6, considera ocorrências de curtos-circuitos em linhas de transmissão, barramentos e transformadores e permite analisar certas falhas de operação de equipamentos, como falha na abertura de disjuntores. Também é possível realizar análises de afundamentos de tensão, interrupções de curta e longa duração.

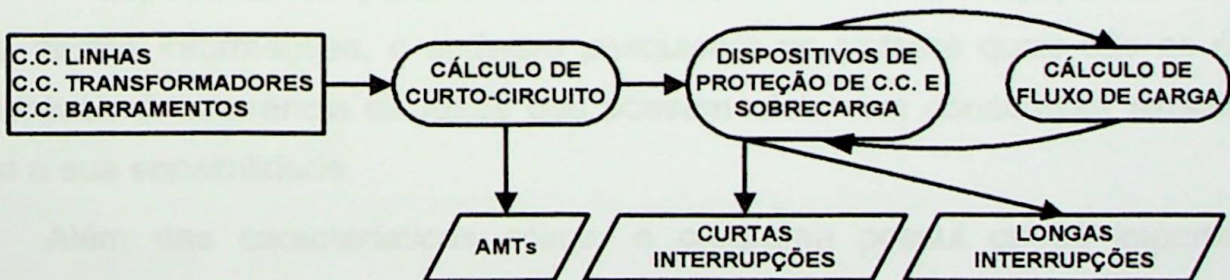


Figura III.6 – CALIFE: Release 3.

III.4.4. 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".

As etapas básicas de utilização do VSAT para a previsão de desempenho de uma determinada barra do sistema, sob o enfoque de afundamentos de tensão, são:

- Abrir/criar um novo banco de dados de afundamentos de tensão;
- Importar dados de curto-circuito previamente gerados no “*Aspen OneLiner*” [ASPEN, 2000]. Caso o usuário esteja interessado nos efeitos de faltas apenas no sistema de distribuição, este passo pode ser dispensado;
- Visualizar dados de curto-circuito importados do “*Aspen OneLiner*”;
- Calcular faltas nos sistemas de distribuição. Quando os dados do sistema de distribuição não fazem parte do sistema de transmissão processado, mas o efeito das faltas nas linhas de distribuição acopladas a uma barra comum for considerado importante, estes dados podem ser inseridos e as faltas calculadas;
- Introduzir ou alterar dados de faltas do sistema de transmissão. As taxas de falta podem ser informadas individualmente ou para grupos de linhas de transmissão pertencentes a uma determinada classe de tensão;
- Indicar os tipos de faltas a serem aplicados, especificar como a carga crítica está conectada e determinar como o desempenho será calculado e exibido graficamente;
- Especificar os parâmetros de sensibilidade de um equipamento. Com base nestas informações, o *software* pesquisará no sistema quais são as áreas vulneráveis à ocorrência de faltas que possam afetar um consumidor específico, dada a sua sensibilidade.

Além das características acima, o programa possui outros 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.

III.4.5. Programa VSAG da Pacific Gas and Electric Company

A aplicação integrada VSAG foi desenvolvida e implementada pela "Pacific Gas and Electric Company, San Francisco, California" [LIU, 1997] para analisar afundamentos de tensão associados a faltas ocorridas em alimentadores de distribuição. Uma qualidade deste programa é a integração de dados históricos de interrupções a algoritmos de cálculos e avançada capacidade gráfica.

O objetivo deste aplicativo é o de utilizar o histórico de informações do sistema para calcular, através de um algoritmo analítico, os afundamentos de tensão ocorridos em consumidores individuais do sistema, visando fornecer informações úteis tanto para a concessionária quanto para os seus consumidores.

O programa VSAG possui três componentes principais:

- Análise de curto-circuito: é o componente responsável pelo cálculo das tensões mediante aplicações de faltas. Permite simular todos os tipos de falta, inclusive as simultâneas. Para representação das cargas existem três possibilidades: impedância constante, corrente constante ou, simplesmente, desprezá-las;
- Interface gráfica com o usuário (GUI): baseada na estrutura CAD (*Computer Aided Drawing*), permite a exibição em mapas geográficos das linhas de transmissão e distribuição, ruas, subestações, etc. Neste mesmo mapa é possível visualizar, ao final do processamento, as áreas de vulnerabilidade. Esta interface possui sistema aberto para integrar bancos de dados, desenhos gráficos, aplicações em "Fortran" e ferramentas do "Microsoft Office";
- *Software* de integração de aplicações: gerencia a execução da aplicação e controla o fluxo de informações das diferentes plataformas, possibilitando o seu intercâmbio. Busca as informações do banco de dados do sistema de distribuição, do banco de dados de interrupções e as entradas manuais do usuário e as integra em um ambiente "Unix" para "Windows".

Com o objetivo de fornecer uma solução mais precisa na análise de curtos-

circuitos no sistema de distribuição, as tensões pré-falta são calculadas por um programa de fluxo de potência trifásico para sistemas de distribuição em tempo real, com parâmetros de carga sazonal apropriados. Alternativamente, em situações onde se possui sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), a tensão pré-falta é registrada por equipamentos apropriados e, portanto, torna-se desnecessário o cálculo do fluxo de potência.

O procedimento de execução do *software* pode ser sintetizado da seguinte forma:

- Através da interface gráfica, o usuário informa o consumidor de interesse e o período de tempo a ser estudado;
- O *software* de integração pesquisa os bancos de dados nas estações de trabalho remotas, prepara as informações necessárias e desencadeia o processamento do programa de análise de curto-circuito;
- Os resultados obtidos são gravados no microcomputador do usuário em padrão "*Microsoft Access*", "*Excel*" ou "*Word*";
- A interface gráfica recupera os resultados e os exibe em mapas geográficos com os alimentadores de distribuição, identificando inclusive as linhas de contorno representando áreas de vulnerabilidade. Também são fornecidos gráficos estatísticos dos afundamentos de tensão.

Como melhorias do programa, os autores [LIU, 1997] propunham:

- Incorporação do cálculo da duração dos afundamentos de tensão utilizando dados de operação dos dispositivos de proteção;
- Integração com os bancos de dados de instrumentos de monitoração de qualidade da energia;
- Previsão da frequência de ocorrência dos afundamentos de tensão baseada em estatísticas de falta;
- Cálculo de índices de afundamentos de tensão para o sistema e para consumidores individuais;
- Determinação do impacto de defeitos no sistema de transmissão nos afundamentos de tensão na distribuição.

III.4.6. 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 faltas 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.

III.4.7. Programa ANAQUALI do Cepel

O programa ANAQUALI [ROMERO, 2003], 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 para o 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.

III.4.8. Programa VISAGE do GQEE

O programa computacional VISAGE desenvolvido no âmbito do Grupo de Estudos em Qualidade de Energia Elétrica da Universidade Federal de Itajubá [ABREU, 1999], [CARVALHO FILHO, 2000], [NORONHA, 1999] destina-se à

análise de afundamentos de tensão devido à ocorrência de faltas em sistemas elétricos, calculando índices de desempenho para barras individuais ou para o sistema global.

A sistemática utilizada para o cálculo dos afundamentos de tensão tem, como base, o método das posições de falta, ou curto-circuito deslizante, conforme descrito no início deste capítulo.

A base de dados do programa é constituída por:

- Informações associadas à análise de faltas ao longo das linhas do sistema elétrico, contemplando as correntes de curto-circuito nos pontos de defeito e as tensões nos barramentos monitorados;
- Comprimento, taxas de falta e informações relativas ao sistema de proteção das linhas de transmissão;
- Características das cargas / processos nas barras dos consumidores de interesse, destacando-se: sensibilidade da carga no plano tensão - tempo, demanda, fator de carga, tempo médio de retomada de produção e custo médio por interrupção, visando o cálculo de indicadores de desempenho, conforme proposto em [CARVALHO FILHO, 2000].

Os principais produtos gerados pelo *software* são:

- Visualização gráfica e numérica do comportamento das tensões nos barramentos monitorados, durante a ocorrência de faltas ao longo das linhas de transmissão. Este tipo de informação é de substancial importância para delimitar a área de vulnerabilidade vista a partir de uma certa barra de interesse;
- Análise do desempenho do sistema em função da frequência de ocorrência de afundamentos de tensão num determinado barramento, incluindo o fornecimento da função densidade e função distribuição de probabilidade das tensões no barramento em análise, para cada linha do sistema, por classe de tensão das linhas e também por tipo de falta;
- Análise do desempenho do sistema para uma sensibilidade específica da carga do consumidor, fornecendo os seguintes índices de desempenho: disponibilidade e indisponibilidade da carga ou processo industrial, número esperado de paradas de processo por ano, custo anual da interrupção do

consumidor, demanda e energia não distribuídas por parte da concessionária.

O programa, implementado em "*Visual Basic*" para ambientes "*Microsoft Windows 3.x*" e "*Windows 9x*", utiliza banco de dados tipo "*.mdb", compatível com "*Microsoft Access*", sendo composto de dois módulos básicos:

- Módulo de importação de dados de um estudo de curto-circuito;
- Módulo de tratamento dos dados e de cálculo dos índices de desempenho individuais por barras e globais do sistema.

O módulo de importação de dados gera um banco de dados "*.mdb" contendo as seguintes informações:

- Intensidade e ângulo das tensões (fase-fase e fase-neutro) nos barramentos de interesse;
- Intensidade e ângulo das correntes de curto-circuito nos pontos de defeito considerando os diversos tipos de falta simulados.

Tanto as tensões durante a falta como as correntes de defeito, são calculadas através de um programa de curto-circuito convencional, simulando-se as seguintes condições de defeito:

- Curtos-circuitos: trifásico, fase-fase, fase-fase-terra e fase-terra;
- Magnitude das tensões pré-falta iguais e diferentes de 1 p.u.;
- Valor de impedâncias de falta igual e diferente de zero;
- Tipo de conexão dos transformadores;
- Aplicação de curto-circuito deslizante nas linhas, considerando incrementos ajustáveis de 1 a 50% do comprimento das linhas.

O módulo de tratamento de dados, além de fornecer as estatísticas dos afundamentos de tensão para cada barra monitorada, sob a forma de gráficos e resultados numéricos, também calcula os índices de desempenho globais do sistema e por barramento a partir da leitura dos dados obtidos do módulo anterior, baseando-se nas características da carga, nas informações do sistema de proteção e nas estatísticas de faltas em linhas de transmissão.

A duração dos afundamentos de tensão é obtida em função da posição de falta na linha para o caso de relés de distância ou dos valores das correntes nos

pontos de defeito para os relés de sobrecorrente. Neste último caso, são consideradas as características de resposta tempo-corrente dos relés. Este tempo de atuação das proteções é ainda somado ao tempo de operação dos disjuntores para, assim, compor a estimativa da duração do evento.

O número esperado de afundamentos de tensão em cada segmento da linha, é calculado com base nas taxas de falta e no incremento do curto-circuito deslizante nas linhas. Admite-se que todos os locais de falta ao longo da linha são equiprováveis, obedecendo à distribuição uniforme.

III.4.9. Programa SCEAT da PUC-BH

A metodologia apresentada neste trabalho [ALVES, 2000], [FONSECA, 1999], [FONSECA, 2002] explora e complementa os procedimentos propostos pelo IEEE [CONRAD, 1991], [BECKER, 1994]. O programa SCEAT foi desenvolvido em “*Visual Basic*” e a proposta para o *software* é a de servir de interface entre o usuário, o programa de cálculo de curto-circuito e um banco de dados, além de efetuar os cálculos estatísticos necessários para a estimativa estocástica de afundamentos de tensão.

Como nas demais ferramentas, este *software*, para obter as intensidades dos afundamentos de tensão, utiliza uma ferramenta de análise de curto-circuito. As durações dos afundamentos de tensão são obtidas através dos tempos típicos de proteção utilizados em sistemas elétricos de potência. Para o cálculo da frequência de ocorrência dos afundamentos de tensão são utilizadas taxas médias de falhas nas linhas, bem como a distribuição percentual de cada tipo de falta.

Os autores ressaltam que o objetivo dos cálculos é a predição dos parâmetros dos afundamentos de tensão (número, intensidade e duração). Como a intensidade e a duração dos afundamentos de tensão dependem da localização do curto-circuito ao longo da linha, e esta é uma variável de natureza intrinsecamente aleatória, faz-se necessário que as posições dos curtos-circuitos sejam escolhidas de forma aleatória para que as simulações retratem melhor a realidade [ALVES, 2000], [FONSECA, 1999], [FONSECA, 2002]. Desta forma, a aleatoriedade deste fenômeno é tipicamente conhecida como processo estocástico, e o procedimento proposto no programa desenvolvido busca levar em consideração este fato,

conforme descrição apresentada na seqüência.

Primeiramente, são calculados os números de faltas FT, FF, FFT e FFF, de acordo com as taxas médias de falhas do sistema e o comprimento das linhas. Em seguida, estas faltas são alocadas de forma aleatória ao longo do sistema, de acordo com os seguintes critérios: linha com falta, tipo de falta, localização da falta em % a partir da barra de origem da linha com falta, barra monitorada, etc; posteriormente, os resultados (intensidade e duração) dos afundamentos simulados são importados por um programa de análise estatística. Estas simulações são repetidas quantas vezes forem necessárias para a definição da tendência do processo. É importante ressaltar que, cada simulação feita, equivale a um ano de estimativa para as ocorrências de afundamento.

Os resultados das simulações por barra monitorada são apresentados através de tabela de distribuição de freqüência no plano tensão x tempo, dividida em intervalos convenientes de amplitude e duração do afundamento de tensão convenientemente selecionados.

Cada célula desta tabela representa os valores médios de ocorrências de afundamentos de tensão, para um número n de anos de simulação. No entanto, sabe-se que, para o valor médio associado a cada célula, tem-se um erro de estimação que deve ser avaliado de acordo com critérios estatísticos.

Para cada célula da tabela, a média aritmética é calculada, anualmente, segundo a soma dos valores da amostra, dividida pelo número de observações, conforme equação (3.4):

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{n} \quad (3.4)$$

onde:

- X_i - i -ésimo elemento da amostra;
- n - tamanho da amostra.

O desvio padrão é calculado conforme a equação (3.5):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (3.5)$$

Para a estimação da média da população é utilizada a distribuição de “*t student*”. Esta é a distribuição adequada quando se precisa estimar a média de uma população mas não se conhece nem o seu desvio padrão, nem a sua distribuição. O primeiro passo é calcular o desvio padrão amostral, denominado de S , mediante a aplicação da equação (3.5). Neste caso, o desvio padrão amostral é usado como estimativa para o desvio padrão populacional.

O erro de estimação da média da população para uma amostra de tamanho n será calculado conforme equação (3.6). Este cálculo é feito através da escolha do coeficiente de “*t student*”, em função do intervalo de confiança α desejado.

$$\delta = \frac{t\alpha \cdot S}{\sqrt{n}} \quad (3.6)$$

onde:

- $t\alpha$ - argumento da função “*t student*” tabulado em função do intervalo de confiança α ;
- S - desvio padrão estimado;
- n - tamanho da amostra.

A média estimada μ do número de afundamentos de tensão em cada célula da tabela é calculada pela equação (3.7):

$$\mu = \bar{x} \pm \delta \quad (3.7)$$

Como uma implementação futura, os autores citam a incorporação de uma rotina de coordenação da proteção, a fim de precisar melhor os cálculos da duração dos afundamentos.

III.5. – ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS SOFTWARES APRESENTADOS

Com base nas informações obtidas a partir das análises qualitativas realizadas em cada um dos *softwares* apresentados, tiram-se as seguintes

conclusões:

- O programa de curto-circuito, sem exceção, é a ferramenta utilizada para o cálculo da intensidade dos afundamentos de tensão em todos os *softwares* analisados;
- Apenas a metade dos programas consultados possui uma ferramenta própria para cálculo de curto-circuito. Os demais utilizam os resultados dos cálculos executados por ferramentas já existentes, integrando-as aos seus sistemas;
- O método das posições de falta, também denominado de curto-circuito deslizante, é utilizado em cinco entre os oito sistemas consultados;
- A estimativa do número de ocorrências de afundamentos de tensão é calculada com base nas taxas médias de falta de linhas de transmissão;
- A duração dos afundamentos é estimada a partir de dados do sistema de proteção. Somente os programas CREUTENSI, CALIFE, VISAGE e SCEAT oferecem esta funcionalidade;
- A maioria dos programas analisados considera distribuição uniforme da localização de falta ao longo das linhas do sistema. Somente o programa SCEAT leva em conta a aleatoriedade das posições de falta;
- Somente o VISAGE executa cálculos de indicadores individuais por barra e globais do sistema com base nos dados de sensibilidade da carga;
- Os aplicativos desenvolvidos pelo PTI e PG&E e o programa CALIFE integram, em um único pacote computacional, os programas de fluxo de carga e curto-circuito.

Na Tabela III.1 é apresentada uma análise comparativa entre os *softwares*, considerando-se algumas das principais características necessárias no que diz respeito a afundamentos de tensão.

Tabela III.1 – Análise comparativa dos *softwares* analisados.

Itens de avaliação	CREUTENSI	CALIFE	EPRI- ELECTROTEK	PG&E
Utilização do método de curto-circuito para o cálculo da amplitude dos AMTs	SIM	SIM	SIM	SIM
Pacote computacional com curto-circuito integrado ao fluxo de carga	NÃO	SIM	NÃO	SIM
Importação de dados do programa de curto-circuito	Desnecessário	Desnecessário	SIM – (Aspen OneLiner)	Desnecessário
Cálculos de índices do sistema considerando a sensibilidade da carga	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
Cálculo da área de vulnerabilidade	NÃO	NÃO	SIM	SIM
Cálculo da duração considerando os dados de proteção	SIM	SIM	NÃO	NÃO
Considera a influência da posição da falta	Simula somente as faltas registradas em histórico	NÃO	Curto deslizante segundo IEEE	Simula somente as faltas registradas

Itens de avaliação	PTI	ANAQUALI	VISAGE	PUC-BH
Utilização do método de curto-circuito para o cálculo da amplitude dos AMTs	SIM	SIM	SIM	SIM
Pacote computacional com curto-circuito integrado ao fluxo de carga	SIM	NÃO	NÃO	NÃO
Importação de dados do programa de curto-circuito	Desnecessário	SIM- (Anafas)	SIM	SIM-(Anafas)
Cálculos de índices do sistema considerando a sensibilidade da carga	NÃO	NÃO	SIM	NÃO
Cálculo da área de vulnerabilidade	SIM	SIM	SIM	SIM
Cálculo da duração considerando os dados de proteção	NÃO	NÃO	SIM	SIM
Considera a influência da posição da falta	Curto deslizante segundo IEEE	Curto deslizante segundo IEEE	Curto deslizante considerando distribuição uniforme	Sorteio aleatório das posições de falta

III.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em função da aleatoriedade de ocorrências de afundamentos de tensão, os métodos de simulação, quando comparados com a medição, apresentam-se como uma boa alternativa para se obter, estatisticamente, os seus parâmetros.

O método de simulação de faltas é o mais utilizado e parte do pressuposto que a maioria dos afundamentos de tensão é originária de curtos-circuitos na rede. Desta forma, torna-se natural utilizar programas de curto-circuito para a determinação da intensidade dos afundamentos de tensão, cujo modelo é linear, permitindo solução direta, não iterativa, e com baixo esforço computacional.

Tomando como base a apresentação dos *softwares* para análise de afundamentos de tensão, pode-se destacar algumas necessidades de desenvolvimentos adicionais nas ferramentas apresentadas, a saber:

- Integração, em uma única ferramenta, das análises retrospectivas e prospectivas;
- Possibilidade de análises prospectivas executadas através do curto-circuito deslizante ou através de simulações utilizando o Método de Monte Carlo, onde a aleatoriedade dos curtos-circuitos pode ser retratada em todos os seus aspectos;
- Possibilidade de simulação de curtos-circuitos tanto em linhas de transmissão e distribuição quanto em barramentos;
- Possibilidade de implementação das diversas filosofias dos sistemas de proteção, a fim de melhor caracterizar o tempo de eliminação das faltas. Deve-se atentar para as distintas práticas utilizadas, tanto em sistemas de transmissão quanto em sistemas de distribuição;
- Possibilidade de caracterização dos afundamentos de tensão segundo as metodologias alternativas, complementando a caracterização pelo método clássico utilizada pela grande maioria dos *softwares* consultados;
- Integração das ferramentas de cálculo de fluxo de potência, curto-circuito e análise de afundamentos de tensão em um único pacote, permitindo a análise da influência dos diversos regimes de carga e, conseqüentemente, da tensão pré-falta nas características dos afundamentos de tensão;

Uma vez identificadas as principais limitações dos *softwares* existentes, o próximo capítulo desta dissertação é dedicado à proposição e implementação de um novo sistema de *software* para análise de afundamentos de tensão.

IV. PROPOSIÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE SOFTWARE

IV.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O capítulo anterior mostrou que, apesar da disponibilidade atual de diversas ferramentas para análise de afundamentos de tensão, ainda persistem várias lacunas que carecem de desenvolvimentos complementares, de forma a retratar, com maior fidelidade, as características deste fenômeno. Com o intuito de contemplar algumas destas lacunas, surge a proposta do sistema de *software* contida neste documento e que se constitui na principal contribuição desta dissertação.

Neste contexto, o *software* ora proposto é dedicado a:

- Integrar em um único sistema de *software* as possibilidades de análise retrospectiva e prospectiva;
- Possibilitar que as análises prospectivas possam ser executadas de acordo com o método do curto-circuito deslizante e/ou método estocástico;
- Ampliar as possibilidades de representação do sistema de proteção, incorporando a teleproteção, a proteção de distância, a proteção de sobrecorrente a tempo definido e a tempo inverso, religadores e fusíveis;
- Possibilitar a representação da sensibilidade da carga pelos métodos não-convencionais tais como: perda de tensão e perda de energia.

Assim sendo, a proposta deste novo sistema de *software* visa suprir algumas das carências apresentadas pelos *softwares* existentes, vindo ao encontro das necessidades atuais do setor elétrico, tanto em nível das concessionárias, quanto dos consumidores, principalmente os industriais.

É importante ressaltar que o desenvolvimento deste sistema de *software* é objeto de um Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Light Serviços de Eletricidade S.A. através de convênio firmado com a FUPAI – Fundação de Pesquisa e Assessoramento à Indústria, fundação esta ligada à Universidade Federal de Itajubá. Tal desenvolvimento divide-se nas seguintes etapas:

- Análise dos requisitos e descrição das funcionalidades executadas em conjunto pelas três equipes: GRES, GQEE e Light;
- Projeto e implementação computacional, desenvolvidos pela equipe do GRES;
- Testes e validação da metodologia utilizada, executados pelas equipes do GQEE e GRES.

Além desta dissertação, o P&D em questão prevê, como resultado, um segundo trabalho de mestrado na área de engenharia de *software*.

IV.2. PROPOSTA DO SISTEMA DE SOFTWARE

A apresentação do estado da arte sobre os *softwares* para análise de fundamentos de tensão realizada no Capítulo III mostrou que, todas as ferramentas atualmente desenvolvidas, utilizam como base de dados os resultados de cálculo de curto-circuito. Além disto, o método das posições de falta é o procedimento de cálculo mais utilizado. Desta forma, seguindo a tendência atual, a proposta de *software*, ora apresentada, também utilizará o método das posições de falta associado a um programa convencional de cálculo de curto-circuito.

Vale ressaltar que será adotada como premissa, no desenvolvimento deste sistema, a utilização do programa ANAFAS [CEPEL, 1998], por se tratar de uma ferramenta de cálculo de curto-circuito já consolidada e amplamente utilizada pelas concessionárias do sistema elétrico brasileiro. Adicionalmente, o programa ANAFAS já dispõe de uma subrotina para o cálculo de curto-circuito deslizante. Portanto, este desenvolvimento não contemplará a implementação de um programa específico para cálculo de curto-circuito.

A principal base de dados será obtida do programa ANAFAS, onde são simulados curtos-circuitos dos tipos trifásico, fase-terra, bifásico e bifásico-terra nos barramentos e ao longo de todas as linhas do sistema elétrico em estudo. Para as faltas em linhas, o usuário deverá determinar o passo do curto-circuito deslizante, ou seja, ajustar a distância entre duas faltas consecutivas, em % do comprimento da linha. Serão extraídos os resultados das correntes de falta por fase em cada uma das posições de falta e os valores das tensões fase-fase, fase-neutro e componentes seqüenciais para cada barra monitorada. Os resultados das

correntes serão utilizados para o cálculo da atuação dos dispositivos de proteção para posterior estimativa da duração dos eventos. Por outro lado, os valores das tensões serão submetidos ao processo de agregação de fases segundo proposta do “EPRI/ELECTROTEK” [SABIN, 2001] e, assim, determinarão a intensidade dos eventos.

De posse dos resultados de curto-circuito, serão necessárias algumas informações adicionais para possibilitar a execução das análises:

- Comprimento e taxa de falta das linhas de transmissão e distribuição, bem como a sua distribuição estatística;
- Taxa de falta de barramentos e sua distribuição estatística;
- Dados das cargas, como, por exemplo, sensibilidade frente a AMTs, demanda, fator de carga, custo de interrupção, tempo de retomada da produção;
- Dados de proteção, como o tipo da proteção utilizada bem como os seus ajustes.

A metodologia de cálculo empregada no *software* contemplará duas vertentes principais. A primeira diz respeito aos estudos retrospectivos, cuja funcionalidade principal é reproduzir o comportamento pretérito do sistema elétrico em estudo. A segunda trata dos estudos prospectivos, com vistas a estimar o comportamento futuro do sistema.

Os estudos retrospectivos terão o objetivo de retratar o comportamento passado de um determinado sistema elétrico, com base em um relatório de ocorrências de faltas. Buscar-se-á calcular o desempenho passado de determinadas barras do sistema, tendo em mãos o relatório de faltas da concessionária durante um certo período de tempo, como por exemplo, um ano. Este estudo permitirá avaliar, por exemplo, se a reclamação de um determinado consumidor tem procedência ou não.

Esta possibilidade de análise é de muita utilidade para as concessionárias como forma alternativa ao monitoramento da tensão nos consumidores. Tal prática torna-se inviável, economicamente, devido à necessidade de grandes investimentos financeiros e longos períodos de medição, sobretudo quando se deseja obter estatísticas precisas acerca dos parâmetros dos afundamentos de

tensão.

Os estudos prospectivos terão o objetivo de estimar o comportamento futuro do sistema elétrico e podem ser classificados em duas vertentes: estudos baseados na metodologia do curto-circuito deslizante e estudos baseados em cálculos estocásticos de afundamentos de tensão [FONSECA, 1999]. Neste último caso, o sistema de *software* se encarregará de construir uma lista de ocorrências através de sorteio de seus dados e, posteriormente, buscará no banco de dados apenas as informações relativas às ocorrências sorteadas.

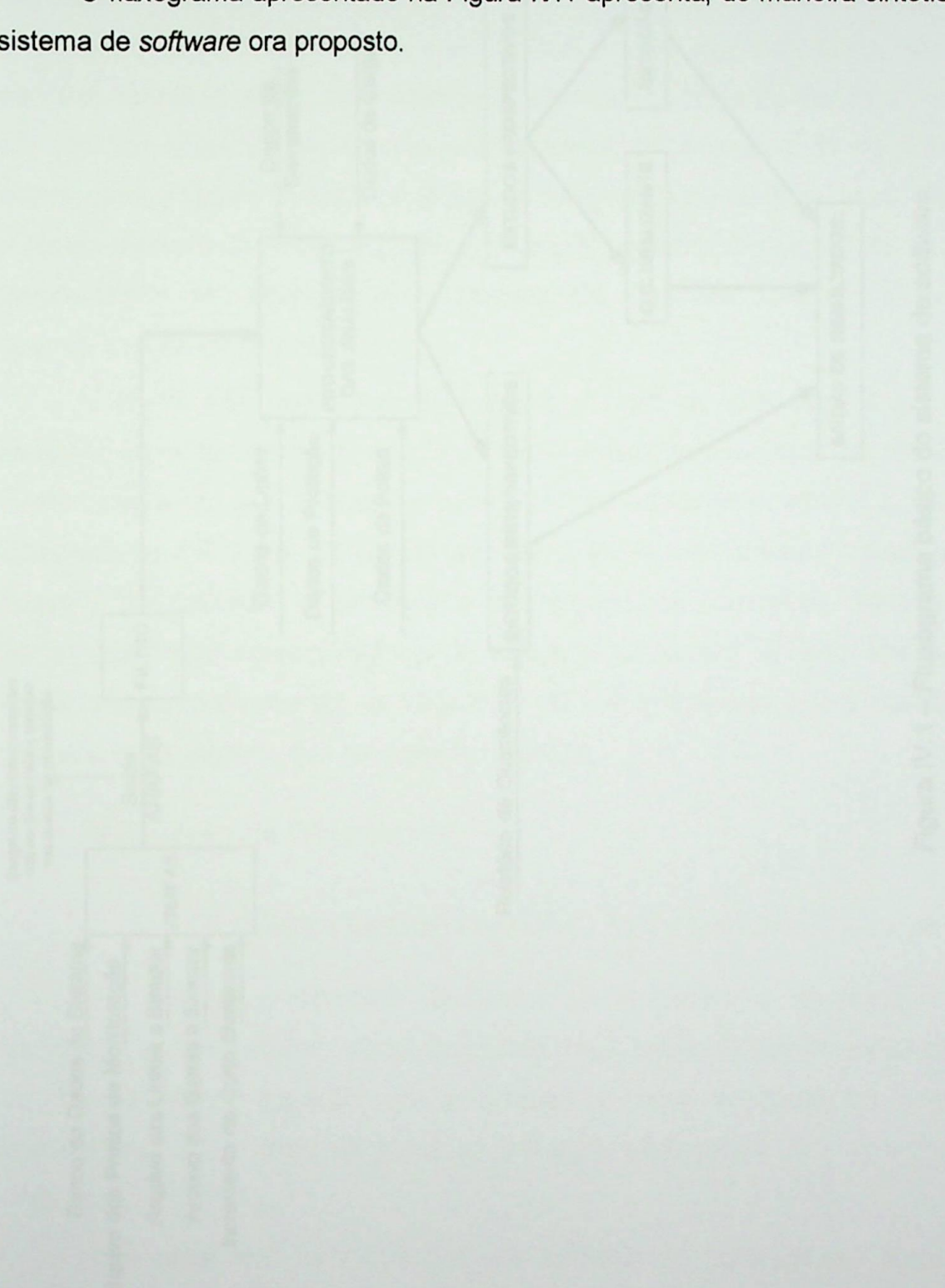
O principal objetivo dos estudos prospectivos é a previsão do comportamento futuro do sistema visando, por exemplo, selecionar o barramento de melhor desempenho para a instalação de uma nova planta industrial com cargas sensíveis a afundamentos de tensão.

O sistema de *software* deverá disponibilizar diversas funcionalidades para apresentação de resultados, destacando-se:

- Diagrama fasorial das tensões fase-fase ou fase-neutro nas barras de interesse;
- Visualização gráfica e numérica do comportamento das tensões e/ou correntes de falta e/ou duração nos barramentos de carga monitorados durante a ocorrência de faltas ao longo das linhas de transmissão. Este tipo de informação é de substancial importância para executar a delimitação da área de vulnerabilidade vista pelo consumidor;
- Análise do desempenho do sistema em função da frequência de ocorrência de afundamentos de tensão em um determinado consumidor, incluindo o fornecimento das funções densidade e distribuição de probabilidade da intensidade e/ou duração do AMT no barramento do consumidor para cada linha do sistema, por classe de tensão das linhas e também por tipo de falta;
- Análise do desempenho do sistema para uma sensibilidade específica da carga do consumidor, fornecendo os índices de desempenho: disponibilidade (indisponibilidade) da carga ou processo industrial, número esperado de paradas de processo por ano, custo anual da interrupção do consumidor, demanda e energia não distribuída por parte da concessionária.

- Relatório apresentando a porção de cada linha de transmissão e distribuição contida na área de vulnerabilidade de cada carga analisada;
- Curvas “iso-sags”;
- Gráficos estatísticos da distribuição percentual de algumas importantes variáveis determinantes das características dos eventos;

O fluxograma apresentado na Figura IV.1 apresenta, de maneira sintética, o sistema de *software* ora proposto.



IV.3. METODOLOGIA DE CÁLCULO

IV.3.1. Estudos Retrospectivos

Para permitir o processamento dos cálculos em um estudo do tipo retrospectivo, é preciso que o usuário, inicialmente, crie uma lista com os dados das faltas a analisar. Para cada evento é necessário que seja informada a linha com falta, a respectiva posição do curto na linha e o tipo do curto-circuito. No caso de faltas em barramentos, deve-se informar apenas o barramento com falta e o tipo do curto. Em seguida, deve-se selecionar as barras de carga a serem monitoradas e o respectivo tipo de tensão monitorada, ou seja, fase-fase ou fase-neutro. Assim, o processamento dos cálculos pode ser conduzido e, desta forma, os relatórios de apresentação de resultados são disponibilizados para que o usuário selecione apenas aqueles de seu interesse.

Vale ressaltar que a determinação da posição de falta esbarra em uma limitação inerente ao cálculo do curto-circuito deslizante executado no ANAFAS. Neste programa, não é possível determinar um incremento inferior a 1% do comprimento das linhas. Conseqüentemente, o sistema de *software* desenvolvido somente disponibilizará as posições de falta segundo tal incremento. Desta forma, ao se determinar cada ocorrência do estudo retrospectivo, deve-se executar o arredondamento da posição de cada falta, de forma a permitir que a ocorrência seja analisada, mesmo que de forma aproximada.

IV.3.2. Estudos Prospectivos

IV.3.2.1. Cálculos Baseados no Método do Curto-Circuito Deslizante

Os estudos prospectivos baseados na metodologia do curto-circuito deslizante, buscam estimar o comportamento futuro médio de determinadas barras do sistema elétrico. Para isto, são analisados os curtos simulados em todos os barramentos e ao longo de todas as linhas, a cada passo fixo, previamente determinado.

Vale dizer que os resultados dos cálculos do curto-circuito deslizante fornecem a base para as análises das demais metodologias. Tais informações são

armazenadas em um banco de dados a fim de permitir o posterior acesso por parte das rotinas de cálculo das análises desta metodologia, bem como das análises estocásticas e retrospectivas.

Demais informações acerca da metodologia de cálculo do curto-circuito deslizante podem ser encontradas na Seção III.3.

IV.3.2.2. Cálculos Baseados na Metodologia para Cálculos Estocásticos

Os estudos prospectivos baseados na metodologia estocástica para cálculo de afundamentos, não consideram todos os curtos-circuitos simulados, como o faz a metodologia baseada no curto-circuito deslizante. Todas as características das faltas são sorteadas considerando o período de simulação selecionado pelo usuário, em anos. O processo de sorteios tem como base a simulação de Monte Carlo [FISHMAN, 1995] e utiliza o método da transformada inversa da função distribuição das variáveis aleatórias, para determinar o valor de cada variável sorteadas. Neste sistema, as variáveis sorteadas são: componente com falta (barra ou linha), posição e tipo da falta.

Para a seleção das linhas, o sorteio é conduzido com base na distribuição de probabilidades uniforme e a ponderação para cada linha é realizada pelo resultado do produto da taxa de falta pelo comprimento da respectiva linha. Desta forma, a probabilidade $p(j)$ da linha j ser sorteadas é dada pela expressão (4.1).

$$p(j) = \frac{\lambda_j \cdot \frac{l_j}{100}}{\sum_{i=1}^k \lambda_i \cdot \frac{l_i}{100} + \sum_{b=1}^m \lambda_b} \quad (4.1)$$

onde:

- λ_i = taxa de falta da linha, em n° de faltas/100km/ano;
- l_i, l_j = comprimento da linha, em km;
- λ_b = taxa de falha dos barramentos, em n° de faltas/barramento/ano;
- k = número de linhas simuladas no sistema;
- m = número de barramentos simulados no sistema.

No caso de barramentos, a probabilidade de uma dada barra z ser sorteada é dada pela expressão (4.2):

$$p(z) = \frac{\lambda_z}{\sum_{i=1}^k \lambda_i \cdot \frac{l_i}{100} + \sum_{b=1}^m \lambda_b} \quad (4.2)$$

Caso este sorteio resulte em uma falta em linha, o passo seguinte é a determinação da posição de falta. Para isto, é considerada a distribuição de probabilidades uniforme, onde todas as posições das linhas são equiprováveis. Porém, isto não exclui a possibilidade de utilização de outras distribuições para as posições de falta. Pode-se, por exemplo, alterar as probabilidades de ocorrência para alguns trechos das linhas, criando-se vários patamares de probabilidades, como apresentado na Figura IV.2. No entanto, vale ressaltar que a área abaixo da curva deve manter-se unitária.

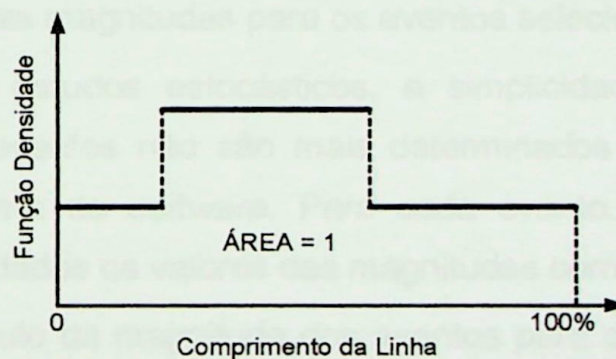


Figura IV.2 – Função densidade de probabilidades das posições de falta.

Desta forma, tendo-se determinado a linha ou barra a ser analisada e a posição da falta nas linhas, resta ao *software* determinar o tipo da falta a ser simulado. A ponderação de cada tipo de falta para o sorteio é determinada pela distribuição percentual informada pelo usuário para cada linha e barra.

Uma vez determinadas todas as condições para o sorteio, o *software* executa, automaticamente, a geração de números aleatórios para determinar as características de cada falta. Este processo de sorteio se repete quantas vezes for necessário até que se atinja o número total de faltas esperado por ano de operação do sistema elétrico estudado, conforme expressão (4.3) :

$$n_{\text{sorteios}} = \sum_{i=1}^k \lambda_i \cdot \frac{l_i}{100} + \sum_{b=1}^m \lambda_b \quad (4.3)$$

Caso o usuário selecione mais de um ano de simulação, este procedimento se repete diversas vezes, até que o número de anos determinado pelo usuário seja atingido.

Nos próximos itens será apresentada a forma de obtenção dos três principais parâmetros dos afundamentos: magnitude, duração e frequência de ocorrência.

IV.3.3. Cálculo da Magnitude

Para os estudos retrospectivos, o cálculo da magnitude é muito simples: visto que o banco de dados do *software* já possui os resultados das tensões para todos os eventos simulados segundo o curto-circuito deslizante, basta que sejam tomados os valores das magnitudes para os eventos selecionados pelo usuário.

No caso dos estudos estocásticos, a simplicidade se repete; a única diferença é que os eventos não são mais determinados pelo usuário, mas sim sorteados pelo sistema de *software*. Para cada evento, basta que o *software* busque no banco de dados os valores das magnitudes correspondentes.

Por fim, o cálculo da magnitude dos eventos para os estudos baseados no curto-circuito deslizante exige processamentos adicionais; como cada linha é seccionada em vários trechos, surge a necessidade de se atribuir apenas um valor de magnitude para cada um destes trechos. Para isto, há algumas possibilidades: tomar o valor correspondente ao início do intervalo, o valor do final do intervalo e por último, o valor médio das tensões dos limites do intervalo. Neste *software* optou-se por atribuir ao intervalo o valor médio das magnitudes dos extremos. Por exemplo, utilizando-se um passo de 1% para o curto deslizante, a magnitude do afundamento para o primeiro trecho da linha será dada pela média das magnitudes da posição 0% e da posição 1%.

IV.3.4. Cálculo da Duração

Pretende-se com este *software*, suprir uma carência existente nas demais

ferramentas computacionais apresentadas no Capítulo III. Dentre os *softwares* consultados, apenas a metade deles considera, nas análises, a duração dos eventos. Por outro lado, nenhum deles possui rotinas específicas para cada filosofia de proteção utilizada nos sistemas elétricos de transmissão e distribuição.

Desta forma, para o cálculo da duração dos afundamentos, o sistema de *software* proposto necessita dos dados: tempos de atuação dos disjuntores, tipos de proteção e respectivos ajustes além das correntes de falta por fase.

Atualmente, existe um amplo leque de opções de relés dos mais diversos tipos e fabricantes; cada um deles possui as suas particularidades no que tange à nomenclatura de parâmetros, tempo de atuação, etc. Durante o desenvolvimento deste *software* optou-se por representar os diversos tipos de proteção de maneira típica, não considerando este ou aquele fabricante ou modelo de relé. Uma outra medida adotada com o intuito de facilitar as análises é o fato de sempre considerar valores de corrente de falta primária dos transformadores de corrente, evitando a necessidade de se considerar a relação de transformação dos mesmos.

Além dos ajustes das proteções, como comentado anteriormente, o usuário deve informar o tempo de atuação dos disjuntores para que, somando este valor ao tempo de atuação das proteções, obtenha-se a estimativa da duração dos eventos.

Esta primeira versão do sistema desenvolvido contempla as filosofias típicas de proteção utilizadas nos sistemas de transmissão, subtransmissão e distribuição [AYELLO, 1999]. Para os sistemas de transmissão são abordados, principalmente, os esquemas de teleproteção e distância; para os sistemas de subtransmissão são considerados os tipos de proteção de sobrecorrente, distância e teleproteção; nos sistemas de distribuição leva-se em conta a proteção do tipo sobrecorrente associada ou não a religadores e chave-fusível.

Assim sendo, é realizada uma classificação das proteções em três grupos: sobrecorrente, distância e tempo definido.

IV.3.4.1. Proteções a Tempo Definido

Nos casos em que o tempo de atuação da proteção independe das características da falta, conhecidos como proteção a tempo definido, o parâmetro

exigido pelo *software* será simplesmente o tempo de ajuste da proteção, em milissegundos. Este único valor já exprime a estimativa de atuação do sistema de proteção, não importando o nível de corrente de curto-circuito calculada ou a posição do curto na linha.

Estas proteções, a tempo definido, são principalmente utilizadas em sistemas de transmissão e subtransmissão. Alguns exemplos de proteções que se enquadram neste grupo são: teleproteção, fio piloto, diferencial de linhas e barras.

IV.3.4.2. Proteção de Distância

Neste caso não é suficiente que o usuário informe somente um parâmetro, como no tempo definido. Usualmente, este tipo de proteção utiliza a divisão da região de atuação em zonas e cada uma destas zonas possui o seu respectivo alcance e tempo de atuação. Alguns tempos típicos são apresentados na Tabela IV.1. Os alcances estão apresentados em % do comprimento da linha em que o relé está instalado. Somente será considerada neste *software*, a presença da primeira e segunda zonas de proteção, sendo necessário que o usuário informe os ajustes para o alcance e o tempo de atuação da primeira zona e o tempo de atuação da segunda zona. Será admitido que a segunda zona apenas complementa o alcance da primeira zona da linha protegida, não avançando sobre a linha seguinte. Portanto, neste *software*, o alcance da segunda zona será sempre de 100%.

Normalmente, as linhas apresentam relés instalados em suas duas extremidades; desta forma, para faltas localizadas próximas das extremidades, um dos relés atuará em sua primeira zona e o outro em segunda zona, causando uma reconfiguração temporária do sistema elétrico. No desenvolvimento desta versão do sistema de *software* será adotado, como primeira zona de proteção, aquela região intermediária das linhas onde é comum a atuação de ambos os relés em primeira zona; o restante da linha, próximo das duas extremidades, será adotado como sendo a segunda zona da proteção de distância. Por exemplo, para um alcance de 85% para a primeira zona, tem-se que faltas localizadas entre 15 e 85% do comprimento da linha serão eliminadas no tempo correspondente a esta zona; por outro lado, faltas entre 0 e 15%, ou entre 85 e 100% serão eliminadas pela

segunda zona.

Tabela IV.1 – Tempos típicos para proteção de distância.

Zona de proteção	Alcance (%)	Tempo de atuação (ms)
1ª	85	150
2ª	115	500

IV.3.4.3. Proteção de Sobrecorrente

A proteção por relés de sobrecorrente é a mais simples, mais barata e mais fácil de ser manipulada. É geralmente utilizada na proteção de faltas fase-fase ou fase-terra em subestações, linhas de distribuição, sistemas industriais e em sistemas de subtransmissão, onde não se pode justificar o custo de relés de distância.

Os tipos básicos das proteções de sobrecorrente são os seguintes:

- Tempo definido: utilizados quando a corrente de curto é praticamente constante ao longo da linha e, portanto, podem ter seu tempo de atuação ajustado, independentemente do valor da corrente;
- Tempo dependente da corrente: estes relés ainda podem ser classificados em quatro categorias: pouco inversa, normal inversa, muito inversa e extremamente inversa [IEC, 1996]. Um exemplo das curvas normal inversa para um tipo de relé de sobrecorrente está apresentado na Figura IV.3, onde o eixo das abscissas contém valores múltiplos da corrente de ajuste e o eixo das ordenadas os tempos de atuação correspondentes.

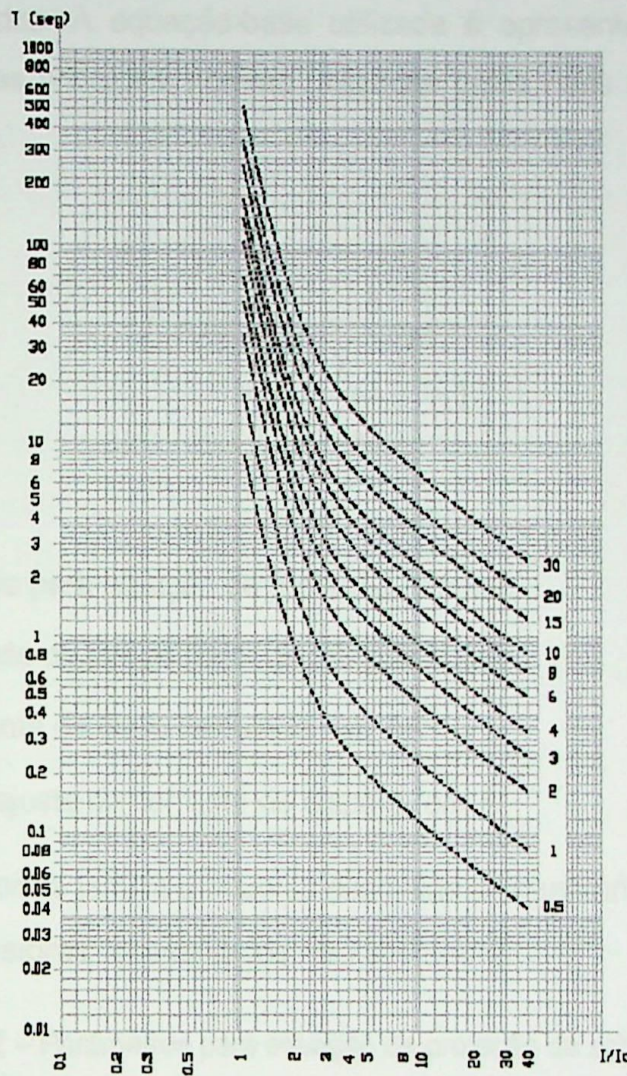


Figura IV.3 – Curvas de atuação da família normal inversa para relés de sobrecorrente.

Pode-se melhorar a proteção por sobrecorrente, diminuindo o tempo de remoção do curto para correntes elevadas, incorporando-se unidades instantâneas aos relés.

Para estimar a duração dos eventos, o usuário deve selecionar o tipo da curva utilizada, o ajuste de disparo do relé, e o ajuste de tempo da curva. Todos estes parâmetros se referem à região temporizada da curva, sendo também necessário que o usuário informe o ajuste da função instantânea. Estes ajustes devem ser informados para as seguintes situações: faltas envolvendo somente fases e faltas envolvendo também a terra. Vale ressaltar novamente que os ajustes devem ser fornecidos em valores primários de corrente.

Neste *software*, as famílias de curvas citadas anteriormente, são representadas por um conjunto de equações que se modificam à medida que os

ajustes são alterados. A equação-base utilizada é apresentada em (4.4) e foi retirada de uma das principais normas utilizadas pelos relés de proteção, a IEC 155-4 [IEC, 1996].

$$T = M \cdot \left[\frac{k}{\left(\frac{I}{I_{disparo}} \right)^E - 1} \right] \quad (4.4)$$

onde:

- T = tempo para atuação da proteção, em *ms*;
- M = ajuste de tempo (fator de multiplicação);
- I = corrente de curto calculada, em *A*;
- $I_{disparo}$ = ajuste da corrente de disparo, em *A*;

De acordo com a família de curvas escolhida pelo usuário, os parâmetros k e E assumem os valores apresentados na Tabela IV.2.

Tabela IV.2 – Parâmetros para equação da proteção de sobrecorrente.

Característica	k	E
Pouco Inversa	0,05	0,04
Normal Inversa	0,14	0,02
Muito Inversa	13,5	1,0
Extremamente Inversa	80	2,0

No tipo de proteção de sobrecorrente a tempo definido, não é necessária a aplicação da equação apresentada. Na região de atuação da unidade temporizada, o tempo é fixo no ajuste de tempo determinado pelo usuário. Da mesma forma que para as curvas de tempo inverso, também é necessário que o usuário informe o ajuste da unidade instantânea.

Vale ressaltar que o valor da corrente I a ser utilizado na equação (4.4) durante os cálculos do curto-circuito deslizante exigem a mesma consideração feita no cálculo da magnitude com relação à divisão das linhas em techos, vide seção IV.3.3. Da mesma forma, o valor de corrente a ser atribuído ao intervalo é a média das correntes de falta dos extremos do mesmo.

Apesar de fazer parte da proposta deste sistema de *software*, a implementação dos sistemas de proteção com religadores e elos fusíveis, tipicamente utilizados em sistemas de distribuição, foge ao escopo desta dissertação, sendo uma das importantes sugestões para implementações futuras.

IV.3.5. Cálculo da Frequência de Ocorrência

De acordo com o tipo de estudo a ser realizado, algumas particularidades surgem no cálculo da frequência de ocorrência de afundamentos. Assim, serão apresentados, individualmente, os cálculos relativos aos estudos prospectivos baseados no curto-circuito deslizante e estocástico e os estudos retrospectivos.

IV.3.5.1. Estudos Prospectivos – Método do Curto-Circuito Deslizante

Em se tratando de curtos-circuitos em barramentos, a estimativa da frequência de ocorrência é dada pelo próprio valor da taxa de falta do barramento.

Por outro lado, para se estimar a frequência de ocorrência de afundamentos devido a curtos-circuitos em linhas, deve-se proceder conforme (4.5):

$$N_n = \Delta L \cdot \lambda \quad (4.5)$$

onde:

- N_n é o número esperado de afundamentos de tensão associado à ocorrência de curtos-circuitos no segmento n da linha, em eventos / ano;
- ΔL é o incremento do curto-circuito deslizante, em km;
- λ é a taxa média de falta da linha, em eventos / km / ano.

Para se obter o valor da frequência total de ocorrência de afundamentos para uma determinada barra monitorada no sistema, basta que sejam somadas as contribuições individuais de cada linha e barramento onde a ocorrência de curtos-circuitos resulta em afundamentos de tensão.

IV.3.5.2. Estudos Prospectivos – Método Estocástico

Visto que no início do processo de sorteios é realizada uma ponderação para se obter a probabilidade de ocorrência de curtos-circuitos em cada

barramento ou segmento de linha, com base nas taxas de falta correspondentes, nos cálculos da frequência de ocorrência não é mais necessário que se considerem as taxas de falta destes equipamentos. Portanto, basta que para cada sorteio, seja executada a verificação do valor da magnitude do afundamento em cada barra monitorada; caso este valor esteja abaixo de 0,9 p.u., o valor da frequência de ocorrência é acrescido em uma unidade; caso contrário, tal valor permanece no seu estado anterior.

Desta forma, ao final dos sorteios, a média do número esperado de afundamentos para a(s) barra(s) monitorada(s) é dada pelo quociente entre o valor total acumulado da frequência de ocorrência para cada barra monitorada e o total de anos simulados.

Uma forma de o usuário limitar o número de sorteios é estabelecer, ao invés do período total de simulação, o erro percentual máximo admitido para o número total de afundamentos para cada barra; desta forma, ao final de cada ano, o erro cometido pelo processo de sorteio é calculado e verificado se a condição de convergência estabelecida pelo usuário é atingida.

Neste caso, será adotada a distribuição de “*t student*” que é, normalmente, utilizada quando se necessita estimar a média de uma população, porém, não se conhece a distribuição da mesma, nem tampouco seu desvio padrão. A função distribuição de “*t student*” apresenta dispersão ligeiramente maior que a distribuição normal para pequenas amostras ($n \leq 30$), e se aproxima da normal para grandes amostras ($n > 30$), conforme mostra a Figura IV.4 [TRIOLA, 1998].

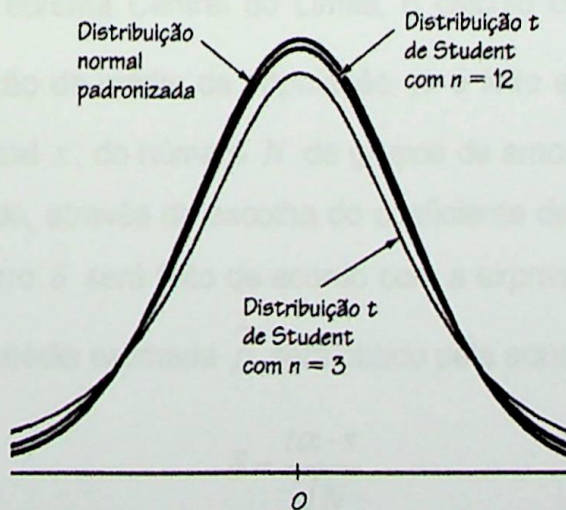


Figura IV.4 – Funções distribuição normal e “*t student*”.

Inicialmente, deve-se calcular a média amostral \bar{x} e o desvio padrão amostral s para toda a amostra de valores x_i , correspondentes a n anos de operação. Para que a distribuição de “*t student*” seja aplicável no caso de pequenas amostras, a distribuição da população deve ser essencialmente normal. Portanto, para possibilitar a aplicação desta distribuição, devem ser extraídas amostras, de mesmo tamanho, obtidas via sorteios, calculando-se as médias de cada uma destas amostras; a distribuição destas médias terá uma forte tendência a se aproximar da distribuição normal, independentemente da forma da distribuição da população original; a equação (4.6) apresenta o cálculo da média amostral e a equação (4.7) mostra o cálculo do desvio padrão amostral; para o cálculo da média, indiferentemente de se considerarem os próprios valores de cada sorteio ou as médias das amostras extraídas da população, o resultado será o mesmo; por outro lado, no cálculo do desvio padrão amostral, devem ser considerados somente os valores das N médias amostrais X_j , ao invés dos resultados dos sorteios [TRIOLA, 1998].

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (4.6)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (x_j - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (4.7)$$

Utilizando o Teorema Central do Limite, o cálculo do erro δ inerente ao processo de estimação da média da população $\hat{\mu}$ é feito em função do valor do desvio padrão amostral s , do número N de grupos de amostras e do intervalo de confiança α desejado, através da escolha do coeficiente de “*t student*” na Tabela IV.3. O cálculo do erro δ será feito de acordo com a expressão (4.8) e o intervalo de confiança para a média estimada $\hat{\mu}$ será obtido pela equação (4.9).

$$\delta = \frac{t\alpha \cdot s}{\sqrt{N}} \quad (4.8)$$

$$\hat{\mu} = \bar{x} \pm \delta \tag{4.9}$$

Para a escolha do argumento da função de “*t student*” na Tabela IV.3 [TRIOLA, 1998] deve-se observar o Grau de Liberdade, ou seja, o número de grupos de amostras menos uma unidade ($N - 1$), e o Intervalo de Confiança, o qual retrata a probabilidade do intervalo apresentado na equação (4.9) conter a verdadeira média populacional. Um intervalo de confiança de 90% significa que existe uma probabilidade de 0,90 (90%) de o intervalo conter a média populacional e, conseqüentemente, 10% de não conter, sendo 5% em cada cauda; isto significa que a área em cada cauda à esquerda e à direita é de 0,05.

Gr. de Liberdade	Intervalo de Confiança de 90%		Intervalo de Confiança de 95%		Intervalo de Confiança de 99%	
	t	t	t	t	t	t
1	6.314	6.314	6.314	6.314	6.314	6.314
2	2.920	2.920	2.920	2.920	2.920	2.920
3	2.353	2.353	2.353	2.353	2.353	2.353
4	2.145	2.145	2.145	2.145	2.145	2.145
5	2.015	2.015	2.015	2.015	2.015	2.015
6	1.943	1.943	1.943	1.943	1.943	1.943
7	1.895	1.895	1.895	1.895	1.895	1.895
8	1.858	1.858	1.858	1.858	1.858	1.858
9	1.833	1.833	1.833	1.833	1.833	1.833
10	1.812	1.812	1.812	1.812	1.812	1.812
15	1.753	1.753	1.753	1.753	1.753	1.753
20	1.729	1.729	1.729	1.729	1.729	1.729
25	1.708	1.708	1.708	1.708	1.708	1.708
30	1.697	1.697	1.697	1.697	1.697	1.697
40	1.684	1.684	1.684	1.684	1.684	1.684
50	1.676	1.676	1.676	1.676	1.676	1.676
60	1.671	1.671	1.671	1.671	1.671	1.671
70	1.667	1.667	1.667	1.667	1.667	1.667
80	1.664	1.664	1.664	1.664	1.664	1.664
90	1.662	1.662	1.662	1.662	1.662	1.662
100	1.661	1.661	1.661	1.661	1.661	1.661
∞	1.658	1.658	1.658	1.658	1.658	1.658

IV.3.5.2. Estudos Retrospectivos

A determinação da frequência de ocorrências para os estudos retrospectivos não se insere no processo estatístico. Porém, neste estudo, as falhas não são coletadas, mas sim determinadas pelo usuário. Vale que a relação de falhas informada pelo usuário é baseada em um histórico operacional de desenvolvimento para um certo período de operação do sistema, considerando-se a frequência de

Tabela IV.3 – Coeficientes para a distribuição de t student.

Graus de Liberdade	Área α na cauda superior				
	0,1	0,05	0,025	0,01	0,005
1	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657
2	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925
3	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841
4	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604
5	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032
6	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707
7	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499
8	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355
9	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250
10	1,371	1,812	2,228	2,764	3,169
11	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106
12	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055
13	1,35	1,771	2,160	2,650	3,012
14	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977
15	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947
16	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921
17	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898
18	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878
19	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861
20	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845
21	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831
22	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819
23	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807
24	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797
25	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787
26	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779
27	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771
28	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763
29	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756
30	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750
40	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704
60	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660
120	1,289	1,658	1,980	2,358	2,617
∞	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576

IV.3.5.3. Estudos Retrospectivos

A determinação da frequência de ocorrência para os estudos retrospectivos muito se assemelha ao processo estocástico, porém, neste estudo, as faltas não são sorteadas, mas sim determinadas pelo usuário. Visto que a relação de faltas informada pelo usuário é baseada em um histórico operacional da concessionária para um certo período de operação do sistema, o resultado final da frequência de

ocorrência será relativo a este período, não sendo necessário que se efetue a divisão pelo período total de observação.

IV.3.6. Cálculo dos Indicadores

O sistema de *software* desenvolvido calculará os indicadores de desempenho [CARVALHO FILHO, 2000] apresentados na Seção II.6.4.2, mostrando os seguintes resultados:

- Disponibilidade, indisponibilidade, freqüência de ocorrência de desligamentos, demanda não distribuída, energia não distribuída e custo do afundamento para cada barra de carga analisada;
- Todos os indicadores citados, porém com resultados médios para o sistema global;

Adicionalmente, será acrescentado o cálculo de um novo indicador, chamado de “Custo da Energia Não Distribuída”, o qual buscará retratar o montante que o consumidor deixará de pagar para a concessionária, enquanto o processo industrial estiver interrompido.

Também será apresentada a soma da Demanda Não Distribuída, Energia Não Distribuída, Custo da Energia Não Distribuída e Custo do Afundamento a fim de retratar o total de cada um destes indicadores para o sistema global.

IV.4. ESTRUTURA DO SISTEMA DE SOFTWARE

IV.4.1. Dados de Entrada

A categoria de dados denominada “dados de entrada” é composta pelos arquivos-texto necessários para o processamento dos cálculos de curto-circuito no programa ANAFAS [CEPEL, 1998]. Para maiores esclarecimentos, favor consultar o Anexo A.

Este primeiro e principal arquivo-texto contempla toda a descrição da topologia da rede elétrica; nele estão contidos os dados de barramentos, dados de circuitos e dados de impedâncias mútuas entre linhas.

Todos os demais arquivos necessários para o processamento do ANAFAS são construídos, interativamente, pelo usuário, através do *software* desenvolvido.

Após a importação dos dados de entrada do ANAFAS, o usuário deve acessar o formulário para cálculo de curto-circuito, o qual o auxilia na construção dos demais dados necessários para o processamento. A Figura IV.5 apresenta o formulário correspondente à seleção dos “Pontos de Monitoração”, “Faltas em Linhas” e “Faltas em Barras”.

Nro	Descrição
<input checked="" type="checkbox"/>	1 BARRA 01
<input type="checkbox"/>	2 BARRA 02
<input type="checkbox"/>	36 BARRA 36
<input type="checkbox"/>	40 BARRA 40
<input checked="" type="checkbox"/>	41 BARRA 41
<input type="checkbox"/>	48 BARRA 48
<input type="checkbox"/>	50 BARRA 50
<input type="checkbox"/>	56 BARRA 56
<input type="checkbox"/>	68 BARRA 68
<input type="checkbox"/>	69 BARRA 69

Passo %

Figura IV.5 – Formulário para cálculo de curto-circuito.

Na aba “Pontos de Monitoração”, o usuário deve selecionar, entre as barras disponíveis, quais aquelas que devem possuir suas tensões monitoradas. Vale ressaltar que somente estarão disponíveis para monitoração as chamadas barras externas ou barras reais; isto significa que as barras “*mid-point*”, utilizadas na modelagem de alguns transformadores, não serão exibidas neste formulário. Da mesma forma, as barras de derivação de linhas, “*line-taps*”, também não estarão disponíveis.

Nas abas “Faltas em Linhas” e “Faltas em Barras”, o usuário deve selecionar, respectivamente, quais as linhas (de transmissão e distribuição) e barras nas quais deseja que curtos-circuitos sejam simulados. Como condição padrão e inacessível para alterações do usuário, são simulados todos os tipos de falta (monofásicas, bifásicas, bifásicas-terra e trifásicas) em cada um destes componentes selecionados.

Finalmente, o último dado a ser preenchido neste formulário diz respeito ao passo incremental para a simulação do curto-circuito deslizante nas linhas selecionadas. É intuitivo dizer que, quanto menor o incremento utilizado, maior será o espaço requerido em disco para o armazenamento do banco de dados.

Realizados todos os preenchimentos e seleções necessárias, o usuário deve proceder ao cálculo do curto-circuito clicando em “Processar”; então o ANAFAS é processado em segundo plano e, automaticamente, o *software* comanda a importação dos resultados deste cálculo.

IV.4.2. Importação dos Resultados de Curto-Circuito

O processamento do ANAFAS se subdivide em quatro etapas:

- Simulação de curtos-circuitos em linhas orientada a ponto de monitoração;
- Simulação de curtos-circuitos em linhas orientada a ponto de falta;
- Simulação de curtos-circuitos em barras orientada a ponto de monitoração;
- Simulação de curtos-circuitos em barras orientada a ponto de falta.

Visto que cada uma destas etapas cria um arquivo de resultados distinto, é necessário que o *software* proceda à importação para o banco de dados das informações contidas nestes quatro arquivos de saída do ANAFAS.

As simulações orientadas a ponto de monitoração fornecem os resultados das tensões fase-fase, fase-neutro e seqüenciais, em módulo e ângulo, em cada uma das barras monitoradas para cada ponto de falta; por outro lado, as simulações orientadas a ponto de falta, fornecem os resultados das correntes de falta, em módulo e ângulo, em cada uma das fases para cada ponto de falta simulado. Entenda-se por ponto de falta cada um dos barramentos selecionados no passo anterior e cada uma das posições intermediárias das linhas, segundo incremento também selecionado anteriormente.

Depois de realizada a importação dos quatro arquivos de resultados de curto-circuito, o *software* comanda o processamento da agregação de fases, obtendo a mínima tensão remanescente em cada barra monitorada, para cada

ponto de falta.

Desta forma, os processamentos do ANAFAS são encerrados e todas as análises são conduzidas exclusivamente pelo *software* desenvolvido.

IV.4.3. Dados de Entrada Adicionais

O primeiro conjunto de informações adicionais diz respeito aos dados de proteção do sistema elétrico, onde somente os administradores do *software* possuem permissão para efetuar o cadastro de novos tipos de proteção. Como condição padrão, são disponibilizados os três tipos de proteção anteriormente apresentados: tempo definido, distância e sobrecorrente. Vale lembrar que as proteções dos tipos religadores e fusíveis não estão disponíveis nesta versão do *software*.

O usuário deve, obrigatoriamente, inserir os parâmetros das proteções cadastradas para cada barramento e linha de transmissão / distribuição considerada no estudo. A Figura IV.6 mostra a parametrização de uma proteção do tipo “TEMPO DEFINIDO”, onde são exigidos apenas os parâmetros “Tempo do disjuntor”, comum a todos os tipos de proteção, e “Ajuste TD”, onde deve ser informado o tempo de atuação desta proteção.

The screenshot shows a software window titled "Proteções". The main form contains the following elements:

- Código:** A text box containing the value "90".
- Tipo de proteção:** A dropdown menu with "TEMPO DEFINIDO" selected.
- Descrição:** A large empty text area.
- Tempo do disjuntor:** A text box with "ms" next to it.
- Tipo da curva:** A dropdown menu.
- Ajuste TD:** A section containing a 3x4 grid of text boxes, each containing the value "1".

On the left side of the window, there is a vertical label "SAT - UNIFEI".

Figura IV.6 – Formulário dos parâmetros de proteção.

De forma semelhante, o usuário deve completar algumas informações relativas às barras, conforme formulário mostrado na Figura IV.7.

The image shows a software window titled "Barras do sistema" with a vertical label "SAT - UNIFEI" on the left. The form contains the following fields:

- Código: 1
- Área: 0
- Classe Tensão: 138.00 kV
- Descrição: BARRA 01
- Proteção: (dropdown menu)
- Taxa falta section:
 - Taxa de falta da barra: .00 faltas/ano
 - %FFF: .00
 - %FFT: .00
 - %FF: .00
 - %FT: .00

Figura IV.7 – Formulário dos dados de barras.

Dentre as informações necessárias destacam-se: associar a cada barramento a proteção correspondente, preencher a taxa de falta do barramento e a respectiva distribuição percentual entre os tipos de falta. Opcionalmente, pode ser complementada a "Descrição" do barramento, a qual é sinteticamente fornecida pelo arquivo de dados do sistema do ANAFAS.

No caso das linhas, as informações que devem ser preenchidas no formulário da Figura IV.8 são: extensão da linha (em km), taxa de falta (número de faltas/100km/ano), porcentagens de ocorrência de cada um dos tipos de falta e, finalmente, associar a cada linha uma das proteções parametrizadas anteriormente. Os valores "R1", "X1", "R0" e "X0" são aqueles importados do arquivo de dados de entrada do ANAFAS e são mostrados neste formulário apenas com o objetivo de visualização.

Figura IV.8 – Formulário de dados de linhas.

Os dados relativos às cargas devem ser preenchidos conforme formulário apresentado na Figura IV.9, de modo que os estudos de impacto sobre as mesmas possam ser realizados.

A cada barra de interesse no sistema, o usuário pode associar uma carga com a sensibilidade correspondente; o usuário também deve determinar qual é a maneira de caracterização da sensibilidade da carga e atribuir os respectivos limites de sensibilidade que, quando violados, resultam em desligamentos dos equipamentos ou processos industriais analisados. As formas de representação de sensibilidade disponíveis no *software* são:

- Somente magnitude;
- Magnitude e duração;
- Magnitude e duração para AMTs do tipo A, B, C e D;
- Perda de tensão;
- Perda de energia.

The image shows a software window titled 'Cargas' with a sidebar on the left labeled 'SAT - UNIFEI'. The main area contains a form with four sections:

- Dados principais:** Includes fields for 'Código' (with value 66), 'Descrição', 'Barra' (a dropdown menu), and 'Tipo Sensibilidade'.
- Valores de sensibilidade:** Includes fields for 'Duração A (ms)', 'Magnitude A (p.u.)', 'Duração B (ms)', 'Magnitude B (p.u.)', 'Duração C (ms)', 'Magnitude C (p.u.)', 'Duração D (ms)', 'Magnitude D (p.u.)', and 'Perda'.
- Informações Adicionais:** Includes fields for 'Demanda (MW)', 'Fator de carga', and 'Tempo Retomada (minutos)'.
- Informações financeiras:** Includes fields for 'Custo interrupção' (R\$/interrupção) and 'Valor kWh' (R\$).

Figura IV.9 – Formulário de dados de cargas.

Para a realização do cálculo dos indicadores, são necessárias informações adicionais sobre a carga, tais como: demanda, fator de carga e tempo médio para retomada da produção. Para se quantificar os prejuízos das paradas do processo, são necessárias informações financeiras como o custo médio por interrupção (R\$/parada) e o valor do kWh.

Uma vez realizado o preenchimento de todos os formulários de entrada de dados, o usuário está apto a processar qualquer estudo no *software*. Vale ressaltar que também se encontram disponíveis ferramentas de exportação de relatórios com apresentação destes dados de entrada, de modo que o usuário possa certificar-se se os mesmos estão corretos e eventualmente corrigi-los, caso necessário.

IV.5. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os formulários utilizados para geração dos relatórios de saída; visto que cada tipo de relatório se repete para os diferentes

tipos de estudo, é descrito cada um deles de maneira geral e, somente em caso de necessidade, as particularidades para cada tipo de estudo são discutidas; da mesma forma, ao descrever os formulários para geração dos relatórios de saída, são apresentados alguns exemplos ilustrativos.

Todos os formulários aqui descritos estão disponíveis no menu “Relatórios” na barra de menus do sistema. Dentro deste menu existem três opções, a saber, “Estudos Retrospectivos”, “Estudos Estocásticos” e “Curto-Circuito Deslizante”, as quais fazem referência ao tipo de estudo desejado pelo usuário.

IV.5.1. Formulário Principal

Os três tipos de estudos possuem um formulário principal para construção das saídas de resultados. Este formulário pode ser dividido em duas seções: a primeira, onde são informados os dados para construção dos relatórios e a segunda onde são selecionados os tipos de relatórios desejados.

A diferença entre cada tipo de estudo está na forma de construção dos dados na primeira seção do formulário, sendo a segunda seção idêntica para os três diferentes tipos de estudos.

A Figura IV.10 apresenta o formulário principal dos estudos retrospectivos. A primeira seção do relatório, na aba “Simulação”, se destina à seleção dos dados principais do estudo, ou seja, barra monitorada, tipo de tensão monitorada e dados das faltas. Cada cálculo deve ser feito individualmente para cada barra monitorada; necessitando dos resultados para mais barras de interesse, basta que o usuário repita o procedimento de cálculo, por quantas vezes julgar necessário. Cada falta deve ser caracterizada individualmente e seus dados devem ser inseridos na relação de faltas à direita do formulário; os dados necessários para cada falta são: a linha ou barra simulada, escolhendo a aba correspondente, posição da falta quando em linhas e tipo da falta.

O usuário deve repetir este procedimento de inclusão de faltas até que complete a relação de ocorrências que deseja retratar e, concluindo tal relação, deve clicar em “Calcular” para que os dados sejam selecionados do banco e manipulados, convenientemente, para a exibição dos relatórios disponíveis na aba “Relatórios”.

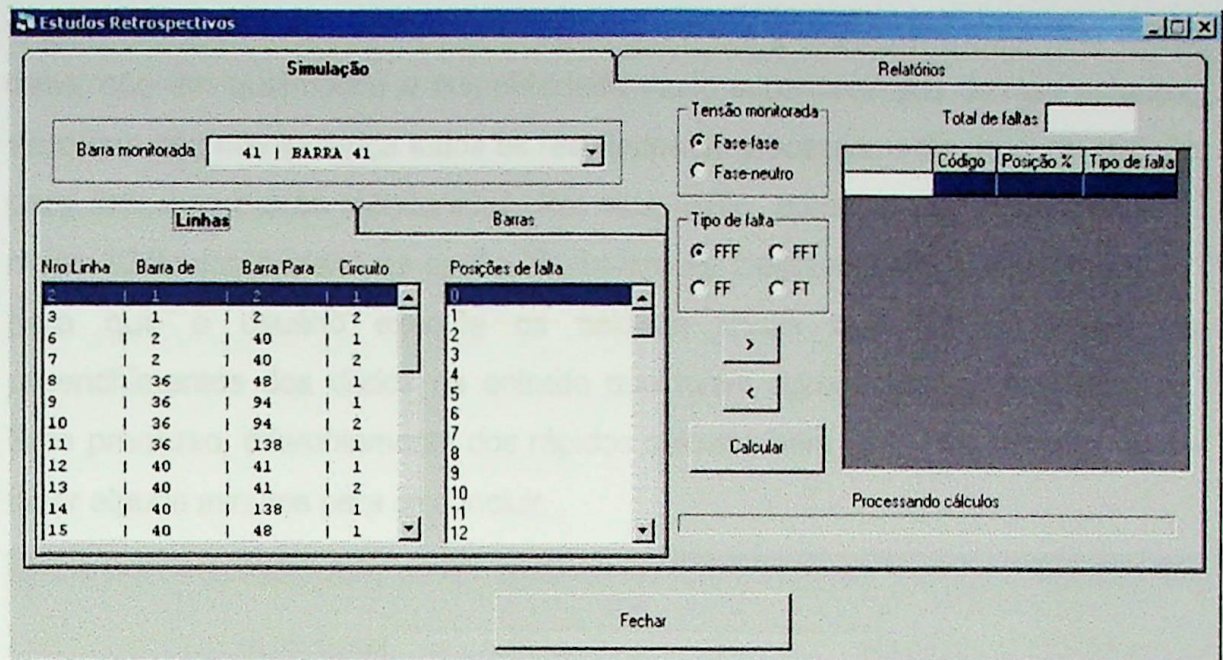


Figura IV.10 – Formulário principal dos estudos retrospectivos.

A Figura IV.11 apresenta o formulário utilizado nos estudos estocásticos. Neste formulário a divisão entre as duas seções também é feita pelas abas “Simulação” e “Relatórios”. Na primeira, o usuário deve selecionar quais as barras a serem monitoradas entre as disponíveis no quadro correspondente. Em seguida, deverá escolher, convenientemente, o período total de simulação desejado ou erro máximo admitido e o tipo de tensão monitorada nas barras selecionadas.

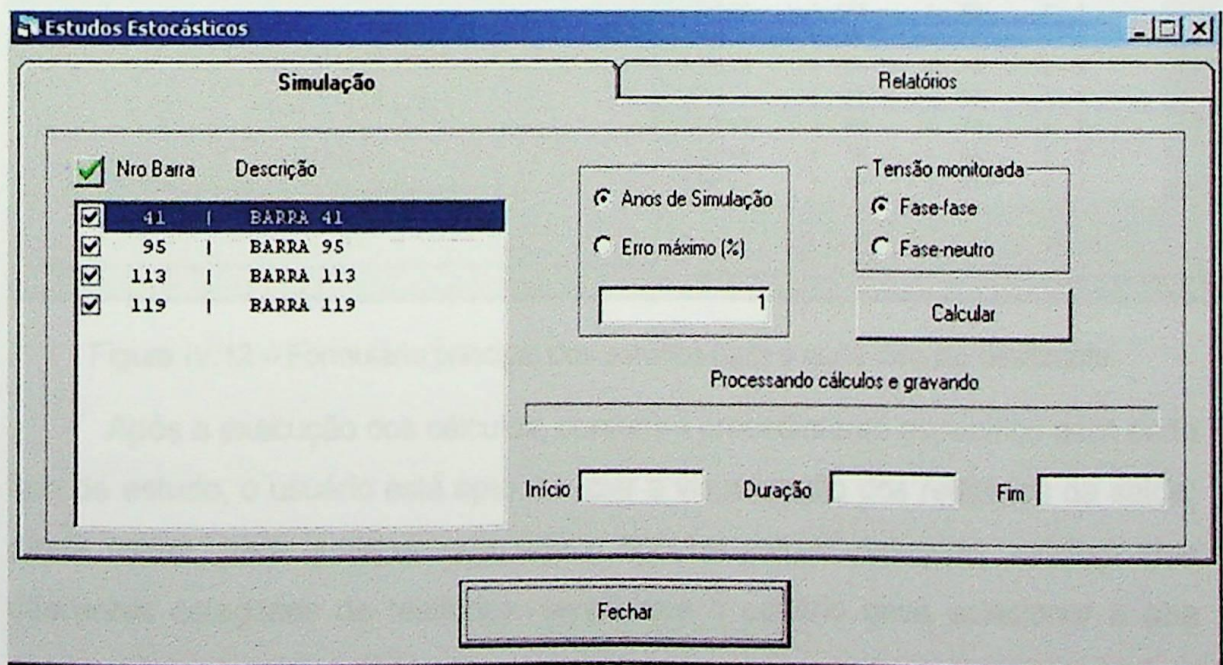


Figura IV.11 – Formulário principal dos estudos estocásticos.

A Figura IV.12 mostra o formulário principal para os estudos do tipo curto-

circuito deslizante. Os cálculos necessários para a geração dos relatórios, neste caso, são em quantidade e complexidade muito superiores aos demais estudos, visto que são manipulados todos os resultados do processamento de curto-circuito para todas as barras monitoradas. Por esta razão, optou-se por inserir um sub-menu “Cálculos Iniciais” na opção “Curto-circuito Deslizante” do menu “Relatório” para que o usuário execute os cálculos assim que finalizar todos os preenchimentos dos dados de entrada que foram apresentados neste capítulo. Este processo, diferentemente dos rápidos cálculos para os outros estudos, pode levar alguns minutos para se concluir.

Figura IV.12 – Formulário principal dos estudos para o curto-circuito deslizante.

Após a execução dos cálculos, conforme procedimento específico para cada tipo de estudo, o usuário está apto a iniciar a visualização dos relatórios de saída; desta forma, para qualquer que seja o tipo de estudo desejado, existem seis diferentes categorias de relatórios, sendo que o usuário deve selecionar a aba correspondente ao tipo desejado.

As opções de relatórios, disponíveis na aba “Relatórios” dos três formulários principais, são as seguintes:

- “Magnitude”, onde são gerados os histogramas e gráficos de frequência acumulada dos valores da intensidade dos eventos analisados;
- “Duração”, onde são gerados os histogramas e gráficos de frequência acumulada dos valores da duração dos eventos;
- “Tabelas”, onde estão disponíveis: um histograma tridimensional, relacionando magnitude, duração e frequência de ocorrência; os gráficos e tabelas apresentando a contribuição das linhas e barras para o número de eventos registrados para a barra monitorada; e, finalmente, um relatório da área de vulnerabilidade onde são apresentados os comprimentos de cada linha contidos na área de vulnerabilidade da barra monitorada;
- “Iso-Sags”, onde são construídas e apresentadas as curvas iso-sags [BOLLEN, 2000a] para a barra monitorada;
- “Indicadores”: nesta opção é gerado um relatório contendo os indicadores de desempenho segundo [CARVALHO FILHO, 2000], para cada barra monitorada;
- “Gráficos Estatísticos”, onde são produzidos gráficos de setores descrevendo a distribuição percentual de três variáveis: tipo de falta, tipos de afundamento, e classe de tensão das linhas e barras simuladas.

São estas as opções, tanto para os relatórios de magnitude quanto para os de duração: histograma percentual, frequência acumulada percentual, histograma em valores absolutos (eventos por ano) e frequência acumulada em valores absolutos.

A Figura IV.13 mostra o formulário para a opção “Magnitude”, enquanto que da Figura IV.14 à IV.17 pode-se observar exemplos dos histogramas, em eventos por ano para magnitude, frequência acumulada para magnitude, histograma percentual para duração e frequência acumulada percentual para duração. Na apresentação dos histogramas também é indicada a contribuição dos diferentes tipos de falta (b) e das classes de tensão das linhas e barras simuladas (c).

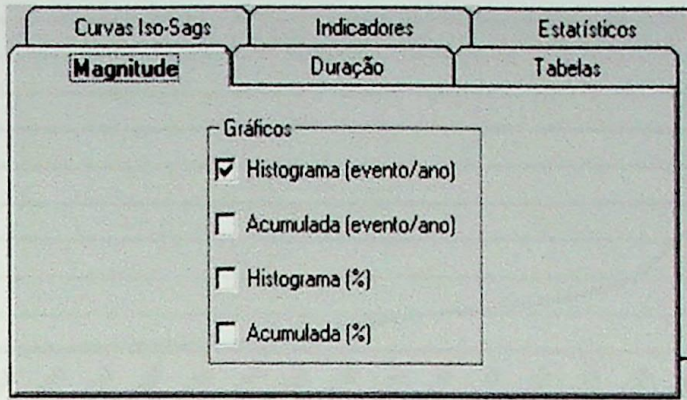
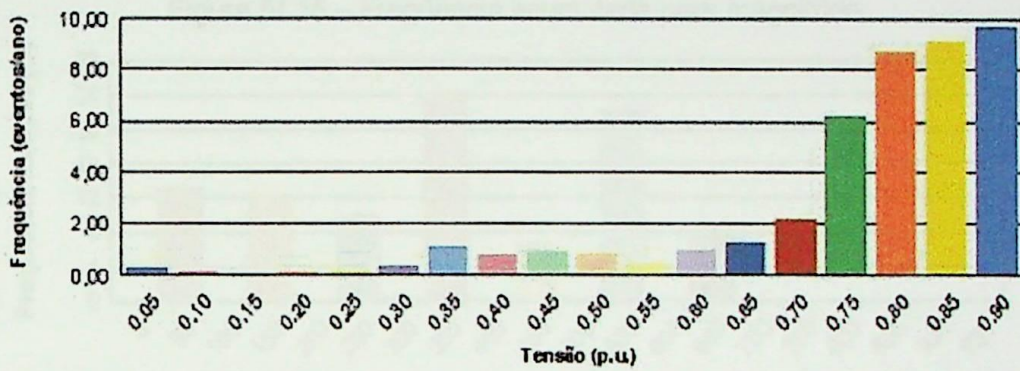
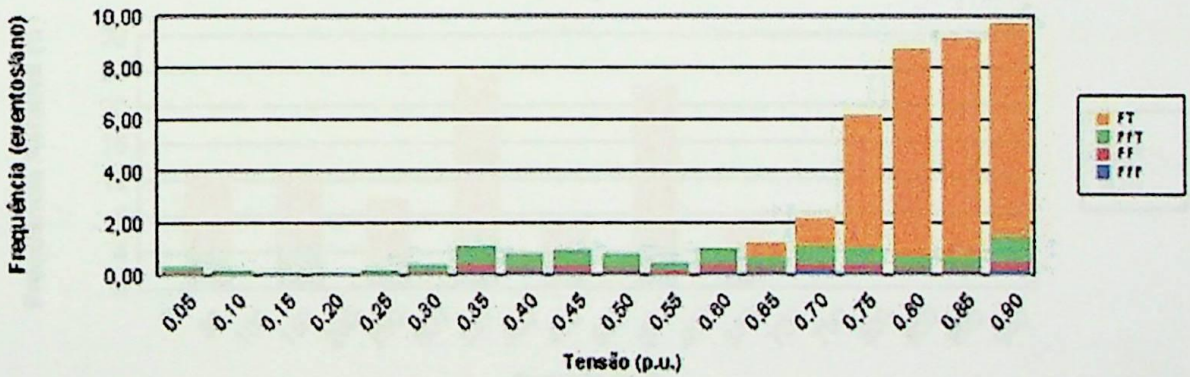


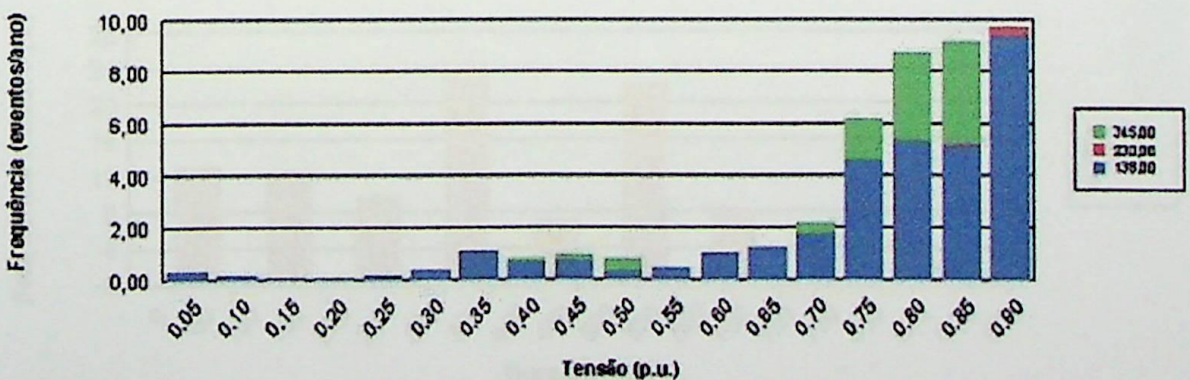
Figura IV.13 – Relatórios disponíveis na opção “Magnitude”.



a)



b)



c)

Figura IV.14 – Histogramas para magnitude.

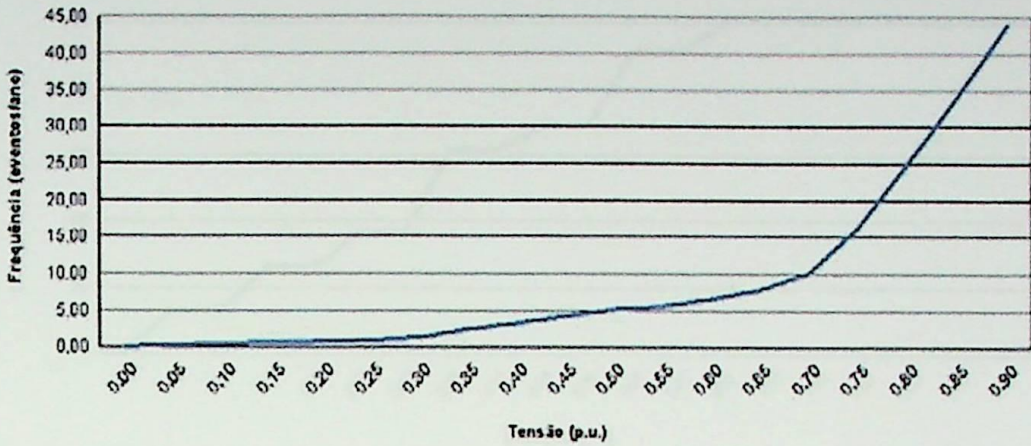
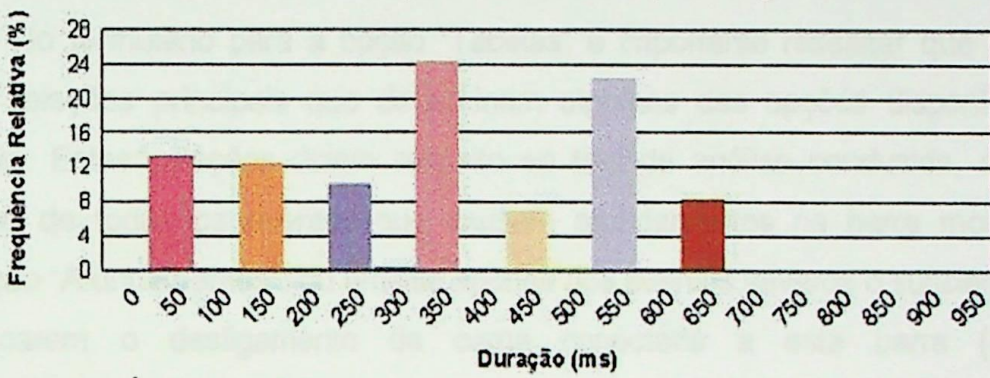
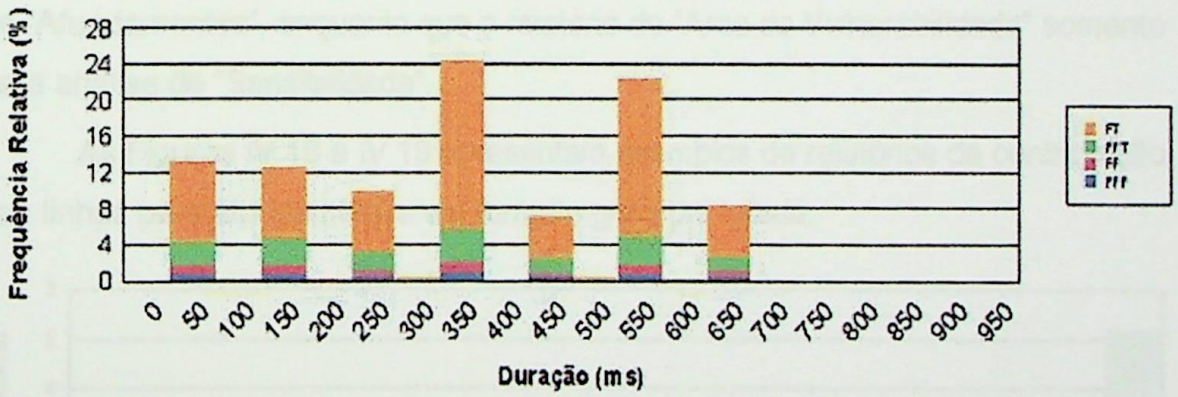


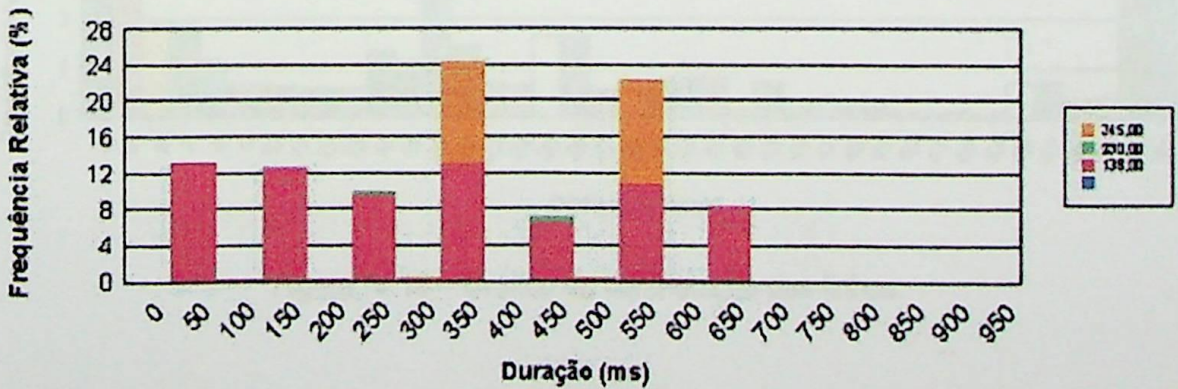
Figura IV.15 – Frequência acumulada para magnitude.



a)



b)



c)

Figura IV.16 – Histogramas para duração.

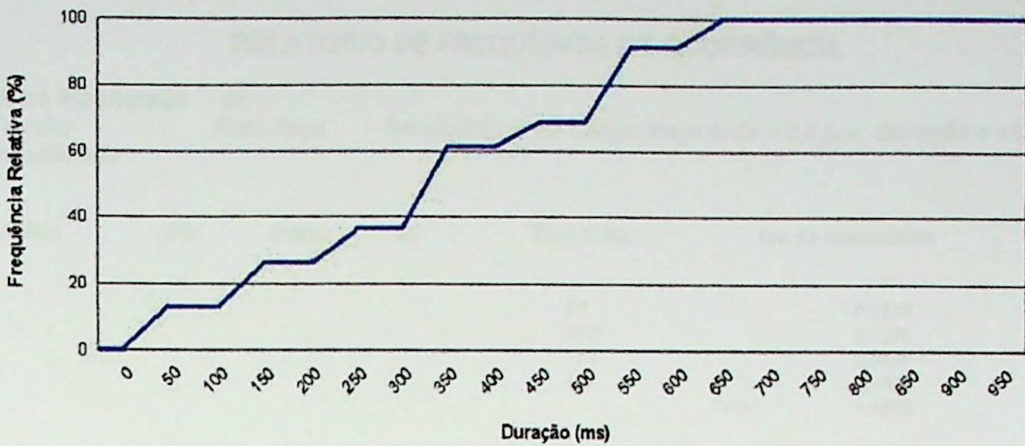


Figura IV.17 – Frequência acumulada para duração.

No formulário para a opção “Tabelas” é importante ressaltar que existem duas seleções principais que determinam algumas das opções disponíveis ao usuário. Estas seleções dizem respeito ao tipo de análise conduzida, ou seja, análise de todos os eventos que causam afundamentos na barra monitorada (seleção “Afundamentos”) ou análise apenas dos eventos severos o suficiente para provocarem o desligamento da carga conectada a esta barra (seleção “Sensibilidade”). A opção “Histograma 3D” somente está disponível para análises de “Afundamentos”, enquanto que o relatório de “Área de Vulnerabilidade” somente para análise de “Sensibilidade”.

As Figuras IV.18 e IV.19 apresentam exemplos de relatórios de contribuição das linhas para afundamentos em formato gráfico e tabela.

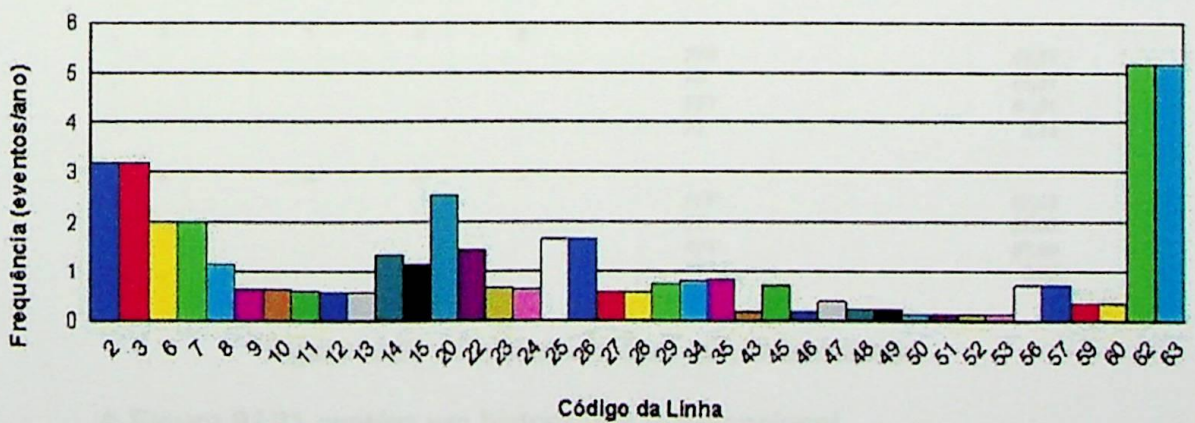


Figura IV.18 – Gráfico de contribuição das linhas.

RELATÓRIO DE FREQUÊNCIA DE OCORRÊNCIA

Barra Monitorada **41**
 Tensão monitorada **Fase-Fase** Sensibilidade da Carga: Magnitude = 0,8 p.u. Duração = 133 m

Linha:	De:	Para:	C:	Tipo falta:	Nro de eventos/ano
2	1	2	1	FF	0,1913
				FFF	0,1275
				FFT	0,5421
				FT	0,3026
				Total	1,1635
3	1	2	2	FF	0,1913
				FFF	0,1275
				FFT	0,5421
				FT	0,3026
				Total	1,1635

Figura IV.19 – Tabela de contribuição das linhas.

A Figura IV.20 mostra o relatório de área de vulnerabilidade.

RELATÓRIO DA ÁREA DE VULNERABILIDADE

Barra Monitorada **119**
 Tensão monitorada **Fase-Fase** Sensibilidade da Carga: **0,8** p.u.

Contribuições por Linha Simulada

Linha:	Do:	Para:	C:	Tipo falta:	Vulnerabilidade (km)
2	1	2	1	FFF	46,01
				FF	46,01
				FFT	46,01
				FT	2,14
3	1	2	2	FFF	46,01
				FF	46,01
				FFT	46,01
				FT	2,14
6	2	40	1	FFF	67,00
				FF	67,00
				FFT	67,00
				FT	0,00

Figura IV.20 – Relatório de área de vulnerabilidade.

A Figura IV.21 contém um histograma tridimensional.

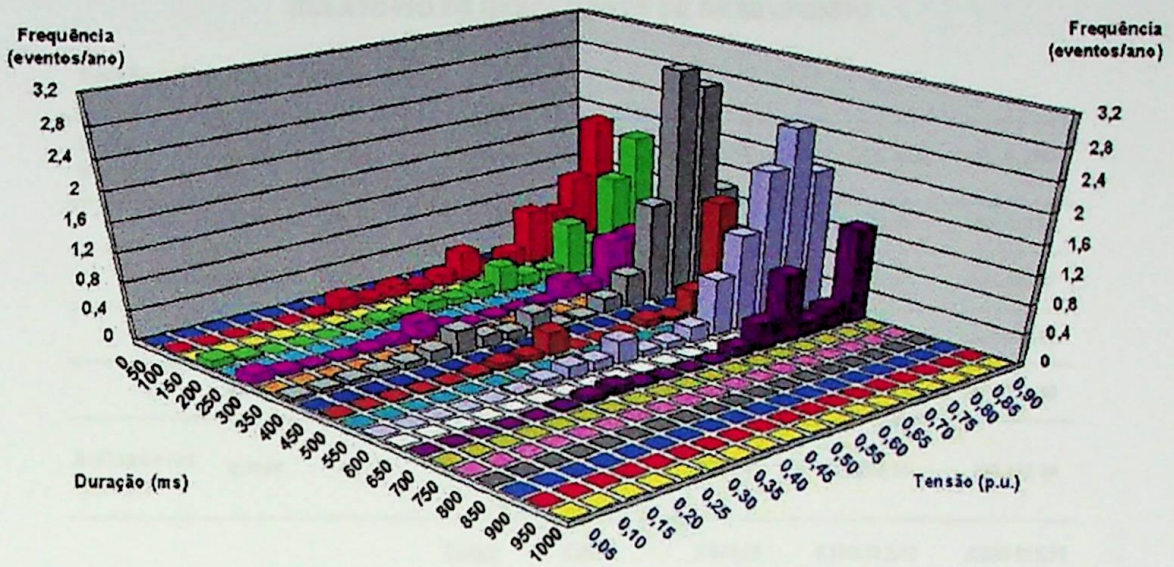


Figura IV.21 – Histograma tridimensional.

Quando selecionada a aba “Iso-Sags”, não existe nenhuma opção adicional necessária ao usuário. Cabe a ele somente solicitar a impressão do relatório, cujo exemplo é mostrado na Figura IV.22. Os cálculos necessários para a construção destas curvas são apresentados em [Bollen, 2000a].

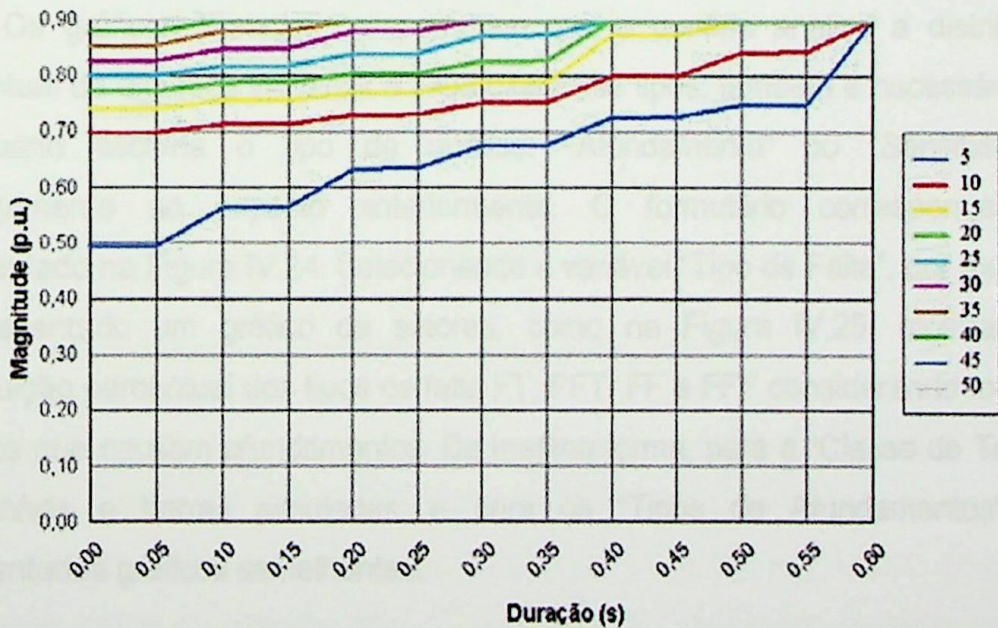


Figura IV.22 – Curvas iso-sags.

Da mesma forma, a aba “Indicadores” somente necessita da ordem de impressão do usuário, retornando um relatório do tipo apresentado na Figura IV.23, onde são impressos os indicadores de desempenho, para todas as barras monitoradas nos cálculos e também para o sistema global.

RELATÓRIO DE INDICADORES DE DESEMPENHO

Tensão monitorada Fase-Fase							
Barra Monitorada	Disp.	Indisp.	Freq.	DND (MW)	END (MWh)	C. END (R\$)	C. A. (R\$)
41	0,9837	0,0163	18,1335	0,3258	2.283,27	570.818,52	906.674,09
95	0,9804	0,0116	12,8940	0,2328	1.631,22	407.804,86	644.698,27
113	0,9804	0,0116	12,8214	0,2315	1.622,14	405.533,50	641.068,63
119	0,9890	0,0110	12,1650	0,2198	1.540,01	385.003,36	608.250,93
Indicadores Globais	0,9874	0,0126	14,0035	0,2524	1.769,16	442.290,56	700.172,98
Total:				1,0098	7.076,65	1.769.162,23	2.800.691,91

LEGENDA

Disp.	Disponibilidade:	DND (MW)	Demanda Não Distribuída (MW)
Indisp.	Indisponibilidade:	END (MWh)	Energia Não Distribuída (MWh)
Freq.	Frequência de Ocorrência (eventos/ano)	C. END (R\$)	Custo de Energia não Distribuída (R\$)
		C. A. (R\$)	Custo Anual Interrupção (R\$)

Figura IV.23 – Relatório de indicadores de desempenho.

Os gráficos “Estatísticos” permitem que o usuário analise a distribuição percentual de algumas variáveis e seus diferentes tipos; também é necessário que o usuário escolha o tipo de análise: “Afundamento” ou “Sensibilidade”, analogamente ao exposto anteriormente. O formulário correspondente é apresentado na Figura IV.24. Selecionando a variável “Tipo de Falta”, por exemplo, é apresentado um gráfico de setores, como na Figura IV.25, mostrando a distribuição percentual dos tipos de falta FT, FFT, FF e FFF considerando todos os eventos que causam afundamentos. Da mesma forma, para a “Classe de Tensão” das linhas e barras simuladas, e para os “Tipos de Afundamentos”, são apresentados gráficos semelhantes.

Figura IV.24 – Formulário para os gráficos “Estatísticos”.

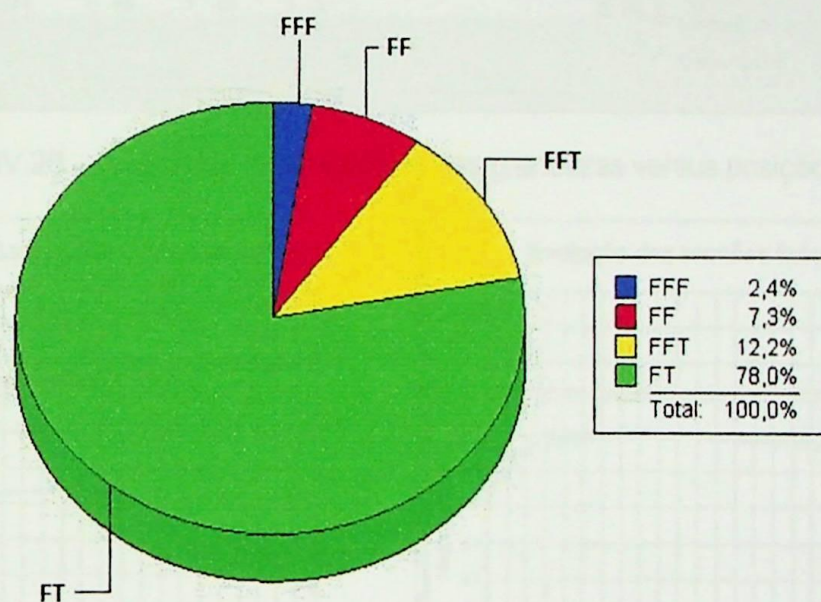


Figura IV.25 – Distribuição percentual dos tipos de falta.

IV.5.2. Formulário “Grandezas versus Posição”

Existem outros dois tipos de relatórios exclusivos aos estudos do tipo curto-circuito deslizante. O primeiro permite a impressão de um gráfico ou tabela, mostrando os valores das tensões ou duração dos eventos, em função da posição das faltas na linha selecionada pelo usuário; o formulário correspondente é apresentado na Figura IV.26. Um exemplo de gráfico mostrando a evolução das tensões em função da posição da falta na linha é apresentado na Figura IV.27. O usuário pode, também, optar por gerar um gráfico utilizando o processo de agregação de fases. Neste caso, somente serão mostradas as mínimas tensões fase-neutro e fase-fase. Da mesma forma, pode ser exibida a duração dos eventos

em função da posição da falta.

Nro Linha	Barra de	Barra Para	Circuito
2	1	2	1
3	1	2	2
6	2	40	1
7	2	40	2
8	36	48	1
9	36	94	1
10	36	94	2
11	36	138	1
12	40	41	1
13	40	41	2
14	40	138	1
15	40	48	1
20	48	69	1

Figura IV.26 – Formulário para relatórios das grandezas versus posição de falta.

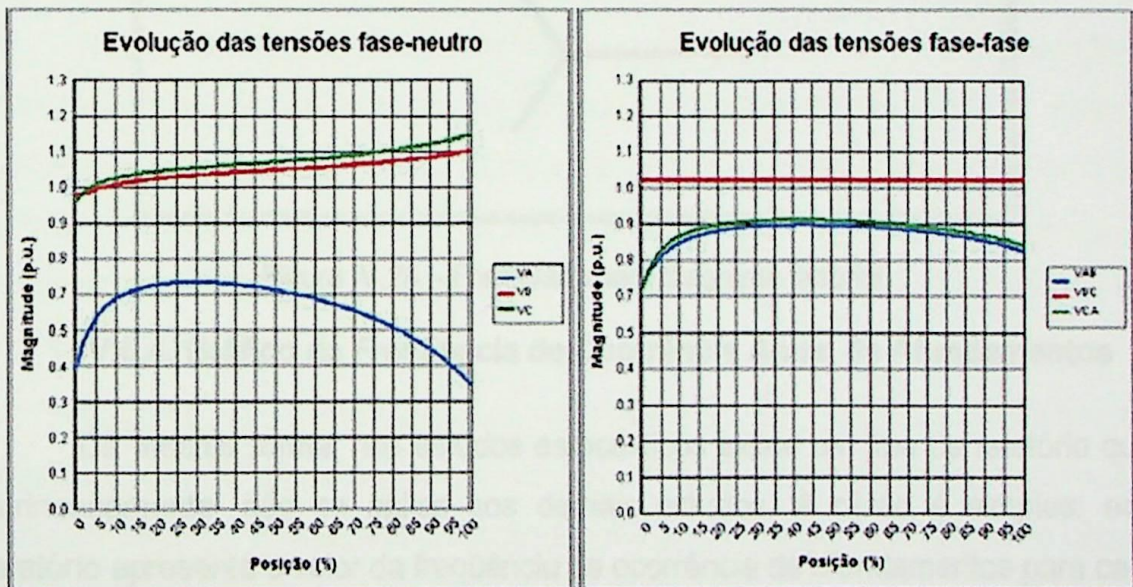


Figura IV.27 – Gráfico de magnitude versus posição de falta.

IV.5.3. Formulário “Diagrama Fasorial”

O segundo formulário exclusivo aos estudos do tipo curto-circuito deslizante, é o responsável pela construção dos diagramas fasoriais das tensões; para isto, o usuário deve selecionar a barra e a respectiva tensão monitorada, a linha ou barra com falta, a posição e o tipo desta falta. A Figura IV.28 mostra o diagrama fasorial das tensões para as condições selecionadas e também os valores de módulo e ângulo de cada fasor. Adicionalmente, é apresentada a classificação do tipo do afundamento segundo [BOLLEN, 2000b].

Diagrama Fasorial

Barra monitorada: 41 | BARRA 41

Nro Linha	Barra de	Barra Para	Circuito
2	1	2	1
3	1	2	2
6	2	40	1
7	2	40	2
8	36	48	1
9	36	94	1
10	36	94	2

Tensão monitorada:
 Fase-fase
 Fase-neutro

Posição: 0

Tipo de falta:
 FFF FF
 FFT FT

Imprimir
 Atualizar
 Fechar

Resultados:

VA = 0,8460 p.u.	VB = 0,4102 p.u.	VC = 0,4113 p.u.	Tipo
Angulo = 1,00 °	Angulo = -127,50 °	Angulo = 128,40 °	C

Figura IV.28 – Formulário para diagrama fasorial.

IV.5.4. Gráfico da Frequência de Ocorrência Anual de Afundamentos

Da mesma forma, nos estudos estocásticos existe um tipo de relatório que, intrinsecamente, não se aplica aos demais estudos. A razão é simples: este relatório apresenta o valor da frequência de ocorrência de afundamentos para cada barra calculada em cada ano de sorteio, bem como a linha de tendência destes resultados. Tal relatório está disponível para o usuário na aba “Tabelas” do formulário principal dos estudos estocásticos. A Figura IV.29 apresenta o gráfico gerado para um sorteio de 100 anos de simulações.

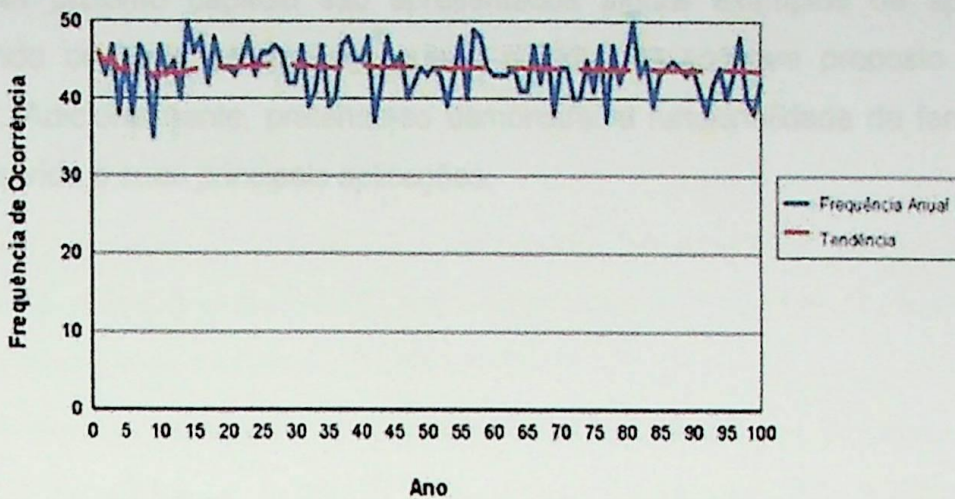


Figura IV.29 – Gráfico de apresentação da frequência de ocorrência anual dos sorteios.

IV.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentada uma proposta e a correspondente implementação de um sistema de *software* destinado à execução de estudos estratégicos envolvendo afundamentos de tensão, o qual consiste na principal contribuição desta dissertação; sistema este, desenvolvido com o intuito de complementar algumas das limitações identificadas nos *softwares* existentes e encontrados na literatura técnica.

Seguindo a tendência atual, a base utilizada para as análises dos afundamentos de tensão é o cálculo de curto-circuito e o procedimento empregado para os cálculos é baseado no método das posições de falta ou curto-circuito deslizando.

O primeiro passo na utilização deste sistema de *software* é a importação, para o seu banco de dados, do arquivo de dados de entrada do sistema elétrico utilizado para o cálculo de curto-circuito e os respectivos arquivos de resultados deste processamento, todos no padrão ANAFAS.

Além dos resultados do cálculo de curto-circuito é imprescindível que o usuário forneça os dados das proteções, taxas de falta de barramentos e linhas e sua distribuição estatística entre os tipos de falta, as extensões das linhas e os dados relativos às cargas, como sensibilidade, demanda, fator de carga, custo médio por interrupção, entre outros.

No próximo capítulo são apresentados alguns exemplos de aplicação, mostrando os tipos de análises que o sistema de *software* proposto permite realizar. Adicionalmente, pretende-se demonstrar a funcionalidade da ferramenta desenvolvida e suas principais aplicações.

Este capítulo é dedicado à apresentação de exemplos de aplicação do sistema de software desenvolvido, mostrando sua funcionalidade na execução de estudos envolvendo fundamentos de energia.

A fim de demonstrar a possibilidade de realização de análises, os exemplos são divididos de acordo com os tipos de estudos disponibilizados pelo sistema de software. Dessa forma, são apresentados os tipos de estudos de curto e de longo prazo, bem como os estudos de curto e de longo prazo, além dos estudos de curto e de longo prazo.

V.2 DADOS DO SISTEMA ELÉTRICO

A Figura V.1 mostra o diagrama unifilar do sistema elétrico utilizado para a realização dos estudos, com os dados necessários para a aplicação baseada na rede de transmissão de energia elétrica brasileira.

O sistema possui 32 barras de transmissão, incluindo 146 km de linha de transmissão de 230 kV, com 20 km de linha de 138 kV e 10 km de linha de 69 kV, sendo 7 das 32 barras de transmissão de curto prazo e 25 de longo prazo, sendo 7 das 32 barras de transmissão de curto prazo e 25 de longo prazo.

Os dados de carga do sistema de potência são apresentados no Tabela V.1, considerando um tempo máximo de 1000 horas de operação, considerando um tempo máximo de 1000 horas de operação.

Tabela V.1 – Dados de carga do sistema de potência.

Barra	Nome	Capacidade (MW)	Capacidade (MVA)	Capacidade (MVA)
1	Barra 1	100	100	100
2	Barra 2	100	100	100
3	Barra 3	100	100	100
4	Barra 4	100	100	100
5	Barra 5	100	100	100
6	Barra 6	100	100	100
7	Barra 7	100	100	100
8	Barra 8	100	100	100
9	Barra 9	100	100	100
10	Barra 10	100	100	100
11	Barra 11	100	100	100
12	Barra 12	100	100	100
13	Barra 13	100	100	100
14	Barra 14	100	100	100
15	Barra 15	100	100	100
16	Barra 16	100	100	100
17	Barra 17	100	100	100
18	Barra 18	100	100	100
19	Barra 19	100	100	100
20	Barra 20	100	100	100
21	Barra 21	100	100	100
22	Barra 22	100	100	100
23	Barra 23	100	100	100
24	Barra 24	100	100	100
25	Barra 25	100	100	100
26	Barra 26	100	100	100
27	Barra 27	100	100	100
28	Barra 28	100	100	100
29	Barra 29	100	100	100
30	Barra 30	100	100	100
31	Barra 31	100	100	100
32	Barra 32	100	100	100

V. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

V.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo é dedicado à apresentação de exemplos de aplicação do sistema de *software* desenvolvido, mostrando sua funcionalidade na execução de estudos envolvendo afundamentos de tensão.

A fim de demonstrar a potencialidade do ferramental desenvolvido, os exemplos são divididos de acordo com os tipos de estudos disponibilizados pelo sistema de *software*. Desta forma, são apresentadas análises realizadas através de estudos prospectivos baseados nos métodos do curto-circuito deslizante e estudos estocásticos, além dos retrospectivos.

V.2. DADOS DO SISTEMA ELÉTRICO

A Figura V.1 mostra o diagrama unifilar do sistema elétrico utilizado para a realização dos exemplos de aplicação; tal sistema tem sua configuração baseada na rede de uma concessionária do sistema elétrico brasileiro.

O sistema possui 39 linhas de transmissão, totalizando 1946 km, sendo duas de 345 kV, duas de 230 kV e 35 de 138 kV. No total, o sistema possui 32 barras, sendo 7 delas de geração. O arquivo de dados de curto-circuito correspondente é apresentado no Anexo B.

Os tempos de atuação do sistema de proteção (relés + disjuntores) são apresentados na Tabela V.1 e correspondem aos tempos praticados no setor elétrico brasileiro, tendo sido obtidos de [AYELLO, 1999].

Tabela V.1 – Tempos de atuação da proteção.

Código das Linhas	Tipo de Proteção	Tempo de Atuação (ms)
62 e 63	Teleproteção	83
43 e 46	Teleproteção	110
50, 51, 52 e 53	Fio Piloto	110
12, 13, 27, 28, 48, 49, 56, 57	Sobrecorrente	300
Demais linhas	Distância (alcance 90%)	1ª zona: 150 / 2ª zona: 550

As taxas de falta para as linhas, bem como a sua composição percentual, são apresentadas na Tabela V.2 [CONRAD, 1991], [BECKER, 1994].

Tabela V.2 – Taxas de falta nas linhas.

Nível de Tensão	Taxa de Falta (*)	Fase-Terra	Bifásica-Terra	Bifásica	Trifásica
345 kV	2,31	91 %	7 %	1 %	1 %
230 kV	1,68	80 %	17 %	1,5 %	1,5 %
138 kV	2,98	73 %	17 %	6 %	4 %

(*) n° de faltas / 100 km / ano.

As barras 41, 95, 113 e 119, destacadas na Figura V.1, foram escolhidas como pontos prováveis para alimentação de uma carga hipotética, pois nestes locais do sistema real encontram-se conectados grandes consumidores, sabidamente possuidores de cargas sensíveis. Os dados relativos à carga hipotética em questão são apresentados na Tabela V.3.

Tabela V.3 – Características da carga.

Dados do Consumidor	Valores
Demanda	20 MW
Fator de Carga	0,8
Tempo de Retomada da Produção	8 horas
Custo por Interrupção	R\$ 50.000,00
Sensibilidade da Carga (Magnitude / Duração)	0,8 p.u. / 120 ms
Critério de Sensibilidade	Mínima Tensão Fase-Fase
Custo do kWh	R\$ 0,25 / kWh

Vale salientar que, para os propósitos deste trabalho, foram adotadas algumas premissas:

- Tensão pré-falta igual a 1 p.u.;
- Impedância de falta nula;
- Sensibilidade da carga determinada por magnitude e duração;
- Desconsideradas faltas em barramentos.

V.3. ESTUDOS PROSPECTIVOS DO TIPO CURTO-CIRCUITO DESLIZANTE

A apresentação dos exemplos de aplicação dos estudos prospectivos do tipo curto-circuito deslizante foi desmembrada em cinco casos-teste, a saber:

- Caso Base: considera todos os dados de entrada anteriormente

apresentados;

- Caso 2: analisa a influência das alterações nos limites de sensibilidade da carga;
- Caso 3: avalia a influência da alteração de dados de proteção de algumas importantes linhas do sistema;
- Caso 4: simula a instalação de condicionadores de energia, uma das possíveis soluções mitigadoras dos efeitos dos afundamentos de tensão;
- Caso 5: analisa a influência do passo do curto-circuito deslizando na precisão dos resultados.

V.3.1. Caso 1: Caso Base

No Caso Base são simulados curtos-circuitos ao longo de todas as linhas do sistema, com passo fixo de 1% do comprimento das mesmas. As próximas figuras apresentam as principais saídas gráficas disponibilizadas pelo *software*.

A Figura V.2 mostra a evolução das tensões fase-neutro na barra 119, quando da aplicação de defeitos fase-terra ao longo da linha 62, partindo da barra 122 (0%) para a barra 124 (100%). Este tipo de gráfico permite identificar os trechos de cada linha onde a ocorrência de faltas poderá ocasionar desligamentos das cargas e/ou processos industriais instalados em cada barra de interesse. Da mesma forma, também é permitido ao usuário construir o gráfico de evolução da duração dos afundamentos em função da posição de falta.

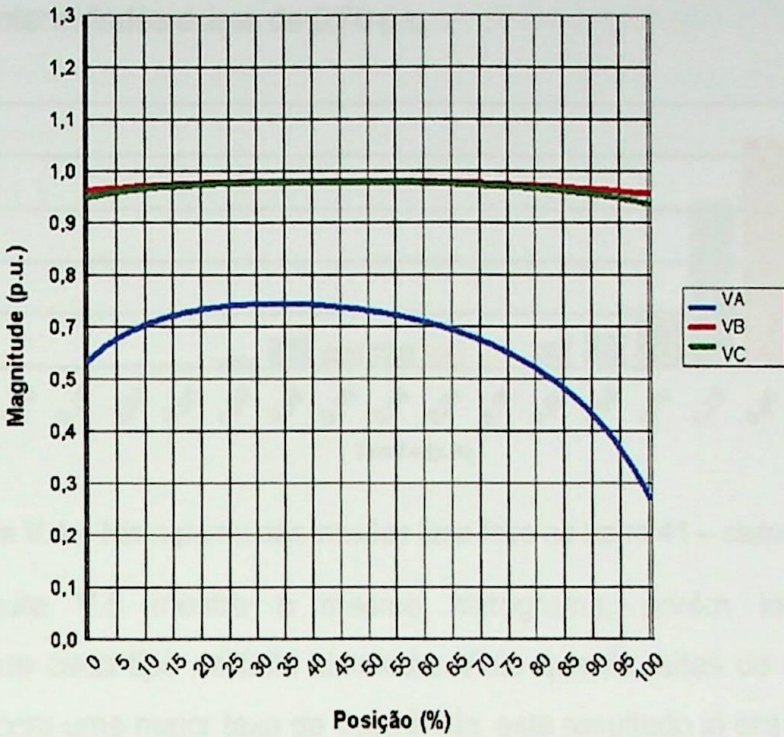


Figura V.2 – Tensões fase-neutro na barra 119 devido a curtos-circuitos fase-terra ao longo da linha 62 – caso base.

A Figura V.3 mostra o diagrama fasorial das tensões fase-fase na barra 113 para faltas fase-terra na linha 24, a 15% da barra 68. Este gráfico permite observar tanto o desequilíbrio quanto a assimetria entre as fases através da comparação tanto dos módulos quanto dos ângulos das tensões. No caso apresentado, tais características definem um afundamento do tipo C.

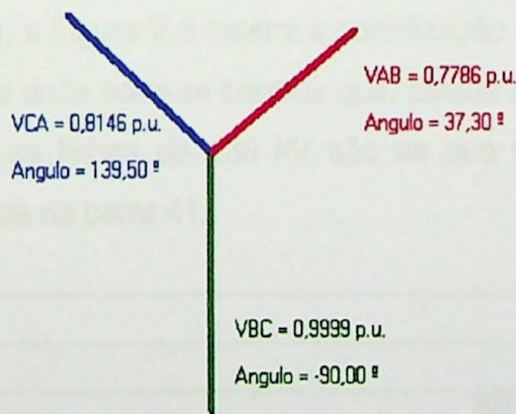


Figura V.3 – Diagrama fasorial – caso base.

A Figura V.4 mostra a função densidade de probabilidade das intensidades dos afundamentos de tensão na barra 41 devido a todos os tipos de faltas em todas as linhas simuladas. Pode ser observado que a maior parte dos eventos

possui suas intensidades acima de 0,70 p.u..

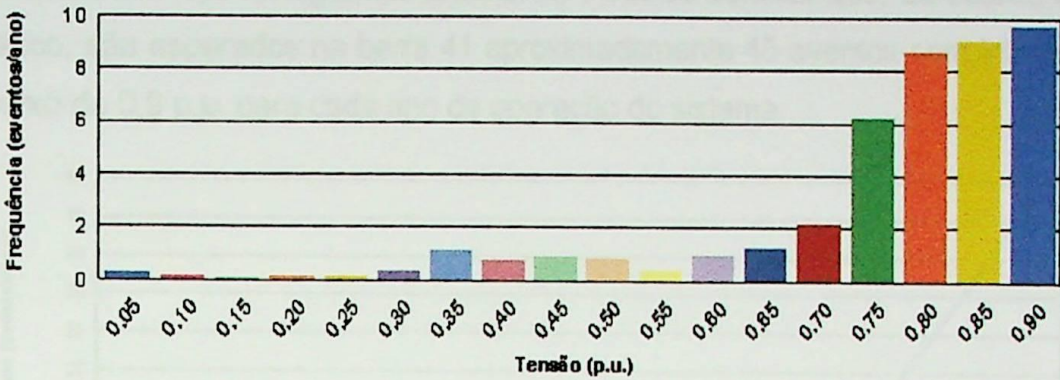


Figura V.4 – Histograma das tensões fase-fase na barra 41 – caso base.

A Figura V.5 mostra o mesmo histograma, porém identificando a contribuição de cada tipo de falta simulada. Visto que as faltas do tipo fase-terra são aquelas com uma maior taxa de ocorrência, este resultado já era esperado.

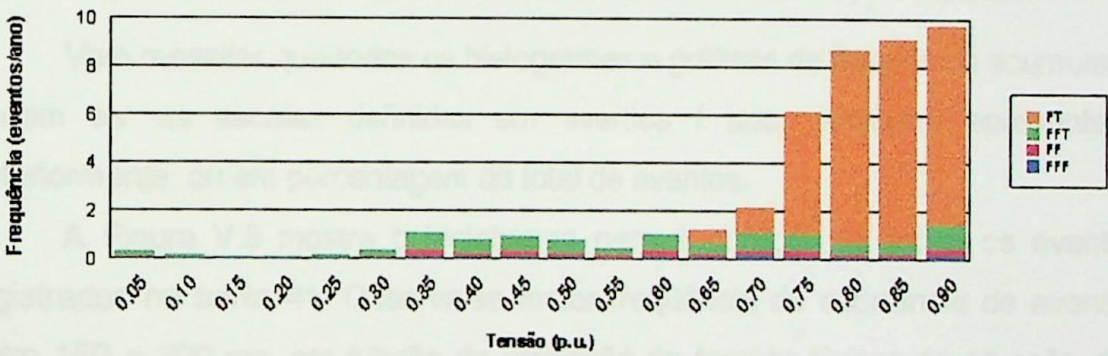


Figura V.5 – Histograma das contribuições por tipo de falta – caso base.

Da mesma forma, a Figura V.6 mostra a contribuição das classes de tensão das linhas simuladas, de onde pode-se concluir que, devido à maior quilometragem e maior taxa de falta, as linhas de 138 kV são as que mais contribuem para afundamentos registrados na barra 41.

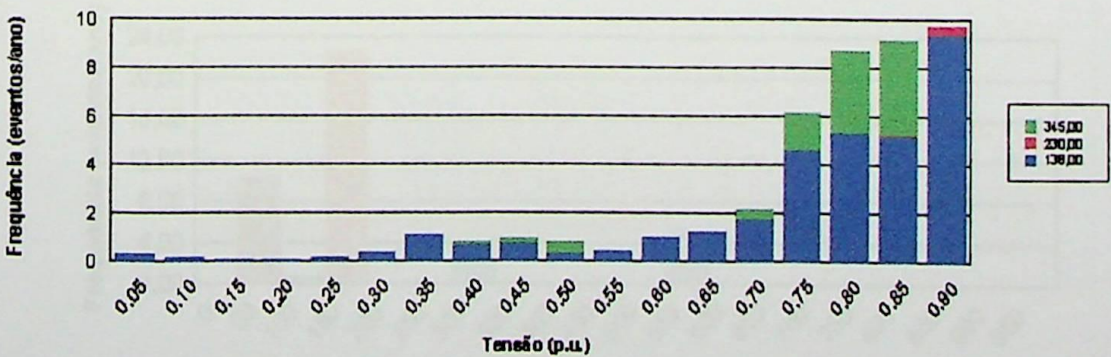


Figura V.6 – Histograma por classe de tensão das linhas – caso base.

A Figura V.7 mostra a função distribuição de probabilidade dos valores apresentados nos histogramas anteriores. Pode-se concluir que, de acordo com o gráfico, são esperados na barra 41 aproximadamente 45 eventos com intensidade abaixo de 0,9 p.u. para cada ano de operação do sistema.

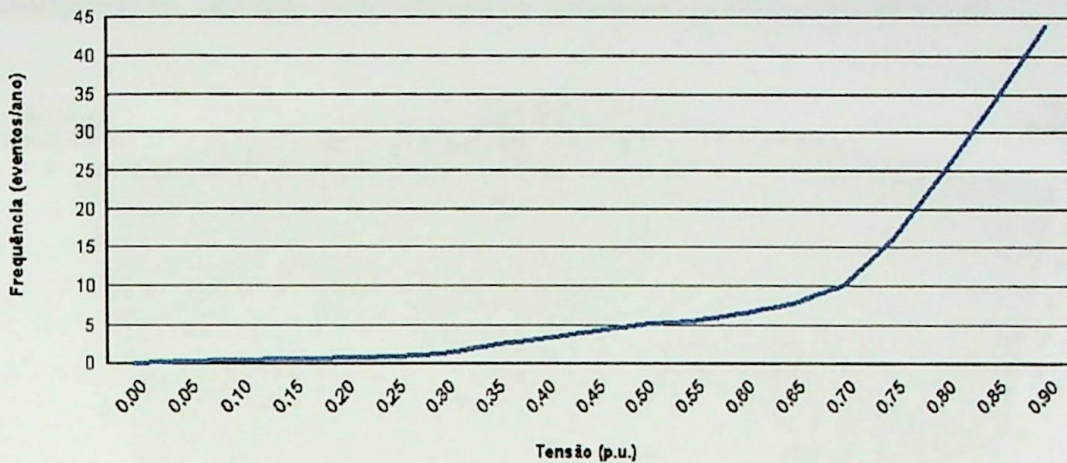


Figura V.7 – Frequência acumulada das tensões na barra 41 – caso base.

Vale ressaltar que todos os histogramas e gráficos de frequência acumulada podem ter as escalas definidas em eventos / ano, conforme apresentado anteriormente, ou em porcentagem do total de eventos.

A Figura V.8 mostra o histograma para a duração de todos os eventos registrados na barra 41. Observa-se maior frequência de ocorrência de eventos entre 150 e 200 ms, em função da utilização de tempos típicos de atuação das proteções das linhas conforme Tabela V.1. Da mesma forma que nos histogramas para magnitude, também pode-se obter outros dois tipos de histogramas. O primeiro apresenta a contribuição de cada tipo de falta e o segundo a contribuição de cada classe de tensão das linhas simuladas para a frequência de ocorrência de eventos em cada faixa de valores.

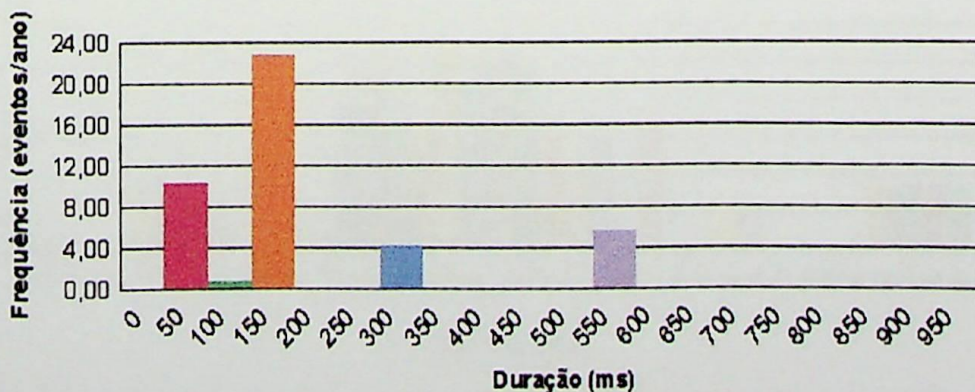


Figura V.8 – Histograma das durações dos eventos – caso base.

A Figura V.9 mostra o gráfico tridimensional, onde são exibidas, simultaneamente, as intensidades, durações e frequência de ocorrência dos eventos para a barra 95, considerando todos os tipos de defeitos simulados. Pode-se observar que os histogramas para magnitude e duração, mostrados anteriormente, correspondem às vistas laterais do gráfico tridimensional.

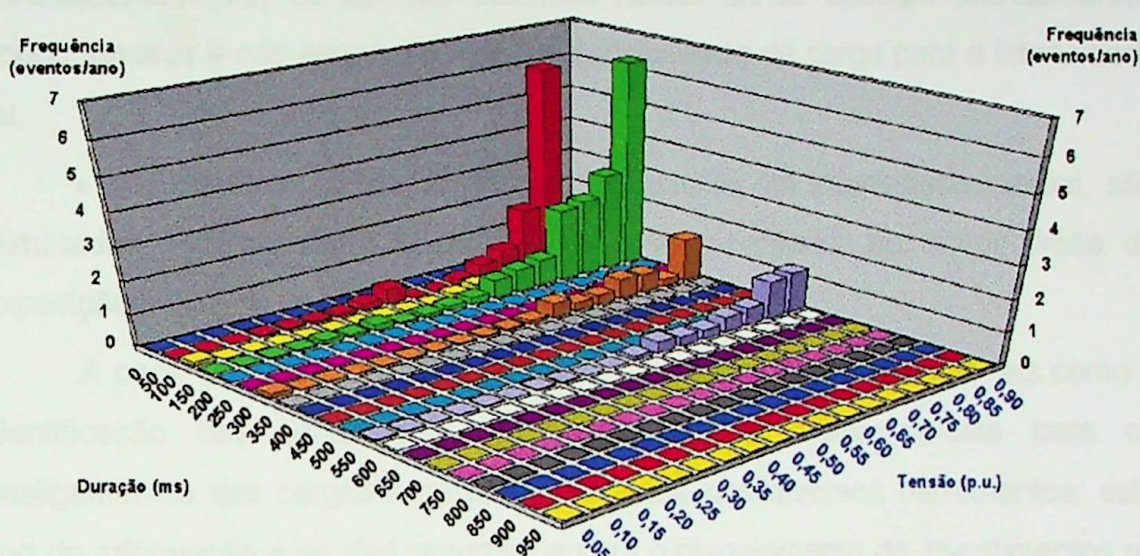


Figura V.9 – Histograma tridimensional para a barra 95 – caso base.

O gráfico apresentado na Figura V.10 mostra a contribuição de cada uma das linhas para os desligamentos de carga na barra 113, considerando a sensibilidade apresentada na Tabela V.3; este tipo de gráfico permite identificar aquelas linhas que mais contribuem para os desligamentos da carga analisada. Neste caso, tais linhas são as de código 22, 25, 27 e 28.

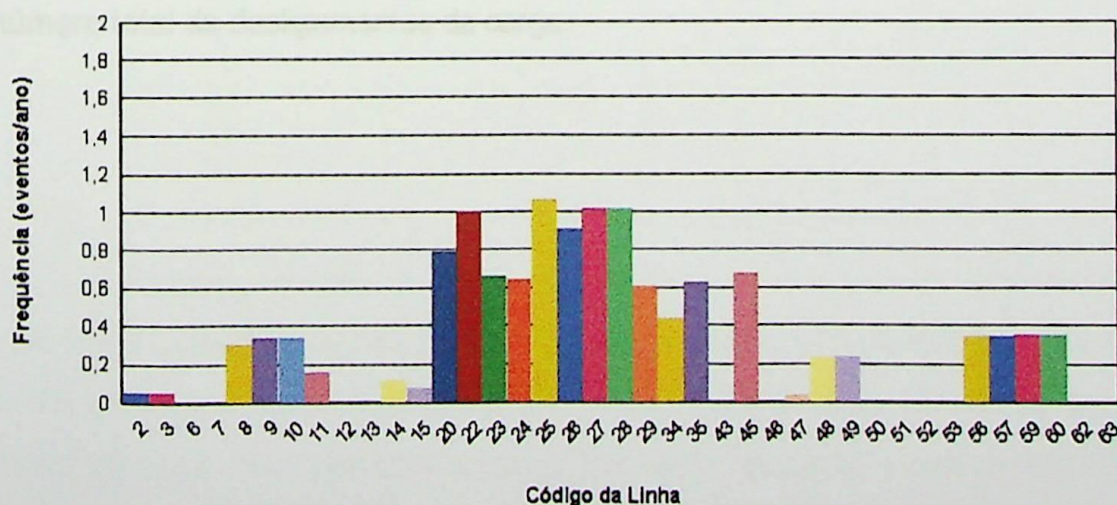


Figura V.10 – Gráfico de contribuição das linhas para desligamentos na barra 113 – caso base.

Da mesma forma, a Tabela V.4 apresenta a contribuição das linhas para os desligamentos em cada uma das cargas. Também pode ser verificado que, algumas linhas, não contribuem para desligamento da carga. Isto pode ser justificado por duas possibilidades:

- as linhas estão muito distantes “eletricamente” da carga e, conseqüentemente, os defeitos ocorridos nestas linhas causam afundamentos pouco severos e não atingem o limite de sensibilidade da carga para a intensidade ou;
- os defeitos causam afundamentos severos em intensidade, porém, são eliminados pela proteção da linha em um tempo inferior ao tempo limite de exposição da carga.

A partir da Tabela V.4 pode-se extrair informações importantes tais como a identificação das linhas que contribuem com a maior parcela para os desligamentos das cargas sensíveis conectadas nos diversos barramentos; este tipo de informação é de vital importância para o planejamento de investimentos no sistema, identificando os pontos vulneráveis. Também é possível identificar aquelas linhas que não contribuem com nenhum desligamento, ou seja, não necessitam de melhorias do ponto de vista de afundamentos de tensão.

Comparando-se os resultados para as diferentes barras analisadas, percebe-se a influência da posição relativa entre a linha com falta e a barra monitorada. As linhas localizadas eletricamente mais distantes causam afundamentos de intensidade pouco severa e, portanto, têm menor participação no número total de desligamentos da carga.

Tabela V.4 – Contribuição das linhas para desligamentos das cargas – caso base.

Código das Linhas	Número Esperado de Desligamentos / Barra / Ano / Linha			
	Barra 41	Barra 95	Barra 113	Barra 119
2	1,1635	0,5864	0,0517	0,4168
3	1,1635	0,5864	0,0517	0,4168
6	1,3699	0,5391	0	0,5391
7	1,3699	0,5391	0	0,5391
8	1,1324	0,5207	0,3057	0,4545
9	0,6258	0,6258	0,3380	0,6258
10	0,6258	0,6258	0,3380	0,6258
11	0,5960	0,3175	0,1609	0,2784
12	0,5662	0,1529	0	0,1529
13	0,5662	0,1529	0	0,1529
14	1,3410	0,3621	0,1231	0,3621
15	1,1324	0,3057	0,0734	0,3057
20	0,8318	0,6839	0,7949	0,6839
22	0,5310	0,5310	1,0048	0,5310
23	0,2494	0,4023	0,6633	0,4023
24	0,2374	0,4023	0,6416	0,4023
25	0,6699	0,8613	1,0647	0,8015
26	0,6340	0,7895	0,9092	0,7416
27	0,2736	0,2736	1,0132	0,2736
28	0,2736	0,2736	1,0132	0,2736
29	0,2414	0,2414	0,6068	0,2414
34	0,2897	0,2897	0,4385	0,2897
35	0,1646	0,1540	0,6315	0,1115
43	0	0	0	0
45	0	0,0652	0,6807	0,0145
46	0	0	0	0
47	0	0	0,0355	0
48	0,2384	0,2384	0,2384	0,2384
49	0,2384	0,2384	0,2384	0,2384
50	0	0	0	0
51	0	0	0	0
52	0	0	0	0
53	0	0	0	0
56	0,4489	0,7152	0,3445	0,6734
57	0,4437	0,7048	0,3445	0,6630
59	0,3576	0,3576	0,3576	0,3576
60	0,3576	0,3576	0,3576	0,3576
62	0	0	0	0
63	0	0	0	0
TOTAL	18,1335	12,8940	12,8214	12,1650

O *software* também oferece o recurso de se obter a área de vulnerabilidade para cada barra de interesse. A Tabela V.5 apresenta a contribuição de cada linha pertencente à área de vulnerabilidade de cada barra, considerando-se apenas faltas trifásicas. Analogamente à Tabela V.4, estes resultados permitem identificar, por exemplo, as linhas que mais contribuem para o comprimento da área de vulnerabilidade. Os resultados podem ser disponibilizados pelo sistema, tanto em

quilômetros, conforme mostra a Tabela V.5, como em porcentagem do comprimento de cada linha. Considerando-se, por exemplo, somente as faltas trifásicas, a linha 2 possui 100% dos seus 107 quilômetros dentro da área de vulnerabilidade para a carga instalada na barra 41, 60% para a barra 95, 6% para a barra 113 e 41% para a barra 119.

Tabela V.5 – Contribuição das linhas para a área de vulnerabilidade para faltas trifásicas – caso base.

Código das Linhas	Contribuição em km			
	Barra 41	Barra 95	Barra 113	Barra 119
2	107,00	64,20	6,42	46,01
3	107,00	64,20	6,42	46,01
6	67,00	67,00	0	67,00
7	67,00	67,00	0	67,00
8	38,00	38,00	38,00	38,00
9	21,00	21,00	21,00	21,00
10	21,00	21,00	21,00	21,00
11	20,00	20,00	20,00	20,00
12	19,00	19,00	0	19,00
13	19,00	19,00	0	19,00
14	45,00	45,00	15,30	45,00
15	38,00	38,00	9,12	38,00
20	85,00	85,00	85,00	85,00
22	66,00	66,00	66,00	66,00
23	31,00	50,00	50,00	50,00
24	29,50	50,00	50,00	50,00
25	55,00	55,00	55,00	55,00
26	55,00	55,00	55,00	55,00
27	34,00	34,00	34,00	34,00
28	34,00	34,00	34,00	34,00
29	30,00	30,00	30,00	30,00
34	36,00	36,00	36,00	36,00
35	20,46	19,14	66,00	13,86
43	0	0	0	0
45	0	8,10	84,60	1,80
46	0	0	0	0
47	0	0	4,41	0
48	8,00	8,00	8,00	8,00
49	8,00	8,00	8,00	8,00
50	0	0	0	0
51	0	0	0	0
52	0	0	0	0
53	0	0	0	0
56	24,00	24,00	24,00	24,00
57	24,00	24,00	24,00	24,00
59	12,00	12,00	12,00	12,00
60	12,00	12,00	12,00	12,00
62	0	0	0	0
63	0	0	0	0
TOTAL	1132,96	1093,64	875,27	1045,68

Como complemento da tabela anterior, a Tabela V.6 apresenta o comprimento total da área de vulnerabilidade, de acordo com cada um dos tipos de falta considerados.

Tabela V.6 – Área de vulnerabilidade total por tipo de falta – caso base.

Tipos de Falta	Comprimento da Área de Vulnerabilidade (km)			
	Barra 41	Barra 95	Barra 113	Barra 119
Faltas FT	414,53	188,22	265,65	172,45
Faltas FF	1132,96	1093,64	875,27	1045,68
Faltas FFT	1132,96	1093,64	875,27	1045,68
Faltas FFF	1132,96	1093,64	875,27	1045,68

Comparando os resultados apresentados nas tabelas anteriores observa-se que a barra 119, mesmo possuindo a menor expectativa de desligamentos, não é aquela com menor comprimento da área de vulnerabilidade para faltas trifásicas, bifásicas e bifásicas-terra. Porém, a distribuição percentual dos tipos de falta faz com que, mesmo para grandes comprimentos da área de vulnerabilidade, a frequência de ocorrência de afundamentos oriundos destes tipos de falta (FFF, FFT e FF) seja muito inferior à frequência associada às faltas fase-terra.

A Tabela V.7 apresenta os resultados dos indicadores de desempenho para os quatro barramentos monitorados e os indicadores globais e totais para o sistema.

Tabela V.7 – Indicadores de desempenho – caso base.

	<i>Disp.</i>	<i>Indisp.</i>	<i>Freq.</i>	<i>DND</i>	<i>END</i>	<i>C. END</i>	<i>C. Anual</i>
Barra 41	0,9837	0,0163	18,1335	0,3258	2.283,27	570.818,52	906.674,09
Barra 95	0,9884	0,0116	12,8940	0,2328	1.631,22	407.804,86	644.698,27
Barra 113	0,9884	0,0116	12,8214	0,2315	1.622,14	405.535,50	641.068,63
Barra 119	0,9890	0,0110	12,1650	0,2198	1.540,01	385.003,36	608.250,93
Sistema Global	0,9870	0,0126	14,0176	0,2525	1.769,12	442.290,56	700.157,78
TOTAL	-	-	-	1,0098	7.076,65	1.769.162,23	2.800.691,91

Onde:

Disp. – Disponibilidade do consumidor;

Indisp. – Indisponibilidade do consumidor;

Freq. – Frequência anual de ocorrência de paradas de processo;

DND – Demanda não distribuída para o consumidor, em MW;

END – Energia não distribuída para o consumidor, em MWh;

C. END – Custo da energia não distribuída, em R\$;

C. Anual – Custo anual de interrupção do consumidor, em R\$.

Através da inspeção da Tabela V.7, chega-se à conclusão que a barra 119 é a que apresenta os melhores índices de desempenho. Por outro lado, a barra 41 é a que apresenta os piores indicadores e possui uma expectativa de interrupções de processo 49% superior à barra 119. Este fato demonstra claramente que, sem qualquer tipo de investimento para melhoria do sistema, é muito mais vantajoso para o consumidor que a planta industrial seja alimentada, prioritariamente, pela barra 119 ao invés da barra 41.

A Figura V.11 mostra as curvas “iso-sags” para a barra 119. A partir deste gráfico, pode-se confirmar os valores de frequência anual de desligamentos de processo apresentados na Tabela V.7. O número esperado de desligamentos é determinado pela interseção do “joelho” do retângulo de sensibilidade (0,8 p.u. x 120 ms) com alguma das curvas. A Figura V.11 mostra que, para a situação analisada, tal interseção se dá em um ponto intermediário entre as linhas de 10 e 15 eventos, valor este coerente com o resultado apresentado na Tabela V.7. Desta forma, estas curvas permitem que, sem grandes dificuldades, o número esperado de desligamentos seja estimado para diferentes condições de sensibilidade da carga.

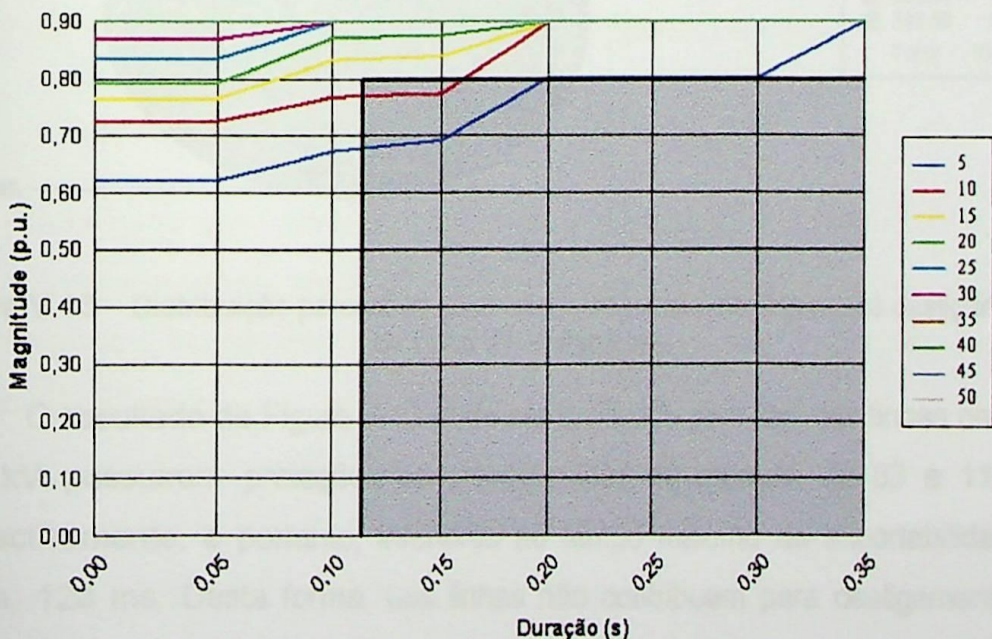


Figura V.11 – Curvas iso-sags para barra 119 – caso base.

A Figura V.12 mostra a distribuição percentual dos tipos de falta nos desligamentos da carga conectada à barra 41. Observa-se que, como era esperado, os defeitos do tipo fase-terra são os tipos predominantes, contribuindo

com 49,7% dos eventos.

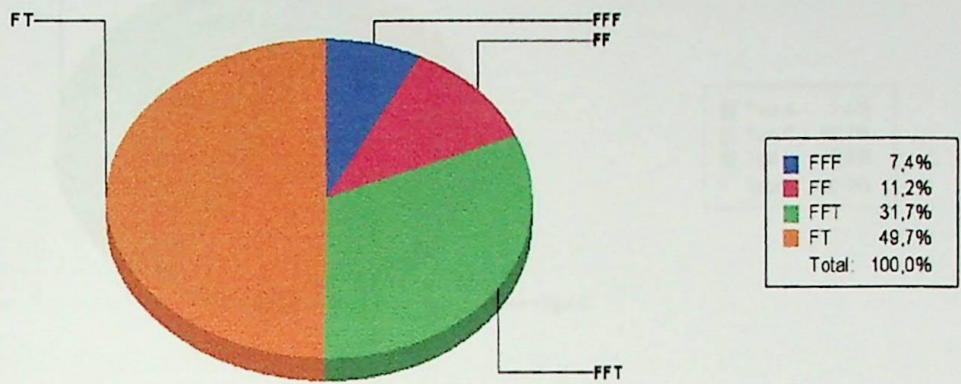


Figura V.12 – Distribuição percentual dos tipos de falta nos desligamentos da barra 41 – caso base.

Da mesma forma, as Figuras V.13 e V.14, mostram a distribuição percentual por classe de tensão das linhas simuladas e por tipo de afundamento, respectivamente.

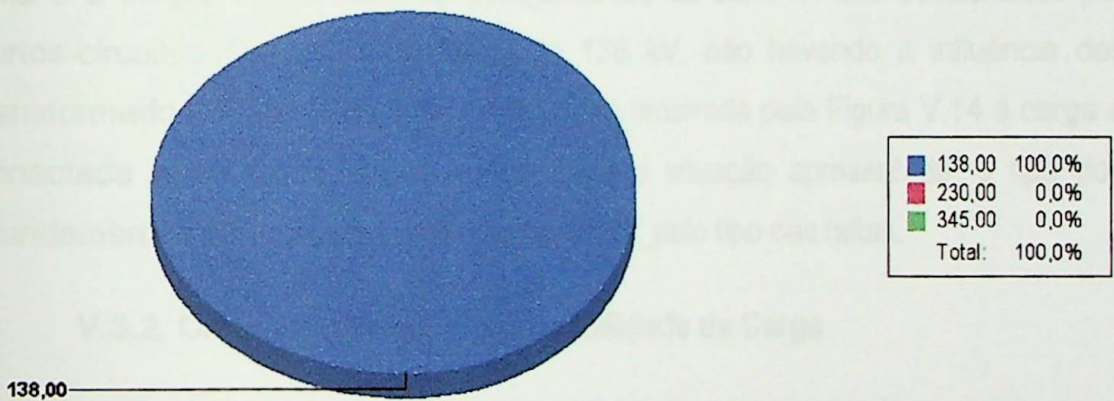


Figura V.13 – Distribuição percentual das classes de tensão das linhas nos desligamentos da barra 41 – caso base.

O resultado da Figura V.13 pode ser explicado pelo fato das linhas de 230 e 345 kV possuírem proteções com tempo total de atuação de 83 e 110 ms, respectivamente, e portanto, inferiores ao tempo máximo de suportabilidade da carga, 120 ms. Desta forma, tais linhas não contribuem para desligamentos da carga conectada à barra 41.

Esta conclusão pode ser extrapolada para as demais barras, visto que o tempo máximo de suportabilidade das demais cargas também é igual a 120 ms.

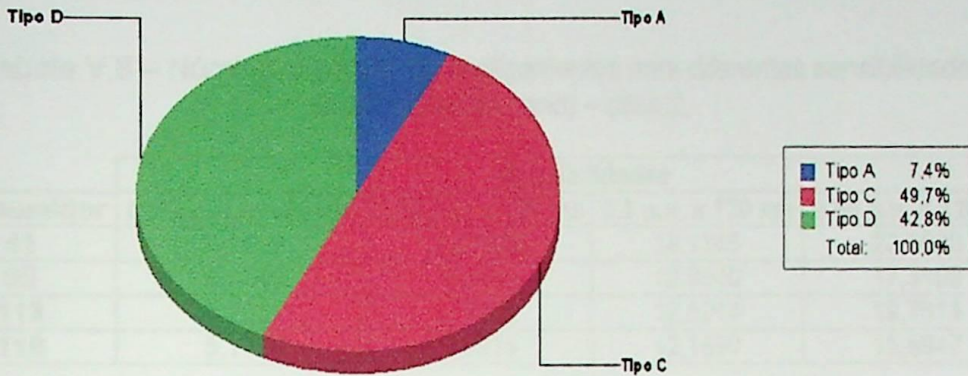


Figura V.14 – Distribuição percentual dos tipos de afundamentos nos desligamentos da barra 41 – caso base.

Os resultados apresentados na Figura V.14 mostram que os tipos de afundamento C e D são os que mais provocam desligamentos da carga na barra 41; estes tipos de afundamentos são determinados pela forma de conexão da carga, tipo da falta e conexão dos transformadores localizados entre o ponto de falta e a carga. Neste caso, os desligamentos da barra 41 são ocasionados por curtos-circuitos somente nas linhas de 138 kV, não havendo a influência dos transformadores; por outro lado, na situação mostrada pela Figura V.14 a carga é conectada entre fases. Assim sendo, para a situação apresentada, o tipo dos afundamentos será determinado, basicamente, pelo tipo das faltas.

V.3.2. Caso 2: Alteração da Sensibilidade da Carga

Este caso tem, como objetivo, mostrar a aplicação do sistema de *software* para subsidiar a análise de custo-benefício para a instalação de cargas / processos com diferentes sensibilidades. Supõe-se, desta forma, que o consumidor industrial possa adquirir processos mais robustos.

Mantendo a caracterização da sensibilidade na forma magnitude x duração, foram simulados limites de intensidade em 0,70, 0,75 e 0,85 p.u. mantendo-se o tempo máximo de exposição da carga em 120 ms.

De forma a comparar numericamente os resultados, a Tabela V.8 mostra o número total esperado de desligamentos para cada valor de sensibilidade das cargas. Os resultados comprovam a influência da sensibilidade da carga no número esperado de desligamentos, fato este que já havia sido discutido no

Capítulo II.

Tabela V.8 – Número esperado de desligamentos para diferentes sensibilidades (desligamentos / ano) – caso 2.

Consumidor	Sensibilidades			
	0,70 p.u. x 120 ms	0,75 p.u. x 120 ms	0,8 p.u. x 120 ms	0,85 p.u. x 120 ms
41	8,1939	12,7902	18,1335	23,3023
95	6,0240	9,3692	12,8940	17,3103
113	5,2237	8,7339	12,8214	19,7614
119	5,1796	7,9935	12,1650	15,6947

A partir dos resultados da tabela anterior, pode-se comprovar que, o aumento da sensibilidade da carga causa um crescimento significativo na expectativa de desligamentos. O gráfico apresentado na Figura V.7 demonstra que há uma grande taxa de crescimento da freqüência acumulada de afundamentos para intensidades superiores a 0,70 p.u., ocasionando uma grande diversificação dos resultados quando se varia a sensibilidade da carga dentro desta região.

As Figuras V.15 a V.17 mostram as novas curvas “iso-sags” para a barra 119, onde é possível observar a variação do número de desligamentos com a alteração da sensibilidade da carga. Estes gráficos comprovam os resultados apresentados na Tabela V.8 para a barra 119, onde o joelho da região de sensibilidade indica o número esperado de desligamento da carga.

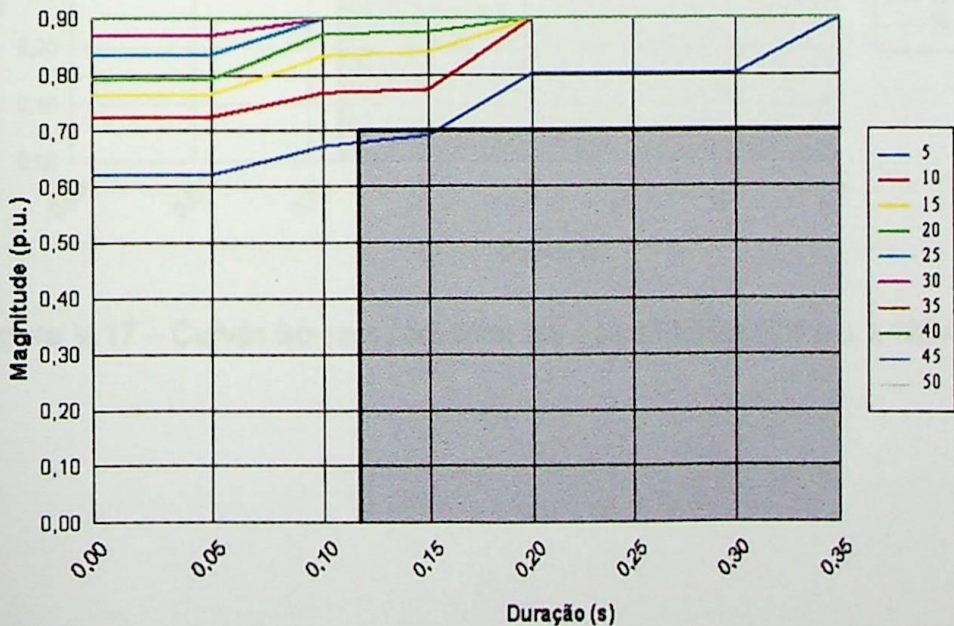


Figura V.15 – Curvas iso-sags para barra 119 – sensibilidade 0,70 p.u. x 120 ms.

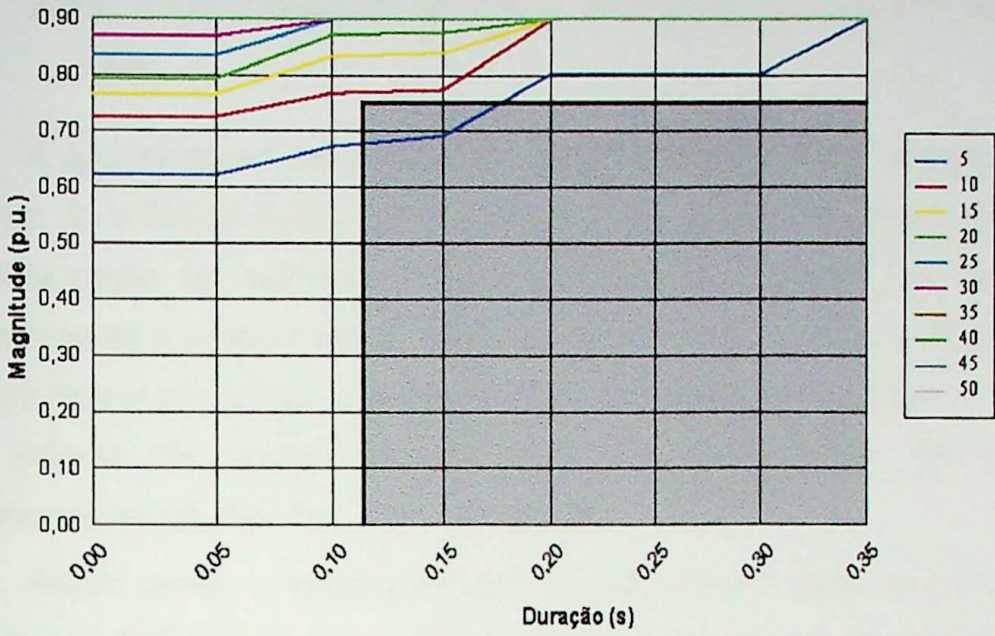


Figura V.16 – Curvas iso-sags para barra 119 – sensibilidade 0,75 p.u. x 120 ms.

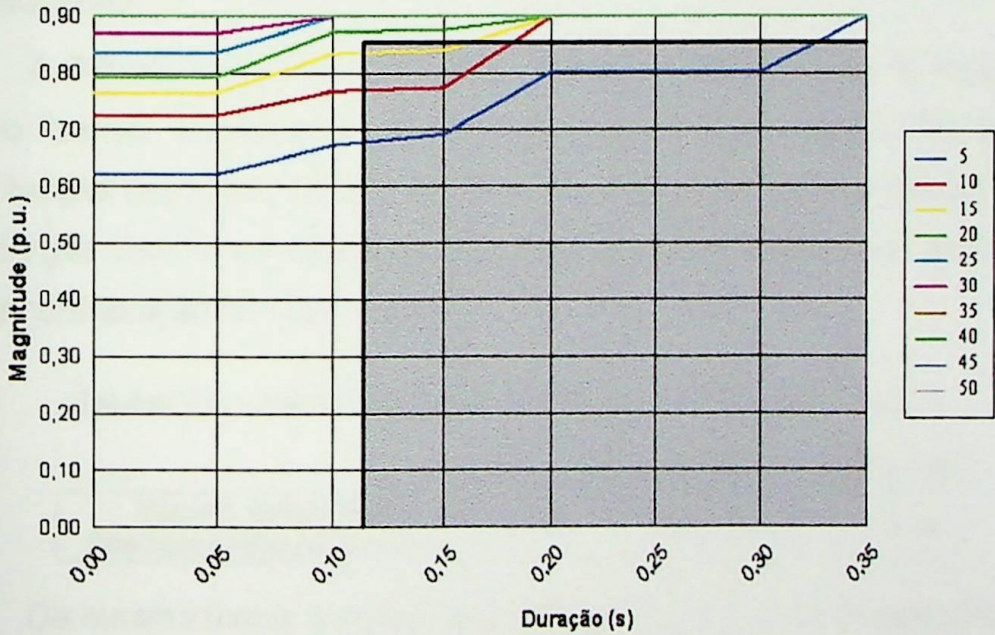


Figura V.17 – Curvas iso-sags para barra 119 – sensibilidade 0,85 p.u. x 120 ms.

V.3.3. Caso 3: Melhoria no Sistema de Proteção nas Linhas 20, 22, 25 e 26.

A apresentação deste caso tem, como finalidade, mostrar a aplicação do sistema de *software* desenvolvido, para subsidiar a análise de custo-benefício na implementação de melhorias no sistema de proteção de linhas. Com este fim, vislumbrou-se a possibilidade de instalação de teleproteção nas linhas 20, 22, 25 e 26 com tempo de atuação total igual a 110 ms. Esta escolha foi realizada com base nos valores de contribuição das linhas para desligamentos das cargas, escolhendo-se aquelas com maior contribuição.

Assim sendo, e considerando que a sensibilidade da carga permanece em 0,80 p.u. x 120 ms, as faltas ocorridas nestas linhas não mais contribuirão para desligamentos nas cargas, conforme poderá ser observado nas análises subsequentes.

A Tabela V.9 mostra os novos valores de desligamentos de carga nas quatro barras monitoradas. Como era de se esperar, com a redução na contribuição das linhas 20, 22, 25 e 26, a expectativa do número de desligamentos das cargas diminuiu consideravelmente, visto que tais linhas figuravam entre as de maior contribuição no Caso – Base.

Tabela V.9 – Número esperado de desligamento das cargas – caso 3.

	Barra 41	Barra 95	Barra 113	Barra 119
Número Esperado de Desligamentos / Barra / Ano	15,4668	10,0282	9,0478	9,4070

Da mesma forma, o comprimento total da área de vulnerabilidade sofre uma redução significativa, conforme mostra a Tabela V.10.

Tabela V.10 – Área de vulnerabilidade total por tipo de falta – caso 3.

	Barra 41	Barra 95	Barra 113	Barra 119
Faltas FT	388,48	153,02	188,72	142,20
Faltas FF	871,96	832,64	614,27	784,68
Faltas FFT	871,96	832,64	614,27	784,68
Faltas FFF	871,96	832,64	614,27	784,68

Conforme pode ser observado, todas as barras apresentam uma significativa redução, tanto na frequência de desligamentos quanto no comprimento

da área de vulnerabilidade.

A fim de permitir a verificação da influência das alterações no sistema de proteção quando em comparação com o caso base, a Tabela V.11 apresenta os resultados dos indicadores de desempenho.

Tabela V.11 – Indicadores de desempenho – caso 3.

	<i>Disp.</i>	<i>Indisp.</i>	<i>Freq.</i>	<i>DND</i>	<i>END</i>	<i>C. END</i>	<i>C. Anual</i>
Barra 41	0,9861	0,0139	15,4668	0,2786	1.952,18	488.044,01	773.340,00
Barra 95	0,9909	0,0091	10,0282	0,1815	1.271,96	317.990,19	501.410,00
Barra 113	0,9918	0,0082	9,0478	0,1639	1.148,63	287.156,87	452.390,00
Barra 119	0,9915	0,0085	9,4070	0,1704	1.193,84	298.459,97	470.350,00
Sistema Global	0,9901	0,0099	10,9875	0,1986	1.391,65	347.912,76	549.372,50
TOTAL	-	-	-	0,7943	5.566,60	1.391.651,04	2.197.490,00

Observando-se, por exemplo, o resultado da frequência média de desligamentos do sistema, no caso base o valor era de 14,0176, passando agora para 10,9875. Do ponto de vista de viabilidade econômica da alteração das proteções, o indicador do Custo total de afundamentos pode subsidiar as análises: no caso base, tem-se um custo total de R\$ 2.800.691,91 e neste caso 3 tal indicador se reduz para R\$ 2.197.490,00. A redução do custo total de R\$ 603.201,91 por ano, certamente justifica e viabiliza a substituição dos relés de proteção nas linhas 20, 22, 25 e 26.

V.3.4. Caso 4: Instalação de Condicionadores de Energia

A apresentação deste caso tem o objetivo de mostrar a aplicação do sistema de *software* para subsidiar a análise de custo-benefício na instalação de condicionadores de energia no sistema do consumidor ou da concessionária.

A instalação de um condicionador, tanto no sistema da concessionária quanto no sistema do cliente, pode ser simulada no sistema de *software* desenvolvido através da alteração no valor da sensibilidade da carga. Desta forma, a nova sensibilidade não representa somente a carga, mas o conjunto carga mais condicionador de energia. Assim sendo, as análises de resultados a serem conduzidas, em um caso como este, se assemelham muito ao Caso 2, apresentado anteriormente.

Sendo a condição simulada para um condicionador capaz de injetar 30% de tensão durante um tempo superior a qualquer atuação das proteções, considera-se

que a nova sensibilidade do conjunto carga-condicionador passa de 0,80 p.u. x 120 ms para 0,5 p.u. x 120 ms.

A Tabela V.12 mostra os resultados para os indicadores de desempenho das cargas conectadas a cada uma das quatro barras analisadas, bem como para o sistema global.

Tabela V.12 – Indicadores de desempenho – caso 4.

	<i>Disp.</i>	<i>Indisp.</i>	<i>Freq.</i>	<i>DND</i>	<i>END</i>	<i>C. END</i>	<i>C. Anual</i>
Barra 41	0,9963	0,0037	4,0289	0,0733	513,81	128.451,34	201.443,68
Barra 95	0,9987	0,0013	1,4538	0,0265	185,83	46.458,36	72.687,56
Barra 113	0,9984	0,0016	1,7333	0,0316	221,51	55.376,96	86.663,47
Barra 119	0,9988	0,0012	1,2911	0,0236	165,06	41.265,30	64.553,06
Sistema Global	0,9981	0,0019	2,1267	0,0387	271,55	67.887,99	106.336,94
TOTAL	-	-	-	0,1550	1.086,21	271.551,97	425.347,77

Em se tratando de indicadores de desempenho, também se observa uma redução considerável em todos os resultados com relação ao caso base. A redução de R\$ 2.375.344,00 no custo total anual é um fator decisivo na análise de investimento para a instalação do condicionador.

V.3.5. Caso 5: Análise da Influência do Passo do Curto-circuito Deslizante

A apresentação deste exemplo tem, por finalidade, avaliar a influência do passo de cálculo do curto-circuito deslizante na precisão dos resultados. Conforme apresentado no Capítulo II, sabe-se que os resultados para um passo de 1% do comprimento das linhas, como utilizado no Caso Base, são mais precisos, porém, decidiu-se avaliar o erro cometido quando da alteração deste passo para valores acima de 1%.

Desta forma, foram simulados cinco casos considerando-se passos de 2, 5, 10, 20 e 25%.

Vale destacar que, todos os demais dados de entrada, foram admitidos conforme o Caso Base.

Inicialmente, as principais razões de aumentar-se o passo, estão relacionadas ao esforço computacional; entenda-se como esforço computacional o tempo necessário para processamento dos cálculos, associado ao espaço

necessário em disco para armazenamento das informações. Em se utilizando o menor valor disponibilizado pelo *software*, isto é 1%, o volume de informações armazenadas no banco de dados e o tempo de processamento são os maiores possíveis. Por outro lado, em se utilizando um passo acima de 1%, o volume de informações armazenadas e o tempo de processamento são reduzidos, porém, certamente, ocorrerá alguma perda na precisão dos resultados.

Desta forma, a Tabela V.13 apresenta os valores do espaço ocupado pelo banco de dados, quando da simulação, utilizando diferentes passos para o curto-circuito deslizando.

Tabela V.13 – Espaço de memória utilizado pelo banco de dados em função do passo do curto-circuito deslizando.

Passo	Tamanho do Banco (Mbytes)	Redução (%)
1%	26,12	0
2%	15,56	40,04
5%	9,19	64,82
10%	6,75	74,16
20%	5,62	78,49
25%	5,38	79,40

Conforme pode ser observado, duplicando o passo do curto-circuito deslizando, o espaço utilizado pelo banco de dados é reduzido de 40,04%; da mesma forma, aumentando em vinte e cinco vezes a amplitude do passo, o espaço utilizado pelo banco é reduzido de 79,40%. Também é possível observar que, para passos a partir de 10%, o banco de dados não sofre significativa redução em seu tamanho. Apenas pela observação deste critério, a amplitude escolhida do passo para a simulação do curto deslizando, neste sistema elétrico, seria de 25%. Porém, deve-se atentar para a perda de precisão dos resultados, fato este que será discutido na seqüência.

A Tabela V.14 mostra os resultados para o número esperado de desligamentos para cada uma das quatro cargas analisadas em função do passo do curto-circuito deslizando.

Tabela V.14 – Número esperado de desligamento das cargas – caso 5.

Passo	Barra 41	Barra 95	Barra 113	Barra 119
1%	18,1335	12,8940	12,8214	12,1650
2%	18,0791	12,8588	12,7885	12,1607
5%	18,2116	13,0094	12,7742	11,9979
10%	18,1844	12,8996	12,9070	12,0794
20%	18,7835	13,0621	13,1876	12,4847
25%	19,3488	13,0121	13,3956	12,2825

Desta forma, pode-se concluir que, para o caso específico deste sistema analisado, a amplitude do passo para o cálculo do curto-circuito deslizante pode ser ampliada até o valor de 10%, onde há uma considerável redução no espaço utilizado pelo banco de dados (74,16%), sem grandes prejuízos na precisão dos resultados. Nesta situação, a maior divergência encontrada entre os resultados apresentados foi de 1,4%, valor este que, certamente, representa um erro aceitável.

A comparação realizada na Tabela V.14 se restringe a um valor específico de sensibilidade da carga (0,80 p.u. / 120 ms). De modo a ampliar as análises comparativas, a Figura V.18 mostra as freqüências acumuladas das tensões para a barra 41, com base em cada um dos passos simulados. Pode-se observar que entre os passos de 1, 2, 5 e 10% existe uma grande aderência entre os resultados; as curvas ficam quase totalmente sobrepostas; para os passos de 20 e 25% observa-se que existe uma diferença na região entre 0,70 e 0,90 p.u., confirmando as conclusões anteriores.

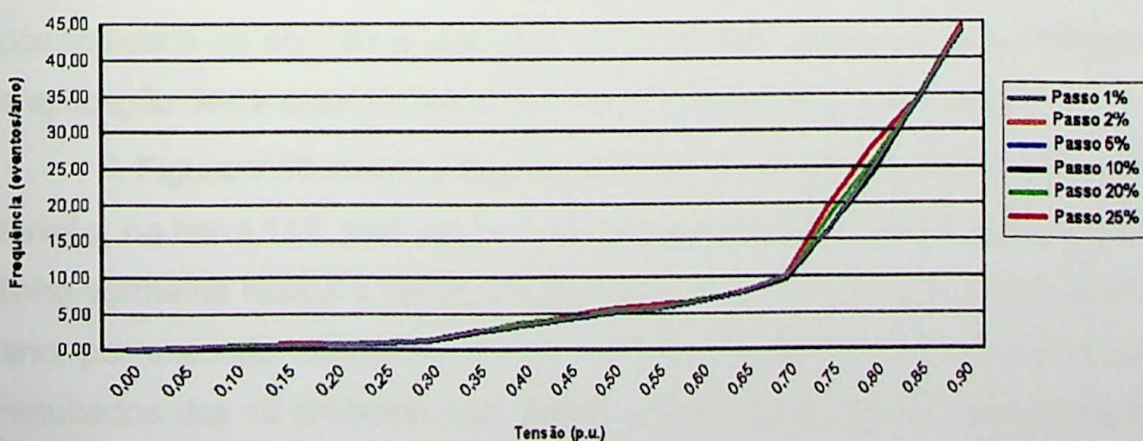


Figura V.18 – Freqüência acumulada das tensões na barra 41 – caso 5.

A justificativa destes resultados pode estar relacionada a uma característica

peculiar do sistema elétrico estudado: a maioria das linhas é muito curta, resultando em um comprimento médio de 49,87 km. Assim, a variação do passo do curto-circuito deslizando não se traduz em grandes variações nas impedâncias dos segmentos das linhas.

Vale salientar que os resultados deste caso não devem ser extrapolados para todo e qualquer sistema elétrico, carecendo, nestes casos, de estudos específicos.

V.4. ESTUDOS PROSPECTIVOS BASEADOS NA METODOLOGIA PARA CÁLCULOS ESTOCÁSTICOS

Esta seção tem o objetivo de apresentar exemplos de aplicação dos estudos prospectivos, baseados na metodologia de cálculos estocásticos.

Neste tipo de estudo, cada conjunto de sorteios, corresponde à estimativa do comportamento futuro de um ano de operação do sistema, baseado nas estatísticas de taxas de falta das linhas de transmissão e distribuição.

De posse dos dados de taxas de falta λ e do comprimento l , em km, de todas as linhas do sistema, é possível efetuar o cálculo do número de faltas N_F esperado para um ano típico de operação do sistema, utilizando a fórmula (5.1):

$$N_F = \sum \frac{\lambda \cdot l}{100} \quad (5.1)$$

Pode-se observar nesta equação que, neste cálculo, não foi considerada a possibilidade de ocorrência das faltas em barramentos. Para o sistema analisado, a aplicação desta equação resulta em, aproximadamente, 53 ocorrências.

A Figura V.19 mostra a frequência anual de ocorrência de afundamentos de tensão, na barra 119, para cada ano de sorteio representada por uma linha azul. A linha vermelha retrata a média dos resultados, para todos os sorteios, até aquele ano; por exemplo, no ano 10, a linha vermelha representa o valor da média dos resultados dos 10 primeiros anos. Estas médias apresentam uma certa oscilação nos primeiros anos de sorteio, mas, a partir dos 40 anos, é observada uma convergência para um valor em torno de 35 ocorrências. Visto que, através dos cálculos do curto-circuito deslizando, a expectativa anual é de 35,067 eventos,

conclui-se, então, que, para períodos de simulação superiores a 40 anos, os resultados obtidos com as duas metodologias são muito próximos.

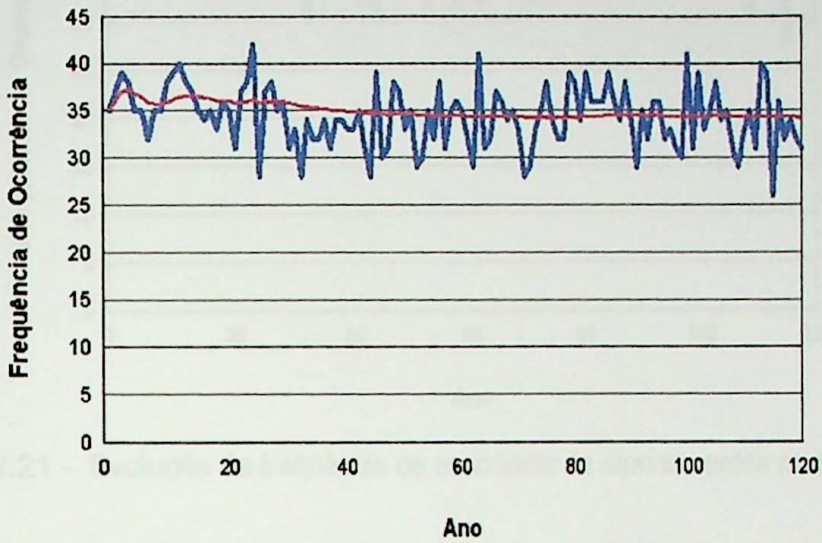


Figura V.19 – Evolução da freqüência de ocorrência de afundamentos na barra 119.

As Figuras V.20 a V.22 mostram a evolução da freqüência anual de desligamentos para as barras 41, 95 e 113, respectivamente. Pode-se observar que as mesmas conclusões extraídas pela observação do comportamento da barra 119, podem ser extrapoladas para as demais barras.

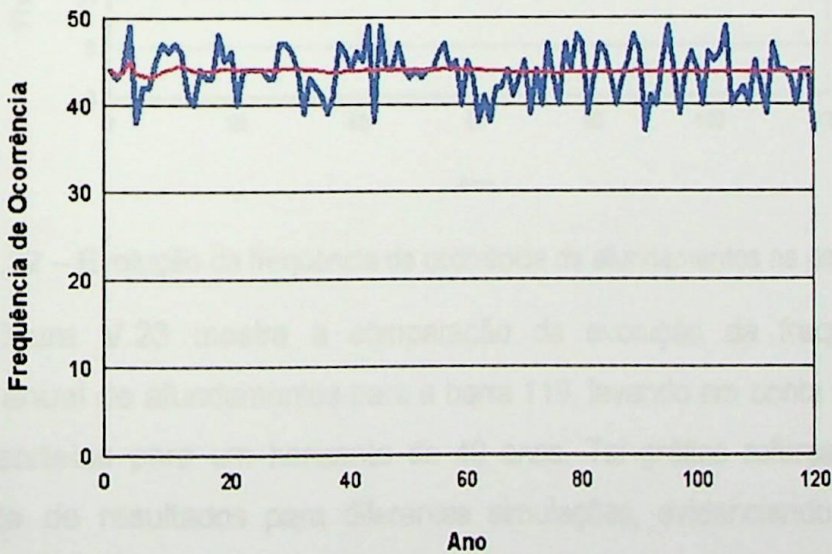


Figura V.20 – Evolução da freqüência de ocorrência de afundamentos na barra 41.

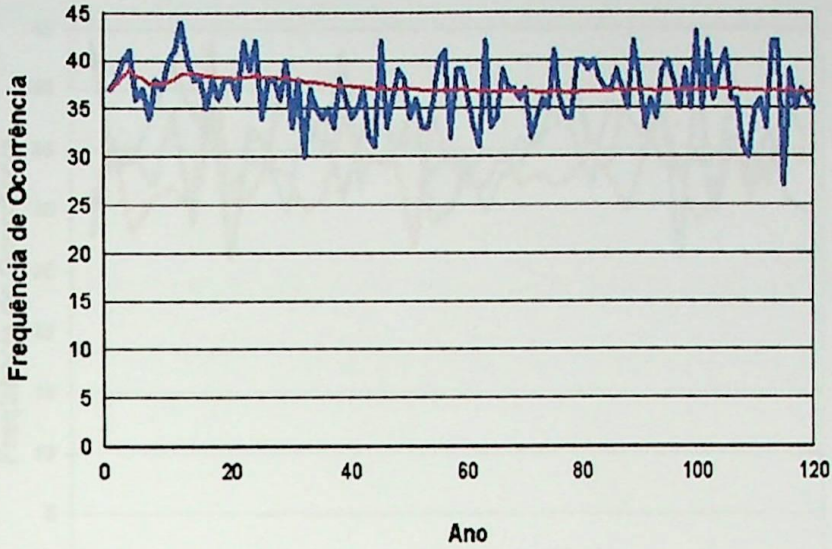


Figura V.21 – Evolução da frequência de ocorrência de afundamentos na barra 95.

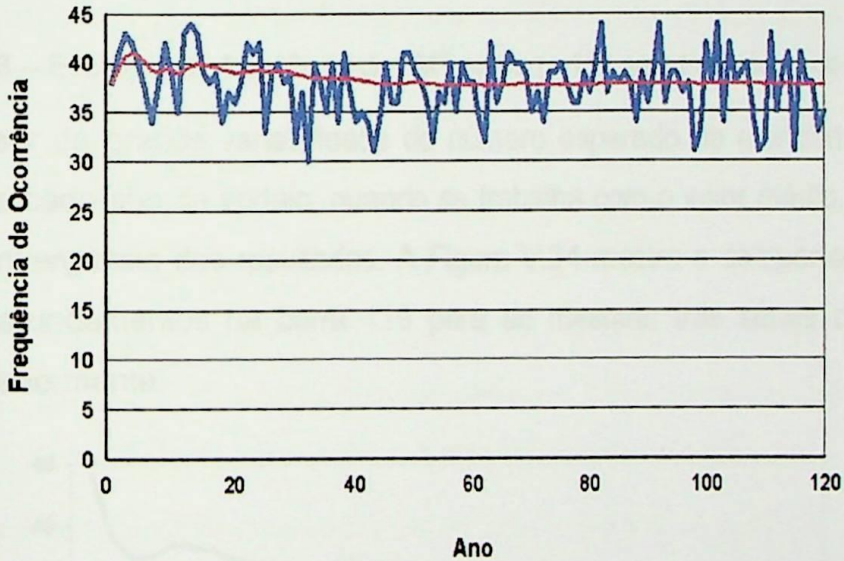


Figura V.22 – Evolução da frequência de ocorrência de afundamentos na barra 113.

A Figura V.23 mostra a comparação da evolução da frequência de ocorrência anual de afundamentos para a barra 119, levando em conta três outras séries de sorteios para um horizonte de 40 anos. Tal gráfico reforça a grande variabilidade de resultados para diferentes simulações, evidenciando o caráter aleatório e não-linear do distúrbio em foco.

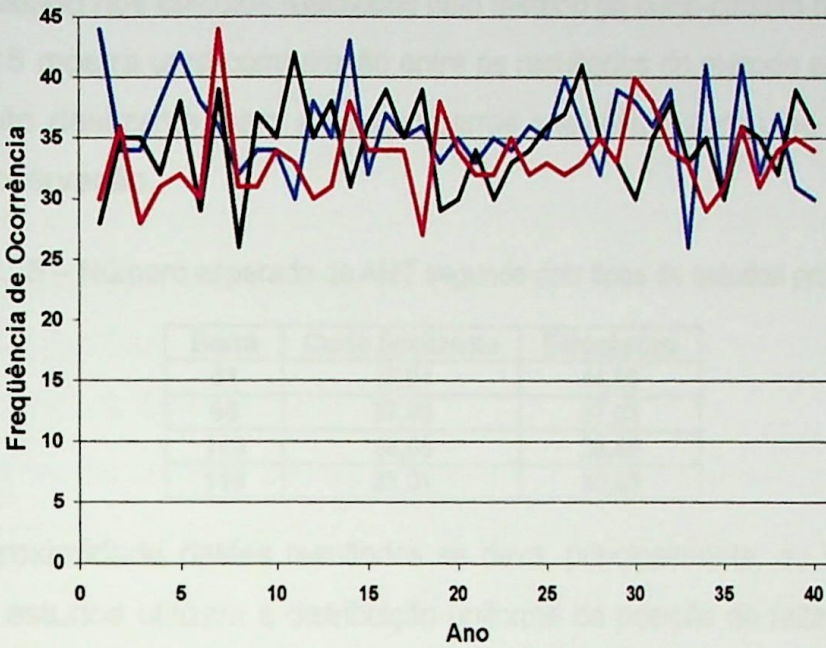


Figura V.23 – Evolução da frequência de AMT na barra 119 para três séries de sorteios.

Apesar da grande variabilidade do número esperado de afundamentos de tensão para cada ano de sorteio, quando se trabalha com o valor médio, observa-se uma convergência dos resultados. A Figura V.24 mostra o comportamento da média de afundamentos na barra 119 para as mesmas três séries de sorteio citadas anteriormente.

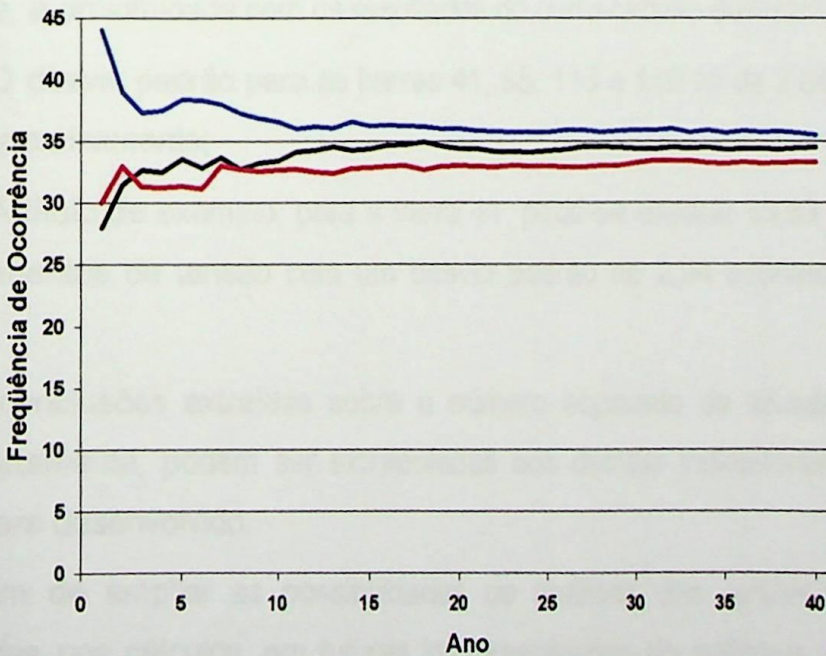


Figura V.24 – Linha de tendência da frequência de ocorrência média de AMT na barra 119.

A tendência verificada, normalmente, converge para um valor próximo ao

resultado obtido nos cálculos realizados pelo método do curto-circuito deslizante. A Tabela V.15 mostra uma comparação entre os resultados do método estocástico e curto-circuito deslizante, para as quatro barras analisadas, para uma série de 40 anos de observação.

Tabela V.15 – Número esperado de AMT segundo dois tipos de estudos prospectivos.

Barra	Curto Deslizante	Estocástico
41	43,94	44,05
95	37,40	37,63
113	38,05	38,48
119	35,01	35,08

A proximidade destes resultados se deve, principalmente, ao fato de que ambos os estudos utilizam a distribuição uniforme da posição de falta nas linhas. Adicionalmente, também foram adotados, nos dois tipos de simulação, valores idênticos para as taxas de falta bem como para a distribuição estatística dos tipos de falta.

Tomando-se como base 10 novas séries de 40 anos de sorteios, algumas análises estatísticas adicionais podem ser extraídas:

- A média do número de afundamentos para as barras 41, 95, 113 e 119 foi de 43,63, 37,03, 37,64 e 34,64, respectivamente. Estes resultados comprovam, novamente, a proximidade com os resultados do curto-circuito deslizante;
- O desvio padrão para as barras 41, 95, 113 e 119 foi de 2,94, 3,41, 3,16 e 3,56, respectivamente;
- A título de exemplo, para a barra 41, pode-se esperar 43,63 ocorrências de afundamentos de tensão com um desvio padrão de 2,94 eventos (6,75% da média).

As conclusões extraídas sobre o número esperado de afundamentos de tensão, certamente, podem ser extrapoladas aos demais indicadores calculados pelo *software* desenvolvido.

A fim de ampliar as possibilidades de análises das variáveis aleatórias consideradas nos cálculos, em futuras implementações do *software*, pretende-se incorporar a utilização das taxas de falta a partir de uma composição de um valor médio, conforme atualmente é feito, associado ao desvio padrão correspondente.

V.5. ESTUDOS RETROSPECTIVOS

Nesta seção é apresentado um exemplo de aplicação do estudo do tipo retrospectivo, que tem por finalidade retratar o comportamento passado de um determinado sistema elétrico, com base em um relatório de ocorrências de faltas.

O objetivo da exposição dos resultados deste tipo de estudo é compará-los com os do Caso Base apresentado anteriormente, o qual retrata o comportamento médio, por ano, de operação do sistema.

A forma de se obter a lista de eventos a serem simulados é, normalmente, através do registro de ocorrências da concessionária; entretanto, nesta seção, será adotada, hipoteticamente, uma lista de ocorrências, de forma a possibilitar a apresentação dos resultados. Conforme discutido anteriormente, aplicando a equação (5.1), obtém-se um número esperado de faltas igual a 53. Buscando-se retratar o comportamento do sistema para um ano de operação, escolheu-se, aleatoriamente, 53 ocorrências, resultando na lista apresentada na Tabela V.16.

Tabela V.16 – Registros de ocorrências para um ano de operação do sistema.

Nº Falta	Linha	Posição (%)	Tipo
1	25	95	FT
2	3	1	FFT
3	22	85	FT
4	3	89	FT
5	27	96	FT
6	52	21	FT
7	2	18	FF
8	63	21	FT
9	7	8	FT
10	23	82	FFT
11	63	27	FT
12	25	64	FFT
13	28	57	FT
14	35	39	FT
15	9	10	FF
16	7	51	FT
17	10	3	FFT
18	29	21	FT
19	20	39	FF
20	22	89	FF
21	7	94	FF
22	63	80	FT
23	25	16	FT
24	3	51	FT
25	63	59	FT
26	34	74	FFT

Nº Falta	Linha	Posição (%)	Tipo
27	35	51	FT
28	3	38	FT
29	62	27	FT
30	26	22	FT
31	3	17	FT
32	22	91	FT
33	15	43	FT
34	43	46	FT
35	59	45	FT
36	23	43	FT
37	11	32	FFT
38	62	48	FT
39	26	68	FT
40	11	96	FT
41	63	8	FT
42	9	62	FFT
43	14	74	FT
44	62	36	FT
45	10	99	FT
46	62	64	FT
47	63	68	FT
48	20	11	FT
49	9	10	FT
50	3	8	FFT
51	63	15	FT
52	62	93	FT
53	46	88	FT

O número total de desligamentos esperados para cada uma das cargas analisadas é apresentado na Tabela V.17.

Tabela V.17 – Número esperado de desligamento das cargas – estudos retrospectivos.

	Barra 41	Barra 95	Barra 113	Barra 119
Número Esperado de Desligamentos / Barra / Ano	20,00	17,00	19,00	17,00

A Tabela V.18 apresenta os resultados para os indicadores de desempenho individuais, globais e totais.

Tabela V.18 – Indicadores de desempenho – estudos retrospectivos.

	<i>Disp.</i>	<i>Indisp.</i>	<i>Freq.</i>	<i>DND</i>	<i>END</i>	<i>C. END</i>	<i>C. Anual</i>
Barra 41	0,9821	0,0179	20,00	0,3587	2.514,08	628.520,18	1.000.000,00
Barra 95	0,9847	0,0153	17,00	0,3058	2.142,73	535.683,45	850.000,00
Barra 113	0,9829	0,0171	19,00	0,3411	2.390,52	597.630,16	950.000,00
Barra 119	0,9847	0,0153	17,00	0,3058	2.142,73	535.683,45	850.000,00
Sistema Global	0,9836	0,0164	18,25	0,3279	2.297,52	574.379,31	912.500,00
TOTAL	-	-	-	1,3114	9.190,06	2.297.517,24	3.650.000,00

Tanto os resultados do número esperado de desligamentos quanto dos indicadores de desempenho apresentam diferenças quando comparados com aqueles mostrados no Caso Base. Os erros verificados para as barras 41, 95, 113 e 119 são de 10,31, 31,89, 48,21 e 39,80%, respectivamente. Vale lembrar que os estudos expostos no Caso Base são calculados de forma a retratar o comportamento médio esperado para cada ano de operação. Por outro lado, a lista de ocorrências apresentada na Tabela V.16, sendo obtida aleatoriamente, certamente não corresponde ao comportamento médio, evidenciando o caráter aleatório inerente ao fenômeno, afundamento de tensão. Neste caso, os números de AMTs em todas as barras são superiores aos valores médios encontrados no caso base.

V.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A implementação do sistema de *software* ora proposto, se constitui em uma importante contribuição técnica para a metodologia de análise e prevenção dos afundamentos de tensão, atendendo, de forma adequada, às necessidades das concessionárias e consumidores quanto à melhoria da qualidade de energia elétrica.

Em se tratando das concessionárias, as análises dos afundamentos de tensão proporcionam o conhecimento do comportamento do sistema diante destes distúrbios, possibilitando a avaliação de sua performance global e o impacto sobre os seus consumidores.

Do ponto de vista dos consumidores, a informação das estimativas de ocorrências de afundamentos, subsidiam a especificação de equipamentos e o processo de avaliação de investimentos alternativos, visando minimizar os problemas decorrentes da sensibilidade de seus equipamentos / processos frente aos afundamentos de tensão.

Durante a apresentação dos resultados disponibilizados pelo sistema de *software* foi observado, que muitos deles, permitem aos planejadores do sistema buscar, ainda na fase de projeto, alternativas que visam minimizar os prejuízos associados aos afundamentos de tensão, tanto do lado do consumidor quanto da concessionária. Além da agilização do processo de análise dos afundamentos de tensão, as informações disponibilizadas contribuem para uma investigação de soluções alternativas que venham a otimizar o desempenho do sistema elétrico como um todo.

Dentre as possibilidades oferecidas, o sistema de *software* implementado permite analisar diversos cenários do conjunto rede de suprimento - processos, avaliar custos e estabelecer estudos de viabilidade técnico – econômica de alternativas para mitigação de problemas tais como:

- Melhoria no sistema de proteção da concessionária;
- Melhoria no desempenho das linhas de transmissão e distribuição;
- Alterações de configuração operacional do sistema de fornecimento de energia;
- Instalação de condicionadores de energia, tanto por parte da concessionária quanto por parte do consumidor;
- Especificar equipamentos e processos menos sensíveis.

Para o caso específico do sistema elétrico utilizado nos casos-teste apresentados, a alteração do passo do curto-circuito deslizando até o valor de 10%, não exerceu influência considerável na precisão dos resultados. Além de

apresentarem uma redução de 74,16% no espaço utilizado pelo banco, os resultados para um passo de 1 e 10% apresentaram uma relativa aderência; por outro lado, para passos superiores a 10%, além da imprecisão dos resultados tornar-se considerável, a redução do espaço ocupado pelo banco de dados quase não se altera. Isto se explica pelo fato de que o banco de dados, para seu correto funcionamento, exige um espaço mínimo necessário, independente do volume de dados armazenados.

Nos estudos estocásticos foi demonstrado que para um número de sorteios reduzido, ou seja, um período de simulação menor que 30 anos, os resultados são amplamente influenciados pela aleatoriedade das posições de falta no sistema elétrico. A partir deste período, observou-se que a frequência de ocorrência de afundamentos para as quatro barras analisadas inicia a convergência para um valor final, o qual é muito próximo daquele calculado através do curto-circuito deslizando.

O exemplo de aplicação para os estudos retrospectivos demonstrou que, a ocorrência de faltas registradas durante um ano de comportamento do sistema, não necessariamente irá corresponder ao comportamento médio do sistema calculado pelo método do curto-circuito deslizando.

Vale ressaltar que tais conclusões se aplicam somente ao sistema elétrico analisado, não devendo ser generalizadas, na íntegra, para quaisquer outros sistemas.

VI. CONCLUSÕES

VI.1. CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÕES

Os estudos de afundamentos de tensão são, basicamente, realizados através da monitoração de grandezas do sistema elétrico (tensões e correntes) ou pela utilização de metodologias de predição, realizadas a partir de dados de simulação.

Em função da aleatoriedade das ocorrências dos afundamentos, os métodos de simulação apresentam-se como uma boa alternativa para se obter, estatisticamente, os parâmetros destes distúrbios, evitando-se despender grandes recursos financeiros e longos períodos de medição.

Simulações baseadas nos cálculos de curto-circuito fornecem a intensidade dos distúrbios exigindo baixo esforço computacional e modelagem simplificada dos componentes.

Nos últimos anos, diversas ferramentas computacionais têm sido desenvolvidas para análise de afundamentos de tensão. Entretanto, apesar da disponibilidade destas ferramentas, ainda persistiam algumas limitações, cuja necessidade de desenvolvimentos complementares era premente.

Dentro deste contexto, neste trabalho de dissertação, foi proposto e implementado um novo sistema de *software* para estudos de afundamentos de tensão, eliminando-se algumas das principais lacunas identificadas nos *softwares* existentes, destacando-se entre elas:

- Necessidade de integração das metodologias de análise retrospectiva e prospectiva em um único sistema de *software*;
- Possibilidade das análises prospectivas segundo o método do curto-circuito deslizante e/ou método estocástico;
- Carência na representação dos sistemas de proteção, onde foram incorporadas, às proteções a tempo definido, as rotinas de cálculo para as proteções de: distância, sobrecorrente a tempo definido e tempo inverso;
- Necessidade de caracterização dos afundamentos segundo metodologias não convencionais, tais como perda de energia e perda de tensão

dentre outras;

De modo a aplicar o sistema de *software* desenvolvido, foram apresentados exemplos de aplicação com base na rede de uma concessionária do sistema elétrico brasileiro, de onde se pode extrair as seguintes conclusões:

- Com o crescimento do passo do curto-circuito deslizante, ocorre significativa redução tanto no banco de dados quanto no tempo de processamento. Por outro lado, um crescimento demasiado pode provocar perda de precisão dos resultados, sendo necessária a otimização do passo para cada sistema estudado. Neste caso exemplo, o incremento do passo em até 10% preservou a precisão dos resultados dentro de limites aceitáveis;

- Alterações da sensibilidade dos equipamentos / processos industriais influenciam, sobremaneira, no comportamento das cargas frente a afundamentos de tensão. Isto ocorre, sobretudo, se a redução da sensibilidade da carga se localizar na faixa entre 0,70 e 0,90 p.u., onde há maior freqüência de ocorrência de afundamentos; nesta situação, a redução do número de paradas de processo é substancial;

- Melhorias no sistema de proteção das linhas de transmissão e distribuição do sistema, podem melhorar, consideravelmente, o desempenho dos consumidores sensíveis a afundamentos, justificando-se, portanto, tais investimentos;

- Investimentos em melhorias no sistema da concessionária ou do consumidor, tais como a instalação de condicionadores de energia, podem ser justificados e viabilizados devido à redução dos prejuízos associados às paradas de processos industriais, resultantes de sua implantação;

- A metodologia para cálculos estocásticos demonstrou que, para períodos de sorteio superiores a 30 anos, os resultados para a média da freqüência de ocorrência de afundamentos de tensão, são próximos daqueles encontrados pela metodologia do curto-circuito deslizante; esta proximidade de resultados se deve à utilização, em ambas as metodologias, da distribuição uniforme das posições de falta e valores médios para as taxas de falta;

- Também na metodologia estocástica, para períodos inferiores a 30 anos,

a aleatoriedade e não-linearidade inerentes ao distúrbio prevalecem, influenciando, sobremaneira, os resultados que, nem sempre, serão próximos da média calculada pelo curto-circuito deslizante;

- Mesmo realizando a monitoração da mesma barra, diferentes séries de sorteios resultarão em uma grande variabilidade de valores a cada ano; porém, a média da frequência de afundamentos tende a convergir para o mesmo resultado, que corresponde àquele obtido pelo método do curto-circuito deslizante;

- Estudos retrospectivos baseados em relatórios de ocorrências de faltas, retratam o comportamento do sistema para uma dada situação pregressa, a qual pode não corresponder ao comportamento médio esperado do sistema.

Além das conclusões específicas, a apresentação dos exemplos de aplicação demonstrou a grande potencialidade de aplicação do sistema de *software* desenvolvido, contemplando técnicas efetivas para estudo e análise do sistema elétrico da concessionária e de seus clientes, frente a AMTs. O sistema de *software* ora implementado representa grande contribuição para o setor elétrico nacional, disponibilizando, dentre outras, as seguintes alternativas:

- Análise da alteração da sensibilidade dos processos industriais, através da especificação de equipamentos menos sensíveis;

- Avaliação da viabilidade técnico-econômica da implantação de medidas mitigadoras dos efeitos dos afundamentos, tanto no sistema da concessionária quanto do consumidor, como por exemplo, a instalação de condicionadores de energia;

- Estudos de melhoria no sistema de proteção a fim de reduzir os tempos de eliminação das faltas e, conseqüentemente, a duração dos afundamentos de tensão sentidos pelas cargas;

- Possibilitar a identificação de locais com baixa incidência do distúrbio visando a instalação de novos consumidores, bem como localizar áreas mais expostas a AMTs, com necessidade de investimento em melhorias;

- Análise de alterações na configuração operacional do sistema de suprimento;

- Avaliação da alteração da conexão de consumidores para diferentes

níveis de tensão;

- Análise da possibilidade de incremento da tensão operativa do sistema em pontos críticos do mesmo.

VI.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Visando dar continuidade ao desenvolvimento do sistema de *software* ora apresentado, bem como nas pesquisas acerca do tema, afundamentos de tensão, são apresentadas, na seqüência, algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Implementar a possibilidade de considerar faltas através de impedâncias no curto-circuito deslizante, recurso este não disponível na versão atual do ANAFAS;
- Considerar as taxas de falta através de um valor médio e correspondente desvio padrão;
- Integrar no *software* uma rotina própria para cálculo de curto-circuito; esta implementação também deve considerar as faltas deslizantes através de impedâncias;
- Integrar no *software* uma rotina de cálculo de fluxo de potência;
- Incorporar rotinas para cálculos envolvendo: proteção direcional, religadores e fusíveis;
- Implementar rotinas para considerar falhas na proteção principal e conseqüente atuação da proteção de retaguarda;
- Analisar o comportamento das componentes seqüenciais das tensões na propagação dos afundamentos; tais componentes já estão disponíveis no banco de dados do sistema;
- Implementar análises da influência da reconfiguração do sistema elétrico, promovida pela abertura não-simultânea dos terminais das linhas de transmissão quando da ocorrência de curtos-circuitos;
- Ampliar as possibilidades de análise do *software*, hoje restritas a afundamentos de tensão, com vistas a considerar, tanto as interrupções momentâneas quanto as elevações de tensão. Tais distúrbios são hoje conhecidos como VTCDs, Variações de Tensão de Curta Duração.

VII. REFERÊNCIAS

- [ABREU, 1999] Abreu, J.P.G., Carvalho Filho, J.M., Caminha Noronha, J.C., Arango, H., "Visage – Um *Software* para Avaliar Depressões de Tensão", Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica, p.183-188, Brasília – DF, 08 a 12 de agosto de 1999.
- [ALVES, 2000] Alves, M.F., Fonseca, V.R.C., "Estimativa Estocástica de Fundamentos de Tensão", CBA 2000 – Florianópolis-SC, 11 a 14 de setembro de 2000.
- [ASPEN, 2000] ASPEN – Advanced Systems for Power Engineering, Inc. ASPEN Onliner User's Manual. USA, 2000.
- [AYELLO, 1999] Ayello, F.P., Carvalho Filho, J.M., et al., "Influência do Sistema de Proteção na Qualidade da Energia", III CONLADIS - Congresso Latino Americano de Distribuição de Energia Elétrica – USP - SP, 1999.
- [BECKER, 1994] Becker, C., Braun Jr., W., Carrick, K., Dilberti, T., Grigg, C., Groesch, J., Hazen, B., Imel, T., Koval, D., Mueller, D., St. John, T., Conrad, L., "Proposed Chapter 9 for Predicting Voltage Sags (Dips) in Revision to IEEE Std 493, The Gold Book". IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, No. 3, p.805 – 821, May/Jun 1994.
- [BLACKBURN, 1987] J. L. Blackburn, "Protective Relaying", New York, Marcel Dekker, 1987, (Electrical Engineering and Electronics, No. 37).
- [BOLLEN, 1994] M. H. J. Bollen, "The Influence of Motor Reacceleration on Voltage sags", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, No. 3, May/Jun 1994, pp. 805-821.
- [BOLLEN, 1996] Bollen, M.H.J., "Fast Assessment Methods for Voltage Sags in Distribution Systems", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, No. 6, p.1414-1423, Nov/Dec 1996.
- [BOLLEN, 1997] Bollen, M. H. J., "Characterization of Voltage Sags Experienced by Three-Phase Adjustable-Speed Drive", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 12, No. 4, October 1997, pp. 1667-1671.

- [BOLLEN, 1998a] Bollen, M. H. J., Qader, M. R., Allan, R. N., "Stochastic and Statistical Assessment of Voltage Dips", IEE Colloquium on Tools and Techniques for Dealing with Uncertainty (Digest No. 1998/200), Page(s): 5/1 -5/4, 27 Jan 1998.
- [BOLLEN, 1998b] Bollen, M.H.J., Yalcinkaya, G., Hazza, G., "The Use of Electromagnetic Transient Programs for Voltage Sags Analysis", 8th ICHQP - International Conference on Harmonics and Quality of Power, IEEE-PES and NTUA, Athens, Greece, October 1998.
- [BOLLEN, 2000a] Bollen, M. H. J., "Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions", IEEE Press, 2000;
- [BOLLEN, 2000b] M. H. J. Bollen, E. Styvaktakis, "Characterization of three-phase unbalanced dips (as easy as one-two-three?)", 9th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Orlando USA, October 2000.
- [BROOKS, 2000] D. L. Brooks, R. C. Dungan, M. Waclawiak, A. Sundaram, "Indices for Assessing Utility Distribution System RMS Variation Performance", IEEE PES Distribution Sub-committee Meeting, Las Vegas, February 2000.
- [CARVALHO FILHO, 1997] Carvalho Filho, J. M., Abreu, J. P. G., Carvalho, P. L., "Análise do Impacto de Voltage Sags sobre Equipamentos Eletrônicos", Anais VII ERLAC, Puerto Iguazu, Argentina, maio de 1997.
- [CARVALHO FILHO, 2000] José Maria Carvalho Filho, "Uma Contribuição à Avaliação do Atendimento a Consumidores com Cargas Sensíveis – Proposta de Novos Indicadores", Tese de Doutorado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Dezembro de 2000.
- [CARVALHO FILHO, 2002a] J. M. Carvalho Filho, J. Policarpo G. Abreu, Roberto C. Leborgne, T. Clé Oliveira, D. M. Correia, Jeder F. de Oliveira, "Comparative Analysis between Measurements and Simulations of Voltage Sags", IEEE – PES – 10th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Rio de Janeiro, Brazil, October 2002.
- [CARVALHO FILHO, 2002b] José M. C. Filho, José P. G. Abreu, Roberto C. Leborgne, Thiago C. Oliveira, "Softwares e Procedimentos Para Simulação de Afundamentos de Tensão", Congresso Brasileiro de Automática – CBA 2002, Natal, Brasil, Setembro 2002.

- [CEPEL, 1998] CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, “ANAFAS – Programa de Análise de Falhas Simultâneas - Versão 3.2”, Rio de Janeiro, Dezembro, 1998.
- [CONRAD, 1991] Conrad, L., Little, K., Grigg, C., “Predicting and Preventing Problems Associated with Remote Fault - Clearing Voltage Dips”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 27, No. 1, p.167-172, Jan/Feb 1991.
- [CONRAD, 1997] Conrad, L. E., Bollen, M. H. J., “Voltage Sag Coordination for Reliable Plant Operation”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, No. 6, Nov/Dec 1997.
- [DAS, 1990] J. C. Das, “Effect of Momentary Voltage Dips on the Operation of Induction and Synchronous Motors”, IEEE Transactions in Industry Applications. Vol. 26, No. 4, July/August 1990.
- [DOQUET, 1992] Doquet, M., Boussin, J. L., Derausseau, G., EDF: Eletricité de France, “CALIFE: a Subtransmission System Planning Tool Which Estimates the Available end-users Power Quality”, 1992;
- [EDF, 1993] EDF: Eletricité de France, “CREUTENSI: *Software* for Determination of Depth, Duration and Number of Voltage Dips (Sags) on Medium Voltage Networks”, 1993;
- [ELECTROTEK, 1997] ELECTROTEK CONCEPTS, Inc.: EPRI Customer Assistance Center, “Power Quality ToolBox™ – Voltage Sag Analysis Module, Version 1.0, Beta Release: User’s Guide”, EPRI – Electric Power Research Institute, May 1997.
- [FISHMAN, 1995] Fishman, G. S., “*Monte Carlo: Concepts, Algorithms, and Applications*”, Springer-Verlag New York, Inc., 1995.
- [FONSECA, 1999] Fonseca, V. R. C., “*Cálculo Estocástico do Afundamento de Tensão*”, Dissertação de Mestrado, PUC-MG, Dezembro, 1999;
- [FONSECA, 2002] Fonseca, V. R. C., Alves, M. F., PUC-MG, “*A Dedicated Software for Voltage Sag Stochastic Estimate*”, 10th International Conference on Harmonics and Quality of Power – ICHQP, Rio de Janeiro, 2002;
- [IEC, 1994] International Electrotechnical Commission – IEC, “Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Distribution Systems”, European Standard, 06 November 1994.

- [IEC, 1996] International Electrotechnical Commission - IEC, "Electromagnetic Compatibility", IEC Standard 61000, 1996.
- [IEC, 2000] International Electrotechnical Commission - IEC, "Low voltage switchgear and controlgear – Part 4-1: Contactors and motors starters", IEC Standard 60947-4-1, November 2000.
- [IEEE, 1995] IEEE, "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality", IEEE Standard 1159 - 1995.
- [IEEE, 1997] IEEE, "IEEE recommended practice for the design of reliable industrial and commercial power systems", IEEE Standard 493 – 1997.
- [IEEE, 1998a] IEEE, "IEEE recommended practice for evaluating electric power system compatibility with electronic process equipment", IEEE Standard 1346 – 1998.
- [IEEE, 1998b] IEEE Power System Relaying Committee Report, "Distribution Line Protection Practices – Industry Survey Results", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, Apr 1998, pp. 514-524.
- [IEEE, 2000] IEEE, "Voltage Sags Indices", Draft 2, working document for IEEE P1564 and CIGRE WG 36-07, December 2000.
- [ITIC, 2000] Information Technology Industry Council, "ITI (CBEMA) CURVE APPLICATION NOTE", Revised in 2000, Available at <http://www.itic.org/technical/iticurv.pdf>
- [LEBORGNE, 2003] Roberto Chouhy Leborgne, José Maria Carvalho Filho, José Policarpo G. de Abreu, Thiago Clé de Oliveira, Alexandre Afonso Postal, Luiz Henrique Zapparoli, "Proposição de uma Metodologia para Caracterização da Sensibilidade de Cargas e Processos Industriais Frente a Afundamentos de Tensão", XVII SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Uberlândia, outubro de 2003.
- [LIU, 1997] Edwin Liu, W.H., Tu, L.G., Wayne Hong, H., Zhong, W., "An Integrated Application For Voltage Sag Analysis", 20th International Conference on Power Computer Applications, Columbus, Ohio, May 1997.
- [MCGRANAGHAN, 1993] M. F. McGranaghan, D. R. Mueller, M. J. Samotyj, "Voltage Sags in industrial Systems", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 29, No. 2, March/April 1993.

[MILANOVIC, 2000] Milanovic, J. V., Gnativ, R.; Chow, K.W.M, "The influence of loading conditions and network topology on voltage sags", Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power, Proceedings, Volume 2 pages 757 - 762 vol. 2, 1-4 Oct. 2000.

[NORONHA, 1999] Noronha, J.C.C., "Análise Computacional de *Voltage Sags* em Consumidores com Cargas Sensíveis", Dissertação de Mestrado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1999.

[OLIVEIRA, 2003] Thiago Clé de Oliveira, José Maria de Carvalho Filho, José Policarpo Gonçalves de Abreu, Roberto Chouhy Leborgne, "Análise da Influência da Conexão de Transformadores Δ/Y aterrado na Propagação de Afundamentos de Tensão", Anais V Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica – SBQEE, Aracajú, agosto de 2003.

[ORTMEYER, 1996] T. H. Ortmeyer, T. Hiyama, H. Salehfar, "Power Quality Effects of Distribution System Faults", Electrical Power & Energy Systems, Vol. 18, No. 5, 1996, pp. 323-329.

[PEDRA, 2002] J. Pedra, F. Córcoles, L. Sainz, "Study of AC Contactors During Voltage Sags", IEEE – PES – 10th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Rio de Janeiro, Brasil, Outubro 2002.

[POHJANHEIMO, 2002] P. Pohjanheimo, M. Lehtonen, "Equipment Sensitivity to Voltage Sags – Test Results for Contactors, PCs and Gas Discharge Lamps", IEEE – PES – 10th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Rio de Janeiro, Brasil, Outubro 2002.

[PRESSMAN, 2001] Pressman, Roger S., "Software Engineering: A Practitioner's Approach, 5th Edition, 2001.

[QADER, 1999] Qader, M.R., et al., "Stochastic Prediction of Voltage Sags in a Large Transmission System", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 35, No. 1, p.152-162, Jan/Feb, 1999.

[ROMERO, 2003] Romero, S. P., Schmidt, D. C., Rei, A. M., Fonseca, L. C. A., "Um Programa para Simulação de Afundamentos Momentâneos de Tensão", Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica, Aracajú, 17 a 20 de agosto de 2003.

[SABIN, 2001] D. Sabin, T. E. Grebe, A. Sundaram, "RMS Voltage Variation Statistical Analysis for a Survey of Distribution System Power Quality Performance", www.pqnet.electrotek.com, May 2001.

[SOMMERVILLE, 2003] Sommerville, Ian, "Engenharia de Software", Addison Wesley, 6ª Edição, 2003.

[STECIUK, 1996] Steciuk, P.B., Redmon, J.R., "Voltage Sag Analysis Peaks Customer Service", IEEE Computer Applications in Power, October 1996, p. 48-51.

[THALLAM, 2000] R. S. Thallam, G. T. Heydt, "Power Acceptability and Voltage Sag Indices in the Three Phase Sense", IEEE PES Summer Meeting, Seattle, USA, July 2000.

[TRIOLA, 1998] Mário F. Triola, "Introdução à Estatística", Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 7ª edição, 1998.

[XU, 2001] Xu, W., "Component Modeling Issues for Power Quality Assessment", IEEE Power Engineering Review, November 2001.

ANEXO A – CARACTERÍSTICAS DO SOFTWARE ANAFAS

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O programa de cálculo de curto-circuito que foi utilizado no desenvolvimento deste sistema de *software* é o ANAFAS [CEPEL, 1998], desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL).

O ANAFAS é uma ferramenta iterativa para análise de faltas em sistemas elétricos de qualquer porte, permitindo a modelagem fiel do sistema e a simulação dos diversos tipos de defeitos, que podem ser compostos para definição de faltas simultâneas.

Este programa permite a execução de estudos individuais, onde o usuário define cada caso, e a execução de estudos macro, onde os casos são gerados automaticamente pelo ANAFAS. A solução pode ser orientada ao ponto de falta ou ao ponto de monitoração, apresentando como resultado em ambos os casos as grandezas escolhidas pelo usuário.

2. MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO

O sistema é modelado através de componentes de seqüência positiva e zero, através de 3 grupos de dados:

- Dados de barra: identificação, tensão base e tensão pré-falta;
- Dados de circuito: identificação, tipo de circuito, resistência e reatância de seqüência positiva e zero em %;
- Dados de acoplamentos: identificação de circuitos acoplados, resistência e reatância de acoplamento em %.

O ANAFAS permite a classificação dos ramos em:

- Linha de transmissão;
- Transformador (ramo série ou ramo shunt);
- Gerador;
- Capacitor série;
- Reator de linha (reator shunt associado a uma linha);

- Capacitor ou reator shunt associado a uma barra;
- Carga, modelagem através de impedância constante e corrente constante.

Esta classificação pode ser definida pelo usuário ou realizada de forma automática pelo programa em função do tipo de ligação e da impedância do ramo de circuito. O ANAFAS permite a especificação de tensões-base dos subsistemas e da potência-base trifásica (MVA).

Este programa permite a correta modelagem dos defasamentos gerados pelos transformadores delta-estrela inseridos no sistema. O valor do ângulo de defasamento depende do tipo de conexão entre os enrolamentos primário e secundário. A presença destes defasamentos implícitos define as regiões do sistema com diferentes referências de ângulo. Os valores de referência de ângulo aparecem no relatório de dados de barra.

É possível a representação dos defasamentos explícitos, analogamente aos modelados no programa de fluxo de potência. Estes defasamentos não afetam as referências angulares do sistema, em vez disto, provocam um aumento no fluxo que circula pelo transformador. Os defasamentos explícitos somente podem ser modelados quando se utiliza modelagem com tensão pré-falta, pois acarreta fluxos de corrente pré-falta.

O ANAFAS permite a representação do sistema com o carregamento pré-falta. Esta representação fornece resultados mais próximos da realidade, em função da utilização de uma modelagem mais fiel do sistema.

Este programa possui uma grande capacidade permitindo a modelagem completa de grandes sistemas. Seus principais limites são:

- 4000 barras;
- 8000 circuitos;
- 4000 ramos de transformadores;
- 800 ramos de geradores;
- 60 circuitos por barra;
- 1600 acoplamentos entre linhas;

- 800 grupos de acoplamentos, cada um com até 30 linhas.

3. ARQUIVOS DE DADOS

Os dados do sistema podem ser fornecidos através de um arquivo texto criado pelo usuário ou um arquivo binário gerado pelo próprio ANAFAS. Este arquivo primário é compatível com arquivos formato PECO do programa *Network Fault Analysis*. O formato ANAFAS é mais completo considerando as tensões pré-falta, capacitâncias das linhas, equipamentos shunt, cargas tipo impedância ou corrente constante, trafos com taps fora da posição nominal.

O programa também fornece um conjunto de relatórios de dados do sistema, resumidos a seguir:

- Sumário de dados: estatística dos elementos do sistema, estatística das matrizes de representação e índice de esparcidade;
- Relatório de barras: identificação das barras, referência de ângulo e injeção de potência pré-falta em cada barra;
- Relatório de circuitos: identificação do ramo, ordenados por barra;
- Relatório de geradores: dados dos ramos identificados como geradores, incluindo tensão interna deduzida a partir do carregamento do sistema;
- Relatório de transformadores: relação de transformação e defasamento;
- Relatório de mútuas: dados de acoplamento mútuo entre circuitos;
- Relatório de impedâncias e admitâncias primitivas: matrizes de impedâncias e admitâncias de seqüência zero;
- Relatório de impedâncias de barra: apresenta a diagonal da matriz de impedância de barra de seqüência positiva e zero;
- Relatório de injeções de corrente pré-falta: somente são apresentadas as ocorrências acima do limite estabelecido pelo usuário;
- Relatório de fluxo pré-falta: indica o fluxo da potência pré-falta nos

circuitos;

- Relatório de dados de curto-circuito: fornece para as barras selecionadas os níveis de curto-circuito total trifásico e monofásico, as relações X/R , X_0/X_1 , R_0/X_1 , o módulo da tensão fase-neutro da fase s durante o curto monofásico e a condição de aterramento (ATR, ARS, ARE) obtida a partir das relações descritas acima de acordo com a seguinte convenção: ATR (efetivamente aterrado) se $X_0/X_1 < 3$ e $R_0/X_1 < 1$, ARS (aterrado por resistência) se $X_0/X_1 < 3$ e $R_0/X_1 > 1$, ARE (aterrado por reatância) $X_0/X_1 > 3$.

4. SOLUÇÃO ORIENTADA A PONTO DE MONITORAÇÃO

Os pontos de monitoração são pontos de observação do sistema, identificados através da sua localização e das grandezas monitoradas. A localização dos pontos de monitoração é definida pela barra local e remota e pelo número do circuito.

As medições de tensão, corrente e potência podem se referir aos regimes pré e pós-falta. As medições de tensão podem se referir a qualquer ponto do sistema exceto as do tipo *mid-point* e a barra de referência.

As medições de corrente e potência se referem a um terminal de qualquer circuito do sistema. A medição é polarizada na direção do terminal de medição para o outro terminal do circuito, ou seja, correntes e potências são positivas quando estão saindo do ponto de medição em direção à outra barra.

As medições de tensão, corrente e potência são realizadas em unidades físicas (kV, kA, MVA), requerendo a definição das tensões bases das respectivas barras. Quando da medição de grandezas em barras do tipo *mid-point* ou de referência, a tensão base será a tensão da outra barra terminal do circuito. As medições podem ser especificadas em coordenadas de fase e/ou de seqüência.

A magnitude, o argumento, a parte real ou a parte imaginária de uma grandeza pode ser monitorada contra limites definidos pelo usuário. Cada ponto de monitoração pode ser ativado por faltas em quaisquer pontos do sistema, ou somente na sua vizinhança, definida pelo usuário, através do raio de observação.

A imagem da especificação dos pontos de monitoração é apresentada no relatório de pontos de monitoração que pode ser consultada iterativamente ou gravada em arquivo texto.

Os resultados de um estudo orientado a ponto de monitoração, apresentados sob a forma de relatório e/ou tabela, são o valor e o estado das unidades de saída das grandezas associadas a cada ponto. O valor das grandezas é apresentado em coordenadas polares, isto é, magnitude e argumento (ângulo de fase), sendo que o argumento pode ser omitido.

O relatório de resultados dos pontos de monitoração pode ser visualizado e/ou gravado como arquivo texto. A tabela de resultados dos pontos de monitoração pode ser somente gravada como arquivo texto e o seu formato é simplificado, sem títulos e com os campos delimitados por “;”.

5. SOLUÇÃO ORIENTADA A PONTO DE FALTA

Nesse modo de solução, o ANAFAS determina a tensão e a corrente nos pontos de falta, a tensão nas barras de contribuição, a tensão nas barras vizinhas a elas e as correntes nos circuitos delas para as barras de contribuição.

As barras de contribuição podem ser determinadas diretamente, como um conjunto de barras especificado pelo usuário, ou indiretamente, como uma vizinhança em torno dos pontos de falta, sendo o grau de vizinhança definido pelo usuário.

A solução de um estudo pode ser apresentada sob o formato de relatório ou de tabela. Ambos contém as mesmas informações, porém o formato relatório é mais adequado para leitura humana, enquanto que a tabela é mais adequada para exportação para outros programas, tais como, planilhas eletrônicas. O relatório pode ser apresentado iterativamente ou gravado em arquivo, enquanto que a tabela só pode ser gravada.

6. ESTUDO INDIVIDUAL

Nesse modo de estudo, o usuário especifica diretamente cada caso, composto por uma ou mais faltas simultâneas, até os seguintes limites por caso:

- 5 curtos-circuitos “shunt” + 3 curtos-circuitos série + 10 remoções e/ou aberturas (simples ou com aterramento);
- 3 faltas (curto-circuito “shunt” ou abertura) intermediárias. Cada ramo de circuito poderá conter, no máximo, 2 barras fictícias, ou seja, uma abertura intermediária (simples ou com defeito “shunt” associado), ou até 2 defeitos “shunt” intermediários.

7. ESTUDO MACRO

Nesse modo de estudo os casos são gerados pelo ANAFAS, através da combinação de tipos de curto-circuito, pontos de falta e contingências, definidos pelo usuário, como mostrado na Figura 1.

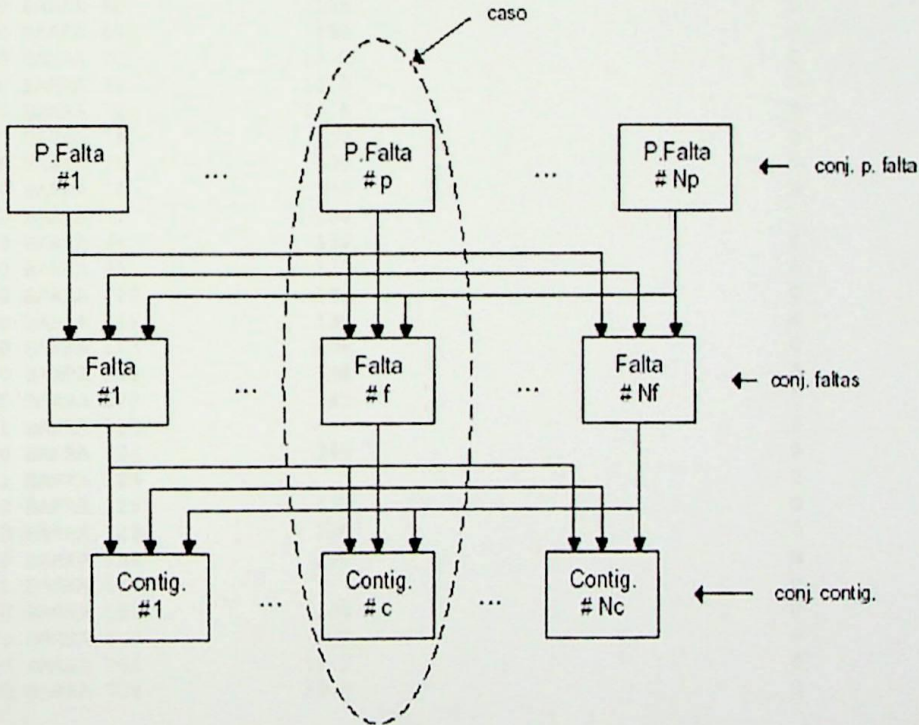


Figura 1 – Estrutura dos casos de um estudo macro.

ANEXO B – ARQUIVO DE DADOS DE CURTO-CIRCUITO

```
( Comentarios Gerais )
(----- Titulo e Comentarios -----)
1      1
***  CALCULO DE VOLTAGE SAGS  ***
2      1
      ***  SISTEMA TESTE  ***
2      2
      ***  SISTEMA EM VAZIO- TENSÃO PRE-FALTA DE 1 PU  ***
```

```
(----- Dados de Barra -----)
38
(NB  C M      BN      VPRE ANG VBAS      IA
(-----)
1    0 BARRA 01      138      0
2    0 BARRA 02      138      0
36   0 BARRA 36      138      0
40   0 BARRA 40      138      0
41   0 BARRA 41      138      0
48   0 BARRA 48      138      0
50   0 BARRA 50      6.3      0
56   0 BARRA 56      6.3      0
68   0 BARRA 68      138      0
69   0 BARRA 69      138      0
70   0 BARRA 70      13.8     0
71   0 BARRA 71      13.8     0
72   0 BARRA 72      13.8     0
74   0 BARRA 74      230      0
75   0 BARRA 75      138      0
76   0 BARRA 76      230      0
77   0 BARRA 77      138      0
94   0 BARRA 94      138      0
95   0 BARRA 95      138      0
110  0 BARRA 110     138      0
111  0 BARRA 111     138      0
113  0 BARRA 113     138      0
119  0 BARRA 119     138      0
122  0 BARRA 122     345      0
123  1 BARRA 123     0        0
124  0 BARRA 124     345      0
125  1 BARRA 125     0        0
126  0 BARRA 126     138      0
129  0 BARRA 129     230      0
138  0 BARRA 138     138      0
144  1 BARRA 144     0        0
180  0 BARRA 180     138      0
609  0 BARRA 609     138      0
701  0 BARRA 701     12.5     0
702  0 BARRA 702     12.5     0
9999
```

```
(----- Dados de Circuito -----)
37
(BF  C  BT  NC T  R1  X1  R0  X0  CN  S1  S0  TAP  TB  TC  IADEF
(-----)
0    1  1G  269  1332  15  348EQVL  0
1    2  1L  614  2623  3147  8919  0
1    2  2L  615  2623  3147  8919  0
1    74 1T1818313445069999999999999999EQVL  0
1    122 1T 1 194 -2 194EQVL  0
2    40 1L 406 1588 1384 6449  0
2    40 2L 405 1588 1384 6449  0
36   48 1L 265 907 817 3648  0
36   94 1L 212 518 588 2009  0
36   94 2L 213 518 588 2009  0
36  138 1L 131 503 440 2043  0
40   41 1L 227 478 469 1713  0
40   41 2L 228 478 469 1713  0
40  138 1L 278 1090 950 4428  0
40   48 1L 684 1777 3522 7049  0
```

Anexo B – Arquivo de Dados do Sistema

0	48	1	999999999999	0	5675	0
0	48	2	999999999999	0	5675	0
48	50	1T	0	5375999999999999		0
48	56	1T	0	5375999999999999		0
48	69	1L	597 2040 1838 8208			0
0	56	1G	0	8120999999999999		0
68	69	1L	467 1662 1403 6101			0
68	75	1L	550 1330 1299 4585			0
68	75	2L	549 1385 1313 5217			0
68	94	1L	388 1327 1195 5356			0
68	94	2L	454 1533 1399 6268			0
68	113	1L	338 876 774 3196			0
68	113	2L	339 876 774 3196			0
68	180	1L	215 733 661 2449			0
69	70	1T	0	2629999999999999		0
69	71	1T	0	2629999999999999		0
69	72	1T	0	2629999999999999		0
69	129	1T	0	9989999999999999		0
69	180	1L	251 859 773 3454			0
69	609	1L	659 1701 1618 6350			0
0	69	1	999999999999	0	2629	0
0	69	2	999999999999	0	2629	0
0	69	3	999999999999	0	2629	0
0	70	1G	0	8000999999999999		0
0	71	1G	0	8000999999999999		0
0	72	1G	0	8000999999999999		0
0	74	1G	93 688 123 815EQVL			0
74	76	1L	140 717 589 2180			0
74	122	1T	23189 7348599999999999EQVL			0
75	77	1L	899 2254 2214 8784			0
76	129	1L	128 658 541 2001			0
77	609	1L	489 1263 1201 4714			0
94	95	1L	51 203 158 760			0
94	95	2L	50 203 158 760			0
94	126	1L	17 82 81 325			0
94	126	2L	16 82 81 325			0
94	126	3L	21 71 80 374			0
94	126	4L	22 71 80 374			0
0	110	1H	999999999999	0	2388	0
0	111	1G	0 40447	0	2208	0
111	126	1L	148 578 598 2161			0
110	126	1L	148 578 598 2161			0
0	113	1G	0 2200	0	4000	0
119	126	1L	74 286 188 1031			0
119	126	2L	73 286 188 1031			0
0	122	1G	41 571 -151 2008EQVL			0
122	124	1L	68 740 532 3042			0
122	124	2L	69 740 532 3042			0
0	123	1T	999999999999	0	1660	0
123	124	1T	0 474	0	474	0
123	126	1T	0 -49	0	-49	0
0	124	1G	0 6334	0	2167	0
0	124	2H	999999999999	0	16667	0
0	124	3H	999999999999	0	16667	0
124	125	1T	0 474	0	474	0
124	144	1T	0 481	0	481	0
0	125	1T	999999999999	0	1660	0
125	126	1T	0 -49	0	-49	0
126	144	1T	0 -57	0	-57	0
0	129	1	999999999999	0	998	0
0	144	1T	999999999999	0	1637	0
0	119	1	999999999999	45	1514	0
0	119	2	999999999999	45	1513	0
0	701	1G	0	3372999999999999G1		0
0	702	1G	0	3372999999999999G2		0
119	701	1T	45	1514999999999999		0
119	702	1T	45	1513999999999999		0