

TESE

1110

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

*Uma Contribuição à Avaliação do Atendimento
a Consumidores com Cargas Sensíveis –
Proposta de novos Indicadores*

JOSÉ MARIA DE CARVALHO FILHO

ITAJUBÁ - Dezembro

2000

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
EFEI

UMA CONTRIBUIÇÃO À AVALIAÇÃO DO ATENDIMENTO
A CONSUMIDORES COM CARGAS SENSÍVEIS -
PROPOSTA DE NOVOS INDICADORES

JOSÉ MARIA DE CARVALHO FILHO



Tese submetida à
Coordenação da Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - CPG-E
da EFEI, como requisito para obtenção do título de
Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica

ORIENTAÇÃO : Dr. José Policarpo G. de Abreu - EFEI

CO-ORIENTAÇÃO : Dr. José Carlos de Oliveira - UFU

: Dr. Héctor Arango - EFEI

Itajubá, dezembro de 2000

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

EFEI

**UMA CONTRIBUIÇÃO À AVALIAÇÃO DO ATENDIMENTO
A CONSUMIDORES COM CARGAS SENSÍVEIS -
PROPOSTA DE NOVOS INDICADORES**

JOSÉ MARIA DE CARVALHO FILHO

Tese submetida à

Coordenação da Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - CPG-E

da EFEI, como requisito para obtenção do título de

Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica

ORIENTAÇÃO : Dr. José Policarpo G. de Abreu - EFEI

CO-ORIENTAÇÃO : Dr. José Carlos de Oliveira - UFU

: Dr. Héctor Arango - EFEI

Itajubá, dezembro de 2000

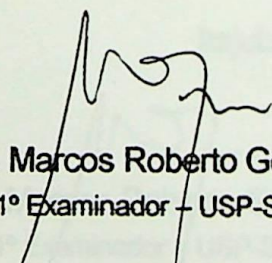


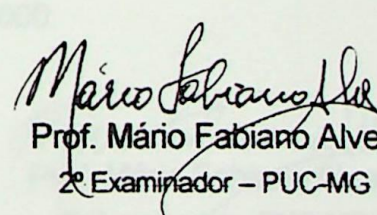
Ministério da Educação
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
Reconhecida Lei 3232 - 05/01/1917

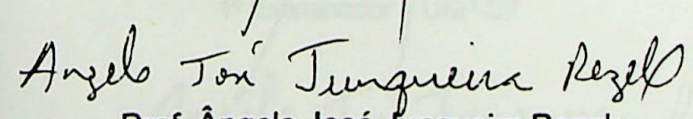
PRONUNCIAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA DE TESE DE DOUTORADO

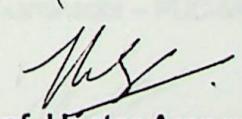
A Comissão Examinadora nomeada pela Portaria nº 341 de 14/12/2000, cumpridas todas as etapas da Sessão de Defesa de Tese previstas no Regulamento do Curso de Doutorado em Engenharia Elétrica, se posiciona favoravelmente à "Aprovação" da Tese de Doutorado intitulada: **"Uma Contribuição à Avaliação do Atendimento a Consumidores com Cargas Sensíveis – Proposta de Novos Indicadores"** e emite instrução para que o Coordenador dos Cursos de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola Federal de Engenharia de Itajubá, tome as providências necessárias junto ao DRA (Departamento de Registro Acadêmico) para a expedição do título de **Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica, na Área de Concentração de Sistemas Elétricos de Potência**, desde que atendidas as demais exigências regimentais, a **José Maria de Carvalho Filho**.

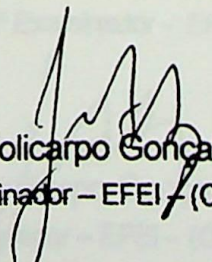
Itajubá, 18 de dezembro de 2000.

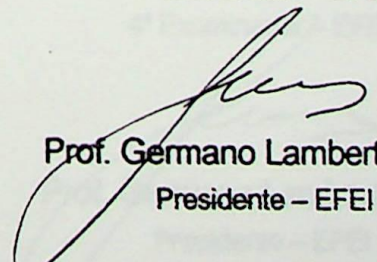

Prof. Marcos Roberto Gouvêa
1º Examinador – USP-SP


Prof. Mário Fabiano Alves
2º Examinador – PUC-MG


Prof. Ângelo José Junqueira Rezek
3º Examinador - EFEI


Prof. Héctor Arango
4º Examinador – EFEI


Prof. José Policarpo Gonçalves de Abreu
5º Examinador – EFEI – (Orientador)


Prof. Germano Lambert Torres
Presidente – EFEI



Ministério da Educação
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
Reconhecida Lei 3232 - 05/01/1917

**FOLHA DE JULGAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA
DE TESE DE DOUTORADO**

Título da Tese: **“Uma Contribuição à Avaliação do Atendimento a Consumidores
com Cargas Sensíveis – Proposta de Novos Indicadores”**

Autor: **José Maria de Carvalho Filho**

JULGAMENTO

Examinadores	Conceito	Rubrica
1º	A	
2º	A	
3º	A	
4º	A	
5º	A	

Resultado Médio: Conceito: A , ou seja, APROVADO

Observações: _____

Itajubá, 18 de dezembro de 2000.

Prof. Marcos Roberto Gouvêa
1º Examinador - USP-SP

Prof. Mário Fabiano Alves
2º Examinador - PUC-MG

Prof. Ângelo José Junqueira Rezek
3º Examinador - EFEI

Prof. Héctor Arango
4º Examinador - EFEI

Prof. José Polcarpo Gonçalves de Abreu
5º Examinador - EFEI - (Orientador)

Prof. Germano Lambert Torres
Presidente - EFEI

AGRADECIMENTOS

- Aos professores e amigos José Policarpo G. de Abreu, José Carlos de Oliveira e Hector Arango, pelo trabalho de orientação e pelo apoio, compreensão e ensinamentos dispensados durante a realização desta tese.
- Aos meus pais José Maria e Idelsuita, pelo cuidado e dedicação dispensados em minha educação e formação.
- À minha esposa Elisete e meus filhos Elisa, Marina e André, pelo estímulo dado e pela compreensão que tiveram nos momentos em que ficaram privados da minha presença.
- Ao amigo Gilson Paulillo, pelas colaborações dadas durante a realização deste trabalho.
- Ao aluno Thiago Clé de Oliveira, pela ajuda na execução de revisões na tese.
- À Eng. Júlia Cristina Caminha Noronha pela implementação do programa e auxílio na simulação dos casos-teste.
- À CAPES e FAPEMIG pelo apoio financeiro.

DEDICATÓRIA

O trabalho que está a ser desenvolvido, fundamentado e desenvolvido de uma forma geral, visando alcançar objetivos que se relacionam a projetos de uma natureza técnica, particularizar os diversos aspectos de natureza técnica e fundamentar de modo claro e consistente os valores de projetos de natureza técnica para projetos industriais de uma forma, na natureza dos seus objetivos.

Considerar desde o início a natureza dos projetos realizados de modo sistemático, tanto que para os conhecimentos, quanto das competências, no que diz respeito à realização de projetos para a implementação de novos produtos industriais, visando alcançar objetivos de natureza técnica. Dentro desta natureza, é possível a realização de atividades, as quais permitem aos participantes do sistema, a partir de técnicas de projeto, identificar as melhores opções de modo de organização para projetos industriais de natureza técnica.

De indícios das propostas de atividades em duas etapas principais - indicações individuais para desenvolver um projeto técnico, cujo objetivo é avaliar os conhecimentos, quais são os temas de projetos que apresentam melhor desempenho, para uma certa modalidade de carga, seguida - indicações gerais de natureza de natureza técnica, cujo objetivo é avaliar o desempenho do sistema técnico como um todo, sendo caracterizadas pelo valor médio de resultados das indicações individuais por categoria.

Para a execução de todos os tipos de atividades foi proposta uma metodologia que permite avaliar diversos aspectos do conjunto técnico-projetos, incluindo, entre outros, estudos de viabilidade técnica, avaliação de alternativas para seleção ou eliminação dos projetos, orientar a priorização de investimentos para manter a eficiência de seus efeitos e por extensão a eficiência das atividades produtivas dos colaboradores.

O potencial da metodologia desenvolvida, bem como a aplicabilidade das indicações propostas, são avaliadas a partir de resultados de diversos casos-linha.

Dedico este trabalho
à minha esposa Elisete
e aos meus filhos Elisa,
Marina e André.

RESUMO

É notório que até o presente momento, concessionárias e consumidores não têm, em geral, aplicado técnicas efetivas para o planejamento e projeto de seus sistemas, visando generalizar ou formalizar estudos de eventos relativos a afundamentos de tensão. Como conseqüência, os índices de produtividade preconizados pelos projetos industriais não tem sido, na maioria das vezes, atingidos.

Consciente deste cenário, o autor desta tese propõe mudanças de procedimentos, tanto por parte das concessionárias, quanto dos consumidores, no que tange à realização de estudos para a implantação de novos complexos industriais, sobretudo àqueles possuidores de cargas sensíveis. Dentro deste contexto, é proposta a utilização de indicadores, os quais permitam aos planejadores do sistema, a partir de técnicas de simulação, identificar os melhores locais da rede de suprimento para conectar consumidores com cargas sensíveis.

Os indicadores propostos são divididos em duas categorias: primeira - indicadores individuais para barramentos com cargas sensíveis, cujo objetivo é acenar para os consumidores quais são as barras do sistema que apresentam melhor desempenho, para uma certa sensibilidade da carga; segunda - indicadores globais do sistema de suprimento, cujo objetivo é avaliar o desempenho do sistema elétrico como um todo, sendo caracterizados pelo valor médio do somatório dos indicadores individuais por consumidor.

Para a obtenção de ambos os tipos de indicadores foi proposta uma metodologia que permite analisar diversos cenários do conjunto suprimento-processo industriais, estabelecer estudos de viabilidade técnico-econômica de alternativas para solução ou minimização dos problemas, orientar a priorização de investimentos para aumentar a eficiência do setor elétrico e por extensão a eficiência das atividades produtivas dos consumidores.

O potencial da metodologia desenvolvida, bem como a aplicabilidade dos indicadores propostos, são mostrados a partir da simulação de diversos casos-teste, tomando-se como base os dados reais de uma importante área de uma concessionária brasileira.

ABSTRACT

It is thoroughly well known that techniques for analysis and prevention of disturbances related to voltage sags have not been developed as fast as expected, so that both utilities and customers have not wholly achieved their analytical PQ needs. As a consequence, industries have their productivity indices, foreseen by projects, not achieved mostly due to PQ problems. Generally, this is caused by incompatibility between the power supply system and the operational requirements of a new generation of equipment.

Fully aware of this, the author of this work has intended to provide both utility and customer planning engineers a new tool capable of aiding them to achieve compatibility between the electric supply and industrial processes, especially the ones having sensitive loads. By applying this approach, new indices for both supply system and load buses can be drawn. These indices, the system global performance and the per load busbar indices can be used by end-users planning engineers to choose the best location in the supply system, where new sensitive load consumers are to be connected.

Several simulations, based upon a real-world system, have been run in order to show the feasibility and applicability of such indices. For obtaining those two indices a methodology, which allows both the utility and the end-user to, objectively and accurately, assess the impact of voltage sag on electric systems, has been proposed. It is the first important step in determining the correct and economically feasible mitigating measures. More, from the comparison between calculated performance indices, both utilities and end-users can obtain a better investment analysis based upon a benefit-cost relation.

2.4.2	Tipos de Tensões	23
2.5	Metodologia de Análise de Compatibilidade de Tensões	24
2.6	Simulação de Tensões Variáveis de Referência	25
2.6.1	Tipos de Tensões	25
2.6.2	Localização de Tensões	26
2.6.3	Resistência de Tensões	27
2.6.4	Tensão por Fase	28
2.6.5	Grupos de 3 ou Transformadores	27

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	xi
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	
1.1 Considerações Iniciais	1
1.2 Relevância do Tema	2
1.3 Estado da Arte	4
1.4 Objetivos e Contribuição da Tese	11
1.5 Estrutura da Tese	13
CAPÍTULO II - AFUNDAMENTOS DE TENSÃO	
2.1 Considerações Iniciais	15
2.2 Conceitos e Definições	16
2.3 Parâmetros para Análise dos Afundamentos de Tensão	17
2.4 Origem dos Afundamentos de Tensão	18
2.4.1 Partida de Motores	18
2.4.2 Faltas no Sistema Elétrico	18
2.5 Metodologia de Análise dos Afundamentos de Tensão	19
2.6 Afundamentos de Tensão. Variáveis de Influência	23
2.6.1 Tipo de Falta	23
2.6.2 Localização da Falta	24
2.6.3 Resistência de Falta	25
2.6.4 Tensão Pré- Falta	26
2.6.5 Conexão dos Transformadores	27

2.6.6	Sistema de Proteção	29
2.6.7	Frequência de Ocorrência	31
2.7	Conceito de Área de Vulnerabilidade	32
2.8	Efeitos sobre Equipamentos Eletro-Eletrônicos e Processos	33
2.9	Sensibilidade dos Equipamentos Eletro-Eletrônicos	34
2.9.1	Sensibilidade de Computadores (Curvas CBEMA e ITIC)	34
2.9.2	Sensibilidade dos AVVs e demais Equipamentos Eletro-Eletrônicos	36
2.9.3	Sensibilidade dos AVVs - Outras Variáveis de Influência	38
2.10	Considerações Finais	41

CAPÍTULO III - PROPOSTA DE NOVOS INDICADORES PARA O SISTEMA ELÉTRICO

3.1	Considerações Iniciais	43
3.2	Indicadores Disponíveis para Afundamentos de Tensão	44
3.2.1	Metodologia UNIPEDE	44
3.2.2	Metodologia NER/NRS-048	46
3.2.3	Metodologia EPRI/ELECTROTEK	48
3.2.4	Análise Comparativa entre as Metodologias	50
3.2.4.1	UNIPEDE	50
3.2.4.2	NRS-048	51
3.2.4.3	EPRI/ELECTROTEK	51
3.3	Métodos de Cálculo dos Afundamentos de Tensão	52
3.3.1	Método da Distancia Crítica	54
3.3.2	Método das Posições de Falta	55
3.4	Proposta de Novos Indicadores para o Sistema Elétrico	57
3.4.1	Premissas Básicas	57
3.4.2	Indicadores- Modelo de n Estados	58
3.4.2.1	Etapa 1	59
3.4.2.2	Etapa 2	62

3.4.2.3	Etapa 3	65
3.4.2.4	Etapa 4	67
3.4.2.5	Sistematização do Processo de Cálculo dos Indicadores	71
3.4.3	Indicadores- Modelo de 2 Estados	71
3.5	Considerações Finais	75

CAPÍTULO IV - IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL – SIMULAÇÃO DE CASOS

4.1	Considerações Iniciais	77
4.2	Implementação Computacional	78
4.2.1	Módulo de Importação de Dados	80
4.2.2	Módulo de Tratamento dos Dados	81
4.3	Simulação de Caso-Teste	82
4.3.1	Dados Gerais do Sistema	82
4.3.2	Caso 1 (Caso-Base)	84
4.4	Análise de Cenários - Rede de Suprimentos - Carga	93
4.4.1	Caso 2 - Alteração da Sensibilidade da Carga	93
4.4.2	Caso 3 - Melhoria no Sistema de Proteção das Linhas L4 e L12	95
4.4.3	Caso 4 - Instalação de Condicionadores de Energia	96
4.5	Análises de Sensibilidade	97
4.5.1	Caso 5 - Sensibilidade da Carga Representada pela Tensão Média	97
4.5.2	Caso 6 - Taxas de Falta das Linhas de Transmissão	98
4.5.3	Caso 7 - Tensão Pré- Falta	99
4.6	Considerações Finais	102

CAPÍTULO V - CONCLUSÕES

5.1 Conclusões Finais	104
5.2 Contribuições Apresentadas	106
5.3 Propostas para Trabalhos Futuros	107

CAPÍTULO VI - REFERÊNCIAS 109

APÊNDICE A: INFLUÊNCIA DA CONEXÃO DE TRANSFORMADORES NO CÁLCULO DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

APÊNDICE B: DISTRIBUIÇÃO EXPONENCIAL E PROCESSOS DE MARKOV

APÊNDICE C: CARACTERÍSTICAS DO PROGRAMA ANAFAS

APÊNDICE D: BANCO DE DADOS CASO-TESTE

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Afundamento de Tensão. Curto-Circuito no Sistema de Transmissão	17
Figura 2.2	Diagrama Unifilar de um Sistema de Distribuição Típico	20
Figura 2.3	Diagrama de Impedância de Seqüência Positiva	21
Figura 2.4	Perfis das Tensões Durante os Eventos	21
Figura 2.5	Área de Influência da Localização da Falta	25
Figura 2.6	Área de Vulnerabilidade	32
Figura 2.7	Curva <i>CBEMA</i>	35
Figura 2.8	Curva <i>ITIC</i>	36
Figura 2.9	Sensibilidade dos AVVs	36
Figura 2.10	Registro do Afundamento de Tensão 1	38
Figura 2.11	Registro do Afundamento de Tensão 2	38
Figura 2.12	Diagrama Fasorial. Afundamento de Tensão Assimétrico	40
Figura 3.1	Caracterização de Afundamentos de Tensão (UNIPEDE)	45
Figura 3.2	Caracterização de Afundamentos de Tensão (NER/NRS 048)	46
Figura 3.3	Categorias de Afundamentos de Tensão (NRS 048)	47
Figura 3.4	Caracterização de um Afundamento de Tensão (EPRI)	48
Figura 3.5	Diagrama Unifilar de um Sistema de Distribuição Típico	54
Figura 3.6	Diagrama Unifilar do Sistema	59
Figura 3.7	Curva Tempo-Corrente do Relé	60
Figura 3.8	Curva de Sensibilidade Genérica	62
Figura 3.9	Fluxograma do Processo	63
Figura 3.10	Sensibilidade das Unidades de Processo	64
Figura 3.11	Sensibilidade Equivalente do Consumidor	65
Figura 3.12	Diagrama de Espaço de Estados	66
Figura 3.13	Representação dos Consumidores a 2 Estados	72
Figura 4.1	Tela Principal do Programa	79
Figura 4.2	Entrada de Dados de LTs	79
Figura 4.3	Entrada de Dados de Proteção de LTs.	79
Figura 4.4	Diagrama Unifilar. Caso-Teste	83
Figura 4.5	Tensão na Barra-41. Curto Fase-Terra Deslizante na Linha 1	85
Figura 4.6	Área de Vulnerabilidade Consumidor 41. Faltas Trifásicas nas LTs.	86
Figura 4.7	Tensão Mínima da Barra 41. Distribuição de Freqüência ...	87
Figura 4.8	Tensão na Barra 41. Função Distribuição	87
Figura 4.9	Tensão na Barra 41. Distribuição por Freqüência	88
Figura 4.10	Tensão na Barra 41. Distribuição por Freqüência por Tipo de Falta.	88
Figura 4.11	Tensão na Barra 41. Distribuição por Freqüência por Classe de Tensão...	89
Figura 4.12	Barra 41. Número de Desligamento/ano/linha. Todos Tipos de Defeito.	91
Figura 4.13	Tensão na Barra 119. Desligamentos por Tipo de Defeito	91
Figura 4.14	Nº de Desligamentos por Sensibilidade da Carga	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Taxa de Falhas em LTs (EUA)	24
Tabela 2.2	Taxa de Falhas em LTs (BRASIL)	24
Tabela 2.3	Efeito das Conexões de Transformadores.....	28
Tabela 2.4	Tempos Típicos de Atuação da Proteção. Sistemas de Transmissão	30
Tabela 2.5	Tempos Típicos de Eliminação de Faltas. Sistemas de Distribuição	31
Tabela 2.6	Faixa de Sensibilidade dos Equipamentos Eletro-Eletrônicos	37
Tabela 3.1	Modelo para Tabulação dos Índices de Ocorrência de Afundamentos ...	45
Tabela 3.2	Categorias para Afundamentos de Tensão. Norma NRS-048	47
Tabela 3.3	Limites de Afundamentos de Tensão por Categoria	47
Tabela 3.4	Período Mínimo de Monitorização e Erro Desejado	53
Tabela 3.5	Modelo para as Formas de Agregação dos Eventos	61
Tabela 3.6	Estados Operacionais da Planta	64
Tabela 4.1	Tempos de Atuação da Proteção	82
Tabela 4.2	Taxas de Falta das Linhas	84
Tabela 4.3	Características da Carga	84
Tabela 4.4	Índices de Desempenho. Critério da Tensão Mínima	89
Tabela 4.5	Número de Desligamento. Todos Tipos de Defeito	90
Tabela 4.6	Índices Globais do Sistema	92
Tabela 4.7	Índices de Desempenho. Critério da Tensão Mínima 0,85 p.u./ 120 ms.	93
Tabela 4.8	Índices de Desempenho. Critério da Tensão Mínima 0,75 p.u./ 120 ms.	93
Tabela 4.9	Índices de Desempenho. Critério da Tensão Mínima 0,70 p.u./ 120 ms.	93
Tabela 4.10	Melhoria nas Proteções das Linhas L4 e L12	95
Tabela 4.11	Índices de Desempenho. Critério da Tensão Mínima com Condicionador ...	95
Tabela 4.12	Índices de Desempenho. Critério da Tensão Fase-Fase Média	96
Tabela 4.13	Índices de Desempenho. Critério da Tensão Mínima Taxas de Falta 0,5 p.u.	97
Tabela 4.14	Índices de Desempenho. Critério da Tensão Mínima Taxas de Falta 1,5 p.u.	97
Tabela 4.15	Índices de Desempenho. Critério da Tensão Mínima Tensão Pré-Falta ...	98
Tabela 4.16	Índices de Desempenho. Critério da Tensão Mínima Tensão Pré-Falta ...	98
Tabela 4.17	Índices de Desempenho. Critério da Tensão Mínima Tensão Pré-Falta ...	98
Tabela 4.18	Análise de Influência da Tensão Pré-Falta. Tabela Comparativa	99
Tabela 4.19	Análise de Influência da Tensão Pré-Falta. Tabela de Erros	99
Tabela 4.20	Índices de Desempenho. Critério da Tensão Mínima Tensão Pré-Falta...	100
Tabela 4.21	Índices Globais do Sistema	100

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AC	Corrente Alternada
AT	Alta Tensão
AVVs	Acionamento de Velocidade Variável
CBEMA	Computer Business Equipment Manufacturers Association
CENELEC	European Committee for Electrotechnical Standardization
CLPs	Controladores Lógicos Programáveis
DC	Corrente Contínua
EAT	Extra Alta Tensão
EMTP	Electromagnetic Transient Program
EPRI	Electrical Power Research Institute
IEC	International Electrotechnical Commission
IEE	The Institution of Electrical Engineers
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEL	IEE Electronic Library
ITIC	The Information Technology Industry Council
LTs	Linhas de Transmissão
NER	National Electricity Regulator
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
SDCDs	Sistema Digital de Controle Distribuído
SE	Subestação Elétrica
UNIPEDÉ	Union of International Producers and Distributors of Electrical Energy
UPS	Uninterrupted Powers Systems
VCR	Vídeo Cassete

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

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 expressivamente a sensibilidade dos equipamentos em relação à 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 por afundamentos de tensão, representam, atualmente, o principal desafio a ser enfrentado por empresas de energia, consumidores e fornecedores de equipamentos elétricos 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 a 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 está se transformando num fator de competitividade, sendo que as empresas de energia deverão oferecer contratos diferenciados, em função dos requisitos de qualidade da energia exigidos pelos processos dos consumidores;
- a qualidade da energia está se tornando um fator diferencial para promover desenvolvimentos regionais, juntamente com incentivos fiscais, meios de transporte, proximidade entre matéria prima e centros consumidores, etc.

1.2 Relevância do Tema

Tomando-se como base o que foi exposto no item anterior, torna-se premente rever os procedimentos normalmente adotados pelas empresas de energia, consumidores e fabricantes de equipamentos, quando da realização de estudos para o atendimento e a implantação de novos complexos industriais, principalmente, aqueles possuidores de cargas sensíveis, como: AVVs, SDCDs, CLPs, controles e instrumentos de medição microprocessados.

De um lado, o procedimento das empresas de energia elétrica tem sido o de verificar se o projeto elétrico e as proteções associadas à subestação de entrada do consumidor atendem as exigências mínimas e aos padrões técnicos estabelecidos. A única exceção ocorre quando se trata de consumidores com cargas especiais, como: fornos a arco, laminadores, máquinas de solda, grandes sistemas de retificação, etc. Nestas circunstâncias, as concessionárias têm estabelecido critérios rígidos de atendimento, de modo a preservar o próprio sistema e dos demais consumidores, contra distúrbios de qualidade como harmônicos, *flicker* e desequilíbrios.

No entanto, para os consumidores com cargas sensíveis, em geral, as concessionárias não analisam com a atenção necessária, os aspectos de sensibilidade frente a afundamentos de tensão, tanto do processo industrial como dos equipamentos envolvidos.

De outro lado, o procedimento do consumidor é de realizar estudos técnico-econômicos para se obter um projeto industrial que lhe assegure um processo com custos de produção compatíveis com a realidade de seu mercado de atuação. Neste particular, a busca por equipamentos e processos de elevado desempenho e produtividade passa a ser uma necessidade vital para se obter custos de produção competitivos e coerentes com a realidade da economia atual, altamente globalizada. Entretanto, a sensibilidade destes equipamentos frente a afundamentos de tensão, não tem sido considerada como um dos fatores essenciais para a continuidade operacional dos complexos industriais e conseqüentemente dos índices de produtividade. De forma geral, não existe ainda uma preocupação prévia por parte dos consumidores quanto à sensibilidade, por vezes excessiva, de seus equipamentos e processos.

Finalmente, os fabricantes dos equipamentos procuram atender as especificações técnicas do consumidor final, que são voltadas, normalmente, apenas para aspectos de processo. Os fornecedores ainda não despertaram espontaneamente o interesse de tornar seus equipamentos menos sensíveis aos afundamentos de tensão, visto que isto implica em gastos adicionais, resultando na elevação do custo final dos equipamentos e até na perda de competitividade no mercado. Esforços no sentido de tornar os equipamentos mais robustos só ocorrerão se houver disposição dos consumidores em pagar mais por tais produtos, ou que sejam editadas normas pelos órgãos competentes, estabelecendo requisitos mínimos de sensibilidade para os equipamentos.

Como conseqüência do cenário apresentado, os índices de produtividade preconizados por projetos industriais não tem sido na maioria das vezes atingidos, seja na sua forma quantitativa, seja na qualitativa. Quando do início de operação, constata-se, normalmente, uma verdadeira incompatibilidade entre a qualidade da energia oferecida pelas empresas de energia e os requisitos operacionais dos modernos processos industriais.

Reconhecendo a importância do assunto, conclui-se que a solução dos problemas apresentados é premente; entretanto, técnicas gerais de análise e de prevenção dos mesmos não têm sido desenvolvidas de forma satisfatória.

Dentro deste contexto, surge esta tese de doutorado, que propõe a utilização de novos indicadores para o sistema elétrico, quando da realização de estudos para a avaliação do atendimento a novos consumidores que possuam cargas sensíveis. Adequadamente utilizados, os indicadores propostos permitirão aos planejadores do sistema, concessionárias e consumidores, analisar diversos cenários de rede de suprimento–sensibilidade de processos, avaliar custos e estabelecer estudos de viabilidade com vistas a minimizar o número de interrupções dos processos industriais. Portanto, caminha-se no sentido de buscar a tão almejada compatibilidade entre a qualidade oferecida pelos sistemas de fornecimento de energia e as necessidades dos modernos processos industriais.

1.3 Estado da Arte

Durante a elaboração desta tese, foi executada uma pesquisa bibliográfica junto à Base de Dados IEL-IEE Electronic Library que congrega os periódicos da série IEE e IEEE. Foram recuperados dezenas de artigos sobre o assunto, tomando-se como base as palavras-chave *voltage (sag ou sags)* e *voltage (dip ou dips)*. Após a leitura destes artigos, elaborou-se um resumo da revisão bibliográfica realizada, buscando apresentar uma retrospectiva histórica, além de caracterizar o estado da arte sobre o assunto. Os parágrafos que se sucedem são dedicados a este objetivo.

Em 1979, Thomas [1] mostra que os problemas associados à QEE já eram motivos de preocupação dos pesquisadores daquela década. O autor cita que estes problemas são aleatórios, inerentes à operação dos sistemas elétricos, e que afetam a operação de equipamentos eletrônicos, principalmente, aqueles associados a sistemas de comunicação, de processamento de dados e de controle de processos.

No artigo é apresentado o diagnóstico de falhas em sistemas computadorizados e concluído que quando o problema está associado à QEE, os afundamentos de tensão são as causas mais freqüentes. Naquela ocasião, o autor propôs a utilização de uma curva representativa da sensibilidade dos equipamentos eletrônicos, no plano tensão x tempo, obtida através de ensaios de campo patrocinados pela marinha americana e fabricantes de computadores. Esta curva de sensibilidade corresponde a uma das primeiras versões da curva CBEMA - Computer Business Equipment Manufacturers Association.

Em 1990, Van Wagner, Allen e Joseph [2] apresentam um estudo de caso, contemplando a monitorização e análise dos distúrbios de qualidade da energia presentes em uma planta industrial automatizada. Neste trabalho foram identificados quais eram os distúrbios de QEE que mais promoviam as paradas de processos e levantadas a sensibilidade de alguns equipamentos eletrônicos.

Os autores enfatizam que as indústrias modernas têm implantado controles rígidos de qualidade, tanto da matéria prima recebida de seus fornecedores, como dos produtos finais. Contudo, estas exigências não têm sido aplicadas quando o assunto se trata da qualidade da energia recebida das empresas de energia.

Como resultado do trabalho de monitorização, os autores concluíram:

- os afundamentos de tensão eram os únicos distúrbios de QEE que provocavam perdas de produção;
- dos distúrbios registrados, os afundamentos de tensão contribuíam com 68 % dos eventos;
- afundamentos de tensão severos correspondem àqueles cujas magnitudes eram suficientes para provocar a parada de processos, normalmente, com amplitudes abaixo de 0,85 p.u.;
- a grande maioria dos afundamentos de tensão tinha como origem as ocorrências de curtos-circuitos no sistema da concessionária;
- a duração média dos distúrbios era de 190 ms e raramente inferior a 100 ms;
- havia uma grande correlação entre a ocorrência de afundamentos de tensão e a incidência de descargas atmosféricas;
- durante o período de monitorização, de 3,5 meses, foram registrados 16 afundamentos severos de tensão, representado uma média de 4,5 ocorrências/mês, ou 54 ocorrências/ano.

Em 1991, Larry, Kevin e Cliff [3] publicam uma das principais referências sobre afundamentos de tensão, apresentando de forma clara e concisa, a conceituação geral sobre o tema, assim como as técnicas gerais para predição e prevenção dos problemas associados.

O artigo pode ser dividido em dois tópicos principais:

Primeiro: Apresenta os resultados de uma pesquisa que teve duração de 5 anos (1984-1989), realizada numa instalação industrial típica, envolvendo medições e análises dos afundamentos de tensão, sobretudo aqueles que provocavam paradas de processos.

Os resultados obtidos são muito semelhantes àqueles encontrados em [2], no tocante a origem dos afundamentos de tensão, impacto sobre os processos industriais, existência de forte correlação entre as ocorrências de afundamentos de tensão e incidências de descargas atmosféricas. De forma complementar, os autores também concluíram:

- o número médio registrado de desligamento de processo foi de 15,2 eventos/ano;
- os afundamentos de tensão, geralmente, são desequilibrados e assimétricos e com duração típica de 80 ms a 1s.

Segundo: Propõe uma metodologia para predição e prevenção dos problemas associados a afundamentos de tensão. A proposta básica do artigo consiste na utilização de um programa computacional para calcular a intensidade das correntes e tensões provenientes de faltas no sistema.

Para calcular a intensidade dos afundamentos de tensão a ferramenta computacional pode ser um programa convencional para cálculo de curto-circuito.

Para a determinação da duração, considera-se o tempo de sensibilização e atuação dos relés de proteção, acrescido do tempo de abertura dos disjuntores correspondentes.

Para determinar a frequência de ocorrência, utiliza-se das estatísticas de taxas de faltas de equipamentos e componentes, principalmente as taxas de falta das linhas de transmissão, que são os elementos mais expostos do sistema elétrico.

Em 1992, Caldon, Fauri e Fellin [4] apresentam um estudo de caso realizado em uma fábrica de tecidos na Itália, cujo processo de produção é contínuo e altamente automatizado. O trabalho engloba várias etapas:

- monitorização dos afundamentos de tensão na rede de alimentação do consumidor e tratamento estatístico dos resultados;
- identificação dos equipamentos sensíveis em cada fase do processo industrial;
- determinação do tempo médio de parada em cada fase do processo;
- realização de ensaios para determinação da sensibilidade dos dispositivos eletrônicos, em termos de intensidade e duração dos afundamentos de tensão;
- estabelecimento de alternativas para mitigar os problemas e execução de análises de custo-benefício.

Os autores enfatizam que o procedimento permite quantificar as perdas de produção, estabelecer estudos comparativos para a mitigação dos problemas, tomando-se como base a distribuição estatística dos afundamentos de tensão registrados e a sensibilidade da carga.

Mark, David e Marek [5], descrevem em 1993 as principais causas dos afundamentos de tensão em plantas industriais, seus efeitos sobre a operação de equipamentos eletro-eletrônicos e, finalmente, apresentam as possíveis soluções para os problemas, como a instalação de condicionadores de energia.

Os autores caracterizam a diferença entre interrupção e afundamento de tensão, sendo que a primeira ocorre quando os dispositivos de proteção, relés, disjuntores, etc., interrompem fisicamente o circuito de alimentação do consumidor. Já o afundamento de tensão, é caracterizado pela redução do valor eficaz da tensão durante um certo período de tempo, sendo que o consumidor permanece conectado à fonte. Os autores também enfatizam que os afundamentos de tensão são muito mais freqüentes que as interrupções.

O artigo também se destaca devido a dois pontos principais, a saber:

- introduz o conceito de área de vulnerabilidade, que tem como objetivo demarcar as áreas no sistema elétrico, constituídas de LTs e subestações onde, se ocorrerem curtos-circuitos, surgirão afundamentos de tensão abaixo de limites críticos, que podem resultar em desligamentos de consumidores em locais específicos do sistema elétrico;
- mostra a influência das diversas conexões de transformadores no cálculo da intensidade dos afundamentos de tensão.

Reconhecendo a importância do assunto, em 1994, Larry Morgan, na posição de *Chairman* da Subcomissão do IEEE-Industry Application Society, na Área de Confiabilidade de Sistemas, juntamente com outros autores [6], publica uma proposta de inclusão de um novo capítulo na norma IEEE-493 - IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems.

Os autores salientam que as análises, envolvendo afundamentos de tensão, devem ser diferentes das executadas para as interrupções, abordadas nos demais capítulos da norma. A proposta baseia-se fundamentalmente nas técnicas de predição apresentadas em [3], utilizando-se também do conceito de área de vulnerabilidade apresentada em [5].

Finalmente, o artigo apresenta casos exemplos ilustrando a metodologia proposta em [3], simulando diversos tipos de curto-circuito em um sistema constituído de LTs de 345, 230, 138 e

69 kV. Nos cálculos, os autores agrupam os afundamentos de tensão por faixa de intensidade e duração, considerando o valor mínimo da tensão encontrado nas três fases e finalmente calculam a frequência anual de ocorrência segundo as faixas estabelecidas. Contudo, salienta-se que os autores não consideram nos cálculos o parâmetro duração.

Em 1995, Math [7] salienta que a hipótese de considerar que os afundamentos de tensão apresentam forma de onda retangular, conforme premissas adotadas nas referências [3,5,6], não corresponde integralmente à realidade, principalmente, quando se trata de sistemas que tenham instalados grandes motores de indução. O autor argumenta que, na fase inicial do curto-circuito, os motores de indução operam como geradores, reduzindo a magnitude dos afundamentos de tensão. Após a eliminação da falta, o processo de retomada de velocidade faz com que os motores drenem correntes reativas do sistema, agravando e prolongando a permanência do afundamento de tensão. A desaceleração e posterior reaceleração dos motores influenciam tanto na magnitude quanto na duração, como também na evolução da forma de onda do afundamento de tensão.

O autor propõe a inclusão do modelo *quasi-steady state* do motor de indução para o efeito de cálculo dos afundamentos de tensão e apresenta alguns resultados de simulação. Entretanto, o autor admite que a sensibilidade da carga em relação aos aspectos dinâmicos dos afundamentos de tensão é algo pouco conhecido e que será uma ampla tarefa de pesquisa.

Em 1997, Larry e Math [8] propõem a inclusão de uma nova seção no capítulo-9 da Norma IEEE-493, sendo que as técnicas de predição apresentadas nas referências [3,6] permanecem inalteradas.

Os autores sugerem um método gráfico de coordenação no plano tensão x tempo, que permite avaliar a compatibilidade da carga com as características dos afundamentos de tensão, obtidas tanto via simulação, como via medição. O método proposto possibilita ao usuário prever o número anual de paradas de processo, a partir do conhecimento das características dos afundamentos, juntamente com a sensibilidade da carga.

Nesta questão, os autores alertam que a sensibilidade da carga não é plenamente caracterizada pela intensidade e duração, comentando que há outros fatores que também influenciam no comportamento dos equipamentos, tais como:

- desequilíbrio e assimetria presentes na maioria dos afundamentos de tensão;
- aspectos dinâmicos dos afundamentos de tensão;

- sensibilidades diferentes de acordo com modelos e fabricantes dos equipamentos e também em função do ciclo operacional da carga/processo.

Outro ponto de destaque do artigo é quando os autores fazem reflexões sobre quais valores de tensão devem ser considerados como sendo representativos da sensibilidade da carga, valor mínimo, valor médio, etc. Os autores argumentam que ao considerar o valor mínimo das tensões das três fases, surgem as seguintes indagações:

- para equipamentos trifásicos, a menor tensão poderá não resultar em parada do equipamento;
- quando a menor tensão ocorrer simultaneamente nas três fases, o equipamento trifásico poderá não suportar.

Em contrapartida, ao considerar o valor médio, poderá ocorrer que alguns equipamentos trifásicos não suportem a menor tensão, muito embora, a tensão média esteja dentro dos limites permitidos.

O fato é que a sensibilidade dos equipamentos, frente a afundamentos de tensão, é um campo de pesquisa vasto e que está apenas se iniciando, restando ainda muitas indagações em torno do assunto.

Contudo, os autores concluem que para os propósitos de planejamento, a representação da sensibilidade da carga no plano tensão x tempo é satisfatória.

Em 1998/99 Brooks, Guntter, Waclawiak and Sundaram [9,10] salientam que várias empresas de energia, na busca de novas oportunidades de negócio, têm oferecido contratos especiais para consumidores possuidores de cargas sensíveis. Para exemplificar esta situação, nos EUA, a Detroit Edison tem assinado esta modalidade de contrato com grandes empresas automobilísticas. Geralmente, a concessionária garante um padrão mínimo de qualidade, principalmente, em relação ao número anual de afundamentos de tensão abaixo de uma determinada intensidade, e o consumidor se compromete a comprar energia por um período mínimo de tempo pré-estabelecido. Caso o padrão mínimo de qualidade seja violado, o consumidor passa a ter o direito a um ressarcimento segundo critérios pré-determinados. Portanto, devido a cláusulas contratuais, a definição de indicadores para os afundamentos de tensão tornou-se importante tanto para consumidores como para concessionárias.

Dentro deste contexto, os autores identificaram no âmbito internacional duas filosofias em relação a definição de indicadores para afundamentos de tensão: a primeira, proposta pela

UNIPEDDE - Union of International Producers and Distributors of Electrical Energy e a segunda pelo EPRI - Electrical Power Research Institute.

A proposta da UNIPEDDE caracteriza o afundamento de tensão através dos parâmetros intensidade e duração, sendo que a intensidade de um afundamento de tensão trifásico é definida como a maior queda de tensão ocorrida nas três fases. A duração é o período de tempo a partir do instante em que a tensão de uma das fases passa a ser inferior ao limiar de 90 % da tensão de referência, até o instante em que a tensão da última fase retorna para o nível acima deste limiar.

Com os parâmetros assim definidos, a avaliação de um sistema elétrico é efetuado com a realização de medições em múltiplos pontos do sistema e os resultados são agrupados por classes previamente definidas de duração e intensidade. Cada classe representa a combinação de resultados de todos os locais medidos e o número de ocorrências, em cada classe, corresponde ao valor esperado, por ano, com a probabilidade de 95% de não ser excedido.

A proposta do EPRI também utiliza a intensidade e a duração como os principais parâmetros. Nesta metodologia, a amplitude é caracterizada pela máxima queda no valor eficaz de tensão ocorrida durante o evento, embora o parâmetro seja dado pela tensão mínima remanescente. Para o sistema trifásico, a amplitude e a duração de um afundamento de tensão são designadas pelas mesmas grandezas da fase onde se tem o maior desvio em relação à tensão nominal.

Nos casos de afundamentos de tensão que não possuem forma retangular, o EPRI propõe uma maneira de atribuir durações de acordo com limiares especificados (90, 80, 70, 50 e 10%). Logo, a um único evento pode ser atribuído mais de um valor de duração.

O indicador básico proposto pelo EPRI para a avaliação do desempenho do sistema é o SARFI_x - System Average RMS (Variation) Frequency Index _{Voltage}, compreendendo os distúrbios com duração entre 0,5 ciclo e 1 minuto. Este indicador fornece o número médio de ocorrências de afundamentos de tensão, por consumidor e num determinado período de tempo, para os diversos limiares de intensidade especificados. Entretanto, a obtenção dos valores precisos desses índices não é imediata, necessitando de uma avaliação adicional dos afundamentos de tensão em pontos não medidos da rede, usando modelagem específicas e informações de medições realizadas.

Conclui-se, portanto que os métodos atualmente usados para a caracterização dos afundamentos de tensão se baseiam em uma amplitude, tensão remanescente ou variação de tensão e um valor para a duração, utilizando tensões de fase-terra ou fase-fase.

Uma das limitações identificadas nestes indicadores é que eles refletem o desempenho do sistema elétrico somente em termos de alguns parâmetros dos afundamentos de tensão, intensidade, duração e frequência de ocorrência, sem levar em consideração a sensibilidade da carga e conseqüentemente o impacto destes fenômenos sobre os equipamentos/processos dos consumidores.

1.4 Objetivos e Contribuição da Tese

Sintetizando o estado da arte sobre o tema, conclui-se que os estudos envolvendo afundamentos de tensão são conduzidos a partir da monitorização das tensões do sistema elétrico [2,3,4,9] ou através da utilização de metodologias de predição [3,6].

As metodologias de predição [3,6] 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 monitorização 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 [3,4,6].

A avaliação da compatibilidade da carga com as solicitações do sistema de suprimento é realizada através de um método gráfico de coordenação no plano tensão x tempo [8]. Nesta metodologia, admite-se que os afundamentos de tensão apresentam a forma retangular e que a sensibilidade da carga, além de retangular, é fundamentalmente caracterizada pela intensidade e duração. Para os propósitos de planejamento, entende-se que este procedimento é adequado e é adotado internacionalmente. Contudo, alguns autores [7,8] reconhecem a importância e a complexidade associada à determinação da sensibilidade das cargas diante da assimetria, do desequilíbrio e do comportamento dinâmico dos afundamentos de tensão.

Os indicadores atualmente disponíveis para avaliar o desempenho do sistema, do ponto de vista de afundamentos de tensão, são aqueles propostos pela UNIPEDA e pelo EPRI [9,10], todos obtidos a partir de campanhas de medição. Constata-se que tais indicadores diferenciam-se nas maneiras de caracterizar o fenômeno (parâmetros), na forma de contagem das ocorrências e,

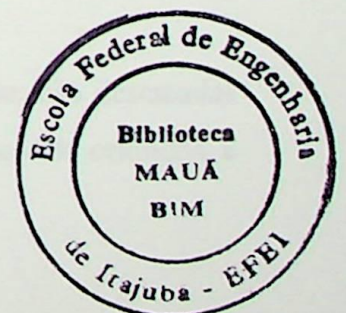
também, na forma de avaliar o desempenho do sistema elétrico (índices), não havendo ainda uma padronização de procedimentos para tratar a questão.

Uma das limitações observadas para estes indicadores é que eles refletem o desempenho do sistema elétrico sem avaliar diretamente o impacto destes fenômenos sobre os consumidores.

Uma vez caracterizado o estado da arte sobre o assunto, apontam-se, na seqüência, algumas lacunas que merecem ser investigadas, quais sejam:

1. melhorar a caracterização da sensibilidade das cargas e processos incorporando a assimetria, o desequilíbrio e os aspectos dinâmicos associados aos afundamentos de tensão;
2. incorporar nas técnicas de cálculo e predição dos afundamentos de tensão, a dinâmica da carga e dos demais equipamentos do sistema, geradores, sistemas de compensação de linhas, etc.;
3. definição e proposição de índices de desempenho para os barramentos de cargas sensíveis, que possam quantificar a disponibilidade (indisponibilidade) de operação de processos industriais, fornecer o número esperado de paradas anuais de produção, calcular a demanda e a energia não distribuída pela concessionária, avaliar custos, etc;
4. definição e proposição de índices globais de desempenho para o sistema de suprimento, calculados a partir dos índices obtidos para os barramentos de cargas sensíveis;
5. aplicação dos modelos probabilísticos utilizados na área de confiabilidade, nos estudos e nas análises envolvendo afundamentos de tensão;
6. aplicação de técnicas de simulação de Monte Carlo e de inteligência artificial para a solução dos modelos utilizados nos estudos de afundamentos de tensão.

Dentro deste contexto, estabelece-se como objetivo imediato desta tese, preencher as lacunas citadas nos tópicos 3, 4 e 5, o que constituir-se-ão a principal contribuição deste trabalho.



1.5 Estrutura da Tese

Esta tese é composta por seis capítulos e quatro apêndices, que são brevemente descritos nos parágrafos subsequentes.

O presente capítulo mostra a importância do afundamento de tensão dentro do contexto da QEE e caracteriza a necessidade do estabelecimento de novos indicadores para o sistema elétrico, visando a avaliação do atendimento a consumidores possuidores de cargas sensíveis.

No capítulo 2 aborda-se os conceitos e definições associados ao tema; apresenta as principais causas dos afundamentos de tensão, sobretudo as ocorrências de curto-circuito. Também são apresentadas as diversas variáveis de influência na caracterização dos parâmetros dos afundamentos de tensão, tais como: tipo e localização do curto-circuito, resistência de falta, tensão pré-falta, etc. Por fim, são abordados os efeitos dos afundamentos de tensão sobre equipamentos eletro-eletrônicos, destacando-se os AVVs.

No capítulo 3, onde aparece a real contribuição desta tese, propõe-se a utilização de novos indicadores para o sistema elétrico, que, a partir de técnicas de simulação, permitem aos planejadores do sistema, identificar os melhores locais da rede de suprimento para conectar consumidores possuidores de cargas sensíveis. Sendo o principal enfoque deste trabalho a proposição de indicadores para o sistema elétrico, considerando o distúrbio afundamento de tensão, decidiu-se por apresentar também os principais indicadores até então utilizados mundialmente (UNIPEDA, EPRI e NER), apontando-se suas particularidades e limitações.

No capítulo 4 apresenta-se o programa computacional, que caracteriza uma outra contribuição deste trabalho, implementado para o cálculo dos indicadores propostos no capítulo 3. De forma complementar, são mostradas as principais saídas gráficas oferecidas pelo programa, cuja utilização é essencial quando da realização de estudos de afundamentos de tensão. Por fim, é apresentada a potencialidade da aplicação dos indicadores propostos, através da simulação de diversos casos-teste, contemplando análises de diversos cenários de rede de suprimento-carga.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões gerais extraídas desta tese; são destacadas as reais contribuições deste trabalho, reconhecidos em diversas citações e artigos dele oriundos, e

por fim, são propostos diversos tópicos para que se dê continuidade à pesquisa sobre o tema em questão.

No capítulo 6 são apresentadas as referências bibliográficas, subdivididas em duas partes: livros, teses, relatórios técnicos e artigos consultados, e ainda, dissertações e artigos produzidos diretamente a partir do desenvolvimento deste trabalho.

A tese se encerra com quatro apêndices. O apêndice A mostra a influencia da conexão de transformadores no cálculo dos afundamentos de tensão; o apêndice B apresenta os princípios básicos da aplicação das técnicas de Markov; o apêndice C descreve sucintamente as características do programa ANAFAS e, finalmente, o apêndice D tornam disponíveis os dados utilizados nas simulações dos casos-teste.

CAPÍTULO II

AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

2.1 Considerações Iniciais

Conforme já abordadas no capítulo anterior, as pesquisas indicam que os afundamentos de tensão são os distúrbios de QEE que mais causam problemas aos consumidores sob a forma de interrupção parcial ou total de processos industriais [11].

Esta questão tem assumido importância estratégica, tanto para os consumidores como para as empresas de energia, face aos elevados custos associados a tais paradas de produção. Os países desenvolvidos têm sofrido prejuízos anuais da ordem de dezenas de bilhões de dólares [11, 12] em decorrência de falhas de equipamentos eletro-eletrônicos, provocadas por estes distúrbios. Dependendo da complexidade e da tecnologia envolvidas no processo industrial, a retomada de produção poderá levar desde várias horas até alguns dias.

No Brasil, o cenário é semelhante e tem sido agravado nos últimos anos, à medida que as indústrias, em geral, têm investido em automatização de seus sistemas produtivos, na busca de se obter melhor qualidade e produtividade.

Dentro deste contexto, este capítulo tem como objetivo abordar os conceitos envolvendo o tema, constituindo-se em uma contribuição didática sobre o assunto, enfocando dentre outros, os seguintes aspectos:

- conceitos e definições;
- principais causas de ocorrência dos afundamentos de tensão, destacando-se os curtos-circuitos;
- fatores de influência nos parâmetros dos afundamentos de tensão;
- conceito de área de vulnerabilidade;
- efeitos dos afundamentos de tensão sobre equipamentos eletro-eletrônicos e processos;
- sensibilidade de equipamentos e processos.

2.2 Conceitos e Definições

Quando se estudam as definições envolvendo o tema afundamento de tensão, o leitor se depara de imediato com duas filosofias distintas; a primeira, estabelecida pelo IEEE e a segunda, pela IEC.

O IEEE, através da Norma IEEE-1159 [13], define afundamento de tensão como sendo a redução da tensão eficaz para 0,1 a 0,9 p.u., durante um período de tempo de 0,5 ciclo a 1 minuto. Adicionalmente, o IEEE classifica os afundamentos de tensão 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.

Quanto à intensidade, o IEEE se refere à mínima tensão remanescente do sistema, ou seja, um afundamento de tensão de 0,80 p.u. significa que a tensão tenha sido reduzida de 1,0 p.u para 0,80 p.u., representando, portanto, uma queda de 0,20 p.u. O afundamento de tensão cuja intensidade é inferior a 0,10 p.u. é considerado pelo IEEE como sendo interrupção.

A IEC, através de [14], define afundamento de tensão como sendo a redução da tensão de 0,10 a 0,99 p.u., durante o período de tempo compreendido entre 0,5 ciclo a 1 minuto. Quanto à intensidade, a IEC se refere à queda de tensão, ou seja, um afundamento de tensão de 0,20 p.u. indica que a tensão caiu, por exemplo, de 1,0 para 0,80 p.u.. Afundamentos de tensão com redução acima de 0,99 p.u. são considerados pela IEC como interrupções.

Outro ponto importante a observar são os valores da tensão de referência utilizados para obter os valores em p.u.. A norma IEC adota como tensão base a tensão nominal do sistema no ponto de observação.

Outras referências [5,8] caracterizam o afundamento de tensão como sendo a redução do valor eficaz da tensão de suprimento, para o limite abaixo de 0,90 p.u., contemplando inclusive, o intervalo de 0,0 a 0,1 p.u., considerado pelo IEEE [13] como sendo interrupção. Este último entendimento é o que será adotado para os propósitos desta tese, ou seja, uma interrupção momentânea será considerada como sendo um afundamento de tensão de 0% (IEEE) o que equivale a uma queda de tensão de 100% (IEC).

A título de ilustração, a figura 2.1 mostra a oscilografia de um afundamento de tensão registrado em um sistema real, ocorrido na subestação de entrada de um consumidor em 69 kV. O evento causador do distúrbio foi um curto-circuito no sistema de transmissão em 230 kV. Observa-se que o afundamento de tensão atingiu o patamar de 0,7 p.u. e duração da ordem de 2,5 ciclos (40 ms.).

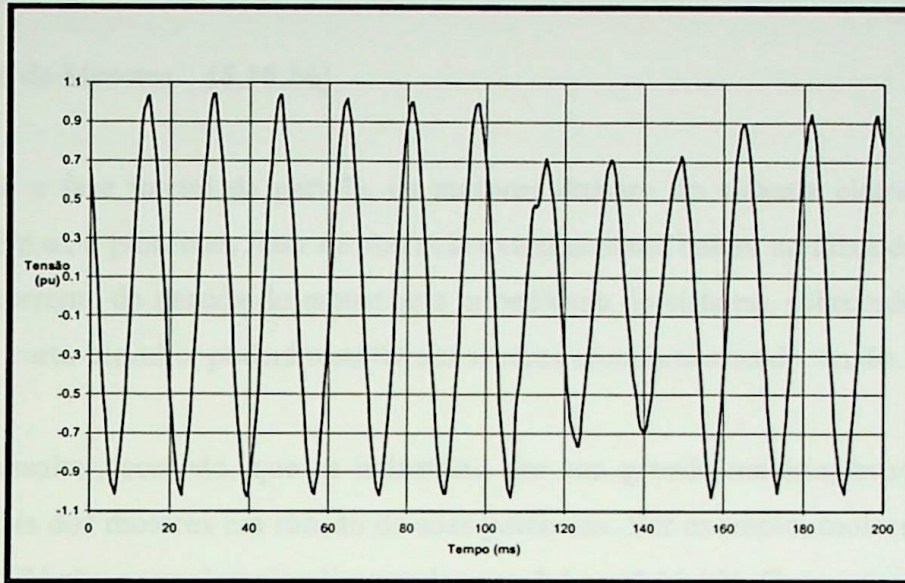


Figura 2.1 - Afundamento de Tensão. Curto-Circuito no Sistema de Transmissão

2.3 Parâmetros para Análise dos Afundamentos de Tensão

Os principais parâmetros que caracterizam um afundamento de tensão monofásico são a amplitude e a duração, conforme mostrado na figura 2.1, que, somados à frequência de ocorrência, fornecem as informações satisfatórias sobre o fenômeno.

No entanto, quando se trata de afundamentos de tensão trifásicos, outros parâmetros também podem 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 [7,8].

Normalmente, visando melhor caracterizar os afundamentos de tensão trifásicos, utiliza-se um procedimento chamado agregação de fase e agregação temporal, conforme será visto no item 2.9.3 e também no capítulo III.

2.4 Origem dos Afundamentos de Tensão

Os afundamentos de tensão no sistema elétrico são gerados devido a duas causas principais: partida de motores de grande porte e ocorrência de curtos-circuitos [15]. Contudo, reconhece-se que perdas de geração, saída de linhas de transmissão, entrada de cargas e operação em ilha, após a ocorrência de contingências, também geram afundamentos de tensão.

2.4.1 Partida de Motores [5,15,16]

Durante a fase inicial da partida, os motores drenam do sistema elétrico correntes da ordem de 5 a 8 p.u., e pior, com fator de potência extremamente baixo, na faixa de 0,15 a 0,30. A passagem da corrente de partida do motor pela impedância do sistema, sobretudo em redes com baixo nível de curto-circuito, poderá resultar em severos afundamentos de tensão.

Vale ressaltar, contudo, que as indústrias, em sua grande maioria, buscam adequar as tensões nominais dos motores em função de suas potências. Por exemplo, motores com potência acima de 250 CV são normalmente alimentados em 2,4 ou 4,16 kV. Caso esta prática não seja implementada, normalmente por razões econômicas, busca-se utilizar processos de partida indireta para os motores de maior porte, dentre eles: a partida com chave estrela-triângulo, partida com auto-transformador, partida com chaves estáticas (*soft-start*), etc.

O fato é que a adoção destas medidas tem por objetivo reduzir a severidade dos afundamentos de tensão, tornando-os de magnitudes que geralmente não são suficientes o bastante para afetar a operação dos equipamentos eletro-eletrônicos. Isto torna a partida de motores uma causa de geração de afundamento de tensão menos relevante, se comparada com a ocorrência de curtos-circuitos nas linhas de transmissão e de distribuição.

2.4.2 Faltas no Sistema Elétrico [2,3,5,16]

As faltas no sistema elétrico são a principal causa do afundamento 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.

Curto-circuitos também ocorrem em subestações terminais de linhas e em sistemas industriais, porém, com menor frequência de ocorrência. 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.

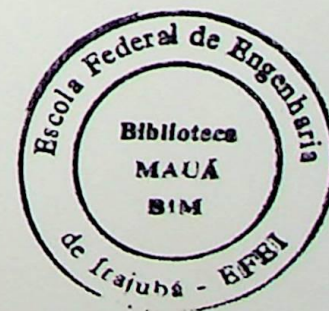
As faltas em linhas aéreas ocorrem devido à incidência de descargas atmosféricas diretas, nos sistemas de transmissão, ou diretas e indiretas (laterais) nos sistema de distribuição. Nos sistemas de distribuição o problema é mais crítico porque estes são geralmente desprovidos de cabos-guarda. Portanto, pode-se concluir que a frequência de ocorrência de afundamentos de tensão está fortemente correlacionada com o nível cerâmico da região onde as linhas aéreas se encontram instaladas. Outras causas de ocorrência de curtos-circuitos são as queimadas em plantações, vendavais, contatos por animais e aves, contaminação de isoladores, falhas humanas, etc.

As faltas podem ser de natureza temporária ou permanente. As faltas temporárias são, em sua grande maioria, devido à ocorrência de descargas atmosféricas, temporais e ventos, que não provocam geralmente danos permanentes ao sistema de isolação, sendo que o sistema pode ser prontamente restabelecido, por meio de religamentos automáticos. Ao contrário, as faltas permanentes são causadas por danos físicos em algum elemento de isolação do sistema, sendo necessária a intervenção da equipe de manutenção.

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 a completa eliminação do mesmo.

2.5 Metodologia de Análise dos Afundamentos de Tensão [3,6,16]

Este item tem por objetivo ilustrar a metodologia de análise de afundamento de tensão, mostrando o processo de surgimento e eliminação de falta num sistema elétrico radial. No exemplo será utilizado um modelo simples de divisor de tensão, a partir do qual será calculado o valor de afundamento de tensão em diversos pontos do sistema, inclusive nos ramais adjacentes ao ramal submetido ao curto-circuito.



O diagrama unifilar apresentado na figura 2.2 apresenta uma subestação de distribuição, constituída de um transformador 69/12 kV e circuitos alimentadores de distribuição contendo religadores automáticos e fusíveis. O ponto C representa uma alimentação típica de pequenas indústrias, supridas por intermédio de um transformador de distribuição, conexão Δ-Y_{aterrado}.

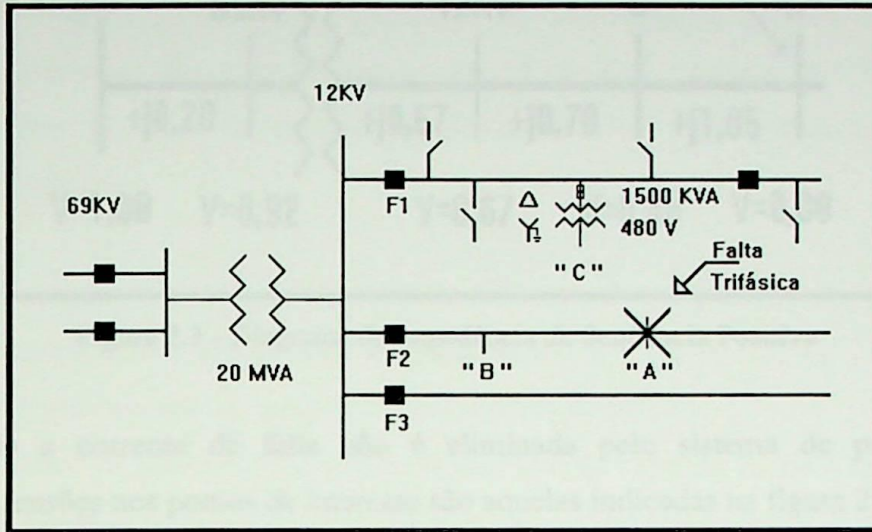


Figura 2.2 - Diagrama Unifilar de um Sistema de Distribuição Típico

Considerando um curto-circuito trifásico no ponto A, os valores dos afundamentos de tensão são calculados a partir do diagrama de impedância de seqüência positiva, conforme mostra a figura 2.3. Os cálculos são conduzidos utilizando-se o conceito de divisor de tensão, retratado em (2.1a) e (2.1b), admitindo-se tensão pré-falta igual a 1 p.u. e impedância de falta zero.

$$V_{afund} = \frac{\sum Z_2 + Z_f}{\sum Z_1 + \sum Z_2 + Z_f} V_{fonte} \tag{2.1a}$$

$$V_{afund} = V_{fonte} - \frac{\sum Z_1}{\sum Z_1 + \sum Z_2 + Z_f} V_{fonte} \tag{2.1b}$$

onde:

V_{afund} - afundamento de tensão em p.u., no ponto de interesse;

V_{fonte} - tensão da fonte em p.u.;

$\sum Z_1$ - somatório das impedâncias em p.u., desde a fonte até o ponto de interesse;

$\sum Z_2$ - somatório das impedâncias em p.u., desde o ponto de interesse até o ponto de defeito;

Z_f - impedância de falta no ponto de defeito.

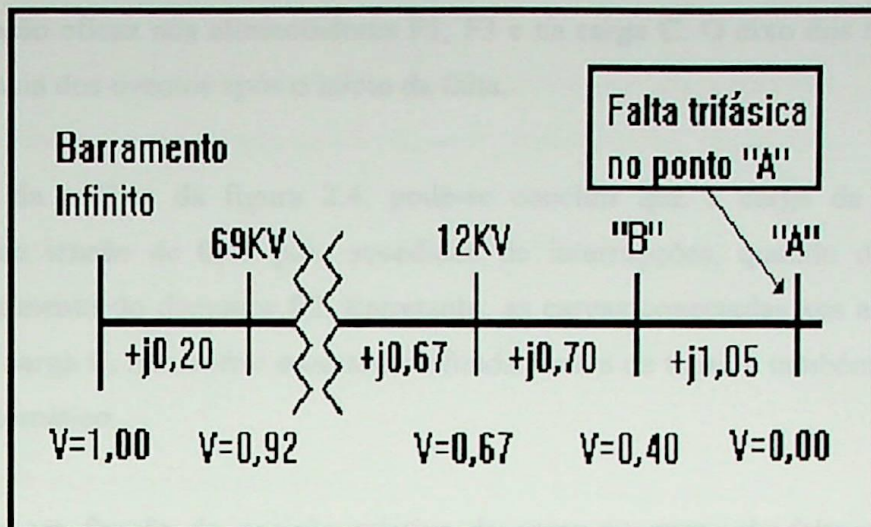


Figura 2.3 - Diagrama de Impedância de Seqüência Positiva

Enquanto a corrente de falta não é eliminada pelo sistema de proteção (relés e disjuntores), as tensões nos pontos de interesse são aquelas indicadas na figura 2.3.

Considerando-se que a queda de tensão, provocada pela corrente de carga, através da impedância do alimentador F1 possa ser desprezada, pode-se afirmar que a tensão no ponto C será a mesma calculada para o barramento de 12 kV. Desta forma, a figura 2.4 apresenta os perfis das tensões nos pontos B, C, F1 e F3, durante a ocorrência da falta no ponto A.

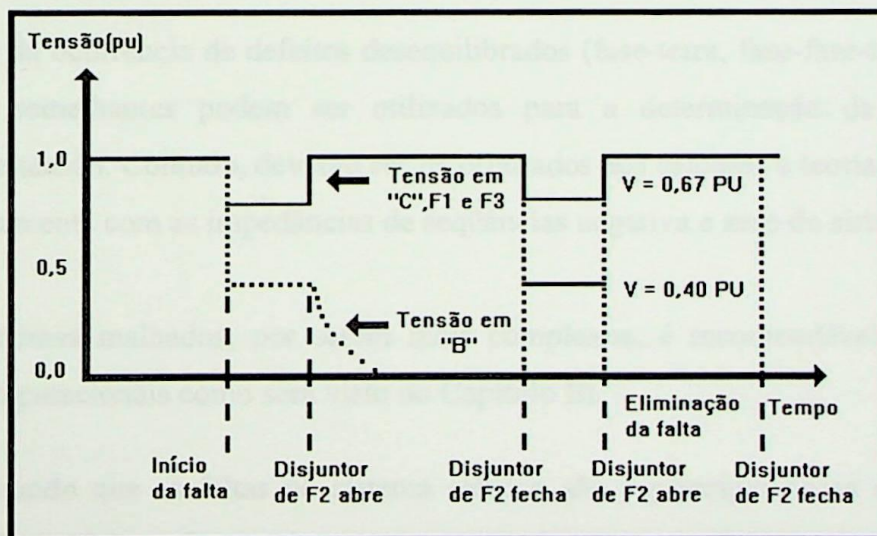


Figura 2.4 - Perfis das Tensões Durante os Eventos

A linha tracejada representa a tensão eficaz no ponto B, enquanto que a linha contínua representa a tensão eficaz nos alimentadores F1, F3 e na carga C. O eixo dos tempos (abscissa) mostra a seqüência dos eventos após o início da falta.

Através da análise da figura 2.4, pode-se concluir que a carga da barra B sofrerá afundamentos de tensão de 0,40 p.u., sucedidos de interrupções, quando das operações de abertura e religamento do disjuntor F2. Entretanto, as cargas conectadas aos alimentadores F1, F3, incluindo a carga C, irão sofrer sucessivos afundamentos de tensão, também devido às ações do religador automático.

Portanto, em função da posição relativa da carga ao ponto de falta e da filosofia de religamento, os consumidores poderão ser submetidos a:

- subtensões sucessivas, como é o caso da barra de 69 kV;
- sucessivos afundamentos de tensão, a exemplo da barra de 12 kV e carga C;
- afundamentos sucedidos de interrupções, como é o caso da barra B.

Para tratar afundamentos sucessivos de tensão em decorrência de um mesmo evento, como no caso, um curto-circuito temporário no ponto A, utiliza-se do procedimento chamado de agregação temporal, conforme será visto no item 2.9.3.

Quando da ocorrência de defeitos desequilibrados (fase-terra, fase-fase-terra e fase-fase), procedimentos semelhantes podem ser utilizados para a determinação da intensidade do afundamento de tensão. Contudo, deverão ser incorporados aos cálculos a teoria de componentes simétricas, juntamente com as impedâncias de seqüências negativa e zero do sistema.

Para sistemas malhados, por serem mais complexos, é recomendável a utilização de ferramentas computacionais como será visto no Capítulo III.

Considerando que as faltas no sistema elétrico são a principal causa da ocorrência de afundamentos de tensão, nos itens subseqüentes serão abordados os diversos fatores de influência nos parâmetros do distúrbio: intensidade, duração e freqüência de ocorrência.

2.6 Afundamentos de Tensão. Variáveis de Influência [3,5,6,16]

A análise do afundamento de tensão pode ser considerada complexa, pois envolve uma diversidade de fatores aleatórios que afetam as suas características, dentre eles:

- tipo de falta;
- localização da falta;
- impedância de falta;
- tensão pré-falta;
- conexão dos transformadores;
- desempenho do sistema de proteção.

2.6.1 Tipo de Falta

As faltas no sistema elétrico podem ser: trifásicas, bifásicas, trifásicas à terra, bifásicas à terra e fase-terra.

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, elas são mais raras.

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

A título de exemplificação, as tabelas 2.1 e 2.2 apresentam as estatísticas de taxas médias de faltas em linhas de transmissão utilizadas nos EUA, [3,6], e em uma das concessionárias do Brasil [17], respectivamente.

Por sua maior exposição à natureza (descargas atmosféricas, ventos e temporais) se comparadas com os equipamentos instalados nas subestações terminais (barramentos, transformadores, etc.), as linhas de transmissão são os componentes do sistema elétrico mais susceptíveis à ocorrência de curtos-circuitos.



Tabela 2.1 - Taxa de Falhas em LTs (EUA)

Nível de Tensão	Taxa de Falta (*)	Fase-terra	Bifásica-Terra	Fase-fase	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%
69 kV	6,15	65%	22%	7%	6%

Tabela 2.2 - Taxa de Falhas em LTs (BRASIL)

Nível de Tensão	Taxa de Falta (*)	Fase-terra	Bifásica-Terra	Fase-fase	Trifásica
230 kV	2,56	91,4%	-	3,2%	5,4%
138 kV	4,70	75%	12,6%	10,1%	2,3%
69 kV	13,08	58%	24,4%	11,2%	6,4%

(*) n.º de ocorrências/ano/ 100 Km de linha

Como esperado, as tabelas 2.1 e 2.2 mostram que as faltas fase-terra e bifásicas-terra, respectivamente, são as que apresentam as maiores taxas de ocorrência.

2.6.2 Localização da Falta

A localização da falta no sistema elétrico influencia, significativamente, o impacto do afundamento de tensão sobre os consumidores. As faltas no sistema de transmissão e subtransmissão afetam certamente um número maior de consumidores do que as 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 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, aqueles dotados de alta capacidade de curto-circuito.

A figura 2.5 ilustra este fato. Quando ocorre uma falta no ponto A, todo o sistema irá sentir os efeitos do afundamento de tensão (distribuição e transmissão). Uma falta no ponto B, porém, será percebida apenas no sistema de distribuição.

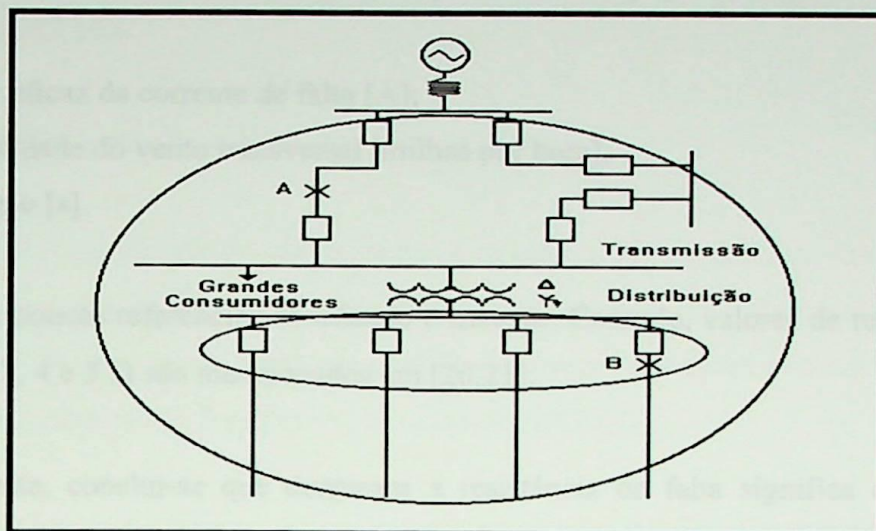


Figura 2.5 - Área de Influência da Localização da Falta

2.6.3 Resistência de Falta

Raramente os curtos-circuitos no sistema elétrico são metálicos, ou seja, com resistência de falta nula. Normalmente, eles ocorrem através da resistência de falta que é constituída da associação dos seguintes elementos:

- resistência do arco elétrico entre o condutor e a terra, para defeitos fase-terra;
- resistência do arco 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.

O aparecimento do arco elétrico é devido ao aquecimento provocado pela corrente de curto-circuito, que propicia a ionização do ar no local de defeito. A resistência do arco elétrico é não linear e pode ser empiricamente calculada pela fórmula de Warrington [18,19], conforme as expressões (2.2a e 2.2b).

$$R_{\text{arco-elétrico}} = \frac{8750L}{I^{1,4}} \tag{2.2a}$$

sendo:

$$L = L_0 + 3 v t \tag{2.2b}$$

onde:

R_{arco} - elétrico - resistência do arco [Ω];

L - comprimento do arco elétrico [pés];

L_0 - comprimento inicial do arco, correspondente ao espaçamento entre os condutores, [pés]

I - valor eficaz da corrente de falta [A];

v - velocidade do vento transversal [milhas por hora];

t - duração [s].

Existem poucas referências abordando o assunto. Contudo, valores de resistência de arco da ordem de 1, 2, 4 e 5 Ω são mencionados em [20,21].

Finalmente, conclui-se que desprezar a resistência de falta significa obter valores de afundamento de tensão mais severos, sobretudo em sistema de distribuição (tensões abaixo de 34,5 kV, inclusive), onde este efeito é mais pronunciado [20].

Vale lembrar que, matematicamente, a influência da resistência de arco no cálculo da intensidade do afundamento de tensão pode ser avaliada através das equações (2.1a) e (2.1b).

2.6.4 Tensão Pré-Falta

Em condições normais de operação, as concessionárias de energia buscam suprir seus consumidores com tensões de operação dentro dos limites normalizados (0,95 - 1,05 p.u.).

Basicamente, o perfil de tensão, em regime permanente, é função da curva de carga do sistema elétrico e também, da disponibilidade de equipamentos destinados à regulação de tensão, como compensadores síncronos, banco de capacitores, reatores de linha, etc.

Normalmente, o perfil de tensão do sistema segue a variação da curva de carga diária, observando-se elevações de tensão durante períodos de carga leve e reduções de tensão nos períodos de carga pesada.

Geralmente, nos estudos de curto-circuito em sistemas elétricos, adota-se tensão pré-falta igual a 1 p.u.. No entanto, em função da curva de carga do sistema, esta premissa, na maioria das vezes, não é verdadeira, incorrendo-se em erros, quando do cálculo da magnitude do afundamento de tensão. A influência da tensão pré-falta também poderá ser avaliada a partir das equações (2.1a) e (2.1b).

2.6.5 Conexão dos Transformadores

Na análise e no cálculo do afundamento de tensão, o tipo de conexão dos transformadores existentes entre o ponto de falta e o barramento do consumidor, irá influenciar no afundamento de tensão percebido pela carga, tanto em magnitude como em ângulo de fase. Basicamente, os transformadores podem ser agrupados em três categorias [22]:

- Primeira - aqueles cujas tensões nas bobinas em um dos enrolamentos (primário ou secundário) é função da diferença fasorial (tensão composta), entre duas tensões aplicadas nas bobinas do outro enrolamento. Estes transformadores são os de conexão $Y-\Delta$, $\Delta-Y$, $Y_{\text{aterrado}}-\Delta$ e $\Delta-Y_{\text{aterrado}}$, que além de filtrarem a componente de seqüência zero da tensão, introduzem defasamento angular entre as tensões primária e secundária;
- Segunda - são os transformadores que somente filtram as componentes de seqüência zero da tensão, ou seja, 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 nem introduzem defasamento angular. Pertencem a esta categoria os transformadores com as conexões $Y_{\text{aterrado}}-Y_{\text{aterrado}}$, $Y_{\text{aterrado}}-\Delta-Y_{\text{aterrado}}$. Neste caso, o Δ é o enrolamento de compensação.

A fim de ilustrar este fato, no Apêndice A é executada a demonstração matemática considerando o transformador com conexão $\Delta-Y_{\text{aterrado}}$, que corresponde a uma das conexões mais utilizadas em sistemas industriais. Conforme poderá ser observado, os cálculos foram conduzidos admitindo um curto-circuito fase-terra no primário do transformador.

Utilizando o mesmo procedimento, foram calculados os valores dos afundamentos de tensão refletidos no secundário de cada tipo de transformador, tendo em vista as diversas

conexões possíveis. Em cada situação foram introduzidas as alterações necessárias em termos de filtragem da componente de seqüência zero e inserção de defasamento angular nas componentes de seqüência positiva e negativa. Os resultados encontrados são apresentados na tabela 2.3 [5], a partir dos quais alguns comentários importantes podem ser tecidos.

Tabela 2.3 - Efeito das Conexões de Transformadores no
Cálculo dos Afundamentos de Tensão

Conexão do transformador	Fase – Fase			Fase – Neutro		
	Vab	Vbc	Vca	Van	Vbn	Vcn
$Y_{\text{aterrado}} - Y_{\text{aterrado}}$	0,58	1,00	0,58	0,00	1,00	1,00
$Y_{\text{aterrado}} - Y$ $Y - Y$ $Y - Y_{\text{aterrado}}$	0,58	1,00	0,58	0,33	0,88	0,88
$\Delta - \Delta$	0,58	1,00	0,58	-----	-----	-----
$Y - \Delta$ $Y_{\text{aterrado}} - \Delta$	0,33	0,88	0,88	-----	-----	-----
$\Delta - Y_{\text{aterrado}}$ $\Delta - Y$	0,88	0,88	0,33	0,58	1,00	0,58

Pode-se dizer 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. Por exemplo, a tabela 2.3 mostra que para o transformador com conexão Δ -Y, o valor mínimo de tensão entre fases, 0,33 p.u., é inferior ao valor mínimo verificado para a tensão fase-neutro, 0,58 p.u.. Isto mostra que para o mesmo curto-circuito analisado, a chance da carga “sobreviver” é maior se ela fosse conectada entre as fases e o neutro.

- a conexão $Y_{\text{aterrado}}-Y_{\text{aterrado}}$ faz com que a tensão da fase A-neutro se anule, visto que o defeito simulado foi na fase A para a terra e com impedância de falta nula. Caso um dos lados do transformador não seja aterrado, observa-se que a tensão fase-neutro, para a mesma condição de falta, se eleva de 0,00 para 0,33 p.u., devido à eliminação da componente de seqüência zero;

- quando a carga é conectada entre fases, o efeito da filtragem da componente de seqüência zero, introduzida pela conexão do transformador, torna-se irrelevante, uma vez que ao se calcular as tensões fase-fase, a componente de seqüência zero é eliminada. Neste caso, a única influência é atribuída à defasagem imposta pela conexão dos transformadores nas componentes de seqüência positiva e negativa, constatada pela comparação dos resultados apresentados para as conexões $Y_{\text{aterrado}}-Y_{\text{aterrado}}$ e $\Delta-Y_{\text{aterrado}}$, por exemplo.

Conclui-se, portanto, que o afundamento de tensão visto pela carga depende tanto das conexões dos transformadores existentes entre o ponto de falta e a carga, como também do tipo de conexão da própria carga.

2.6.6 Sistema de Proteção

A duração do afundamento 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 tempo-corrente, 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.

Reconhecendo-se que a maior incidência de curtos-circuitos ocorre em linhas de transmissão, subtransmissão e distribuição, os próximos parágrafos serão dedicados a abordar, de forma resumida, os esquemas típicos de proteção utilizados nestes sistemas [23].

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 [23].

Quando a teleproteção não é aplicada, utilizam-se proteções de distância com duas ou três zonas. A primeira zona é normalmente ajustada para “enxergar” quase que instantaneamente, defeitos em até 80 % 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 segunda LT. 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, dá-se menos importância aos sistemas de proteção adotados [23]. Basicamente, são utilizadas proteções de sobrecorrente de fase e de neutro e sobrecorrentes direcionais. Em termos gerais, os seguintes esquemas são utilizados:

- 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 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 utilizados seccionadores-fusíveis.

A título de ilustração, a tabela 2.4 apresenta os tempos típicos de atuação da proteção em sistemas de alta tensão (AT) e extra alta tensão (EAT) [23].

Tabela 2.4 - Tempos Típicos de Atuação da Proteção
Sistemas de Transmissão

Tempos Típicos de Atuação da Proteção	EAT	AT
Proteção de Distância-Primeira Zona [ms.]	20 – 40	40 – 60
Proteção de Distância -Segunda Zona [ms.]	300	500
Teleproteção [ms.]	20 – 50	40 - 60
Tempo de abertura de disjuntor [ciclos]	2	3 – 5

De forma semelhante, a tabela 2.5 apresenta os tempos típicos de atuação da proteção em sistemas de distribuição [24,25].

Tabela 2.5 - Tempos Típicos de Eliminação de Falhas
Sistemas de Distribuição

Tipo de Equipamento	Mínimo (ciclos)	Retardo de Tempo (*) [ciclos]	Tentativas de Religamentos
Fusível de expulsão	½	0,5 a 60	-
Fusível Limitador	¼	0,25 a 6	-
Religador	3	1 a 30	0 a 4
Disjuntor a óleo	5	1 a 60	0 a 4
Disjuntor a vácuo ou a SF6	3 e 5	1 a 60	0 a 4

(*) Retardo de tempo intencional para se obter coordenação entre os dispositivos de proteção.

2.6.7 Frequência de Ocorrência

A taxa de ocorrência dos afundamentos de tensão está intimamente relacionada com a origem dos curtos-circuitos no sistema elétrico, quais sejam:

a) Descargas Atmosféricas

A incidência de descargas atmosféricas diretas e indiretas (laterais) sobre as linhas de transmissão e distribuição podem provocar sobretensões que poderão romper a isolação da cadeia de isoladores, ocasionando, normalmente, curtos-circuitos fase-terra. Daí, pode-se correlacionar o número esperado de afundamentos de tensão como o nível cerâmico da região onde o sistema elétrico está inserido [2,3]. 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.

b) Poluição Ambiental e Maresia

A fuligem, gerada pelas indústrias e automóveis, é depositada sobre os isoladores e equipamentos, facilitando a ocorrência de faltas à terra, quando da incidência de sobretensões, sejam elas de manobra ou de origem atmosférica. A maresia também pode causar problemas semelhantes aos causados pela poluição.

c) Causas Diversas

Queimadas acidentais ou intencionais debaixo de linhas de transmissão, contatos acidentais nas redes de distribuição, vendavais, vandalismo, acidentes rodoviários, etc., são fatores que contribuem para a ocorrência de curtos-circuitos.

2.7 Conceito de Área de Vulnerabilidade

O conceito de área de vulnerabilidade [5,26] foi desenvolvido com o objetivo de demarcar as regiões do sistema elétrico, constituídas de LTs e subestações onde, se ocorrerem curtos-circuitos, haverá a ocorrência de afundamentos de tensão abaixo de limites críticos que possam resultar em desligamentos de cargas sensíveis.

A área de vulnerabilidade é traçada tomando-se como ponto de referência um determinado barramento do sistema elétrico e a sensibilidade da carga nele instalada, conforme ilustração apresentada na figura 2.6.

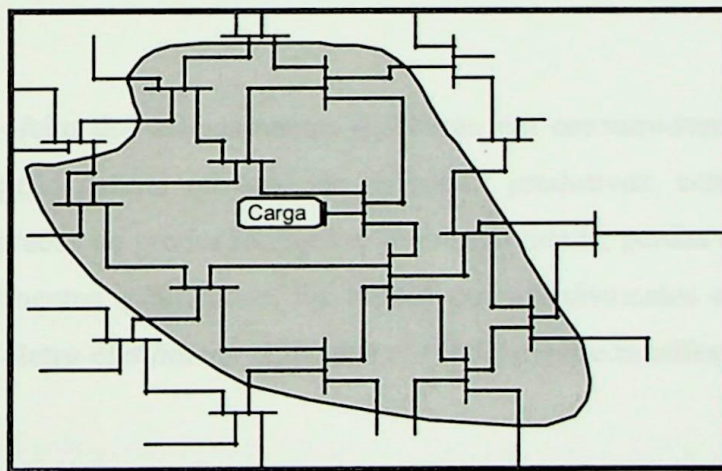


Figura 2.6 - Área de Vulnerabilidade

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

Conclui-se então que a área de vulnerabilidade depende tanto da topologia do sistema como da sensibilidade da carga, sendo que quanto mais sensível for o consumidor, maior será a extensão da área de vulnerabilidade e vice-versa.

Outro fato importante é que a área de vulnerabilidade guarda relação de proximidade com a “distância elétrica” e não, necessariamente, com a “distância geográfica” entre o ponto da falta e a carga sensível.

2.8 Efeitos sobre Equipamentos Eletro-Eletrônicos e Processos

O impacto dos afundamentos de tensão sobre os consumidores industriais ocorre de forma diferenciada em função da sensibilidade dos equipamentos eletro-eletrônicos instalados, das particularidades inerentes a cada processo industrial (indústrias têxteis, alumínio, plásticos, cimento, papel, metalúrgica, siderurgia, química, etc.) e também dos sistemas de controle de processo envolvidos. Portanto, a sensibilidade da carga do consumidor é uma combinação da sensibilidade dos equipamentos eletro-eletrônicos instalados com a sensibilidade do processo industrial.

Normalmente, o efeito dos afundamentos de tensão em consumidores industriais se dá sob a forma de interrupção parcial ou total de processos produtivos, com os conseqüentes prejuízos associados a paradas de produção, perdas de produtividade, perdas de insumos, reparo e a reposição de equipamentos danificados. Os efeitos dos afundamentos de tensão sobre os principais equipamentos eletro-eletrônicos utilizados nas indústrias se manifestam sob a forma de [27 a 33]:

- perda de programação de microprocessadores;
- perda de programação de PLCs;
- desatracamento das bobinas de contadores e relés auxiliares, com conseqüentes desligamentos de cargas e equipamentos via lógica do sistema de controle;
- desligamento de lâmpadas de descarga, como as de vapor de mercúrio, que levam cerca de alguns minutos para reacenderem;

- variação de velocidade dos acionamentos AC e DC (motor e carga mecânica), que dependendo do tipo de processo, poderá comprometer a qualidade do produto, ou até provocar a parada de produção;
- variação de torque do motor (AC e DC) com as mesmas implicações citadas anteriormente;
- desligamento de acionamentos devido à atuação de dispositivos de proteção associados, que quando detectam condições de risco, promovem o bloqueio do disparo dos tiristores ou até mesmo o desligamento imediato da fonte de alimentação;
- falhas de comutação em pontes controladas, afetando os disparos dos gatilhamentos dos tiristores;
- queima de fusíveis e outros componentes, principalmente, nos acionamentos DC operando no modo regenerativo.

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, VCRs, 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.

2.9 Sensibilidade dos Equipamentos Eletro-Eletrônicos

2.9.1 Sensibilidade de Computadores (Curvas CBEMA e ITIC)

A representação da tolerância das cargas ao afundamento de tensão é fornecida através de uma curva cujos eixos representam a magnitude e a duração das variações de tensão no sistema elétrico.

A sensibilidade dos computadores é retratada pela Curva CBEMA, publicada na norma IEEE-446 [34], apresentada na figura 2.7.

Apesar da curva CBEMA ter sido originalmente proposta para caracterizar a sensibilidade de computadores *mainframe*, atualmente ela também tem sido utilizada para outros componentes eletro-eletrônicos como: microcomputadores, equipamentos microprocessados, etc.

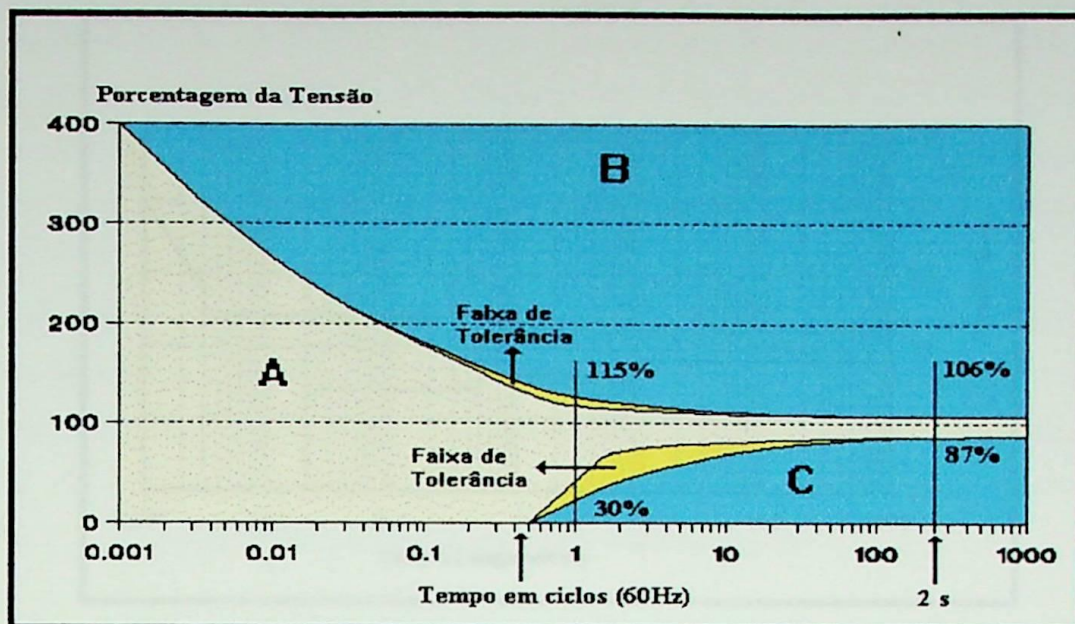


Figura 2.7 - Curva CBEMA

A figura 2.7 mostra três regiões distintas de operação, onde estão associadas às letras A, B, e C, que representam:

- região A - região de imunidade;
- região B - região de susceptibilidade, com possibilidade de ruptura da isolação dos equipamentos (perda de *hardware*), devido a ocorrência de sobretensões transitórias e à 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. No contexto desta tese, esta é a região de interesse.

Recentemente, a curva CBEMA foi modificada para caracterizar melhor a sensibilidade dos computadores e demais equipamentos, a fim de acomodar mais adequadamente a diversidade dos modernos dispositivos eletrônicos [35]. Esta curva é a ITIC, apresentada na figura 2.8.

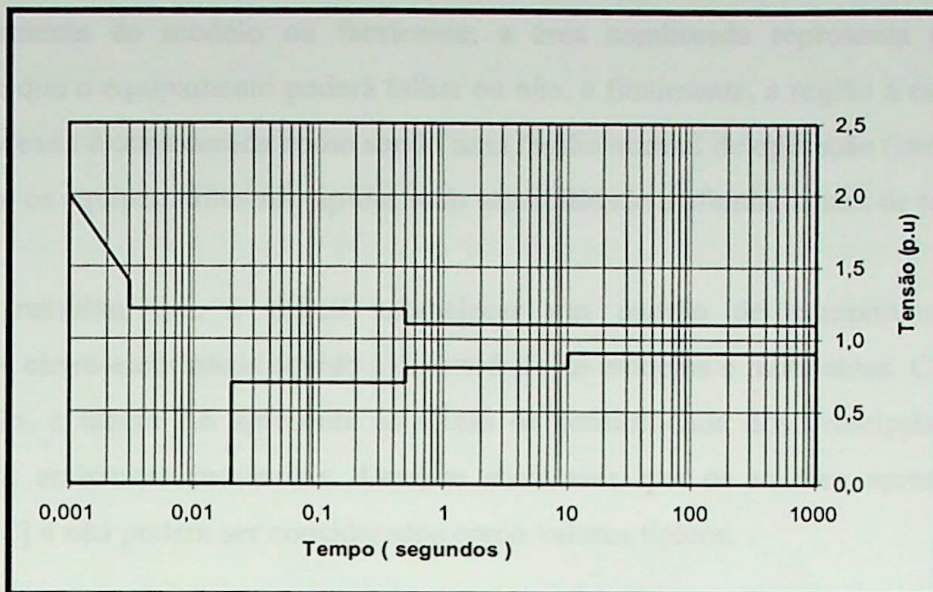


Figura 2.8 - Curva ITIC

2.9.2 Sensibilidade dos AVVs e demais Equipamentos Eletro-eletrônicos

Conforme já citado no item anterior, a sensibilidade dos equipamentos é geralmente representada a dois parâmetros (magnitude e duração) no plano cartesiano.

A sensibilidade dos AVVs, assim como todos os demais equipamentos eletro-eletrônicos, é caracterizada por uma faixa dentro do plano tensão x tempo, conforme mostra a figura 2.9.

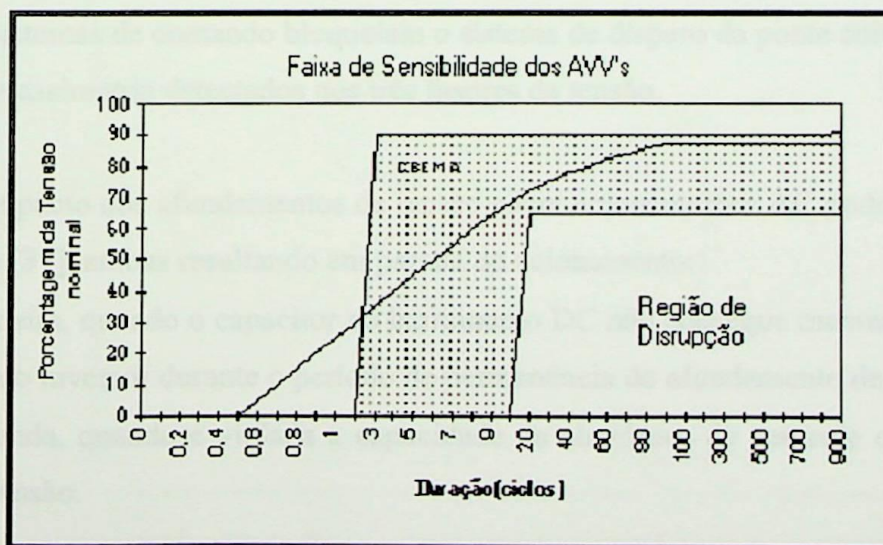


Figura 2.9 - Sensibilidade dos AVVs

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

Vale ressaltar que é difícil estabelecer um padrão de comportamento para os equipamentos eletro-eletrônicos devido à diversidade de modelos e fabricantes. Contudo, a título de informação, a tabela 2.6 apresenta as faixas de sensibilidade dos principais equipamentos utilizados em ambientes industriais. Deve-se esclarecer que os valores apresentados foram obtidos de [12] e não podem ser considerados como valores típicos.

Tabela 2.6 - Faixa de Sensibilidade dos Equipamentos Eletro-Eletrônicos

Tipo de Equipamento	Duração (ms.)	Intensidade (p.u.)
PLCs	16 – 616	0,45 - 0,75
AVVs- 5 HP (PWM)	16 - 83	0,6 - 0,8
Relés Auxiliares	8,3 – 33	0,6 - 0,78
Contatores	16 – 83	0,4 - 0,6

Um fato a ser observado é que geralmente os acionamentos DC são mais sensíveis a afundamentos de tensão que os acionamentos AC [22,36]. Isto ocorre devido aos seguintes fatores:

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

Já, o impacto dos afundamentos de tensão sobre acionamentos AC pode-se manifestar de duas maneiras [37], ambas resultando em parada do acionamento:

- primeira, quando o capacitor no barramento DC não consegue manter a tensão mínima nos terminais do inversor durante o período de permanência do afundamento de tensão;
- segunda, quando é violada a capacidade da eletrônica de controle operar com níveis reduzidos de tensão.

2.9.3 Sensibilidade dos AVVs - Outras Variáveis de Influência

Até o presente momento, todo o raciocínio foi conduzido tomando-se como premissa básica que os afundamentos de tensão apresentam forma de onda retangular. Desta maneira, pode-se estabelecer uma boa relação de causa e efeito quanto a estimativa de interrupção da carga. No entanto, sabe-se que, na prática, os afundamentos de tensão podem apresentar formas de onda não retangulares e semelhantes àsquelas mostradas nas figuras 2.10 e 2.11, obtidas de medições reais na baixa tensão numa planta industrial.

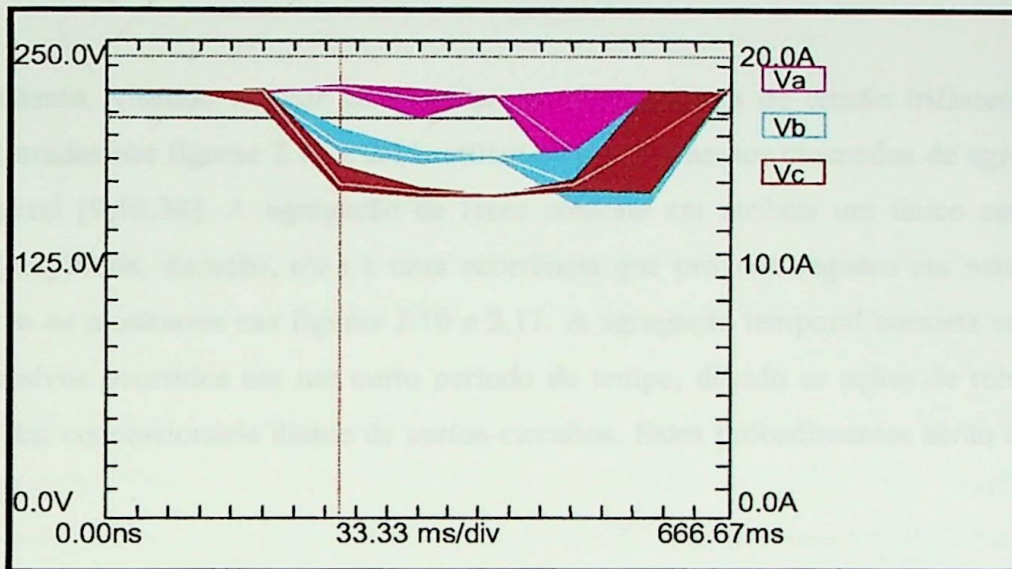


Figura 2.10 - Registro do Afundamento de Tensão 1

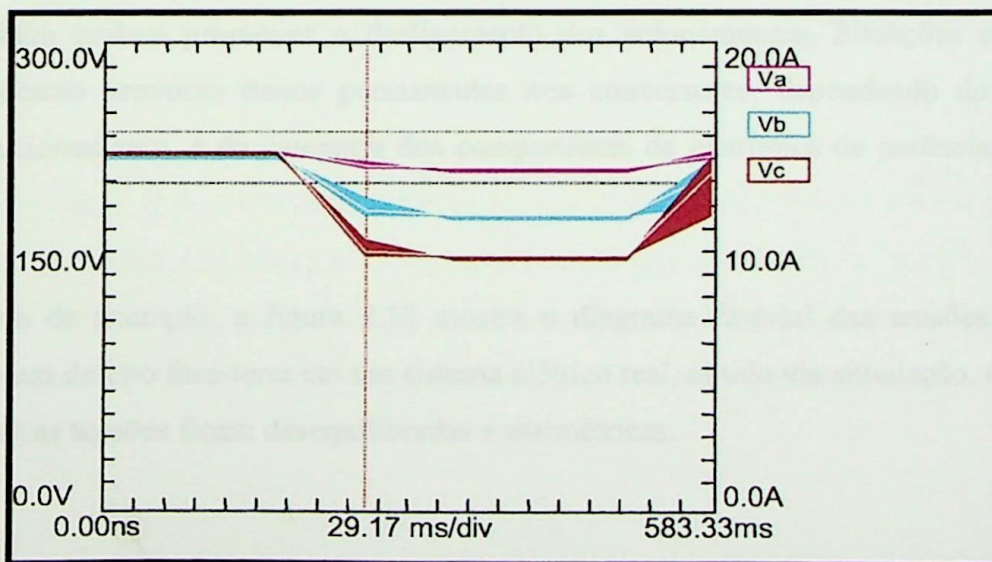


Figura 2.11 - Registro do Afundamento de Tensão 2

Observando tais figuras, o leitor se depara com algumas dificuldades para identificar os parâmetros característicos associados e conduzir as análises necessárias. Estas dificuldades são atribuídas aos seguintes aspectos:

- a intensidade do afundamento de tensão nas três fases é variável no tempo;
- a duração do afundamento de tensão em cada uma das fases é diferente;

Tendo em vista o que foi exposto, torna-se difícil determinar os parâmetros característicos dos afundamentos de tensão e apontar qual deles foi o fator determinante para promover o desligamento da carga.

No entanto, visando melhor caracterizar os afundamentos de tensão trifásicos para as situações mostradas nas figuras 2.10 e 2.11, utiliza-se procedimentos chamados de agregação de fases e temporal [9,10,38]. A agregação de fases consiste em atribuir um único conjunto de parâmetros (amplitude, duração, etc.) a uma ocorrência que provoca registro em mais de uma fase, conforme os mostrados nas figuras 2.10 e 2.11. A agregação temporal consiste em agregar eventos sucessivos ocorridos em um curto período de tempo, devido as ações de religamentos automáticos das concessionária diante de curtos-circuitos. Estes procedimentos serão abordados no capítulo III.

Somadas ao cenário já exposto, algumas publicações técnicas [22,29,32] relatam que, dependendo do tipo de acionamento e sistema de controle utilizado, o desequilíbrio e assimetria angular, também podem promover o desligamento dos acionamentos. Situações como estas podem até mesmo provocar danos permanentes nos conversores, dependendo do ajuste da proteção do acionamento, e da categoria dos componentes de eletrônica de potência utilizados [37].

A título de exemplo, a figura 2.12 mostra o diagrama fasorial das tensões durante a ocorrência de um defeito fase-terra em um sistema elétrico real, obtido via simulação. Observa-se claramente que as tensões ficam desequilibradas e assimétricas.

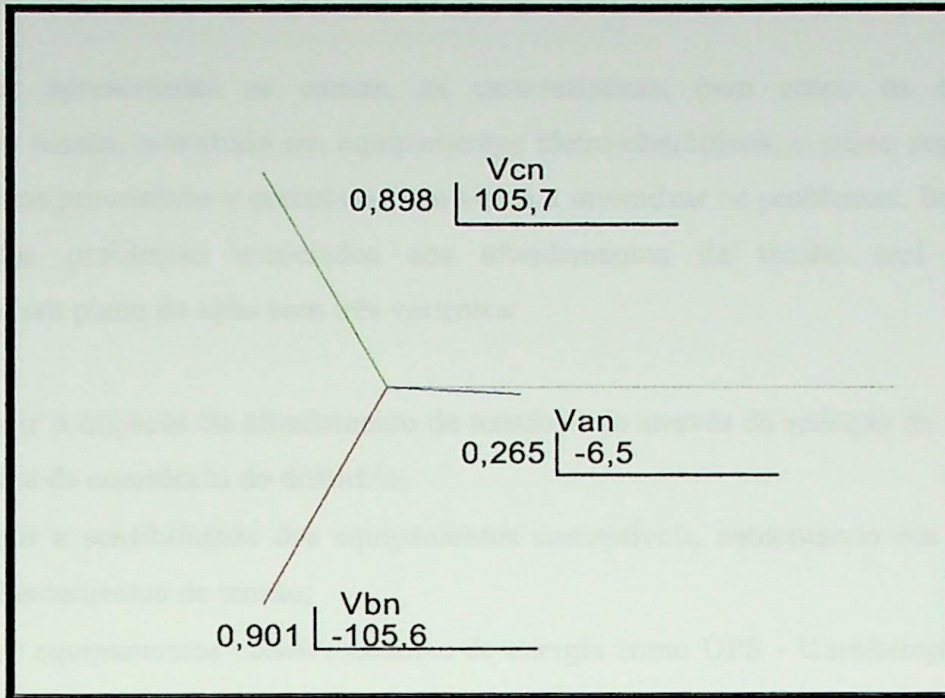


Figura 2.12 - Diagrama Fasorial. Afundamento de Tensão Assimétrico

Em função do que foi apresentado, conclui-se que as análises envolvendo afundamentos de tensão são complexas. Os métodos atualmente utilizados para a caracterização destes fenômenos se baseiam em uma amplitude e um valor para a duração, utilizando tensões de fase-terra ou fase-fase. É evidente que esta metodologia apresenta limitações, pois essas duas grandezas não refletem plenamente os efeitos dos afundamentos de tensão sobre os equipamentos trifásicos, considerando que, na grande maioria dos casos, estes distúrbios são de natureza desequilibrada, tanto em módulo como em ângulo de fase [38].

Entretanto, para os propósitos de planejamento e para a execução de estudos prospectivos para análise de cenários do sistema de suprimento-cargas sensíveis, a caracterização dos afundamentos de tensão por intermédio dos parâmetros magnitude, duração e frequência de ocorrência é adequado [8] e adotado internacionalmente. Este será o entendimento utilizado para os propósitos desta tese.

2.10 Considerações Finais

Uma vez apresentadas as causas, as características, bem como os efeitos dos afundamentos de tensão, sobretudo em equipamentos eletro-eletrônicos, o passo seguinte seria abordar as medidas preventivas e corretivas com vistas a minimizar os problemas. Basicamente, a mitigação dos problemas associados aos afundamentos de tensão será alcançada, estabelecendo-se um plano de ação com três vertentes:

- diminuir o impacto do afundamento de tensão, seja através da redução da magnitude, da duração ou taxa de ocorrência do distúrbio;
- diminuir a sensibilidade dos equipamentos susceptíveis, aumentando sua robustez e tolerância aos afundamentos de tensão;
- instalar equipamentos condicionadores de energia como UPS - Uninterrupted Powers Systems (estáticos ou rotativos), condicionadores tipo série, dentre outros [39,40,41].

As medidas mitigadoras sob a ótica do consumidor, seja ele residencial, comercial ou industrial, devem ser tomadas em função das categorias dos equipamentos que estão sendo afetados:

a) microcomputadores, relógios digitais, microondas e vídeos

Por serem de baixa potência, o ideal é que os fabricantes destes equipamentos desenvolvessem fontes internas robustas e capazes de suportar os afundamentos de tensão.

b) computadores de processo e de Centros de Processamento de Dados e CLPs

A solução natural é a instalação de UPS, cuja tecnologia de fabricação está consolidada e disponível no mercado através de inúmeros fornecedores.

c) contadores e relés auxiliares

Quando o problema de desatracamento de bobinas de contadores e relés auxiliares estão associados às cargas vitais de processos, ficam as opções:

- instalar retardadores (capacitores em paralelo) nas bobinas de corrente alternada;

- utilizar contadores com bobinas de corrente alternada, porém, com tensão de comando estabilizada, suprida através de UPS;
- utilizar contadores com bobinas de corrente contínua. Nesta opção é evidente que serão necessários investimentos adicionais em baterias e carregador de baterias.

d) AVVs

Estes equipamentos representam atualmente um grande desafio aos pesquisadores, uma vez que a solução de se instalar UPS, sejam estáticos ou rotativos, não é viável técnico-economicamente, principalmente, quando se trata de AVVs de grande potência.

Tomando-se por base que os afundamentos de tensão são distúrbios inevitáveis e inerentes à operação do sistema elétrico, cabem às partes envolvidas (concessionárias, consumidores e fabricantes) buscar, em conjunto, as soluções para os problemas. É dentro deste contexto que está tese esta inserida, sendo que o seu principal objetivo é o de propor critérios e índices de avaliação, que a partir de técnicas de simulação, permitam aos planejadores do sistema, concessionárias e consumidores, identificar os melhores locais da rede de suprimento para conectar consumidores com cargas sensíveis.

CAPÍTULO III

PROPOSTA DE NOVOS INDICADORES PARA O SISTEMA ELÉTRICO

3.1 Considerações Iniciais

A desregulamentação do setor elétrico, que vem ocorrendo em âmbito mundial, tem levado as empresas de energia elétrica a buscar novos mercados e novas oportunidades de negócio. Neste sentido, para atender uma parcela significativa de seus clientes, algumas empresas têm oferecido contratos especiais para aqueles consumidores possuidores de cargas sensíveis. Exemplos desta prática são o *Émeraude Service*, oferecido pela *Electricité de France*, e os contratos firmados entre grandes empresas automobilísticas, como a Ford, GM e a Chrysler, e a *Detroit Edison*, nos USA [9, 42].

Basicamente, estes contratos têm como característica principal o fornecimento de energia elétrica, segundo um padrão mínimo de qualidade, especialmente em relação a afundamentos de tensão. Caso o padrão estabelecido seja violado pela concessionária, o consumidor passa a ter direito a ressarcimento de prejuízos associados a seu processo, mediante um critério previamente acordado entre as partes. Para cumprir esta tarefa, faz-se necessário conhecer tanto o desempenho do sistema elétrico quanto a tolerância dos equipamentos sensíveis instalados no sistema do consumidor. Os dados referentes ao desempenho do sistema elétrico, como número de afundamentos de tensão e seus parâmetros, podem ser obtidos através de medições e/ou simulações. Por outro lado, os dados de sensibilidade dos equipamentos/processos podem ser obtidos através de consultas aos fabricantes e consumidores ou até mesmo através de ensaios específicos.

Assim, a definição de indicadores para afundamentos de tensão torna-se imprescindível, tanto do lado dos consumidores como do lado das concessionárias, seja para definir adequadamente as bases dos contratos citados, seja para executar estudos de planejamento e de avaliação para o atendimento de novos consumidores possuidores de cargas sensíveis.

Neste contexto, este capítulo tem como objetivos:

- apresentar os principais indicadores utilizados internacionalmente na área de afundamentos de tensão;
- apresentar os principais métodos para a predição de afundamentos de tensão;
- propor novos indicadores para o sistema elétrico, que, em verdade, se constitui na principal contribuição deste trabalho.

3.2 Indicadores Disponíveis para Afundamentos de Tensão

No âmbito internacional, destacam-se três vertentes em relação à definição de indicadores para afundamentos de tensão [9,10,38]. A primeira vertente é referente à proposta feita pela UNIPEDA; a segunda pelo NER/NRS e terceira pelo EPRI/ELETROTEK. Na seqüência serão apresentadas as principais características de cada uma destas vertentes, enfocando-se, principalmente, as formas de caracterização do fenômeno, agregação de eventos, contagem das ocorrências e, por fim, a proposição dos indicadores como uma maneira de avaliar o desempenho do sistema elétrico.

3.2.1 Metodologia UNIPEDA [9, 38]

Esta metodologia enfoca, especificamente, os afundamentos de tensão, sendo resultado de discussões de um grupo de trabalho denominado UNIPEDA/DISDIP, cujo relatório final foi concluído em 1990. Os principais parâmetros de caracterização considerados nesta metodologia são a intensidade e a duração.

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 mesmo é dada pelo período de tempo decorrido a partir do instante em que a tensão de uma das fases é igual ou inferior ao limite de 90 %, até o instante em que a tensão de nenhuma das fases seja inferior a este limite. A figura 3.1 ilustra esta situação, onde se observa um afundamento de tensão para 0% (queda de 100%) e o tempo correspondente T_{dip} .

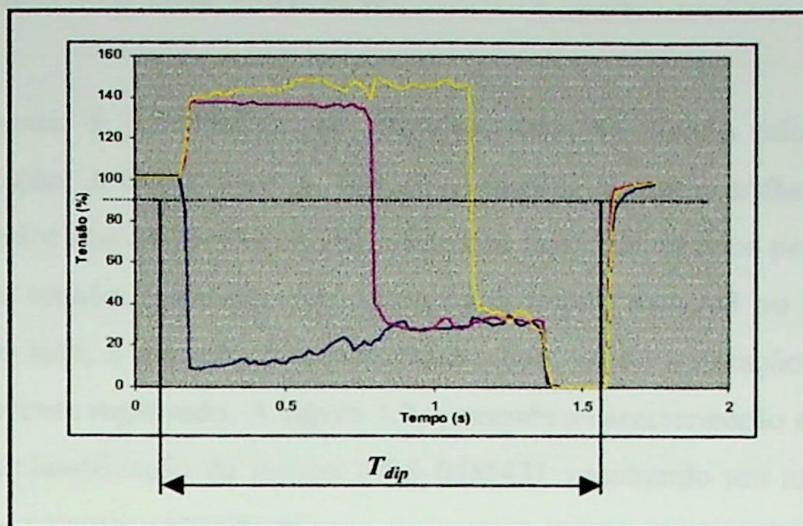


Figura 3.1 - Caracterização de Afundamentos de Tensão (UNIPEDE)

Com os parâmetros assim definidos, a avaliação de um sistema elétrico é efetuada com a realização de medições em múltiplos pontos e os resultados são agrupados conforme critérios mostrados na tabela 3.1. Cada célula desta tabela representa a combinação dos resultados de todos os locais medidos e indica o número de ocorrências de afundamentos de tensão que pertencem às classes correspondentes de duração e intensidade. O número de ocorrências em cada célula corresponde ao valor esperado, por ano, com probabilidade de 95% de não ser excedido.

Tabela 3.1 - Modelo para Tabulação dos Índices de Ocorrência de Afundamentos de Tensão (UNIPEDE)

Intensidade (%)	Duração					
	10 a 100 ms	100 a 500 ms	0,5 a 1s	1 a 3 s	3 a 20 s	20 a 60 s
10 a 15						
15 a 30						
30 a 60						
60 a 99						
99 a 100						



3.2.2 Metodologia NER / NRS-048 [38, 43]

Analogamente à UNIPEDE, os afundamentos de tensão são caracterizados pela intensidade e duração. A intensidade de um afundamento de tensão trifásico é definido como a maior queda do valor rms da tensão ocorrida nas três fases. Os desvios percentuais são tomados em relação à uma tensão declarada, por exemplo, à tensão nominal ou à tensão operativa do sistema. Por outro lado, a duração é caracterizada como sendo a duração associada à pior fase afetada em cada evento registrado. A figura 3.2 apresenta a caracterização de um afundamento de tensão segundo a classificação da norma NRS-048[43], mostrando um afundamento de tensão para 0% (queda de 100 %) e duração T_{dip} .

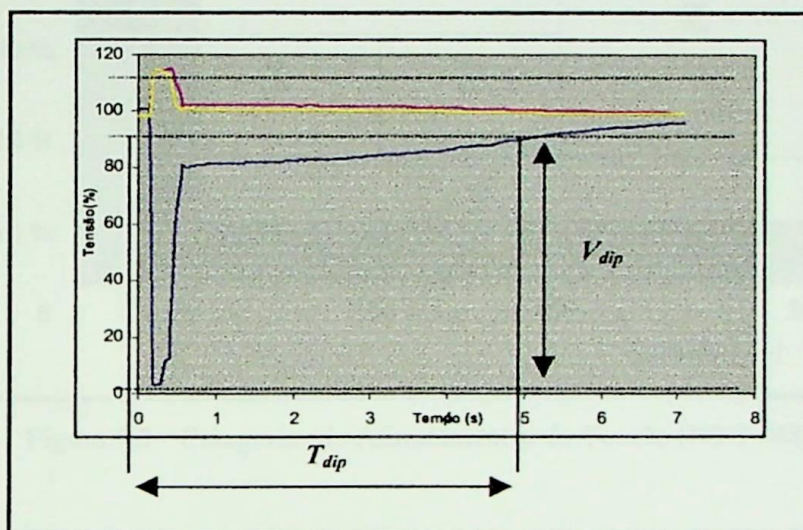


Figura 3.2 - Caracterização de Afundamentos de Tensão (NER/NRS 048)

O NER, com o objetivo de fornecer às empresas de energia elétrica da África do Sul uma forma de avaliar a qualidade do fornecimento de energia elétrica a seus clientes, definiu categorias de afundamentos de tensão, conforme mostrado na tabela 3.2 e figura 3.3. Adicionalmente, estabeleceu limites para os indicadores em função destas categorias, por classes de tensão, como indicado na tabela 3.3.

Tabela 3.2 - Categorias para Afundamentos de Tensão - Norma NRS-048

Intensidade (%)	Duração (ms)		
	20 a 150	150 a 600	600 a 3000
10 a 20	Y		
20 a 60	X	S	Z
60 a 100	T		

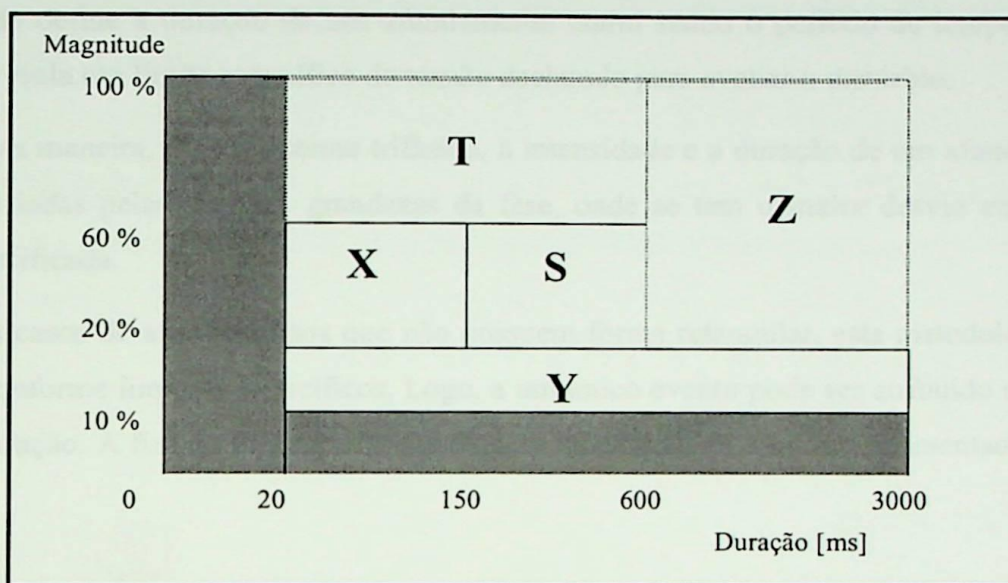


Figura 3.3 - Categorias de Afundamentos de Tensão (NRS 048)

Tabela 3.3 - Limites de Afundamentos de Tensão por Categoria

Faixas de Tensão [kV]	Número de Afundamentos de Tensão por ano				
	Categoria dos Afundamentos de Tensão				
	Z	T	S	X	Y
6,6 < 44	20	30	30	100	150
6,6 < 44 (rural)	49	54	69	215	314
44 < 132	16	25	25	80	120
220 < 765	5	6	11	45	88

Reportando-se a tabela 3.3, verifica-se que um consumidor atendido em 15 kV, por exemplo, poderá estar sujeito a no máximo 20 afundamentos de tensão na categoria Z. De modo geral, pode-se dizer que os limites propostos na tabela 3.3 são elevados, e por consequência inadequados para os consumidores, pois estes, dependendo da sensibilidade da carga, poderão estar sujeitos a um número elevado de paradas de processos.

3.2.3 Metodologia EPRI/ELECTROTEK [9, 38]

O EPRI/ELECTROTEK enfocam tanto os afundamentos como as elevações de tensão, sendo que os principais parâmetros utilizados na caracterização destes fenômenos, consoante com os demais métodos, são a intensidade e a duração. A intensidade do afundamento de tensão é caracterizada pela máxima queda no valor eficaz de tensão ocorrida durante o evento, a qual é representada pela mínima tensão remanescente. Esta forma de focar a intensidade do afundamento é diferente dos demais métodos já apresentados, o da UNIPEDE e o da NRS 048. Este método define a duração de um afundamento como sendo o período de tempo em que a tensão rms viola um limite específico de tensão declarado para avaliar o distúrbio.

Desta maneira, para o sistema trifásico, a intensidade e a duração de um afundamento de tensão são dadas pelas mesmas grandezas da fase, onde se tem o maior desvio em relação à tensão especificada.

Nos casos de afundamentos que não possuem forma retangular, esta metodologia atribui durações conforme limiares específicos. Logo, 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 3.4.

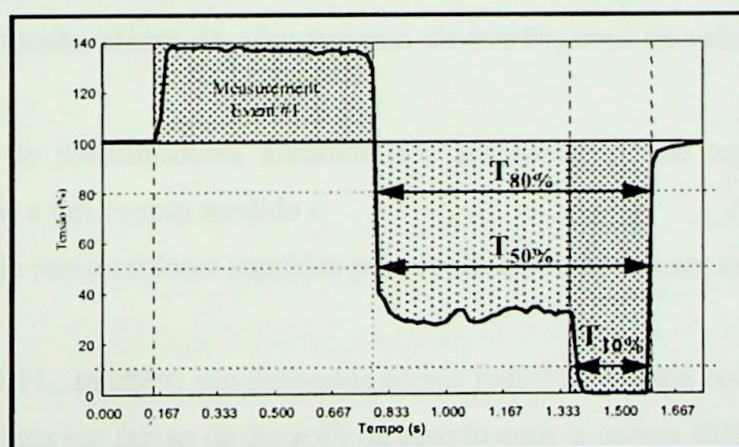


Figura 3.4 - Caracterização de um Afundamento de Tensão (EPRI)

Nesta figura, 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 cujos valores remanescentes de tensão 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.

No caso da agregação temporal, define-se um período de tempo fixo a partir do qual, identificando-se um evento, todos registros dentro deste período são considerados como parte do mesmo período agregado. Esta metodologia utiliza o período de agregação de um minuto, tomando como parâmetros característicos do evento agregado a amplitude e a duração daquele evento medido, que, potencialmente, resultará em falhas nos equipamentos dos consumidores. Para a definição de qual é a pior condição, existem três possibilidades: o maior desvio da tensão, o que é normalmente utilizado; a maior duração ou a maior área resultante do produto intensidade e duração. Vale ressaltar que ocorrendo simultaneamente afundamento e elevação de tensão, cada fenômeno deve ser tratado separadamente, muito embora este último não seja objeto de análise neste trabalho.

Considerando a sistemática apresentada, o indicador usado pelo EPRI para a avaliação do desempenho do sistema é o SARFI_x (System Average RMS Variation Frequency Index _{voltage}), conforme equação (3.1).

$$SARFI_x = \frac{\sum N_c}{N_T} \quad (3.1)$$

onde:

x: limiar da tensão eficaz do afundamento de tensão, com os valores: 90, 80, 70, 50, e 10%;

N_c: número de consumidores afetados por afundamentos de tensão com intensidade abaixo de x%, devido a um evento medido i;

N_T: número de consumidores supridos pela seção do sistema a ser avaliado.

Além do SARFI_x, também são definidos outros indicadores cuja concepção é semelhante; no entanto, subdivididos em faixas de duração de acordo com a norma IEEE-1159 [13], ou seja:

- SIARFI_x (instantâneo) para as faixas de 0,5 a 30 ciclos;
- SMARFI_x (momentâneo) para as faixas de 30 ciclos a 3 segundos;
- STARFI_x (temporário) para as faixas de 3 a 60 segundos.

Conforme apresentado, estes indicadores fornecem o número médio de ocorrência de afundamentos de tensão por consumidor num determinado período de tempo, considerando os diversos níveis de afundamentos de tensão (90, 80, 70, 50, e 10%).

De modo geral, estes indicadores representam uma forma apropriada para avaliação do desempenho do sistema elétrico. No entanto, a obtenção destes índices não é imediata, pois os mesmos não são obtidos a partir de amostras de medições, uma vez que a monitorização de todos os consumidores do sistema, é inviável. Além disto, pelo fato das amplitudes dos afundamentos, originadas por um mesmo evento, serem diferentes em diversos pontos, é imprescindível a quantificação do número de consumidores envolvidos por níveis de afundamentos de tensão. Para a consecução desta tarefa, o EPRI utiliza uma metodologia que consiste em segmentar adequadamente em trechos os alimentadores de média tensão, além da aplicação de uma ferramenta de estimação de estado [9, 38].

3.2.4 Análise Comparativa entre as Metodologias UNIPEDE, NRS-048 e EPRI

As principais metodologias de análise e tratamento de medições de afundamentos de tensão foram apresentadas nos itens anteriores. Do que foi exposto, verifica-se que estes métodos se baseiam em uma amplitude do valor rms da tensão (tensão remanescente ou queda de tensão) e num valor para a duração, utilizando tensões fase-terra ou fase-fase. Observa-se também que cada um destes métodos possui uma maneira particular de caracterização do fenômeno; nas formas de contagem das ocorrências e avaliação do desempenho do sistema elétrico, através da proposição de diferentes indicadores.

3.2.4.1 UNIPEDE:

O indicador proposto é o resultado de uma avaliação estatística simples, realizada a partir dos dados das medições e que leva em consideração apenas os pontos medidos. Em contrapartida a esta simplicidade, verifica-se o efeito de embaralhamento das fases. Este efeito é resultado da maneira como esta metodologia caracteriza o afundamento, podendo tomar por exemplo a intensidade de uma fase e a duração de outra. Consequentemente, perde-se a correlação tanto com os eventos causadores dos afundamentos, como também com os possíveis efeitos sobre as cargas.

3.2.4.2 NRS-048

A implementação da metodologia sugerida pela norma NRS-048 permite a clara definição de indicadores para avaliar os afundamentos de tensão [44]. Entretanto, a observação dos valores definidos para os limites das regiões que definem as categorias X, Y, S, T e Z permite algumas ponderações acerca dos critérios que levaram à definição dos mesmos [44]. Na região entre 0 e 10%, os afundamentos não são considerados, pois não existe nenhum indicador definido. Como a maioria das cargas sensíveis, geralmente, suporta afundamentos de até 20 %, provavelmente este fato levou à definição do início das regiões X, S e Z [44].

Outro ponto a observar é que soluções econômicas que envolvam equipamentos condicionadores de energia, protegendo cargas sensíveis contra afundamentos maiores que 60 %, mostram-se inviáveis na prática. Nestes casos, a ocorrência de eventos é baixa, tornando os investimentos com relação custo-benefício desfavorável [44].

As definições das durações de cada região também devem ser avaliadas. Afundamentos com duração inferior a 20 ms afetam um grupo restrito de cargas sensíveis. Por outro lado, o limite da região X (150 ms) relaciona-se a defeitos ocorridos na transmissão e da região S (600 ms), a defeitos ocorridos na subtransmissão/distribuição. Isto mostra a influência das práticas de proteção com os eventos registrados e com a definição dos indicadores.

Por fim, eventos na região Z, observadas a intensidade e duração, também são suficientes para levar um grande número de cargas sensíveis à interrupção.

3.2.4.3 EPRI/ELECTROTEK

Os indicadores propostos pelo EPRI/ELECTROTEK possibilitam avaliar, precisamente, o número de consumidores afetados por um afundamento de tensão. Entretanto, a sua aplicação é mais difícil de ser implementada, se comparada, por exemplo, ao indicador da UNIPEDA.

Considerando-se que apenas 10% das medições de afundamentos de tensão não apresentam forma de variação retangular [9], os procedimentos ditados pelo EPRI e pela UNIPEDA podem ser uniformizados [9, 38]. Por exemplo, pode-se sugerir que no indicador do EPRI seja utilizada apenas a duração que considere o limiar de 90%, o que coincide com a definição de duração da UNIPEDA [9, 38].

Outro fato a ser considerado é que todos os indicadores abordados apresentam algumas restrições, pois as grandezas associadas não refletem plenamente os efeitos dos distúrbios sobre equipamentos trifásicos, considerando-se que a grande maioria dos afundamentos de tensão registrados são de natureza desequilibrada e assimétrica.

Outra limitação identificada nestes indicadores mostra que eles refletem o desempenho visto somente pelo lado do sistema elétrico, sem qualquer avaliação direta do impacto dos fenômenos sobre a carga. É condição desejável que estes indicadores também possam avaliar o impacto dos afundamentos de tensão sobre os equipamentos/processos dos consumidores. Em outras palavras, os indicadores para os afundamentos de tensão, dentre outros aspectos, devem quantificar além de qualificar:

a)do lado do consumidor

- disponibilidade (indisponibilidade) de operação dos processos produtivos;
- número esperado de paradas anuais de produção;
- custos associados às paradas de produção.

b)do lado da concessionária

- disponibilidade (indisponibilidade) média de operação dos processos produtivos por consumidor;
- número médio de paradas anuais de produção por consumidor;
- custos médios associados às paradas de produção por consumidor;
- demanda média não distribuída por consumidor.
- energia média não distribuída por consumidor.

Neste contexto, os indicadores propostos neste trabalho visam exatamente suprir estas deficiências apontadas nos indicadores disponíveis até a presente data.

3.3 Métodos de Cálculo dos Afundamentos de Tensão

Em função da aleatoriedade das ocorrências dos afundamentos de tensão, é pouco conveniente a obtenção de dados estatísticos confiáveis através de medições, podendo despender grandes recursos financeiros e longos períodos de medição [45]. A título de exemplo, a tabela 3.4 obtida de [45] mostra o período mínimo de monitoramento necessário em função do número

esperado de afundamentos de tensão, assim como do grau de confiança desejado. Por exemplo, para um evento que ocorra uma vez por semana, são necessários 4 meses de medição para se ter um erro de 50%, ou 7 anos, para se obter 10%. Vale esclarecer que a referência [45] adotou neste estudo a distribuição de Poisson, cujos princípios de aplicação estão descritos no Apêndice B.

Tabela 3.4 - Período Mínimo de Monitorização e Erro Desejado

Frequência de Ocorrência do Afundamento de Tensão	Erro de 50 %	Erro de 10 %
1 por dia	2 semanas	1 ano
1 por semana	4 meses	7 anos
1 por mês	1 ano	30 anos
1 por ano	16 anos	400 anos

As ferramentas computacionais utilizadas para determinar os parâmetros e as estatísticas dos afundamentos de tensão são bem conhecidas. Normalmente, para o cálculo das intensidades dos afundamentos de tensão, utilizam-se programas de análise de curto-circuito convencionais, cujo modelo é linearizado, permitindo solução direta, portanto, não iterativa e com baixo esforço computacional. Outras ferramentas, como o EMPT, também têm sido utilizadas [46] quando se deseja avaliar detalhadamente os efeitos dinâmicos dos motores e geradores nos cálculos dos afundamentos de tensão. Em contrapartida, com a utilização do EMPT, agrega-se maior esforço computacional, em função da complexidade da modelagem do sistema e de seus componentes.

Para estudos de planejamento, a análise de curto-circuito é a ferramenta mais utilizada [3,6,37,47,48]. Para cumprir esta tarefa, dois métodos de cálculo têm sido utilizados [36,37,49, 50]: método da distância crítica e o método das posições de falta, os quais serão brevemente descritos nos itens subsequentes.

Visando estimar a duração dos eventos, utilizam-se os tempos correspondentes à atuação do sistema de proteção, somado ao tempo de abertura dos disjuntores. Finalmente, para estimar o número de ocorrências anuais dos afundamentos de tensão, são utilizadas as estatísticas de taxas de falta em barramentos, linhas de transmissão, etc. Evidentemente que os resultados das simulações serão mais confiáveis, à medida que os dados do sistema forem mais precisos, como por exemplo: modelagem dos equipamentos, componentes e dados de taxas de falta, principalmente das linhas de transmissão e distribuição.

3.3.1 Método da Distância Crítica

Este método é bastante simples, e mostra-se adequado para aplicação em sistemas de distribuição, que são 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. Esta posição, uma vez encontrada, é denominada de distância crítica, sendo que os afundamentos de tensão de menor amplitude estarão associadas à ocorrência de curto-circuitos além da distância crítica calculada e vice-versa.

Adotando-se a barra de 12 kV mostrada no diagrama da figura 3.5 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 (3.2).

$$V_{PAC} = \frac{Z_A}{Z_s + Z_A} \quad (3.2)$$

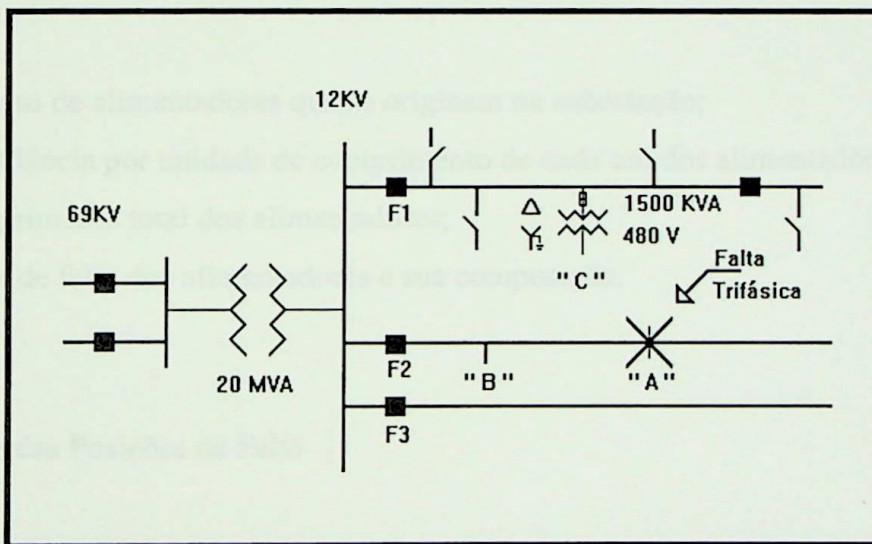


Figura 3.5 - Diagrama Unifilar de um Sistema de Distribuição Típico

onde:

V_{PAC} - afundamento de tensão no ponto de acoplamento [p.u.];

Z_A - impedância do alimentador entre a barra de acoplamento e ponto A [Ω];

Z_s - impedância equivalente da fonte no ponto de acoplamento [Ω].

Vale dizer que na expressão (3.2) foram adotadas algumas premissas, quais sejam: 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 ($V_{crítica}$), de acordo com a equação (3.3).

$$L_{crítica} = \frac{Z_S}{z} \cdot \frac{V_{crítica}}{1-V_{crítica}} \quad (3.3)$$

onde:

$L_{crítica}$ - distância crítica [km];

z - impedância do alimentador por unidade de comprimento [Ω/km].

Os dados necessários para executar uma análise completa num sistema de distribuição são:

- 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.

3.3.2 Método das Posições de Falta

Este método tem sido amplamente utilizado para calcular os afundamentos de tensão em sistemas elétricos de potência de grande porte, contemplando sistemas radiais e 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. Desta maneira, pode-se avaliar a influência da posição da falta tanto na amplitude como na duração dos afundamentos de tensão. Este método também é conhecido como método do curto-circuito deslizando.

A magnitude do afundamento de tensão (tensão pós-falta) é calculada a partir da

utilização de um programa de cálculo de curto-circuito, mediante a aplicação da equação (3.4) para defeitos trifásicos.

$$E_{i,k} = E_i^P - \frac{E_k^P}{Z_{kk}^+ + Z_f} Z_{i,k} \quad (3.4)$$

onde:

$E_{i,k}$ - afundamento de tensão 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 barra i-k ;

Z_{kk} - impedância própria da barra k;

Z_f - impedância de falta na barra k.

Para defeitos fase-terra são utilizadas as expressões (3.5) e (3.6).

$$\begin{bmatrix} E_{i,k}^0 \\ E_{i,k}^+ \\ E_{i,k}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_{i,k}^P \\ 0 \end{bmatrix} - \frac{E_{i,k}^P}{Z_{kk}^+ + Z_{kk}^- + Z_{kk}^0 + 3Z_f} \begin{bmatrix} Z_{i,k}^0 \\ Z_{i,k}^+ \\ Z_{i,k}^- \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$\begin{bmatrix} E_{a_{i,k}} \\ E_{b_{i,k}} \\ E_{c_{i,k}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{i,k}^0 \\ E_{i,k}^+ \\ E_{i,k}^- \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

onde:

$E_{a_i}^P, E_{a_k}^P$ - tensão pré-falta na fase A nas barras i e k, respectivamente;

$E_{i,k}^+, E_{i,k}^-, E_{i,k}^0$ - tensão de seqüência positiva, negativa ou zero na barra i, devido a curto fase-terra na barra k, respectivamente;

$Z_{i,k}^+, Z_{i,k}^-, Z_{i,k}^0$ - impedância de transferência de seqüência positiva, negativa e zero entre as barras i - k, respectivamente ;

$Z_{kk}^+, Z_{kk}^-, Z_{kk}^0$ - impedância própria de seqüência positiva, negativa e zero da barra k, respectivamente;

$E_{a_{i,k}}$, $E_{b_{i,k}}$, $E_{c_{i,k}}$ - tensão pós-falta nas fases A, B e C na barra i devido a curto fase-terra na barra k .

Para a obtenção dos valores das impedâncias próprias e de transferência indicadas nas equações (3.4) e (3.5), são utilizadas técnicas matriciais elaboradas, cujo detalhamento está fora dos objetivos deste trabalho.

Para o cálculo da tensão pós-falta, devido a defeitos fase-fase e fase-fase-terra, são utilizadas equações equivalentes às expressões (3.5) e (3.6).

3.4 Proposta de Novos Indicadores para o Sistema Elétrico

3.4.1 Premissas Básicas

Um sistema elétrico é composto por um conjunto de componentes estatisticamente independentes, tais como geradores, linhas de transmissão e de distribuição, subestações e sistema de proteção. Nenhum destes componentes opera livre de falhas, isto é, eles não são totalmente confiáveis em sua operação.

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, tipicamente, apresentam uma taxa de ocorrência de faltas da ordem de um defeito a cada dez anos [23].

Os demais equipamentos, dos quais os principais são os geradores e transformadores, apresentam baixa ocorrência de curto-circuito[23], mas podem ser desligados com frequência por outras razões. No caso dos geradores, muitos desligamentos são provocados por problemas nos acessórios ou no serviço auxiliar. Nos transformadores, os desligamentos são normalmente causados por sobrecarga.

Portanto, no processo de determinação do desempenho do sistema elétrico diante dos afundamentos de tensão, os únicos componentes considerados são as linhas aéreas, razão pela qual o enfoque deste trabalho será concentrado neste tipo de componente. Baseado nestas

premissas, os itens que se sucedem são dedicados a proposição de novos indicadores para o sistema elétrico, visando suprir aquelas limitações citados no item 3.2.4.3.

Como será visto, os indicadores serão subdivididos em dois grupos, quais sejam:

- indicadores para barramentos de carga sensíveis;
- indicadores globais do sistema.

Em ambos os casos, serão consideradas tanto a possibilidade de modelagem de n estados para a carga do consumidor quanto a de dois estados.

3.4.2 Indicadores - Modelo de n Estados

A metodologia utilizada para o cálculo dos indicadores será baseada no conceito de perda de carga, classificando os estados operativos da planta industrial em estados de falha (que implicam em paradas de processos) e estados de sucesso (operação normal), sendo analisados somente os estados de falha, os quais comprometem a continuidade operacional dos processos dos consumidores. A metodologia consistirá, basicamente, na construção dos modelos: tensão disponível nos barramentos de carga e modelo da carga/processo do consumidor. Posteriormente, estes modelos serão combinados de forma apropriada para obter probabilisticamente o modelo de risco de interrupção de processo em decorrência dos afundamentos de tensão.

Em linhas gerais, a metodologia será dividida em quatro etapas, quais sejam:

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.

3.4.2.1 Etapa 1 - Modelo da Tensão Disponível nos Barramentos de Carga

Para o cálculo da intensidade dos afundamentos de tensão nos barramentos de carga, será utilizada uma ferramenta convencional de cálculo de curto-circuito, considerando curtos-circuitos deslizantes ao longo das linhas de transmissão. Isto equivale a aplicar o conceito associado ao método das posições de falta, conforme mostra a figura 3.6, simulando os vários tipos de curto-circuito (3F, FF, FFT e FT).

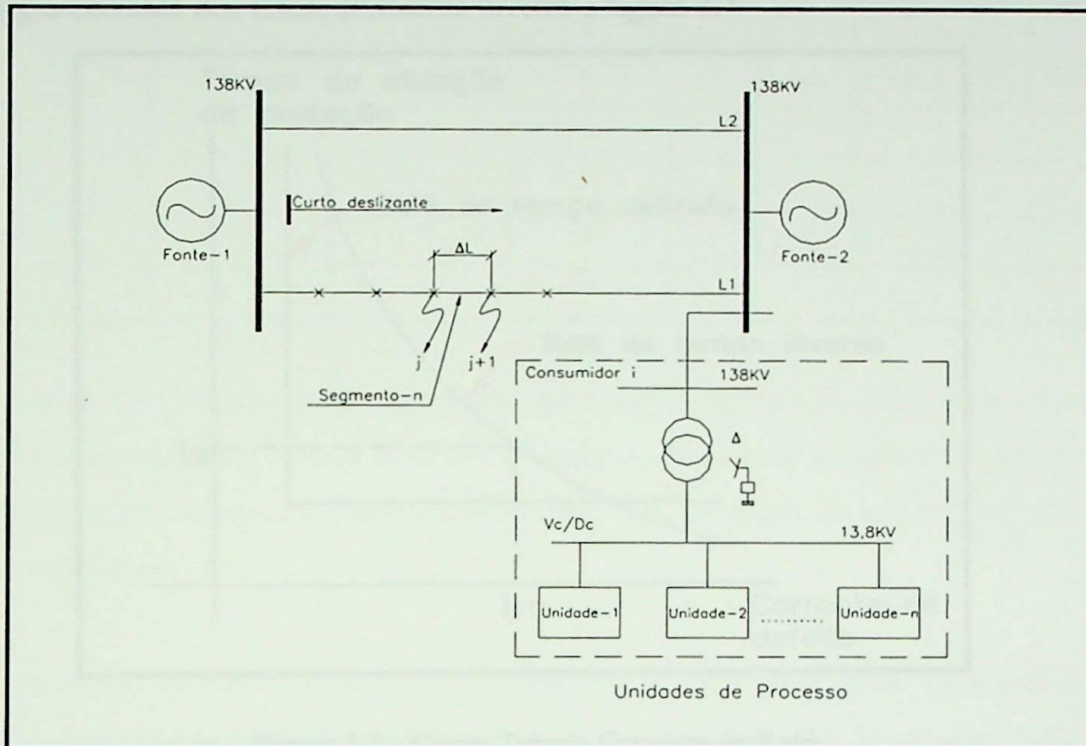


Figura 3.6 - Diagrama Unifilar do Sistema

A intensidade dos afundamentos de tensão nos barramentos de carga e associados aos curtos-circuitos em determinado segmento da linha, será considerada como sendo o valor médio resultante de defeitos aplicados no início e no final de cada segmento, conforme mostra (3.7)

$$V_n = \frac{V_j + V_{j+1}}{2} \tag{3.7}$$

onde:

V_n - tensão resultante no barramento de carga devido ao curto-circuito no segmento n da linha em análise;

V_j - tensão resultante no barramento de carga devido ao curto-circuito no ponto j do segmento n da linha;

V_{j+1} - tensão resultante no barramento de carga devido ao curto-circuito no ponto $j+1$ do segmento n da linha em análise.

A duração dos afundamentos de tensão será obtida em função da posição de falta na linha para o caso de relés de distância ou em função dos valores das correntes nos pontos de defeito para os relés de sobrecorrente. Neste último caso, serão consideradas as características de resposta tempo-corrente dos relés, conforme mostra a figura 3.7

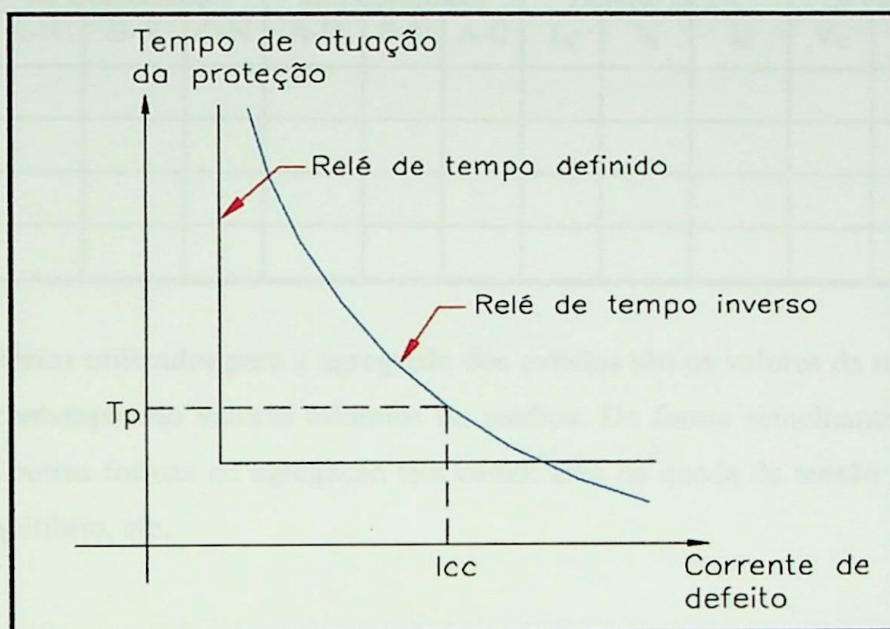


Figura 3.7 - Curva Tempo-Corrente do Relé

Para o cálculo da duração, serão considerados tanto a filosofia como os ajustes do sistema de proteção, cujos tempos resultantes são somados ao tempo de operação dos disjuntores, conforme (3.8).

$$D_C = T_P + T_D \quad (3.8)$$

onde:

D_C - duração do afundamento de tensão [s];

T_P - tempo associado à sensibilidade e atuação da proteção [s];

T_D - tempo de operação do disjuntor [s].

Como resultado desta sistemática, obtém-se o modelo da tensão disponível em cada consumidor, decorrentes da simulação de diversos tipos de defeitos ao longo das linhas do sistema. Os resultados obtidos são agrupados de forma conveniente através do parâmetro intensidade (V_C), duração (D_C) e número de ocorrências (N_n), por segmento da linha, conforme as possibilidades apresentadas na tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Modelo para as Formas de Agregação dos Eventos

Segmentos das LTs	Tensão Fase-Neutro no Consumidor			Tensão Fase-Fase no Consumidor			Correntes de Defeito na LT			Agregação de Fases		Número de Eventos- N_n
	A-N	B-N	C-N	A-B	B-C	A-C	I_A	I_B	I_C	V_C	D_C	
Segmento 1												N_1
Segmento 2												N_2
Segmento 3												N_3
Segmento n												N_n

Os critérios utilizados para a agregação dos eventos são os valores da tensão fase-fase ou fase-neutro, contemplando valores mínimos ou médios. De forma semelhante, também podem ser utilizadas outras formas de agregação tais como: área da queda de tensão x tempo, energia, fator de desequilíbrio, etc.

Finalmente, a terceira variável, que corresponde ao número esperado de afundamentos de tensão em cada segmento da linha, será calculada mediante a aplicação da equação (3.9).

$$N_n = \Delta L \cdot \lambda \quad (3.9)$$

onde:

N_n - número esperado de afundamentos de tensão associado ao segmento n da linha [eventos/ano];

ΔL - incremento do curto-circuito deslizando em [km]

λ - taxa média de falta da linha por tipo de defeito [eventos/km. ano]

Para a obtenção dos valores indicados em (3.9) admiti-se que todos os locais de falta ao longo da linha são equiprováveis, obedecendo à distribuição uniforme.

Analisando a tabela 3.5, pode-se dizer que nos barramentos dos consumidores, cada linha de transmissão do sistema será representada por um modelo discreto de múltiplos estados de tensão, referentes aos segmentos da linha onde são aplicados os defeitos.

3.4.2.2 Etapa 2 - Modelo de Sensibilidade da Carga

Toda unidade associada ao consumidor será representada segundo a sensibilidade dos equipamentos/processos envolvidos, definida através de limites de tolerância de intensidade (V_L) e duração (D_L). A figura 3.8 mostra a curva de sensibilidade genérica de uma unidade produtiva. Os estados 1 e 2 são os estados operantes e inoperantes, respectivamente.

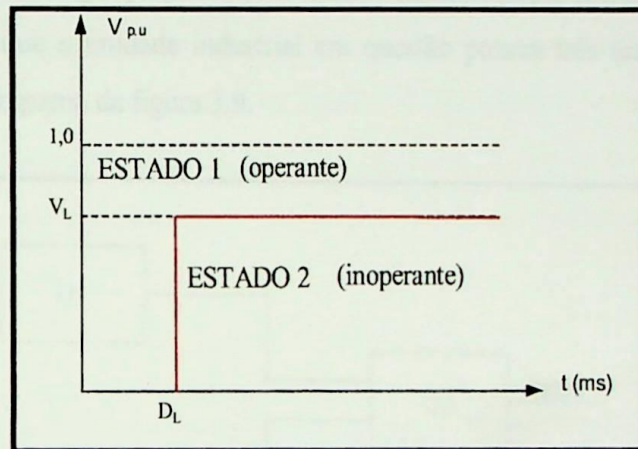


Figura 3.8 - Curva de Sensibilidade Genérica

A interrupção de cada unidade de produção ocorrerá se as condições estabelecidas em (3.10) forem satisfeitas, ou seja:.

$$(V_C < V_L) \cap (D_C > D_L) \quad (3.10)$$

Logo, a probabilidade de desligamento da unidade de processo será obtida a partir de (3.11):

$$P_F = P [(V_C < V_L) \cap (D_C > D_L)] \quad (3.11)$$

onde:

P_F - probabilidade de desligamento da carga/unidade produtiva.

Geralmente, os processos industriais são constituídos de diversas unidades produtivas associadas de diversas maneiras, dependente das particularidades do processo de cada

consumidor. De qualquer maneira, pode-se imaginar três possibilidades de associação, quais sejam:

- unidades operando em série, ou em cascata. Nesta configuração, o desligamento de qualquer uma das unidades resultará na interrupção de todo o processo do consumidor;
- unidades operando em paralelo. Nesta condição, a parada total do processo ocorrerá somente se todas as unidade forem desligadas. Para qualquer situação intermediária, haverá perda parcial de produção;
- unidades operando numa associação mista, ou seja, numa configuração série e paralelo.

Para ilustrar a metodologia proposta, será tomada como exemplo a condição operacional mista, e supõe-se ainda que a unidade industrial em questão possua três unidades produtivas arranjadas conforme fluxograma da figura 3.9.

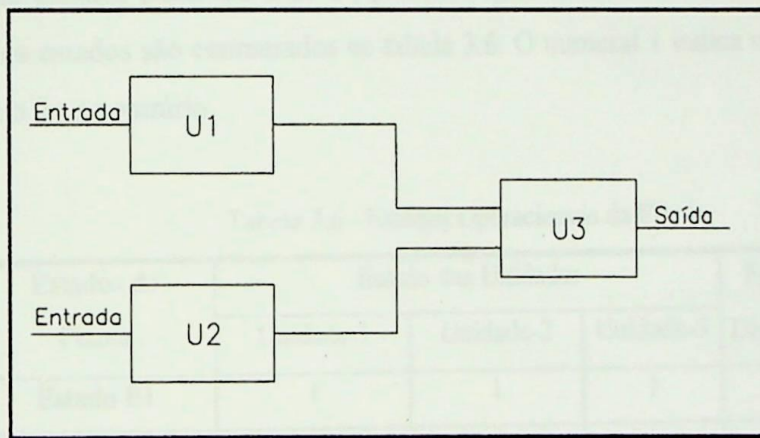


Figura 3.9 - Fluxograma do Processo

Admite-se também que cada unidade tenha a sensibilidade caracterizada conforme limites estabelecidos na figura 3.10. Observa-se que a unidade U3 é a mais robusta, o que equivale a ter menor sensibilidade à intensidade dos afundamentos de tensão.

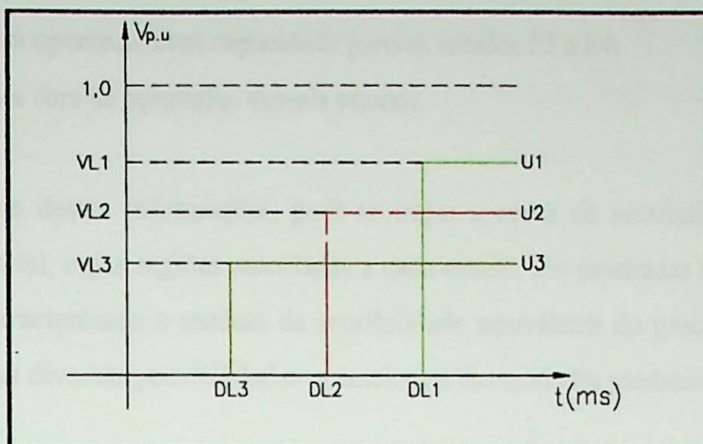


Figura 3.10 - Sensibilidade das Unidades de Processo

O próximo passo consiste então em definir os possíveis estados operativos do complexo industrial, através do método de enumeração de estados. Como são três unidades, sabe-se que o número total de estados possíveis é de 2^3 , portanto, igual a 8. A fim de melhor sistematizar a análise, todos os estados são enumerados na tabela 3.6. O numeral 1 indica unidade de processo em operação e o 0 ao contrário.

Tabela 3.6 - Estados Operacionais da Planta

Estados da Planta	Estado das Unidades			F_K - Fator de Disponibilidade
	Unidade-1	Unidade-2	Unidade-3	
Estado E1	1	1	1	F_1
Estado E2	0	0	0	F_2
Estado E3	1	0	1	F_3
Estado E4	0	1	1	F_4
Estado E5	1	1	0	F_5
Estado E6	1	0	0	F_6
Estado E7	0	0	1	F_7
Estado E8	0	1	0	F_8

Também observa-se na tabela 3.6 que a cada estado operacional está associado a um fator de disponibilidade da fábrica F_K .

Baseado ainda no conhecimento do processo, foram estabelecidas as seguintes condições operativas:

- planta operando com capacidade total, estado E1;
- planta operando com capacidade parcial, estados E3 e E4;
- planta fora de operação, demais estados.

De posse destas informações, pode-se traçar a curva de sensibilidade equivalente do processo industrial, cujas regiões associadas a cada estado, são mostradas na figura 3.11. Desta maneira fica caracterizado o modelo da sensibilidade equivalente do processo do consumidor, contemplando as diversas possibilidades operacionais das unidades produtivas.

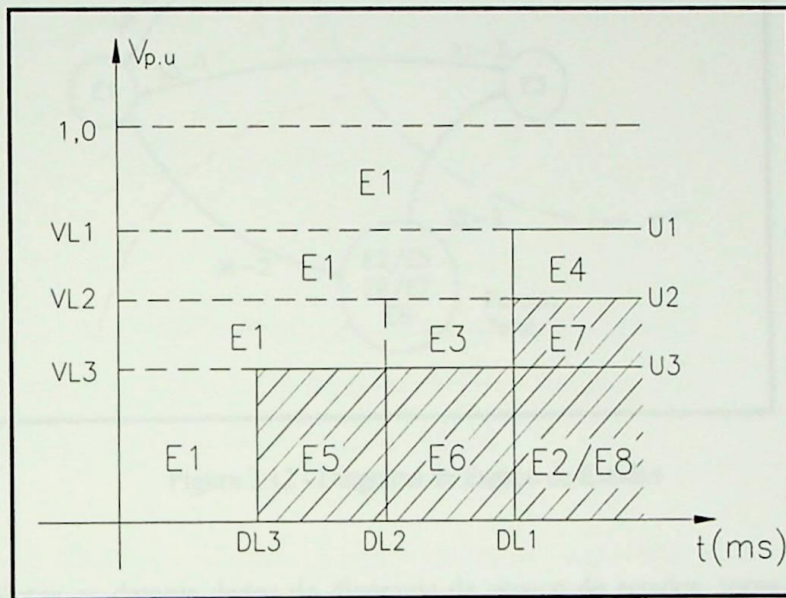


Figura 3.11 - Sensibilidade Equivalente do Consumidor.

3.4.2.3 Etapa 3 - Combinação dos Modelos

Uma vez caracterizado tanto o modelo da tensão disponível no barramento do consumidor quanto o da sensibilidade equivalente do processo, o passo seguinte é obter probabilisticamente o modelo de risco de interrupção do complexo industrial em decorrência de afundamentos de tensão.

Para cumprir esta tarefa, torna-se necessário construir o diagrama de espaço de estados do processo, e determinar as taxas de transição entre os estados. Neste exemplo, admiti-se que uma vez a planta tenha atingido os estados correspondentes a parada total da fábrica (E2, E5, E6, E7 e E8), a retomada de produção dar-se-á por estágios, transitando primeiramente para o estado E3 e posteriormente para o estado E1. Caso a planta venha a residir no estado E4, ela poderá, após um certo tempo, retornar diretamente para o estado E1.

Com base nestas informações, pode-se construir o diagrama de espaço de estados, conforme mostra a figura 3.12. Observa-se que os estados (E2, E5, E6, E7 e E8) correspondem aos estados acumulados representando a condição de parada total do processo.

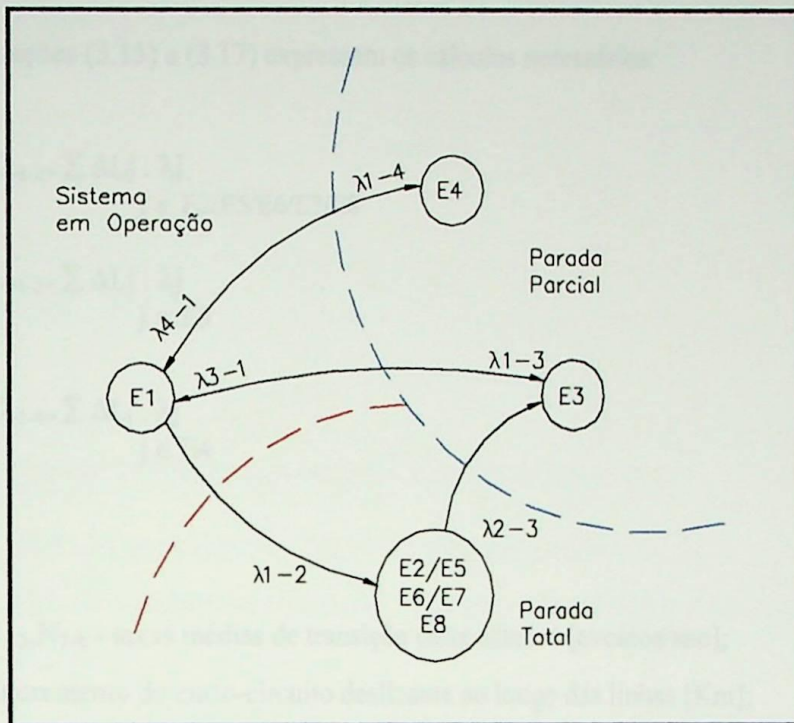


Figura 3.12 - Diagrama de Espaço de Estados

Para completar os demais dados do diagrama de espaço de estados, torna-se necessário determinar todas as taxas de transição.

Admitindo uma distribuição de probabilidade caracterizada por taxas de transição constantes, pode-se obter as taxas médias de retomada de produção a partir dos tempos médios correspondentes conforme indicado nas equações (3.12) a (3.14).

$$\lambda_{2-3} = 8760 / T_{2-3} \tag{3.12}$$

$$\lambda_{3-1} = 8760 / T_{3-1} \tag{3.13}$$

$$\lambda_{4-1} = 8760 / T_{4-1} \tag{3.14}$$

onde:

λ_{2-3} , λ_{3-1} e λ_{4-1} - taxas médias de transição entre estados [eventos/ano]

T_{2-3} , T_{3-1} e T_{4-1} - tempos médios de retomada de produção [h]

As demais taxas de transição dependem do número esperado de afundamentos de tensão que vão incidir nas regiões associadas a cada um dos estados operativos da planta industrial e identificados na figura 3.11.

As equações (3.15) a (3.17) expressam os cálculos necessários:

$$N_{1-2} = \lambda_{1-2} = \sum_{j \in E2/E5/E6/E7/E8} \Delta L_j \cdot \lambda_j \quad (3.15)$$

$$N_{1-3} = \lambda_{1-3} = \sum_{j \in E3} \Delta L_j \cdot \lambda_j \quad (3.16)$$

$$N_{1-4} = \lambda_{1-4} = \sum_{j \in E4} \Delta L_j \cdot \lambda_j \quad (3.17)$$

onde:

$N_{1-2}, N_{1-3}, N_{1-4}$ - taxas médias de transição entre estados [eventos/ano];

ΔL_j - incremento do curto-circuito deslizando ao longo das linhas [Km];

λ_j - taxa média de falta das linhas [eventos/km/ano].

Uma vez consolidado o diagrama de espaço de estados, com a determinação dos valores numéricos das taxas de transição, a última etapa consiste em calcular as probabilidades estacionárias, e posteriormente, obter os indicadores propostos.

3.4.2.4 Etapa 4 - Determinação dos Indicadores. Generalização do Modelo

Tomando como base a sistemática apresentada nos itens anteriores, pode-se deduzir que todo processo industrial pode ser representado por um modelo de n estados, sendo que, tanto o número de estados quanto a taxas de transição entre eles dependem das características inerentes a cada processo, das sensibilidades de cada unidade produtiva e, da forma como essas unidades estão associadas. Admitindo-se que as taxas de transição são constantes, o que pressupõe a utilização da distribuição de Poisson ou exponencial, pode-se lançar mão das técnicas de Markov, cujos princípios de aplicação estão descritos em [51] e no Apêndice B.

A equação diferencial que modela o processo de Markov está descrita em (3.18), sendo que a lei de formação da matriz A encontra-se em (3.19) e (3.20).

$$\dot{P}(t) = P(t) \cdot A \quad (3.18)$$

$$A_{ij} = \lambda_{ij} \quad (3.19)$$

$$A_{ii} = -\sum \lambda_{ij} \quad \text{para } i \neq j \quad (3.20)$$

onde:

$P(t)$ - vetor das probabilidades dos estados no fim do tempo (t) .

$\dot{P}(t)$ - vetor das primeiras derivadas das probabilidades dos estados.

A - matriz de coeficientes constantes do sistema de equações matriciais ou matriz de probabilidade de transição estocástica.

A_{ij} e A_{ii} - elementos da matriz A;

λ_{ij} - taxas de transição entre os estados.

Na região estacionária, ou seja, quando $t \rightarrow \infty$, sabe-se que as probabilidades dos estados ficam constantes. Portanto, o primeiro termo da equação (3.18) torna-se nulo, resultando em (3.21).

$$0 = P(\epsilon) \cdot A \quad (3.21)$$

onde:

$P(\epsilon)$ - vetor de probabilidades no estado estacionário;

0 - vetor linha de zeros.

Por inspeção, verifica-se que a equação (3.21) representa um sistema de equações algébricas linearmente dependentes. Daí, a solução matemática deste problema será substituir em (3.21), qualquer uma das equações algébricas pela expressão (3.22).

$$\sum P_i(\epsilon) = 1 \quad (3.22)$$

Finalmente, as probabilidades estacionárias serão obtidas após a solução de (3.23).

$$P_{(\epsilon)} = O_m \cdot A_m^{-1} \quad (3.23)$$

onde:

$P_{(\epsilon)}$ - vetor das probabilidades dos estados na região estacionária;

A_m - matriz A original com o numeral 1 nos elementos da coluna i;

O_m - vetor linha, com o numeral 1 na coluna i e zero nas demais colunas.

Uma vez calculadas as probabilidades de todos os estados, a etapa final será calcular os indicadores propostos, conforme expressões (3.24) a (3.29).

a) Disponibilidade do Processo do Consumidor

$$A_p(i) = \sum_{k=1}^w P_k \cdot F_k \quad (3.24)$$

b) Indisponibilidade do Processo do Consumidor

$$U_p(i) = 1 - A_p(i) \quad (3.25)$$

c) Número Anual de Paradas de Processo do Consumidor

$$N_I(i) = \sum_{k=2}^w N_{1-k} \quad (3.26)$$

$k \in \overline{SF}$ e $1 \in SF$ (estado operante)

d) Custo Anual de Interrupção do Consumidor

$$C_{afund}(i) = \sum_{k=1}^w P_k \cdot C_k \quad (3.27)$$

e) Demanda Não Distribuída

$$DND(i) = \sum_{k=1}^w P_k \cdot D_k \quad (3.28)$$

f) Energia Não Distribuída

$$END(i) = 8760 \cdot \sum_{k=1}^w P_k D_k \quad (3.29)$$

g) Índices Globais do Sistema

De posse de todos os índices de desempenho individuais por barra, pode-se também calcular os índices globais do sistema, através do somatório dos índices dos consumidores. O resultado obtido será normalizado de acordo com o número total de clientes possuidores de cargas sensíveis, sendo que o resultado desta normalização retratará os índices médios do sistema de fornecimento de energia.

A equação (3.30) generaliza a situação exposta considerando o indicador disponibilidade. O mesmo princípio poderá ser aplicado para os demais indicadores.

$$A_p(s) = \frac{\sum_{i=1}^n A_p(i)}{n} \quad (3.30)$$

Para as equações (3.24) a (3.30), tem-se:

$A_p(s)$ - disponibilidade por consumidor);

P_K - probabilidade associada a cada um dos estados operativos da planta i ;

F_K - fator de disponibilidade associado a cada um dos estados operativos da planta i ;

D_K - demanda não distribuída associada a cada um dos estados operativos da planta i ;

C_K - prejuízo associado a cada um dos estados operativos da planta i ;

\overline{SF} - estados correspondentes a paradas de produção da planta i ;

SF - estado correspondente a condição normal de operação da planta i ;

K - estados operativos da planta i ;

n - numero total de consumidores com cargas sensíveis.

3.4.2.5 Sistematização do Processo de Cálculo dos Indicadores

Finalmente, a metodologia proposta pode ser sintetizada nos passos enumerados a seguir:

1. obtenção do modelo da tensão disponível nos barramentos de interesse, considerando curtos-circuitos deslizantes ao longo das linhas de transmissão;
2. obtenção do modelo da sensibilidade da carga/processo nos barramentos dos consumidores;
3. identificação de todos os estados em que o processo de cada consumidor pode residir, classificando-os em estados de sucesso, de falha e intermediários;
4. combinação dos modelos obtidos nas etapas 1 e 2 por consumidor e obter o modelo de risco;
5. identificação de todas as possíveis transições entre estados e especificação dos valores numéricos destas transições;
6. construção do diagrama de espaço de estados e obtenção da matriz A por consumidor;
7. determinação das probabilidades no regime estacionário por consumidor;
8. determinação dos indicadores de desempenho para os barramentos de carga;
9. determinação dos indicadores globais do sistema.

3.4.3 Indicadores - Modelo de 2 Estados

Como uma grande parte dos processos industriais modernos são contínuos, ou seja, cada unidade de produtiva é interdependente da outra, o modelo de n estados apresentado anteriormente pode ser simplificado para o modelo de 2 estados. Portanto, os tópicos que se sucedem são dedicados a este fim.

A exemplo do que foi apresentado nos itens anteriores, a modelagem a dois estados também tem como base a confrontação da sensibilidade da carga com as solicitações impostas pelo sistema supridor, a partir da utilização de técnicas de predição da intensidade, da duração e da frequência de ocorrência dos afundamentos de tensão.

No modelo de dois estados, cada consumidor será representado no PAC por uma curva no plano tensão x tempo, representativa da sensibilidade da carga/processo industrial, conforme modelo apresentado na figura 3.8 e diagrama de espaço de estados, mostrado na figura 3.13.



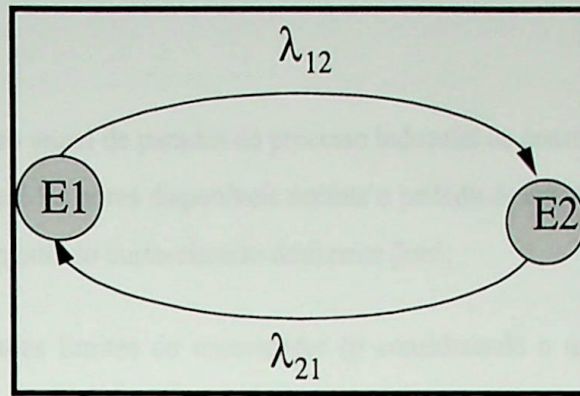


Figura 3.13 - Representação dos Consumidores a 2 Estados

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

- $T(i)$ - tempo médio, em horas, necessário para ao consumidor (i) retomar a plena produção [h];
- $C(i)$ - custo de interrupção do consumidor (i), 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, conforme modelagem apresentada para o modelo de n estados. 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.

Tomando-se como base estas premissas, as taxas de transição λ_{12} e λ_{21} serão obtidas conforme equações (3.31) e (3.32).

$$\lambda_{12}(i) = N_i = \sum_{J \in SF} \Delta L_J \cdot \lambda_J \quad (3.31)$$

$$\lambda_{21}(i) = 8760 / T(i) \quad (3.32)$$

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 [h]
- 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 (3.33) e (3.34), respectivamente.

$$P_i(1) = \lambda_{21} / (\lambda_{12} + \lambda_{21}) \quad (3.33)$$

$$P_i(2) = \lambda_{12} / (\lambda_{12} + \lambda_{21}) \quad (3.34)$$

onde:

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

Os índices $P_i(1)$ e $P_i(2)$, correspondem aos índices $A_p(i)$ e $U_p(i)$, respectivamente, obtidos do modelo de n estados, atribuindo-se valores corretos para o fator de disponibilidade (F_K), ou seja, 1 para o estado E1 e 0 para o estado E2.

Os cálculos dos demais indicadores por barra de carga, serão obtidos mediante a aplicação das equações (3.35) e (3.36).

$$DND(i) = P_i(2).D(i) \quad (3.35)$$

$$END(i) = 8760.DND(i).F_c(i) \quad (3.36)$$

$$C_{afund.}(i) = N(i).C(i) \quad (3.37)$$

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 (3.38) a (3.43).

$$P_S(1) = \frac{\sum_{i=1}^n P_i(1)}{n} \quad (3.38)$$

$$P_S(2) = 1 - P_S(1) \quad (3.39)$$

$$N(s) = \frac{\sum_{i=1}^n N(i)}{n} \quad (3.40)$$

$$DND(s) = \frac{\sum_{i=1}^n DND(i)}{n} \quad (3.41)$$

$$END(s) = \frac{\sum_{i=1}^n END(i)}{n} \quad (3.42)$$

$$C_{afund.}(s) = \frac{\sum_{i=1}^n C_{afund.}(i)}{n} \quad (3.43)$$

onde:

$P_S(1)$ - disponibilidade/consumidor

$P_S(2)$ - indisponibilidade/consumidor

$N_S(s)$ - número anual de parada/consumidor

$DND(s)$ - demanda não distribuída do sistema/consumidor [MW];

$END(s)$ - energia não distribuída do sistema/consumidor [MWh];

$C_{afund.}(s)$ - custo anual de interrupção /consumidor [US\$/ano]

Finalmente, conclui-se que o modelo de 2 estados é equivalente a duas associações correspondentes ao modelo de n estados:

Primeira: todas as unidades operando em série. Nesta condição, a sensibilidade equivalente do processo será representada pela unidade produtiva mais sensível frente a afundamentos de tensão.

Segunda: todas as unidades operando em paralelo e possuindo a mesma sensibilidade.

3.5 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados os principais indicadores utilizados mundialmente para avaliar o desempenho do sistema, do ponto de vista de afundamentos de tensão, sendo todos eles obtidos a partir de campanhas de medição. Constata-se que tais indicadores diferenciam-se nas maneiras de caracterizar o fenômeno (parâmetros), na forma de contagem das ocorrências e, também, na forma de avaliar o desempenho do sistema elétrico (índices), não havendo ainda uma padronização de procedimentos para tratar esta importante questão da atualidade.

Dois aspectos podem ser observados:

Primeiro - todos os indicadores abordados apresentam limitações, pois as grandezas associadas não refletem plenamente os efeitos dos distúrbios sobre equipamentos trifásicos, porque a grande maioria dos afundamentos de tensão são de natureza desequilibrada e assimétrica.

Segundo - todos os indicadores refletem o desempenho visto somente pelo lado do sistema elétrico, sem correlacionar diretamente o impacto dos fenômenos sobre a carga/processo do consumidor.

Foi verificado, também, que em função da aleatoriedade das ocorrências dos afundamentos de tensão, as técnicas de simulação tornam-se uma boa opção para se obter dados estatísticos confiáveis. A opção por executar medições de campo pode implicar em despender grandes recursos financeiros e longos períodos de monitoração. A ferramenta computacional mais utilizada para o cálculo da intensidade dos afundamentos de tensão é um programa de curto-circuito, principalmente, quando se está executando estudos de planejamento, visando analisar alternativas de investimentos para melhoria da QEE.

Também neste capítulo foram propostas duas categorias de indicadores, quais sejam:

Primeira - indicadores individuais para barramentos de cargas sensíveis, cujo objetivo é mostrar quais são as barras do sistema que apresentam melhor desempenho, dada certa sensibilidade para a carga;

Segunda - indicadores globais do sistema de suprimento, cujo objetivo é avaliar o desempenho do sistema elétrico como um todo. Estes indicadores são caracterizados pelo valor médio do somatório dos indicadores individuais por consumidor.

Para a obtenção de ambos os tipos de indicadores foi apresentado inicialmente o modelo genérico de n estados para a carga/processo do consumidor, cuja sensibilidade equivalente da carga, congrega tanto as sensibilidades individuais de cada unidade produtiva, quanto as formas operativas do processo industrial. Posteriormente, o modelo genérico foi particularizado para o modelo de 2 estados, porque um número substancial de consumidores apresentam processos contínuos, caracterizados pelo sistema de produção seriada.

A metodologia apresentada pode ser estendida para avaliar simultaneamente afundamentos e elevações de tensão, desde que sejam estabelecidos os limites de sensibilidade da carga para ambos os distúrbios. De forma semelhante, também podem ser implementados outros critérios para avaliação de desligamento da carga tais como: área ou energia associada à variação de tensão ocorrida durante o afundamento de tensão, fator de desequilíbrio para contemplar os afundamentos desequilibrados e assimétricos, etc. A dificuldade de implementação destas novas alternativas é que a sensibilidade da carga/processo diante de tais variáveis não é conhecida. Portanto, a caracterização da sensibilidade da carga no plano tensão-tempo continua sendo atualmente a melhor opção.

CAPÍTULO IV

IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL - SIMULAÇÃO DE CASOS

4.1 Considerações Iniciais

Com base na metodologia apresentada no capítulo 3 e considerando o modelo de 2 estados para a carga/processo do consumidor, foi implementado um programa computacional para calcular o indicadores propostos.

Neste contexto, este capítulo é dedicado à apresentação da ferramenta computacional desenvolvida, mostrando sua aplicabilidade na execução de estudos de afundamentos de tensão, seja através dos cálculos dos indicadores propostos, seja por intermédio da utilização dos recursos gráficos oferecidos pelo programa.

Para caracterizar a potencialidade do ferramental desenvolvido, bem como a aplicabilidade dos indicadores propostos, são simulados diversos casos-teste. O primeiro, denominado de caso-base, fornece um visão geral de como o programa e os indicadores podem ser utilizados. Nos demais casos, são simulados diversos cenários da rede de suprimento-processos, cujos resultados são comparados em relação ao caso-base. Dentre as diversas simulações realizadas, pode-se destacar:

- alteração da sensibilidade da carga, considerando diversos níveis de imunidade;
- implementação de melhorias no sistema de proteção em duas LTs da concessionária;
- instalação de condicionadores série na indústria do consumidor;
- análises de influência da tensão pré-falta no cálculo dos indicadores;
- outros.

4.2 Implementação Computacional

O programa computacional foi desenvolvido no âmbito do GQEE- Grupo de Estudos de Qualidade da Energia da EFEI, tendo gerado também uma dissertação de mestrado [52]. Vale salientar que este programa destina-se à análise do impacto de afundamentos de tensão nas instalações dos consumidores com cargas sensíveis, devido à ocorrência de faltas em sistemas elétricos. Portanto, não são avaliados os afundamentos de tensão originários de partida de motores de grande porte, assim como a entrada em operação de grandes blocos de carga.

A sistemática utilizada para o cálculo dos afundamentos de tensão tem com base a metodologia proposta em [3, 6], ou seja, aplica-se o conceito associado ao método das posições de falta, ou curto-deslizante, conforme descrito no capítulo 3. Para a modelagem da carga/processo do consumidor utiliza-se o modelo de 2 estados proposto no capítulo anterior.

A base de dados do programa [52, 53] é constituída por:

- informações associadas à análise de faltas ao longo das linhas do sistema elétrico, contemplando as correntes de curto-circuitos nos pontos de defeito e as tensões pós falta nos barramentos dos consumidores monitorados;
- características das cargas/processos nas barras dos consumidores de interesse, destacando-se: sensibilidade da carga no plano tensão x tempo, demanda, fator de carga, tempo médio de retomada de produção e custo médio da interrupção;
- comprimento das linhas de transmissão, bem como os demais dados necessários tais como as taxas de falta e informações relativas ao sistema de proteção. Neste particular é importante dizer que a versão atual do programa considera somente proteções de tempo definido, incluindo evidentemente, os relés de distância e teleproteção.

A tela principal do programa está apresentada na figura 4.1, onde se observa algumas possibilidades de entrada de dados como: sensibilidade da carga; seleção do tipo de tensão a ser considerada para a análise (fase-fase ou fase-neutro), tensão mínima ou média, etc. Nas figuras 4.2 e 4.3 são mostradas as principais formas de entrada de dados para as linhas de transmissão,

destacando-se: comprimento da linha, taxas de falta e sua composição, dados do sistema de proteção, etc.

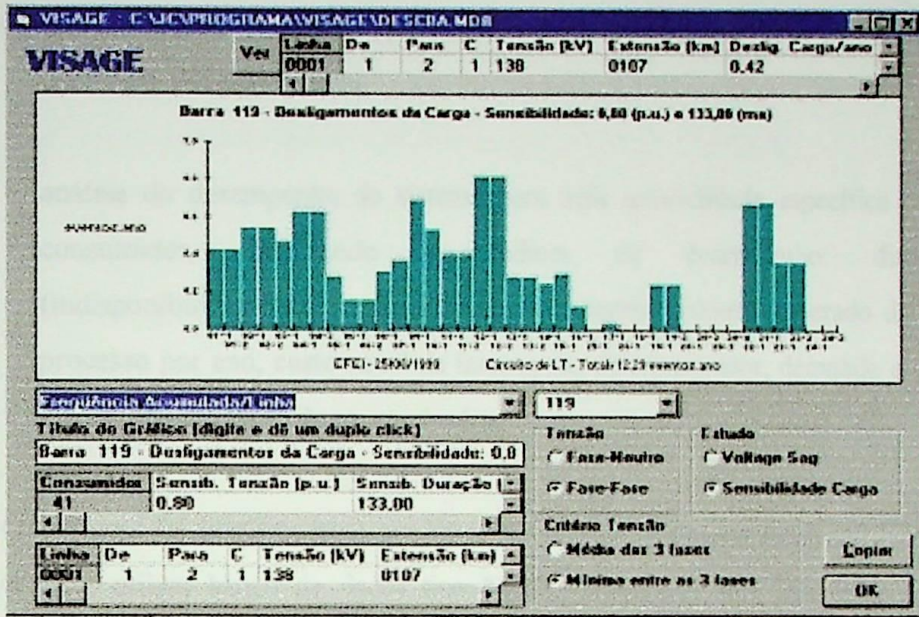


Figura 4.1 - Tela Principal do Programa

De	Para	C	Linha	Tensão (kV)	Extensão (km)	Falhas.ano/km	%Falas 3F	%Falas FT	
1	2	1	0001	138	0107	0.029800	4.00	73.00	
1	2	2	0001	138	0107	0.029800	4.00	73.00	
2	40	1	0002	138	0067	0.029800	4.00	73.00	
2	40	2	0002	138	0067	0.029800	4.00	73.00	
36	48	1	0003	138	0038	0.029800	4.00	73.00	

Figura 4.2 - Entrada de Dados de LTs

De	%Falas FFT	%Prot. Dist. Zona 1	%Prot. Dist. Zona 2	Zona 1 (ms)	Zona 2 (ms)	
1	17.00	90	10	150	800	
1	17.00	90	10	150	800	
2	17.00	90	10	150	800	
2	17.00	90	10	150	800	
36	17.00	90	10	150	800	

Figura 4.3 - Entrada de Dados de Proteção de LTs

Os principais produtos gerados pelo *software* são [52, 53]:

- visualização gráfica e numérica do comportamento das tensões 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 num determinado consumidor, incluindo o fornecimento da distribuição de frequência e função distribuição de probabilidade das tensões 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.

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

- módulo de importação de dados de um estudo de curto-circuito;
- módulo de tratamento dos dados e cálculo dos índices de desempenho das barras do sistema.

4.2.1 Módulo de Importação de Dados

Durante a implementação deste módulo, buscou-se a compatibilidade do sistema desenvolvido com o formato de saída com um dos principais programas utilizados no setor elétrico brasileiro [52, 53], qual seja, o programa ANAFAS que foi desenvolvido pelo CEPEL [54]. Informações gerais sobre este programa podem ser obtidas no Apêndice C.

Este módulo gera um banco de dados.mdb contendo as seguintes informações:

- intensidade e ângulo das tensões pós-falta (afundamentos de tensão) fase-fase e fase-neutro nos barramentos dos consumidores de interesse;

- intensidade e ângulo das correntes de curto-circuitos nos pontos de defeito considerando os diversos tipos de falta simulados.

Tanto as tensões pós-falta como as correntes de defeito são calculadas pelo ANAFAS simulando-se as seguintes condições de defeito:

- curto-circuitos trifásicos, fase-fase, fase-fase-terra e fase-terra;
- tensões pré-falta iguais e diferentes de 1 p.u.;
- impedâncias de falta iguais e diferentes de zero;
- conexão delta-estrela dos transformadores.

Para a geração de dados a partir do programa ANAFAS, são aplicados curto-circuitos nas barras terminais de cada linha, e curto-circuitos deslizantes em todas as linhas de transmissão do sistema, considerando incrementos ajustáveis de 1 a 50 % do comprimento das linhas. Os resultados dos estudos de falta são gerados em arquivos, formato tabela, para posterior leitura do *software* desenvolvido.

4.2.2 Módulo de Tratamento dos Dados

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

Deve-se salientar que tantos os índices de desempenho globais do sistema, quanto os índices por consumidor, podem ser obtidos considerando-se os seguintes critérios para a sensibilidade da carga, conforme pode ser visualizado na figura 4.1.

- tensão fase-fase ou fase-neutro;
- tensão mínima ou média.

4.3 Simulação de Caso-Teste

Visando mostrar a potencialidade e aplicabilidade do programa, será processado um caso-teste conforme dados apresentados nos itens subsequentes.

4.3.1 Dados Gerais do Sistema

A figura 4.4 mostra o diagrama unifilar de um sistema de transmissão, baseado na configuração de um sistema real de uma empresa brasileira.

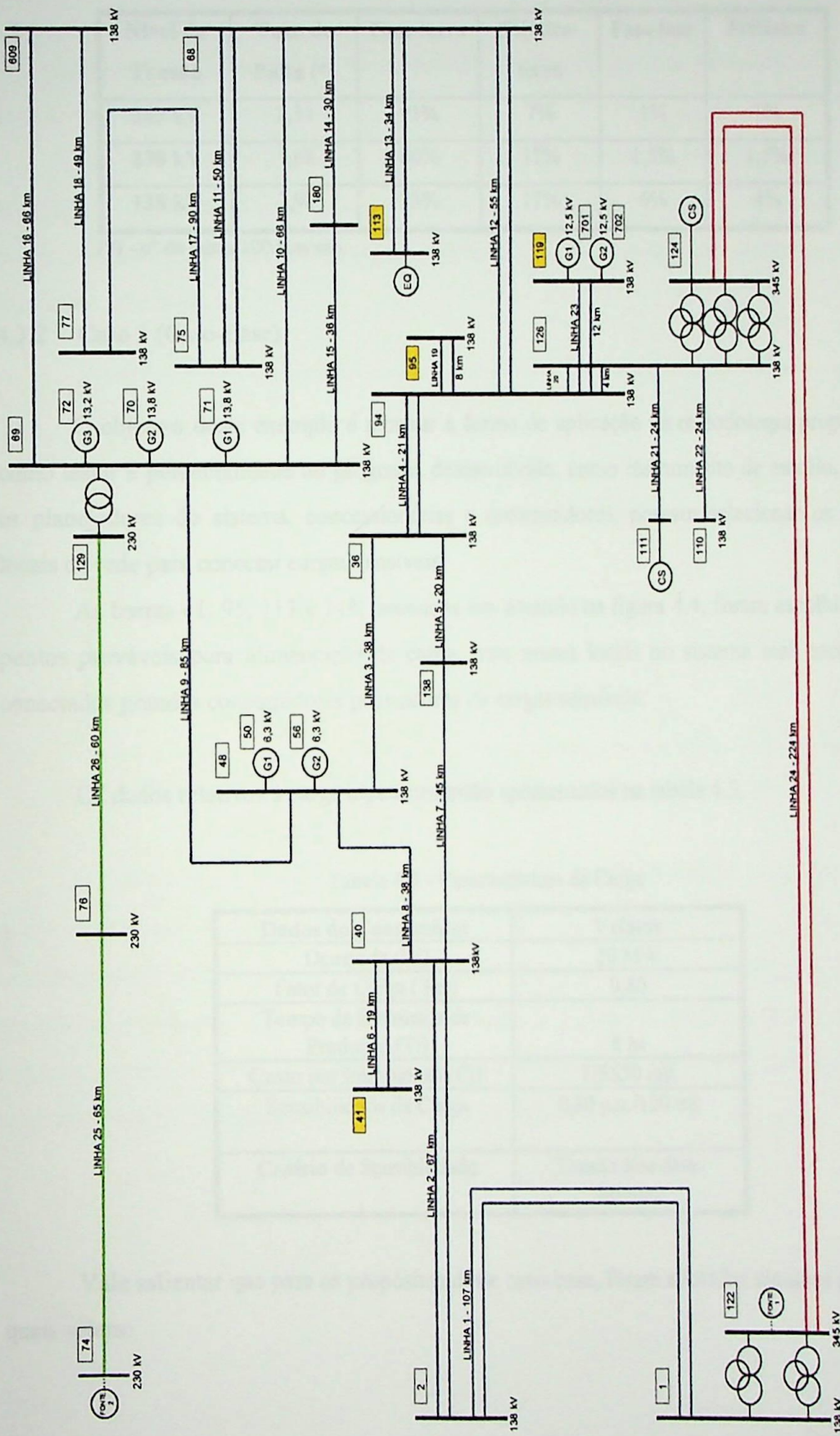
O sistema possui 39 linhas de transmissão, totalizando 1946 km, sendo 2 de 345 kV, 2 de 230 kV e 35 de 138 kV. Para cada classe de tensão, as linhas foram representadas em cores diferentes (vermelha, verde e azul) no diagrama unifilar. No total o sistema possui 32 barras, sendo 7 delas de geração (barras 50, 56, 70, 71, 72, 701 e 702).

O banco de dados de curto-circuito e os dados das linhas de transmissão correspondentes são apresentados no Apêndice D, onde o leitor pode obter maiores informações.

Os tempos de atuação do sistema de proteção (relés + disjuntores) estão apresentados na tabela 4.1, e correspondem aos tempos praticados no setor elétrico brasileiro, tendo sido obtidos de [23].

Tabela 4.1 - Tempos de Atuação da Proteção

Identificação das LTs	Tipo de Proteção	Tempo de Atuação (ms)
L24	Teleproteção	83
L25 e L26	Teleproteção	110
L20	Fio Piloto	110
L6, L13, L19, L21 e L22	Sobrecorrente	300
Demais linhas	Distância (alcance de 90%)	1ª Zona: 150ms 2ª Zona: 550 ms



As taxas de falta para as LTs, bem como a sua composição, estão apresentadas na tabela 4.2, sendo que estes valores foram obtidos de [3, 6].

Tabela 4.2 - Taxas de Falta das Linhas

Nível de Tensão	Taxa de Falta (*)	Fase-terra	Bifásica-terra	Fase-fase	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%

(*) - nº de faltas/100 Km/ano.

4.3.2 Caso 1 (Caso-Base)

O objetivo deste exemplo é mostrar a forma de aplicação da metodologia proposta bem como testar a potencialidade do programa desenvolvido, como instrumento de auxílio, para que os planejadores do sistema, concessionárias e consumidores, possam selecionar os melhores locais da rede para conectar cargas sensíveis.

As barras 41, 95, 113 e 119, marcadas em amarelo na figura 4.4, foram escolhidas como pontos prováveis para alimentação da carga, pois nestes locais no sistema real encontram-se conectados grandes consumidores possuidores de cargas sensíveis.

Os dados relativos à carga hipotética estão apresentados na tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Características da Carga

Dados do Consumidor	Valores
Demanda (Di)	20 MW
Fator de Carga (Fci)	0,80
Tempo de Retomada de Produção (Ti)	8 hs
Custo por Interrupção (Ci)	US\$50 mil
Sensibilidade da Carga	0,80 p.u./120 ms
Critério de Sensibilidade	Tensão fase-fase-Mínima

Vale salientar que para os propósitos deste caso-base, foram adotadas algumas premissas, quais sejam:

- tensão pré-falta: 1 p.u.;
- impedância de falta: nula;
- sensibilidade da carga: tensão fase-fase mínima.

Após a execução dos processamentos necessários, obtém-se as principais saídas gráficas indicadas nas figuras 4.5 a 4.11.

A figura 4.5 mostra a evolução da tensão fase-fase na barra 41, quando da simulação de curto-circuito deslizante fase-terra ao longo da linha L1, sentido da barra 1 para a barra 2. Esta figura apresenta as tensões entre fases (AB, BC e CA), a tensão média e finalmente a tensão mínima das três fases.

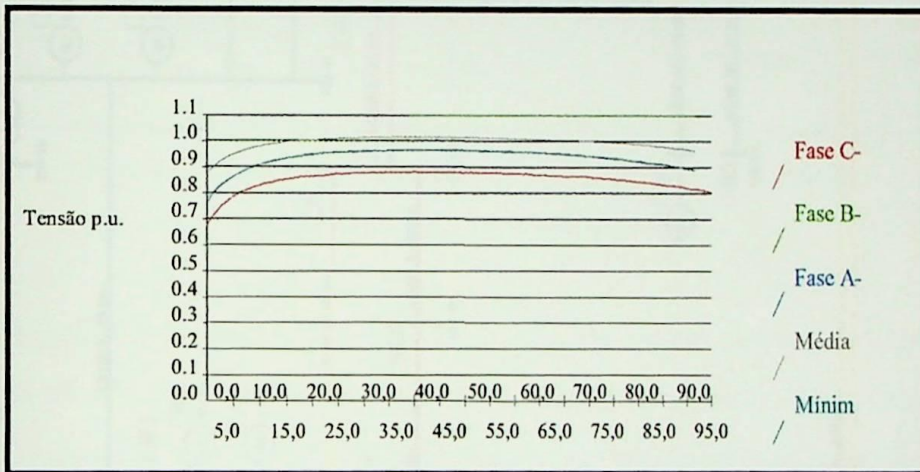


Figura 4.5 - Tensão na Barra 41. Curto Fase-Terra Deslizante na Linha L1

Os valores apresentados na figura em questão permitem identificar os trechos das linhas onde a ocorrência de faltas ocasiona valores severos de afundamentos de tensão. Como por exemplo, a partir destes valores pode-se traçar a área de vulnerabilidade do sistema, vista por um consumidor específico. Para ilustrar esta situação, a figura 4.6 mostra, através de cores no diagrama unifilar, as áreas de vulnerabilidade para o consumidor da barra 41, devido à ocorrência de faltas trifásicas aplicadas em todas as linhas do sistema [52].

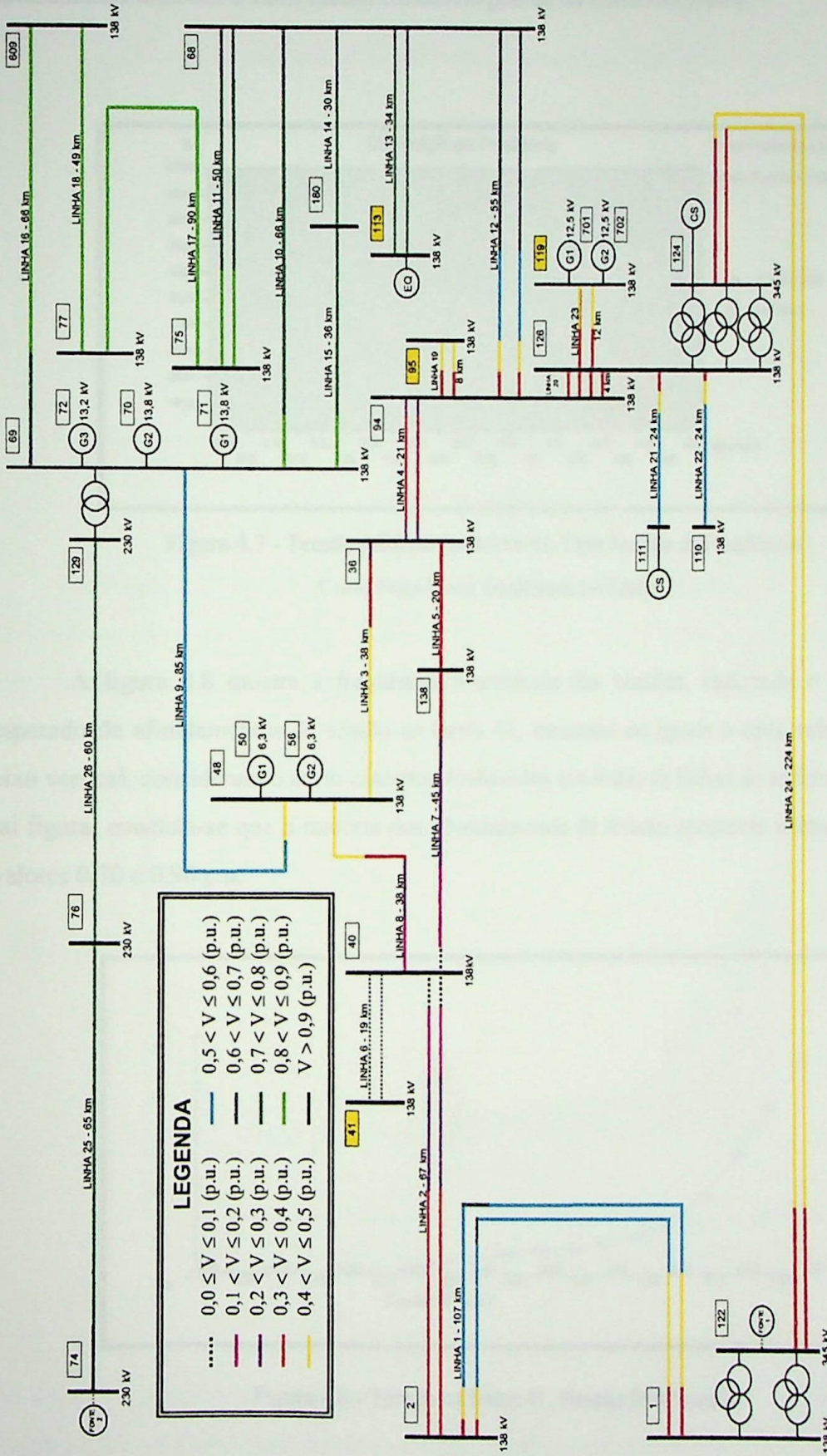


Figura 4.6 – Área de Vulnerabilidade Consumidor 41. Falhas Trifásicas nas LTs.

A figura 4.7 mostra a distribuição de freqüência das tensões fase-fase mínima resultantes da aplicação de curto-circuito fase-terra deslizante ao longo da linha 1. Nesta figura são apresentados também o valor médio e o desvio padrão da tensão resultante.

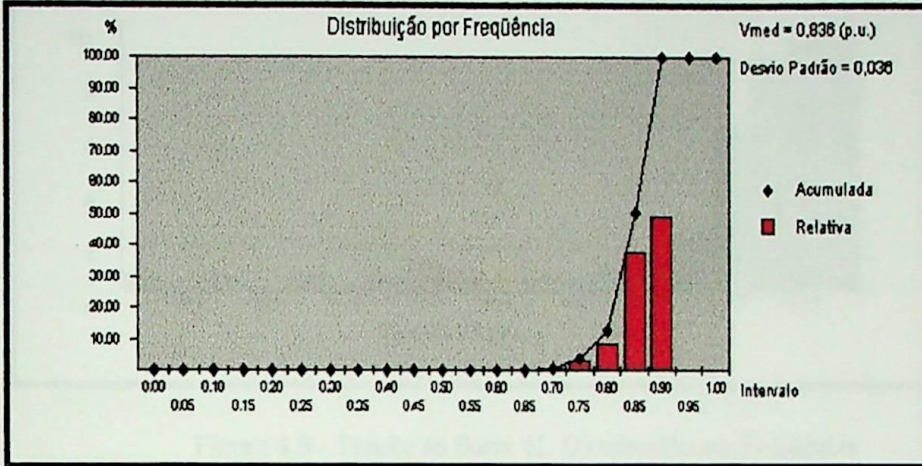


Figura 4.7 - Tensão Mínima da Barra 41. Distribuição de Freqüência -
Curto Fase-Terra Deslizante na Linha 1

A figura 4.8 mostra a freqüência acumulada das tensões, indicando o número anual esperado de afundamentos de tensão na barra 41, menores ou iguais a cada valor indicado no eixo vertical, considerando curtos-circuitos deslizantes em todas as linhas do sistema. Observando tal figura, constata-se que a maioria dos afundamentos de tensão apresenta intensidade entre os valores 0,70 e 0,90 p.u.

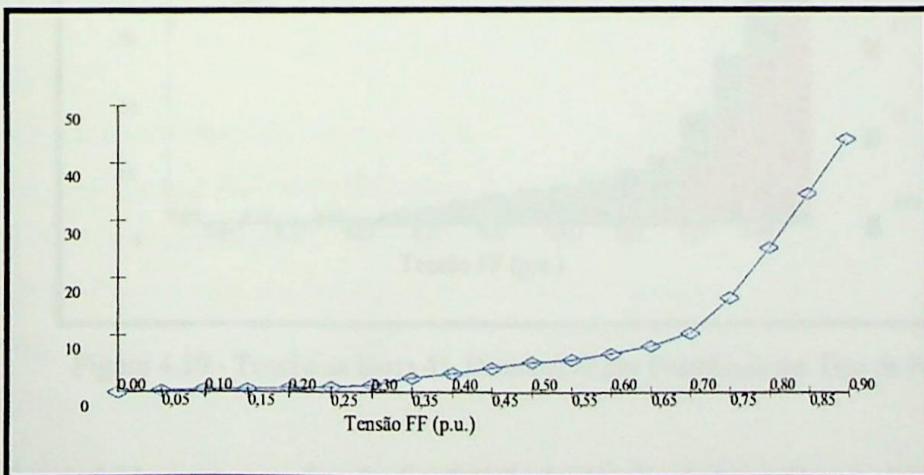


Figura 4.8 - Tensão na Barra 41. Função Distribuição

Já a figura 4.9 mostra a distribuição por frequência correspondente a figura 4.8, mostrando o número de ocorrências de afundamentos de tensão, considerando faixas discretas de intensidade. Por exemplo, entre 0,80 e 0,85 p.u. o número de ocorrências é da ordem de 8 vezes.

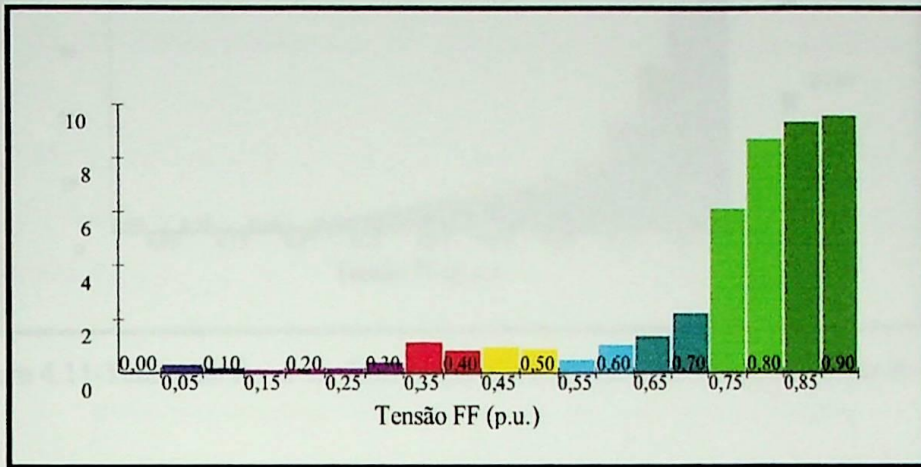


Figura 4.9 - Tensão na Barra 41. Distribuição por Frequência

A figura 4.10 apresenta a função distribuição das tensões da barra 41, por tipo de falta, podendo-se observar, como esperado, que os defeitos envolvendo a terra são os que mais contribuem para as ocorrências de afundamentos de tensão.

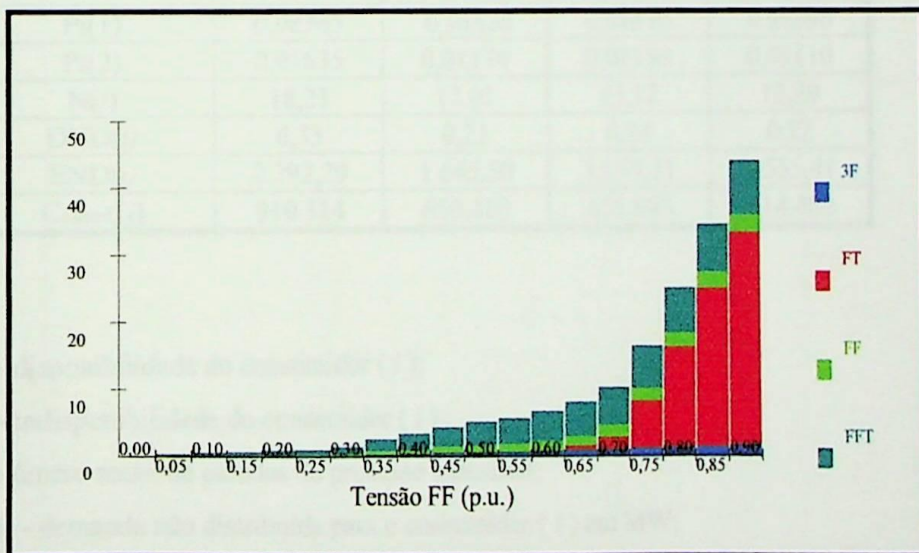


Figura 4.10 - Tensão na Barra 41. Distribuição por Frequência por Tipo de Falta.

A figura 4.11 apresenta a função distribuição das tensões da barra 41, por classe de tensão da linhas de transmissão. Também, como esperado, as linhas de 138 kV, devido a sua maior extensão, são as linhas mais suscetíveis a ocorrências de curto-circuito.

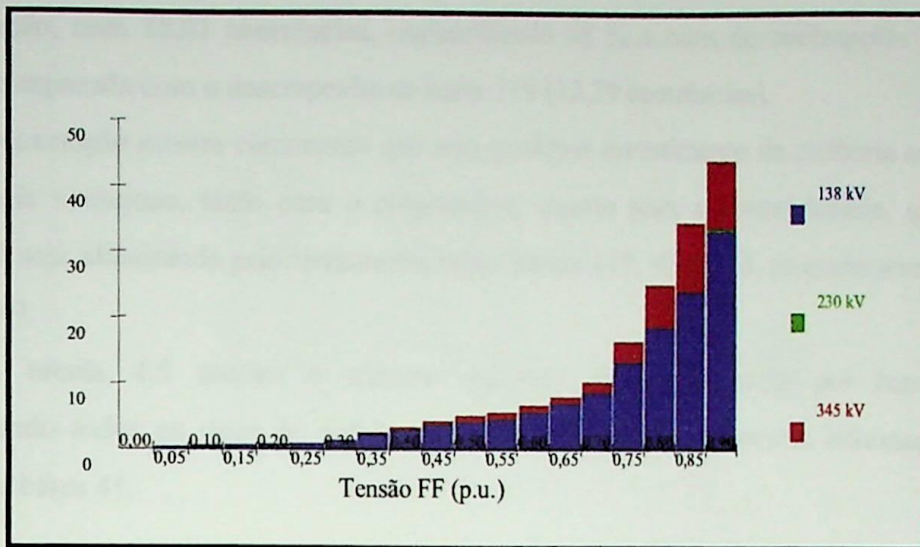


Figura 4.11-Tensão na Barra 41. Distribuição por Frequência por Classe de Tensão de LTs.

Além dos recursos gráficos apresentados, o programa desenvolvido calcula os indicadores do sistema, o que aliás é o objetivo principal deste trabalho.

Desta forma, os índices de desempenho calculados para os diversos barramentos são apresentados na tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Índices de Desempenho. Critério da Tensão Mínima

Discriminação dos Índices	Índices por Barra de Carga			
	Barra 41	Barra 95	Barra 113	Barra 119
$P_i(1)$	0,98365	0,98826	0,98816	0,98890
$P_i(2)$	0,01635	0,01174	0,01184	0,01110
$N(i)$	18,21	13,01	13,12	12,29
$DND(i)$	0,33	0,23	0,24	0,22
$END(i)$	2.292,29	1.645,50	1.659,21	1.555,41
$Cafund.(i)$	910.314	650.410	655.893	614.400

onde:

$P_i(1)$ - disponibilidade do consumidor (i);

$P_i(2)$ - indisponibilidade do consumidor (i);

$N(i)$ - número anual de paradas do processo industrial;

$DND(i)$ - demanda não distribuída para o consumidor (i) em MW;

$END(i)$ - energia não distribuída para o consumidor (i) em MWh;

$Cafund.(i)$ - custo anual de interrupção do consumidor em US\$/ano.

Através de inspeção da tabela 4.4, chega-se à conclusão que a barra 119 é a que apresenta os melhores índices de desempenho, seguindo-se as barras 95, 113 e 41.

A barra 41 é a que apresenta os piores índices com o número anual esperado de paradas

de produção, com 18,21 ocorrências, representando 48 % a mais de interrupções de processo quando comparada com o desempenho da barra 119 (12,29 ocorrências).

O exemplo mostra claramente que sem qualquer investimento de melhoria no sistema, é muito mais vantajoso, tanto para o consumidor, quanto para a concessionária, que a planta industrial seja alimentada prioritariamente pelas barras 119, 95 e 113, respectivamente, em vez da barra 41.

A tabela 4.5 mostra o número esperado de desligamento por barra/ano/linha, considerando todos os tipos de defeito. A figura 4.12 fornece a mesma informação, porém, limitada a barra 41.

Tabela 4.5 - Número de Desligamento. Todos os Tipos de Defeitos

Identificação das LTs	Número Esperado de Desligamentos/Barra/Ano/Linha			
	B-41	B-95	B-113	B-119
L1	2,33	1,19	0,12	0,85
L2	2,74	1,08	0	1,08
L3	1,13	0,52	0,31	0,46
L4	1,26	1,26	0,68	1,26
L5	0,6	0,32	0,16	0,28
L6	1,14	0,3	0	0,3
L7	1,34	0,36	0,12	0,36
L8	1,13	0,31	0,08	0,31
L9	0,83	0,68	0,8	0,68
L10	0,53	0,53	1,03	0,53
L11	0,5	0,8	1,34	0,8
L12	1,35	1,74	2,16	1,62
L13	0,54	0,54	2,02	0,54
L14	0,24	0,24	0,61	0,24
L15	0,29	0,29	0,44	0,29
L16	0,17	0,15	0,63	0,12
L17	0	0,07	0,68	0,02
L18	0	0	0,04	0
L19	0,48	0,48	0,48	0,48
L20	0	0	0	0
L21	0,45	0,72	0,35	0,68
L22	0,44	0,71	0,35	0,67
L23	0,72	0,72	0,72	0,72
L24	0	0	0	0
L25	0	0	0	0
L26	0	0	0	0
TOTAIS	18,21	13,01	13,12	12,29

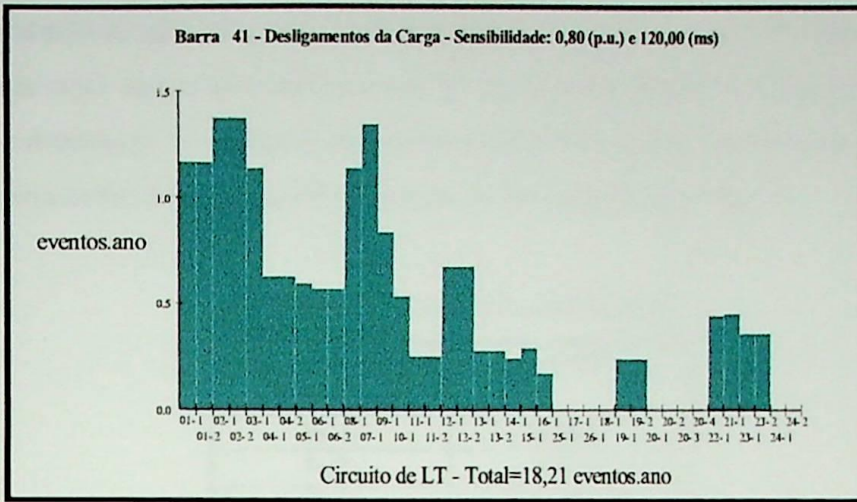


Figura 4.12 - Barra 41. Número de Desligamento/Ano/Linha. Todos Tipos de Defeito

A partir da tabela 4.5, pode-se extrair informações importantes como a identificação das linhas que contribuem com a maior parcela para os desligamentos das cargas sensíveis conectadas nos diversos barramentos. Por exemplo, as linhas L2, L4 e L12 são as que mais contribuem para desligar o consumidor conectado na barra 119. É importante ressaltar que estas informações são vitais para que os planejadores identifiquem aqueles pontos no sistema que merecem investimento, seja na melhoria do desempenho do sistema de proteção, diminuindo a duração dos afundamentos de tensão, seja no investimento de medidas preventivas que diminuem as ocorrências de curto-circuitos.

Também, a tabela 4.5 permite identificar as linhas que estão fora da área de vulnerabilidade dos consumidores, e, portanto, não carecem de nenhuma preocupação adicional do ponto de vista de afundamentos de tensão, como por exemplo, as linhas L20, L24, L25 e L26.

A figura 4.13 mostra o número de desligamentos esperados para a barra 119 por tipo de curto-circuito. Observa-se que os defeitos FFT contribuem com 5,31 desligamentos/ano.

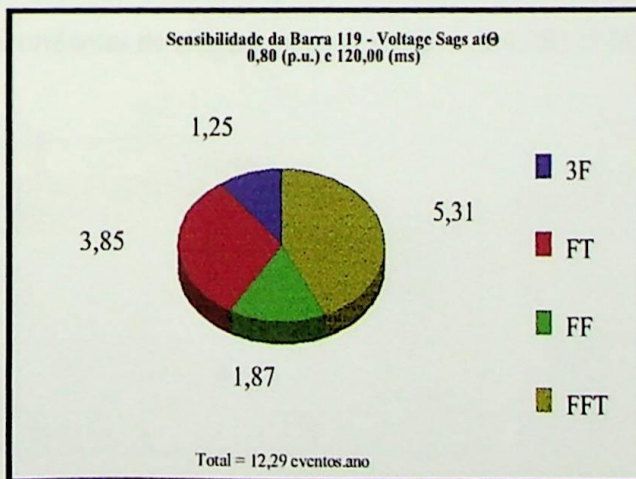


Figura 4.13 - Tensão na Barra 119. Desligamentos por Tipo de Defeito

Admitindo-se que em cada uma das barras (41, 95, 113 e 119) sejam instalados consumidores cujas cargas apresentam características semelhantes àquelas apresentadas na tabela 4.3, pode-se determinar os índices de desempenho globais do sistema, a partir dos índices obtidos para cada barramento de carga, conforme resultados apresentados na tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Índices Globais do Sistema

Discriminação dos Índices	Índices Globais
Ps(1)	0,9872
Ps(2)	0,0128
N(s)	14,15
DND(s)	0,255
END(s)	1.788,10
Cafund.(s)	707.754

onde:

Ps (1) - disponibilidade/consumidor;

Ps (2) - indisponibilidade/consumidor;

N(s) - número anual de paradas/consumidor;

DND(s) - demanda não distribuída/consumidor em MW;

END(s) - energia não distribuída/consumidor em MWh;

C_{afund.}(s) - custo anual de interrupção/consumidor em US\$/ano.

Os índices globais apresentados na tabela 4.6 refletem os índices médios por consumidor possuidores de carga sensível conectados ao sistema da concessionária. Por exemplo, o número de desligamento médio, calculado por consumidor, é de 14,15 ocorrências/ano, representando uma perda anual de US\$707,754.00/consumidor.

De forma semelhante, observa-se que a energia média não distribuída por consumidor, END(s), devido às ocorrências de afundamentos de tensão é de 1.788,10 MWh/ano.

4.4 Análise de Cenários - Rede de Suprimento - Carga

Os casos-teste, apresentados na seqüência, têm como objetivo aplicar a metodologia apresentada na avaliação de cenários rede de suprimento-carga, envolvendo ações de melhoria tanto do lado da fonte de suprimento como da carga.

4.4.1 Caso 2 - Alteração da Sensibilidade da Carga

Este caso tem como objetivo mostrar a aplicação da metodologia proposta para subsidiar a análise de custo benefício, visando a instalação de cargas/processos com diferentes sensibilidades. Supõe-se portanto, que o consumidor industrial pode adquirir processos mais robustos. As sensibilidades de carga simuladas foram de 0,85 / 0,75 e 0,70 p.u. e mantido o tempo máximo de exposição de 120 ms. Como critério para a sensibilidade da carga manteve-se o valor mínimo das tensões entre fases.

Os resultados obtidos são apresentados nas tabelas 4.7 a 4.9 e figura 4.14

Tabela 4.7 - Índices de Desempenho
Critério da Tensão Mínima 0,85 p.u./120ms

Índices	Índices por Barras de Carga/Globais				
	Barra 41	Barra 95	Barra 113	Barra 119	Globais
$P_i(1)$	0,97908	0,98422	0,98219	0,98569	0,98279
$P_i(2)$	0,02092	0,01578	0,01781	0,01431	0,01721
$N(i)$	23,4	17,56	19,86	15,9	19,18
$DND(i)$	0,42	0,32	0,36	0,29	0,34
$END(i)$	2.932,53	2.212,20	2.496,80	2.006,07	2.412,78
$C_{afund.}(i)$	1.170.000	878.000	993.000	795.000	959.000

Tabela 4.8 - Índices de Desempenho
Critério da Tensão Mínima 0,75 p.u./120ms

Índices	Índices por Barras de Carga/Globais				
	Barra 41	Barra 95	Barra 113	Barra 119	Globais
$P_i(1)$	0,98845	0,99145	0,99205	0,99272	0,99116
$P_i(2)$	0,01155	0,00855	0,00795	0,00728	0,00884
$N(i)$	12,8	9,44	8,78	8,03	9,76
$DND(i)$	0,23	0,17	0,16	0,15	0,18
$END(i)$	1.619,47	1.197,99	1.114,90	1.020,36	1.238,56
$C_{afund.}(i)$	640.000	472.000	439.000	401.500	488.125

Tabela 4.9 - Índices de Desempenho
Critério da Tensão Mínima 0,70 p.u./120ms

Índices	Índices por Barras de Carga/Globais				
	Barra 41	Barra 95	Barra 113	Barra 119	Globais
$P_i(1)$	0,99256	0,99447	0,99526	0,99528	0,99439
$P_i(2)$	0,00744	0,00553	0,00474	0,00472	0,00561
$N(i)$	8,21	6,09	5,22	5,19	6,18
$DND(i)$	0,15	0,11	0,09	0,09	0,11
$END(i)$	1.043,06	775,21	664,99	661,19	786,28
$C_{dep.}(i)$	410.500	304.500	261.000	259.500	308.875

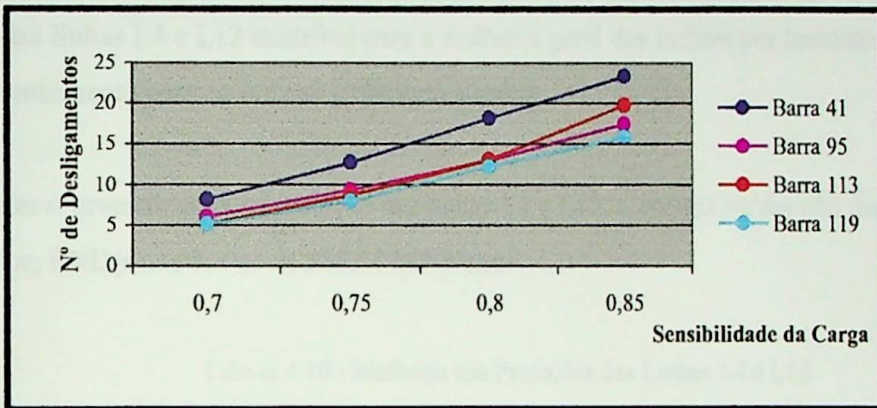


Figura 4.14 - N° de desligamentos por Sensibilidade da Carga

Tomando-se como base a variável $N(i)$ na figura 4.14, observa-se que para qualquer sensibilidade da carga analisada, a barra 119 é a que apresenta o melhor desempenho. Ao contrário, a barra 41 é a que apresenta os piores indicadores, que além de penalizar o consumidor ali conectado, contribui para piorar os índices globais do sistema.

Finalmente, este tipo de análise possibilita ao consumidor executar análises de custo-benefício visando a instalação de equipamentos/processos mais robustos. Por exemplo, ao reduzir a sensibilidade do consumidor da barra 119 de 0,80 para 0,75 p.u., o número de desligamentos reduz de 12,29 para 8,03 ocorrências/ano, representando uma economia US\$213,000.00/ano.

4.4.2 Caso 3 - Melhoria no Sistema de Proteção das Linhas L4 e L12

Este caso tem como objetivo mostrar a aplicação da metodologia proposta para subsidiar a análise de custo benefício, visando a melhoria do sistema de proteção das linhas L4 e L12.

Com este propósito, vislumbrou-se a possibilidade de instalação de teleproteção nas linhas citadas, com tempo total de atuação, relé mais disjuntor, de 110 ms

Os resultados apresentados na tabela 4.10 mostram que o investimento no sistema de proteção das linhas L4 e L12 contribui para a melhoria geral dos índices por barramento de carga e conseqüentemente para os índices globais do sistema.

Com o investimento na proteção das linhas L4 e L12, a energia média não distribuída por consumidor, END(s), reduz-se de 353,34 MWh/ano.

Tabela 4.10 - Melhoria nas Proteções das Linhas L4 e L12

Critério da Tensão Mínima 0,80 p.u./120 ms

Índices	Índices por Barras de Carga/Globais				
	Barra 41	Barra 95	Barra 113	Barra 119	Globais
$P_i(1)$	0,98595	0,99094	0,99070	0,99148	0,98976
$P_i(2)$	0,01405	0,00906	0,00930	0,00852	0,01024
$N(i)$	15,6	10,01	10,28	9,41	11,33
$DND(i)$	0,28	0,18	0,19	0,17	0,20
$END(i)$	1.968,75	1.269,67	1.303,60	1.194,22	1.434,76
$C_{afund.}(i)$	780.000	500.500	514.000	470.500	566.250

Vale ressaltar que a barra 119 continua apresentando os melhores índices, com redução de 2,88 paradas/ano.

4.4.3 Caso 4 - Instalação de Condicionadores de Energia

Este caso tem como objetivo fornecer parâmetros para subsidiar a análise de custo benefício, visando a instalação de condicionadores de energia [42,43,44] no sistema do consumidor.

Admitindo a possibilidade de instalação de um condicionador de energia tipo série, capaz de injetar entre o sistema e a carga sensível 30 % de tensão durante 600 ms, compatível com o tempo de atuação da segunda zona dos relés de distância (550ms).

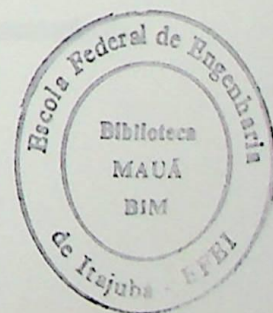
A sensibilidade da carga continua sendo 0,80 p.u./120ms, utilizando-se como critério o valor mínimo das tensões entre fases. Após a instalação do condicionador de energia, considerou-se que a sensibilidade da carga mais condicionador torna-se 0,50 p.u./ 120ms. Os resultados encontrados são apresentados na tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Índices de Desempenho

Critério da Tensão Mínima com Condicionador de Energia

Índices	Índices por Barras de Carga			
	Barra 41	Barra 95	Barra 113	Barra 119
$P_i(1)$	0,99631	0,99864	0,99836	0,99881
$P_i(2)$	0,00369	0,00136	0,00164	0,00119
$N(i)$	4,06	1,49	1,8	1,31
$DND(i)$	0,07	0,03	0,03	0,02
$END(i)$	517,76	190,46	230,02	167,48
$C_{afund.}(i)$	203.000	74.500	90.000	65.500

Comparando-se os resultados das tabelas 4.4 e 4.11, verifica-se que o número de paradas de processo em todas as barras reduz-se drasticamente. O número de desligamento do consumidor da barra 119, por exemplo, reduz-se de 12,29 para 1,31 ocorrências/ano, representando uma economia anual da ordem de US\$ 549.000,00/ano. A barra 119 continua sendo a que apresenta os melhores índices, seguida das barras 95 e 119. A barra 41 permanece apresentando os piores resultados.



4.5 Análises de Sensibilidade

Os casos-teste, apresentados na seqüência, têm como objetivo executar análises de sensibilidade dos indicadores em relação a forma de representação da sensibilidade de carga assim como em relação à algumas variáveis associadas ao sistema elétrico, destacado-se: taxas de falta em LTs, tensão pré-falta, etc.

4.5.1 Caso 5 - Sensibilidade da Carga Representada pela Tensão Média

Este caso exemplo tem como objetivo analisar a influência da forma de representação da sensibilidade da carga no cálculo dos índices. No Caso-Base, foi adotado como critério o valor mínimo das tensões entre fases; porém, nesta simulação, será adotado o valor médio das tensões fase-fase. Os resultados obtidos encontram-se na tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Índices de Desempenho. Critério da Tensão Fase-Fase Média

Índices	Índices por Barras de Carga/Globais				
	Barra 41	Barra 95	Barra 113	Barra 119	Globais
$P_i(1)$	0,99348	0,99491	0,99569	0,99540	0,99487
$P_i(2)$	0,00652	0,00509	0,00431	0,00460	0,00513
$N(i)$	7,19	5,60	4,74	5,06	5,65
$DND(i)$	0,13	0,10	0,09	0,10	0,10
$END(i)$	914,32	713,15	604,10	644,70	719,17
$C_{afund.}(i)$	359.500	280.000	237.700	253.000	282.375

Comparando-se os resultados apresentados nas tabelas 4.4 e 4.12, verifica-se que, como previsto, os índices de todos os barramentos melhoram substancialmente. O número de desligamentos dos consumidores nas barras 41, 95, 113 e 119 reduziram, respectivamente, a 39, 43, 36 e 41% dos valores obtidos no Caso-Base.

A barra 113 é a que apresenta os melhores indicadores, seguida das barras 119 e 95. A barra 41 continua apresentando os piores indicadores.

Finalmente, este exemplo deixa em evidência a importância da forma de representação da sensibilidade da carga, se através da tensão média ou tensão mínima.

4.5.2 Caso 6 - Taxas de Falta das Linhas de Transmissão (0,5 e 1,5 p.u.)

Este caso exemplo tem como objetivo analisar a influência da taxa de falta das linhas de transmissão no cálculo dos índices do sistema. Para efeito de simulação, foram considerados os valores de 0,5 e 1,5 p.u., tomando-se como 1 p.u. aqueles valores apresentados na tabela 4.2. O percentual de composição de faltas em trifásicas, bifásicas, etc. foi mantido conforme o Caso-Base.

Os resultados obtidos são apresentados nas tabelas 4.13 e 4.14 e quando comparados com os resultados da tabela 4.4, pode-se concluir-se que o número de desligamentos por consumidor varia linearmente com os valores de taxas de falta das linhas de transmissão. Este resultado era esperado conforme mostram as equações (3.9) e (3.31).

Tabela 4.13 - Índices de Desempenho. Critério da Tensão Mínima
Taxas de Falta 0,5 p.u.

Índices	Índices por Barras de Carga/Globais				
	Barra 41	Barra 95	Barra 113	Barra 119	Globais
$P_i(1)$	0,99178	0,99412	0,99411	0,99444	0,99361
$P_i(2)$	0,00822	0,00588	0,00589	0,00556	0,00639
$N(i)$	9,07	6,48	6,49	6,12	7,04
$DND(i)$	0,16	0,12	0,12	0,11	0,13
$END(i)$	1.151,42	824,56	825,83	779,01	895,36
$C_{afund}(i)$	453.500	324.000	324.500	306.000	352.000

Tabela 4.14 - Índices de Desempenho. Critério da Tensão Mínima
Taxas de Falta 1,5 p.u.

Índices	Índices por Barras de Carga/Globais				
	Barra41	Barra 95	Barra 113	Barra 119	Globais
$P_i(1)$	0,97575	0,98257	0,98253	0,98351	0,98108
$P_i(2)$	0,02425	0,01743	0,01747	0,01649	0,01892
$N(i)$	27,21	19,43	19,47	18,36	21,12
$DND(i)$	0,48	0,35	0,35	0,33	0,38
$END(i)$	3.398,43	2.443,68	2.448,62	2.311,33	2.651,90
$C_{afund}(i)$	1.360.500	971.500	973.500	918.000	1.055.875

4.5.3 Caso 7 - Tensão-Pré- Falta (Regimes de Carga Mínima, Média e Máxima)

Este caso exemplo tem como objetivo analisar a influência do regime de carga e consequentemente da tensão pré-falta no cálculo dos índices de desempenho do sistema. No caso-base, foi adotado 1 p.u. para a tensão pré-falta e nesta simulação, foram obtidos os valores de tensão pré-falta a partir do processamento de estudos de fluxo de carga. Os perfis de carga considerados foram os de carga mínima, média, máxima. A sensibilidade da carga foi representada pelo valor mínimo das tensões entre fases, 0,80 p.u./ 120 ms. Os resultados obtidos se encontram nas tabelas 4.15 a 4.17.

Tabela 4.15 - Índices de Desempenho. Critério da Tensão Mínima
Tensão Pré-Falta.Carga Mínima

Índices	Índices por Barras de Carga			
	Barra 41	Barra 95	Barra 113	Barra 119
$P_i(1)$	0.98484	0.99040	0.98679	0.99153
$P_i(2)$	0.01516	0.00960	0.01321	0.00847
$N(i)$	16.86	10.61	14.66	9.35
$DND(i)$	0.30	0.19	0.26	0.17
$END(i)$	2.124,76	1.345,40	1.851,33	1.187,00
$C_{afund}(i)$	842.760	530.642	732.855	467.631

Tabela 4.16 - Índices de Desempenho. Critério da Tensão Mínima
Tensão Pré-Falta. Carga Média

Índices	Índices por Barras de Carga			
	Barra 41	Barra 95	Barra 113	Barra 119
$P_i(1)$	0.98021	0.98933	0.98285	0.99059
$P_i(2)$	0.01979	0.01067	0.01715	0.00941
$N(i)$	22.11	11.81	19.11	10.41
$DND(i)$	0.40	0.21	0.34	0.19
$END(i)$	2.774,20	1.496,07	2.403,98	1.319,41
$C_{afund}(i)$	1.105.554	590.707	955.442	520.291

Tabela 4.17 - Índices de Desempenho. Critério da Tensão Mínima
Tensão Pré-Falta. Carga Máxima

Índices	Índices por Barras de Carga			
	Barra 41	Barra 95	Barra 113	Barra 119
$P_i(1)$	0.97820	0.98841	0.98184	0.98935
$P_i(2)$	0.02180	0.01159	0.01816	0.01065
$N(i)$	24.41	12.83	20.25	11.79
$DND(i)$	0.44	0.23	0.36	0.21
$END(i)$	3.056,07	1.623,80	2.545,04	1.492,76
$C_{afund}(i)$	1.220.386	641.733	1.012.544	589.387

De acordo com os resultados apresentados nas tabelas 4.4 e 4.15 a 4.17, observa-se que o número esperado de paradas/ano apresenta valores diferentes em função do regime de carga do sistema e conseqüentemente da tensão pré-falta.

Tomando-se como referência a variável $N(i)$, associada à simulação com tensão pré-falta de 1 p.u., os erros atingem o valor de 54 %, conforme é mostrado na tabela 4.19.

Tabela 4.18 - Análise de Influência da Tensão Pré-Falta. Tabela Comparativa

Tensão Pré-Falta	Número de Desligamentos/Ano				
	Barra 41	Barra 95	Barra 113	Barra 119	Globais
1p.u.	18,21	13,01	13,12	12,29	14,15
Mínima	16,86	10,61	14,66	9,35	12,87
Média	22,11	11,81	19,11	10,41	15,86
Máxima	24,41	12,83	20,25	11,79	17,32

Tabela 4.19 - Análise de Influência da Tensão Pré-Falta. Tabela de Erros

Tensão Pré-Falta	Erro percentual em relação a $N(i)$ - Tensão pré-falta de 1 p.u.				
	Barra 41	Barra 95	Barra 113	Barra 119	Globais
1p.u.	-----	-----	-----	-----	-----
Mínima	7,41	18,45	-11,74	23,92	9,05
Média	-21,42	9,22	-45,66	15,30	-12,08
Máxima	-34,05	1,38	-54,34	4,07	-22,40

Visando minimizar os erros identificados, propõe-se a utilização de fatores de ponderação proporcionais às taxas de exposição do sistema às diversas tensões pré-falta. Desta forma, o número anual esperado de paradas de produção pode ser obtido através da aplicação das equações 4.1 e 4.2.

$$N_{ip} = N_{i \text{ mínima}} \cdot \alpha + N_{i \text{ média}} \cdot \beta + N_{i \text{ máxima}} \cdot \gamma \quad (4.1)$$

$$\alpha + \beta + \gamma = 1 \quad (4.2)$$

onde:

N_{ip} - número anual esperado de paradas de produção;

α - taxa de exposição à carga mínima;

β - taxa de exposição à carga média;

γ - taxa de exposição a carga máxima.

Admitindo fatores de ponderação iguais a: $\alpha=0,25$, $\beta=0,625$ and $\gamma=0,125$; e considerando $\lambda_{12}(i) = N_{ip}$, obtido de (4.1) obtém-se os resultados apresentados nas tabelas 4.20 e 4.21.

Tabela 4.20 - Índices de Desempenho. Critério da Tensão Mínima
Tensão Pré-Falta. Valores Ponderados

Discriminação dos Índices	Índices por Barras de Carga			
	Barra 41	Barra 95	Barra 113	Barra 119
$P_i(1)$	0,98111	0,98949	0,98370	0,99067
$P_i(2)$	0,01889	0,01051	0,01630	0,00933
$N(i)$	21,08	11,63	18,14	10,31
$DND(i)$	0,38	0,21	0,33	0,19
$END(i)$	2.647,62	1.473,08	2.284,61	1.307,69
$C_{afund.}(i)$	1.054.000	581.500	907.000	515.500

Tabela 4.21 - Índices Globais do Sistema

Discriminação dos Índices	Tensão Pre- Falta 1 p.u.	Tensao Pré-Falta Valores Ponderados
$P_s(1)$	0,9872	0,9862
$P_s(2)$	0,0128	0,0138
$N(s)$	14,15	15,29
$DND(s)$	0,25	0,28
$END(s)$	1.788,10	1.934,21
$C_{afund.}(s)$	707.754	764.500

Observando os resultados, conclui-se que ao se adotar a tensão pré-falta igual a 1 p.u. pode-se estar cometendo erros substanciais em função das características de cada sistema, ou seja, da topologia da rede, do suporte de reativo disponível e da forma de utilização destes recursos. Para exemplificar esta situação, supõe-se que o consumidor, por razões específicas, tenha optado por conectar a carga na barra 113 em vez da 95, pois os índices obtidos para a condição de tensão pré-falta de 1p.u são equivalentes nestes barramentos. No entanto, ao comparar os índices calculados e considerando a taxa de exposição (ponderação) aos diversos regimes de carga (tensões pré-falta), constata-se que o erro cometido é substancial. Neste caso, verifica-se que, se o consumidor optar pela barra 113 ele estará sujeito a 6,51 paradas de processo/ano a mais, quando compara à quantidade prevista para a barra 95. Isto mostra claramente a importância de se considerar os valores reais da tensão pré-falta nas análises envolvendo afundamentos de tensão.

4.6 Considerações Finais

Visando atender as preocupações dos consumidores quanto aos afundamentos de tensão, as empresas têm implementado estratégias cujas filosofias vão desde reativa à pro-ativa. Segundo a filosofia reativa, a empresa se limita a responder as reclamações de seus consumidores e na filosofia pro-ativa, a empresa se envolve tanto na educação do consumidor como na promoção de serviços que possam auxiliar na identificação de soluções para os problemas de QEE.

A proposição e aplicação dos indicadores apresentados, bem como a implementação da ferramenta computacional, se enquadram na filosofia pro-ativa acima descrita e ambas se constituem numa contribuição técnica para a metodologia de análise e prevenção dos afundamentos de tensão, atendendo de forma adequada às necessidades das concessionárias e consumidores no processo de melhoria da QEE.

No âmbito da concessionária, a análise dos afundamentos de tensão visa conhecer o comportamento do sistema diante destes distúrbios, possibilitando a avaliação de sua performance global e o impacto sobre os seus consumidores individuais.

No âmbito dos consumidores, novos ou atuais, a informação das estimativas de incidências de afundamentos subsidiam na especificação de equipamentos e no processo de avaliação de investimentos alternativos, visando minimizar os problemas decorrentes da sensibilidade de seus equipamentos/processos aos afundamentos de tensão.

Além da previsão da frequência anual de desligamentos, os demais índices propostos neste trabalho 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 como da concessionária. Além da agilização do processo de análise dos afundamentos de tensão, as informações disponibilizadas contribuem para uma análise de soluções alternativas a fim de otimizar a performance do sistema elétrico como um todo.

Dentre as possibilidades oferecidas, o ferramental apresentado permite analisar diversos cenários de rede de suprimento-processos, avaliar custos e estabelecer estudos de viabilidade técnico-econômica de alternativas para mitigação de problemas tais como:

- melhorias no sistema de proteção da concessionária;

- melhoria da performance das linhas de transmissão, como a instalação de pára-raios visando reduzir as taxas de falta;
- alterações de configuração operacional do sistema de fornecimento e/ou suprimento;
- proceder redespachos de carga para melhorar as condições de tensão pré-falta;
- proceder a alteração de *taps* de operação de transformadores;
- instalação de suporte de reativo como compensadores síncronos;
- instalação de condicionadores de energia tanto por parte da concessionária, como por parte do consumidor;
- especificar e adquirir equipamentos e processos menos sensíveis.

Dentre as melhorias pretendidas para serem implementadas no programa desenvolvido destacam-se:

- aperfeiçoamento dos algoritmos que determina o tempo de atuação das proteções de linhas, incorporando as curvas tempo x corrente dos relés de tempo dependente e fusíveis,
- implementar nos algoritmos de cálculo a probabilidade de falha da proteção de primeira zona da proteção de distância;
- implementar técnicas de simulação de Monte Carlo para quantificar as incertezas do sistema elétrico, tais como: tipo de falta, localização da falta, impedância de falta, tensão pré-falta, sensibilidade da carga, etc.
- implementar melhorias na forma de representação da sensibilidade da carga, incorporando os efeitos da assimetria e do desequilíbrio dos afundamentos de tensão nas cargas trifásicas.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Este capítulo está subdividido em três seções, quais sejam:

- **Conclusões Finais** - nesta seção apresenta-se as conclusões gerais deste trabalho, onde se generaliza e se complementa as considerações finais de cada capítulo anterior e onde se apresenta uma visão de conjunto;
- **Contribuições Apresentadas** – Mostra-se nesta seção, de forma sucinta e itemizada, as reais contribuições deste trabalho;
- **Propostas para Trabalhos Futuros** – tendo em conta que ao longo dos capítulos foram citadas diversas contribuições que poderiam advir, junta-se todas elas, itemizando-as nesta seção.

5.1 Conclusões Finais

Esta tese aponta no essencial para mudanças de procedimentos, tanto por parte das concessionárias quanto dos consumidores de grande porte, quando da realização de estudos para implantação de novos complexos industriais, sobretudo àqueles possuidores de cargas sensíveis.

Os clientes precisam buscar maior aproximação com os potenciais fornecedores ainda na fase de projeto e definição dos equipamentos, além de procurar entender, com a profundidade necessária, os requisitos de sensibilidade de seu processo industrial. Neste sentido, os consumidores devem lembrar-se de que sensibilidade excessiva dos equipamentos e dos processos associados é um fator impeditivo para se obter continuidade operacional satisfatória e por conseqüência, atingir os índices de produtividade e qualidade planejados.

Por sua vez, as concessionárias devem estar atentas, ao planejar seu sistema, à exagerada proliferação de afundamentos de tensão, tanto em número, como em severidade; entendendo por

“exagerada” uma situação em que se produzam efeitos adversos em parcela substancial dos consumidores.

A justificativa principal para mudanças de postura de ambas as partes consiste na experiência mostrada de que os custos das soluções para os problemas associados aos afundamentos de tensão para sistemas industriais já em operação, são elevados e muitas vezes de difícil implementação. A única alternativa é que os problemas sejam prognosticados e solucionados antecipadamente na fase de elaboração do projeto, especificação e compra dos equipamentos.

Até o presente momento, concessionárias e consumidores não têm aplicado técnicas efetivas para o planejamento e projeto de seus sistemas que visem generalizar ou formalizar estudos de eventos relativos aos afundamentos de tensão. É nesta circunstância que esta tese está inserida e seu objetivo foi o de propor a utilização de índices de desempenho, permitindo aos planejadores do sistema buscar a compatibilidade entre a qualidade oferecida pelos sistemas de fornecimento de energia, e as necessidades dos modernos processos industriais. A metodologia abordada permite analisar diversos cenários do conjunto suprimento-processo, avaliar custos e estabelecer estudos de viabilidade técnico-econômica de alternativas para solução ou minimização dos problemas.

A metodologia apresentada tem como base a confrontação da sensibilidade da carga, no plano tensão x tempo, com as solicitações impostas pelo sistema suprimento e fornecimento de energia, a partir da utilização de técnicas de predição da intensidade, da duração e da frequência de ocorrência dos afundamentos de tensão. Esta metodologia pode ser aplicada tanto em sistemas radiais como malhados e também com características diversas de tempo-corrente para os dispositivos de proteção. Reconhece-se que a sensibilidade da carga não é plenamente caracterizada pela intensidade e duração dos afundamentos de tensão, e que há outros fatores que influenciam no comportamento dos equipamentos sensíveis, tais como: assimetria, desequilíbrios, forma de onda dos afundamentos de tensão, salto de ângulo, etc. Contudo, para os propósitos deste trabalho e diante das inúmeras incertezas existentes no sistema elétrico, tais como: tensão pré-falta, impedância de falta, erros de modelagem, etc., julga-se que a representação da sensibilidade, tal como mencionado, é bastante satisfatória. Em verdade, a sensibilidade dos equipamentos/processos frente a afundamentos de tensão é um campo de

pesquisa bastante amplo que está apenas se iniciando. Também vale dizer que precisão dos indicadores calculados está vinculada tanto a confiabilidade dos dados de sensibilidade das cargas/processos como dos dados de taxas de falta das linhas de transmissão e de distribuição.

A tese apresentada, embora voltada para grandes consumidores com cargas sensíveis, é complementar aos estudos convencionais que são normalmente executados para o planejamento e operação do sistema elétrico a saber: curto-circuito, fluxo de carga, seletividade, confiabilidade, transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos.

Finalmente, pode-se concluir que a utilização dos indicadores propostos, permitirá o gerenciamento da QEE no tocante a afundamentos de tensão, tanto do lado da concessionária quanto do consumidor, orientar a priorização de investimentos, aumentar a eficiência do setor elétrico e por extensão o rendimento das atividades produtivas dos consumidores possuidores de cargas sensíveis. Estes índices deverão ser utilizados preferencialmente quando da realização de estudos para a avaliação do atendimento a consumidores possuidores de cargas sensíveis.

5.2 Contribuições Apresentadas

Como principais contribuições apresentadas por este trabalho podem ser destacadas:

- Torna disponível para o setor elétrico uma metodologia que auxilia na busca da compatibilidade entre a qualidade oferecida pelos sistemas de fornecimento de energia e as necessidades dos modernos processos industriais. A metodologia apresentada permite delimitar a área de vulnerabilidade do sistema sob a ótica dos consumidores com cargas sensíveis e conhecer os pontos fracos do sistema de fornecimento de energia que precisam de investimentos;
- Propõe-se índices de avaliação para o sistema elétrico que permitem executar estudos comparativos entre as alternativas de projeto de melhoria para os sistemas de transmissão, subtransmissão e distribuição da concessionária, sob o enfoque dos afundamentos de tensão;
- Propõe-se índices de avaliação de desempenho para o sistema de distribuição do consumidor que permite executar estudos de viabilidade técnico-econômica para a instalação de

condicionadores de energia, mudança de filosofia de concepção de projeto de sistemas industriais, especificação e aquisição de equipamentos eletro-eletrônicos menos vulneráveis a afundamentos de tensão;

- Propõe-se índices de avaliação de desempenho para os diversos barramentos de carga com o objetivo de fornecer subsídios para que os planejadores do sistema possam, incluir a sensibilidade dos equipamentos e processos, na escolha o melhor local da rede da concessionária para conexão da carga.

5.3 Propostas para Futuros Trabalhos

Visando dar continuidade à pesquisa sobre o tema afundamentos de tensão, serão apresentadas na seqüência uma relação de sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros:

- executar análises comparativas entre os resultados de medições reais de afundamentos de tensão com resultados de simulações. Estas análises permitirão validar tanto as técnicas de simulação, atualmente utilizadas, como a modelagem do sistema e seus componentes;

- implementar melhorias na forma de representação da sensibilidade da carga, incorporando os efeitos da assimetria e do desequilíbrio dos afundamentos de tensão nas cargas trifásicas;

- implementar no cálculo dos índices propostos a sensibilidade dos AVVs diante do desequilíbrio e assimetria angular dos afundamentos de tensão;

- implementar no cálculo do afundamento de tensão, a influência da reconfiguração do sistema promovido pela abertura não simultânea dos terminais da linha de transmissão, quando da ocorrência de curtos-circuitos;

- incorporar no cálculo da duração do afundamento de tensão a representação de relés de sobrecorrente de tempo dependente, inclusive os direcionais;

• incorporar no cálculo da duração do afundamento de tensão a probabilidade de falha da proteção principal, com conseqüente atuação da proteção de retaguarda ou de segunda zona.

• implementar no cálculo dos índices outras formas de distribuição de curto-circuito ao longo da linha, diferentes da distribuição uniforme que foi utilizada neste trabalho;

• implementar no programa desenvolvido as técnicas de simulação de Monte Carlo e de inteligência artificial, considerando as incertezas inerentes às variáveis de influência no cálculo dos afundamentos de tensão (tensão pré-falta, resistência de arco, localização e tipo da falta, falha da proteção principal, etc.);

• implementar um equipamento capaz de gerar afundamentos de tensão assimétricos e desequilibrados que possibilite executar ensaios para o levantamento da sensibilidade dos AVVs.

CAPÍTULO VI

REFERÊNCIAS

6.1 Livros, Teses, Relatórios Técnicos e Artigos Consultados

- [1] KEY, T.S. Diagnosing Power Quality - Related Computer Problems. **IEEE Transaction on Industry Applications**, v. 15, n. 4, jul./aug., 1979, p. 381-393.
- [2] WAGNER, V. E; ANDESHAK, A. A; and STANIAK, J. J.P. Power Quality and Factory Automation. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 26, n. 4, jul./aug., 1990, p. 620-626.
- [3] CONRAD, L., LITTLE, K ., GRIGG, C. Predicting and Preventing Problems Associated with Remote Fault- Clearing Voltage Dips. **IEEE Transactions on Industry Applications**. v.27, n.1, jan./feb. 1991. p.167-172.
- [4] CALDON, R.; FAURI, M.; FELLIN, L. **Voltage Sag effects on Continuous Industrial Processes: Desensitizing Study for Textile Manufacture**. In: "PROC. 2nd CONFERENCE POWER QUALITY", 1992. p. D13:1 - D13:6.
- [5] MACGRANAGHAN, M. F; MUELLER, D. R; and SAMOTYJ, M. J. Voltage Sags in Industrial Systems. **IEEE Transaction on Industry Applications**, v. 29, n. 2, mar./apr., 1993, p. 397- 403
- [6] POWER SYSTEMS RELIABILITY SUBCOMMITTEE OF THE VOLTAGE SAG WORKING GROUP. Proposed Chapter 9 for Predicting Voltage Sags (Dips) in Revision to IEEE Std 493, The Gold Book. **IEEE Transaction on Industry Applications**. v. 30, n.3, may./jun., 1994. p.805- 821.
- [7] BOLLEN M. H. J. The Influence of Motor Reacceleration on Voltage Sags. **IEEE Transactions on Industry Applications**. v.31, n.4 , jul./aug. 1995. p.667-674
- [8] CONRAD, L., BOLLEN M. H. J. Voltage Sag Coordination for Reliable Plant Operation. **IEEE Transactions on Industry Applications**. v.33, n.6, nov./dec. 1997. p.1459-1464.
- [9] BROOKS, D.L., DUCAN, R.C., SUNDARAM, A. Recommendations for tabulating RMS Variations Disturbances with Specific reference to utility Power Contracts. www.PQNET.ELECTROTEK.com
- [10] BROOKS, D.L., DUCAN, R.C., WACLAWIAK, M., SUNDARAM, A. Indices for Assessing Utility Distribution System RMS Variation Performance. www.PQNET.ELECTROTEK.com
- [11] JOHN, ANTHONY N. **Survey of the Recent Voltage Sag Papers from Around the World**. In: "PROCEEDINGS OF IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Annual Technical Conference". St. Petersburg, FL, USA. 1993. p.52-54.
- [12] **IEE Recommended Practice for Evaluating Electric Power System Compatibility With Electronic Process Equipment**. IEEE Std. 1346 - 1988
- [13] **IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality**. IEEE Std.1159-1995.
- [14] **EN50160. Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems**. European Standard (CLC, BTTF 68, 06 nov. 1994).

- [15] LAMORRE, J. et all. Voltage Sag Analysis Case Studies. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 30, n. 4 jul./aug., 1994, p. 1083-1088.
- [16] CARVALHO, P. L. **Uma Contribuição ao Estudo da Depressão de Tensão**. Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI, 1997.121p.(Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. EFEI).
- [17] BICHELS, A. **Determinação do Perfil de Afundamento de Tensão em um Barramento de Subestação**. In: "XIV SNPTEE. Belém. Outubro", 1977.
- [18] KINDERMANN, G. **Curto-Circuito**. Porto Alegre: SAGRA-DC LUZZATTO, 1992.
- [19] WARRINGTON, A.R. Van C. **Protective Relays; their theory and practice**. 3ed. London, Chapman and Hall. 2v.
- [20] BLACKBURN, J. L. **Protective Relaying**. New York, Marcel Dekker. 1987 (Electrical engineering and electronics, n. 37)
- [21] ORTMAYER, T., H, HIYAMA, T., SALEHFAR, H. Power Quality Effects of Distribution System Faults. **Electrical Power & Energy Systems**. v.18, n.5, 1996. p.323 -329.
- [22] BOLLEN, M. H.J. Characterization of Voltage Sags Experienced Voltage Sag By Three-Phase Adjustable-Speed Drive. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 12, n. 4 , oct., 1997, p. 1666-1671.,
- [23] AYELLO, F. P., CARVALHO FILHO, J.M., et all . **Influência do Sistema de Proteção na Qualidade da Energia**. In: III CONCLADIS - CONGRESSO LATINO AMERICANO DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA- USP- SP, 1999". 5p..
- [24] IEEE Power System Relaying Committee Report. Distribution Line Protection Practices – Industry Survey Results. **IEEE Transactions Power Delivery**, v. PD-3, apr. 1998. p. 514-524.
- [25] IEEE Power System Relaying Committee Report, Line Protection Design Trends in the USA and Canada. **IEEE Transactions Power Delivery**, v. 3, oct. 1998, p. 1530-1535.
- [26] DUGAN, R.C. et all. **Electrical Power Systems Quality**. New York, Mc Graw-Hill. 1996. 265p.
- [27] TURNER, A. E, COLLINS Jr E. R. **The Performance of AC Contactors During Voltage Sags**. Clemson University.<http://ece.clemson.edu/power>
- [28] COLLINS Jr E. R, BRIDGWOOD, M A. **The Impact of Power System Disturbances on AC - Coil Contactors**. Clemson University.
<http://ece.clemson.edu/power>
- [29] DAVID, A, LAJOIE-MAAZEND, E. **Ride - Through Capability of AC Adjustable Speed Drives in Regards to Voltage Dips on The Distribution Network**.
- [30] COLLINS Jr. E. R, MANSOUR, A. **Effects of Voltage Sags on AC Motors Drive**. **Clemson University**. <http://ece.clemson.edu/power/pqia>
- [31] MANSOUR, A , COLLINS Jr E. R, MORGAN, R.L. **Effects of Unsymmetrical Sags on Adjustable Speed Drive**. Clemson University.
<http://ece.clemson.edu/power/pqia>.
- [32] TUNABOYLU, N.S, COLLINS Jr E. R, MIDDLELEKAUF, S. W. **Ride - Through for DC Motor Drives During Voltage Sags**. Clemson University.
<http://ece.clemson.edu/power/pqia>.
- [33] ANDERSON, L. M e BOWES, K. The Effects of Power-Line Disturbances on Consumer Electronic Equipment. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.5, n.2, apr., 1990, p. 1062-1064.

- [34] **IEEE Recommended for Emergency and Stand-by Power Systems for Industrial and Commercial Applications**. Std.446. IEEE Orange Book,1995..
- [35] RIBEIRO, T. N. **Uma Discussão dos Critérios e Normas Relativos à Qualidade da Energia Elétrica**. Belo Horizonte – PUC-MG (Dissertação de Mestrado PPGEE – 03/98. ago., 1998)
- [36] BOLLEN, M. H. J. **Understanding power quality problems; voltage sags and interruptions**. New York, IEEE Press. 2000, 541p.
- [37] FONSECA, V. R. C. **Cálculo Estocástico do Afundamento de Tensão**. Belo Horizonte, PUC-MG. 1999. 120p. (Dissertação de Mestrado PPGEE-11/99).
- [38] QUALIDADE DE ENERGIA: Projeto de Mapeamento de Fenômenos Relativos à Qualidade de Produto no Sistema Elétrico; Proposta de Indicadores para a Fiscalização Estatística dos Fenômenos de VMT. São Paulo, USP/ELETRIPAULO, mar., 2000.
- [39] WEINHOLD, M. et all. **Power Conditioning Equipment for Improvement of Power Quality in Distribution Systems** In :“II SBQEE – SEMINÁRIO BRASILEIRO SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA. São Lourenço – MG., 16 a 19 de novembro de 1997”.
- [40] DACONTI, J.R. et all. **Panorama sobre Modernos Equipamentos Utilizados para Melhorar a Qualidade de Energia Elétrica em Sistemas de Distribuição** In: “II SBQEE – SEMINÁRIO BRASILEIRO SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA. São Lourenço – MG., 16 a 19 de novembro de 1997”.
- [41] GURLASKIE, G. T, PEEL, M. **Enhancing Power Quality Delivered to Sensitive Customers with Distribution- Class Custom Power Products** Power In: “II SBQEE – SEMINÁRIO BRASILEIRO SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA. São Lourenço – MG., 16 a 19 de novembro de 1997”.
- [42] DETTLOFF, A. and SABIN, D. **Power Quality Performance Component of the Special Manufacturing Contracts between Power Provider and Customer**. In: “9th INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND QUALITY OF POWER – ICHOP, IEEE-PES, Orlando, EUA, Oct. 01 – 05 de 2000”.
- [43] NRS – 048 – **ELECTRICITY SUPPLY – QUALITY OF SUPPLY – Part 1** Minimum Standards – for Application by the National Electricity Regulator.
- [44] RAMOS, A. J. P. **Análise da Norma NRS – 048 (África do Sul) e sua Aplicabilidade ao Sistema Brasileiro quanto à Variação Momentânea de Tensão**. Recife, nov., 1999.
- [45] QADER, M. R., et al. **Stochastic Prediction of Voltage Sags in a Large Transmission System**, **IEEE Transactions on Industry Applications**, v.35, n. 1, p.152-162, jan./feb., 1999.
- [46] BOLLEN, M. H. J., YALCINKAYA G. , HAZZA, G. **The use of electromagnetic Transiente Programas for Voltage Sags analylis** . In. “8th INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND QUALITY OF POWER – ICHOP, IEEE-PES and NTUA, Athens, Greece, Oct. 14 – 16 de 1998”.
- [47] LIU, W. –H. , HONG, H. W., ZHONG, W. **An Integrated Application for Voltage Sags Analysis Module**. In: “20th INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER INDUSTRY COMPUTER APPLICATION , Columbus, Ohio, May 11-16, 1997”. IEEE Proceedings, 199 p. 119-124.
- [48] STECIUK, P.B.; REDMON, J.R.; **Voltage Sags Analysis Peaks Customer Service**. **IEEE Computer Applications in Power**. Oct. 1996, p.48-51.
- [49] BOLLEN, M. H. J., **Method of Critical Distances for Stochastic Assessment of Voltage Sags**. **Proceedings IEE – Generation, Transmission and Distribution**, v.145, n. 1, jan., 1998, p. 70-76.

- [50] BOLLEN, M. H. J., Fast Assessment Methods for Voltage Sags in Distribution Systems, **IEEE Transactions on Industry Applications**, v.32, n. 6, p. 1414-
- [51] BILLINTON, R. and ALLAN, R. N. **Reliability Evaluation of Power Systems**. 2 ed. New York, Plenum, 1996.
- [52] CAMINHA NORONHA, J.C., **Análise Computacional de Voltage Sags em Consumidores Sensíveis**. Escola Federal de Engenharia de Itajubá – EFEI, 1999 175p. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. EFEI).
- [53] ABREU, J. P. G., CARVALHO FILHO, J. M., CAMINHA NORONHA, J.C., ARANGO, H. Visage – Um Software para Avaliar Depressões de Tensão. In: “IEE – SEMINÁRIO BRASILEIRO SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA. Brasília – DF, 08 a 12 de agosto de 1999”. p. 183-188.
- [54] ANAFAS – PROGRAMA DE ANÁLISE DE FALTAS SIMULTÂNEAS - CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, Versão 1.0, 1996, RJ – RJ.

6.2 Dissertações e Artigos Produzidos

- [16] CARVALHO, P. L. **Uma Contribuição ao Estudo da Depressão de Tensão**. Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI, 1997.121p.(Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. EFEI).
- [23] AYELLO, F. P., CARVALHO FILHO, J.M., et all . **Influência do Sistema de Proteção na Qualidade da Energia**. In: “III CONLADIS - CONGRESSO LATINO AMERICANO DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA- USP- SP, 1999”. 5p..
- [52] CAMINHA NORONHA, J.C., **Análise Computacional de Voltage Sags em Consumidores Sensíveis**. Escola Federal de Engenharia de Itajubá – EFEI, 1999 175p. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. EFEI).
- [53] ABREU, J. P. G., CARVALHO FILHO, J. M., CAMINHA NORONHA, J.C., et al. Visage – Um Software para Avaliar Depressões de Tensão. In: “IEE – SEMINÁRIO BRASILEIRO SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA. Brasília – DF, 08 a 12 de agosto de 1999”. p. 183-188.
- [55] CARVALHO FILHO, J.M., ABREU, J.P.G., CARVALHO, P.L. Impact of Voltage Sags: A Metology for its Determination. In: “POWER SYSTEMS WORLD’97 CONFERENCE” (sponsored by Power Quality Assurance Magazine) – USA, Baltimore, setembro, 1997.
- [55a] CARVALHO FILHO, J.M., ABREU, J.P.G., CARVALHO, P.L. Impacto de Voltage Sags Sobre Equipamentos Eletrônicos . In: “VII ERLAC – Argentina, Puerto Iguazu, maio de 1997”. Argentina, 1997.
- [55b] CARVALHO FILHO, J.M., ABREU, J.P.G., CARVALHO, P.L. Análise do Impacto de Voltage Sags Sobre Equipamentos Eletrônicos. In: “XIV SNPTEE – SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA BRASIL, PA, Belém. Outubro de 1997”.
- [55c] CARVALHO FILHO, J.M., ABREU, J.P.G., CARVALHO, P.L. Uma metodologia para Determinação do impacto das Voltag Sags. In: “SBQEE’97 – II SEMINÁRIO BRASILEIRO SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA – BRASIL – São Lourenço, MG, novembro de 1997”.
- [56] CARVALHO FILHO, J.M., ABREU, J.P.G., VILAS BOAS, J.P.G. Medidas Preventivas e Corretivas para Minimização do Impacto das Voltage Sags. In: “SBQEE’97 – II SEMINÁRIO BRASILEIRO SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA – BRASIL – São Lourenço, MG, novembro de 1997”.

- [57] ABREU, J.P.G., CARVALHO FILHO, J.M., CAMINHA NORONHA, J.C., ARANGO, H. Voltage Sags: Proposta de novo critério para Avaliação do Atendimento a Consumidores com Cargas Sensíveis. In: "XII CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, UBERLÂNDIA – MG, setembro de 1998."
- [58] ABREU, J.P.G., CARVALHO FILHO, J.M., CAMINHA NORONHA, J.C., ARANGO, H. Uma Metodologia para Avaliação do Impacto da Depressão de Tensão em Consumidores com Acionamentos CA e CC. In: "IEEE – INDUSCON'98, SÃO PAULO – SP, Setembro de 1998".
- [59] CARVALHO FILHO, J.M., ABREU, J.P.G., CAMINHA NORONHA, J.C., ARANGO, H. Electric Power System under Voltage Sags – A Tool for Achieving Compatibility. In: "9th INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND QUALITY OF POWER – ICHOP, IEEE-PES, Orlando, EUA, Oct. 01 – 05 de 2000".
- [60] CARVALHO FILHO, J.M., ABREU, J.P.G., CAMINHA NORONHA, J.C., ARANGO, H. Analysis of Power Systems Performance under Voltage Sags. *Electric Power Systems Research*, v.55, 2000. p. 211 – 218.

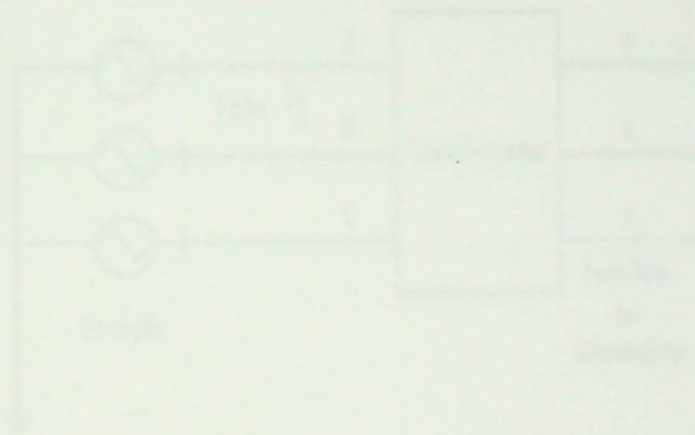


Figura A1 - Diagrama de um sistema de potência

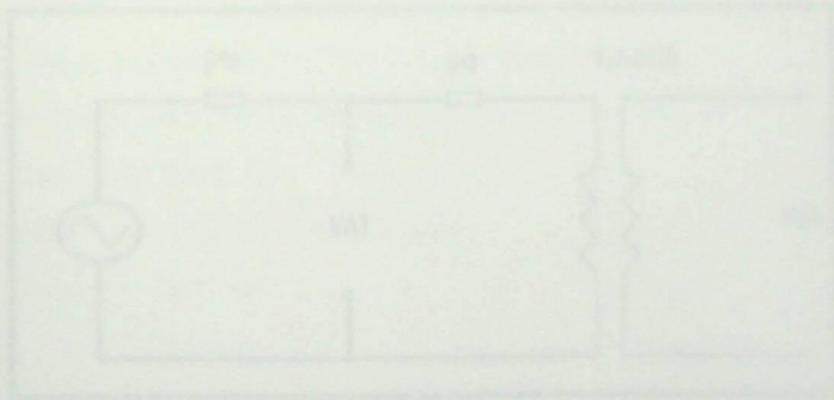


Figura A2 - Diagrama de um sistema de potência

APÊNDICE A

INFLUÊNCIA DA CONEXÃO DE TRANSFORMADORES NO CÁLCULO DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

Este Apêndice é dedicado a mostrar a influência da conexão dos transformadores no cálculo dos afundamentos de tensão.

A figura A1 mostra o diagrama esquemático de um sistema suprindo um transformador Δ - Y_{aterrado} . As figuras A2, A3 e A4, mostram os diagramas de seqüências positiva, negativa e zero, respectivamente.

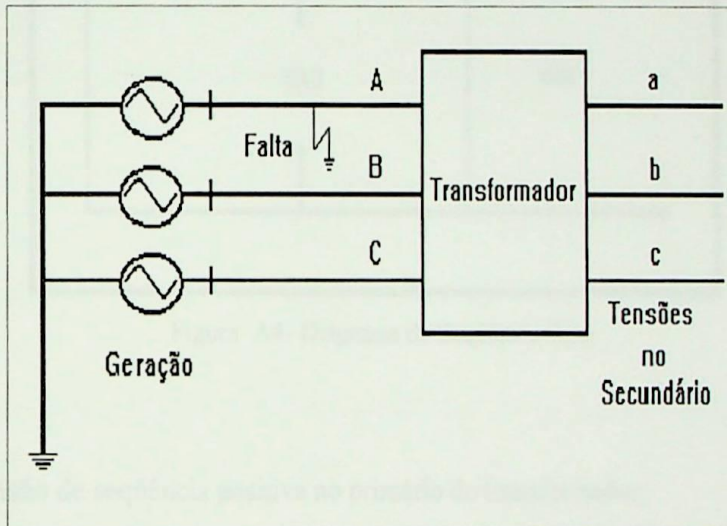


Figura A1 - Diagrama Esquemático

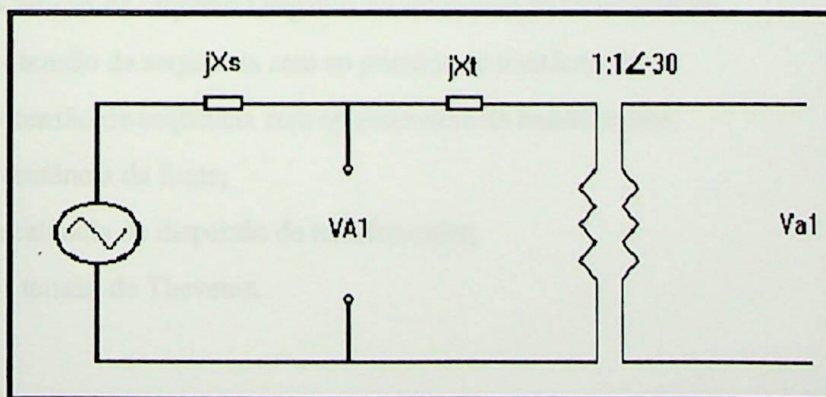


Figura A2 - Diagrama de Seqüência Positiva

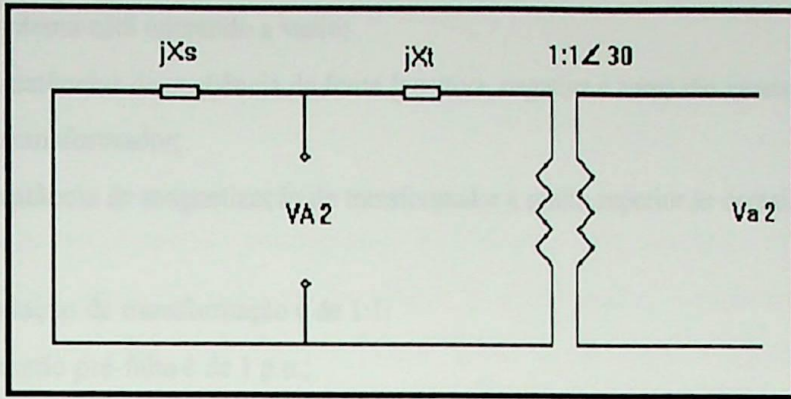


Figura A3 - Diagrama de Seqüência Negativa

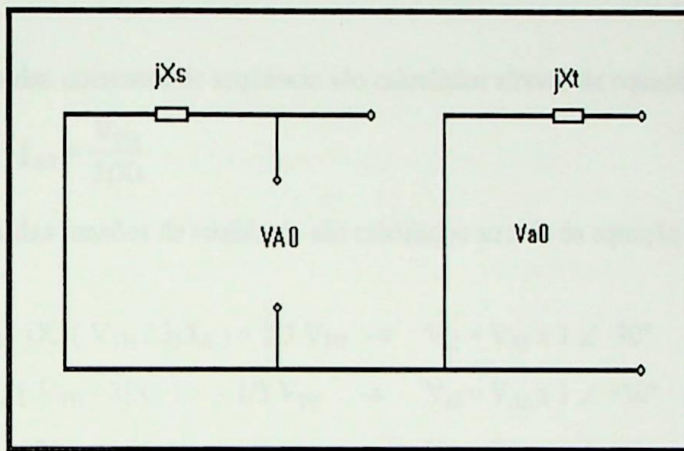


Figura A4- Diagrama de Seqüência Zero

onde:

- V_{A1} - tensão de seqüência positiva no primário do transformador;
- V_{a1} - tensão de seqüência positiva no secundário do transformador;
- V_{A2} - tensão de seqüência negativa no primário do transformador;
- V_{a2} - tensão de seqüência negativa no secundário do transformador;
- V_{A0} - tensão de seqüência zero no primário do transformador;
- V_{a0} - tensão de seqüência zero no secundário do transformador;
- X_s - reatância da fonte;
- X_t - reatância de dispersão do transformador;
- V_{TH} - tensão de Thevenin.

Utilizando a teoria de componentes simétricas, executa-se os cálculos que se sucedem, admitindo as seguintes premissas:

- o sistema está operando a vazio;
- as reatâncias de seqüência da fonte (positiva, negativa e zero) são iguais à reatância de dispersão do transformador;
- a reatância de magnetização do transformador é muito superior às demais reatâncias do sistema;
- a relação de transformação é de 1:1;
- a tensão pré-falta é de 1 p.u.;
- o curto-circuito simulado é da fase A para a terra no primário do transformador, com impedância de falta nula.

Os valores das correntes de seqüência são calculados através da equação (A1).

$$I_{A0} = I_{A1} = I_{A2} = \frac{V_{TH}}{3jX_S} \quad (A1)$$

Os valores das tensões de seqüência são calculados através da equação (A2).

$$\begin{aligned} V_{A1} &= V_{TH} - jX_S (V_{TH} / 3jX_S) = 2/3 V_{TH} \rightarrow V_{a1} = V_{A1} \times 1 \angle -30^\circ \\ V_{A2} &= -jX_S (V_{TH} / 3jX_S) = -1/3 V_{TH} \rightarrow V_{a2} = V_{A2} \times 1 \angle +30^\circ \\ V_{A0} &= -jX_S (V_{TH} / 3jX_S) = -1/3 V_{TH} \rightarrow V_{a0} = 0 \end{aligned} \quad (A2)$$

Os valores das tensões fase-neutro e fase-fase no secundário do transformador são calculados através das equações (A3) e (A4).

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (A3)$$

$$V_{an} = 0,58 \angle -60^\circ$$

$$V_{bn} = 0,58 \angle -120^\circ$$

$$V_{cn} = 1 \angle 90^\circ$$

$$\begin{aligned} V_{ab} &= V_{an} - V_{bn} \\ V_{bc} &= V_{bn} - V_{cn} \\ V_{ca} &= V_{cn} - V_{na} \end{aligned} \quad (A4)$$

$$V_{ab} = 0,33 \angle 0^\circ$$

$$V_{bc} = 0,88 \angle -101^\circ$$

$$V_{ca} = 0,88 \angle 101^\circ$$

Utilizando-se o mesmo procedimento matemático, foram calculados os módulos dos afundamentos de tensão refletidos no secundário do transformador, considerando as diversas conexões possíveis. Em cada situação, foram feitas as alterações necessárias em (A2), considerando ou não a eliminação da componente de seqüência zero da tensão, bem como introduzindo ou não o defasamento angular nas componentes de seqüência positiva e negativa. Os resultados encontrados são apresentados na Tabela A1.

Tabela A1- Efeito das Conexões de Transformadores
no Cálculo de Afundamentos de Tensão

Conexão do transformador	Fase – Fase			Fase - Neutro		
	Vab	Vbc	Vca	Van	Vbn	Vcn
Y _{aterrado} - Y _{aterrado}	0,58	1,00	0,58	0,00	1,00	1,00
Y _{aterrado} - Y Y - Y Y - Y _{aterrado}	0,58	1,00	0,58	0,33	0,88	0,88
Δ - Δ	0,58	1,00	0,58	-----		
Y - Δ Y _{aterrado} - Δ	0,33	0,88	0,88	-----		
Δ - Y _{aterrado} Δ - Y	0,88	0,88	0,33	0,58	1,00	0,58

APÊNDICE B

DISTRIBUIÇÃO EXPONENCIAL E PROCESSOS DE MARKOV

B1 - Distribuição de Poisson [51]

A distribuição de Poisson representa a probabilidade de um evento isolado ocorrer um determinado número de vezes e em um dado intervalo de tempo, quando a taxa de ocorrência é constante, ou seja, invariável com o tempo. Desta forma, a ocorrência dos eventos deve ser afetada somente pelo acaso.

A taxa de ocorrência também é conhecida por taxa de risco ou taxa de falha, representada por (λ) . Normalmente, (λ) representa a taxa média de falha ou número médio de falhas por unidade de tempo.

Uma característica particular da distribuição de Poisson é que somente a ocorrência de um evento é contada, não sendo a sua não ocorrência. Alguns exemplos de aplicação desta distribuição são:

- número de relâmpados num período;
- número de chamadas telefônicas num período;
- número de falhas de um sistema;
- etc.

Matematicamente, a Distribuição de Poisson é representada pelas equações (B1) a (B3).

$$P_X(t) = \frac{(\lambda t)^x e^{-\lambda t}}{x!} \quad (B1)$$

$$E_X(t) = \lambda \cdot t \quad (B2)$$

$$\sigma_X(t) = \sqrt{\lambda \cdot t} \quad (B3)$$

onde:

$P_x(t)$ - probabilidade de x falhas no intervalo $(0,t)$;

x - número de falhas

$E_x(t)$ - valor esperado;

λ - taxa média de falha;

$\sigma_x(t)$ - desvio padrão.

B2- Distribuição Exponencial [51]

A distribuição exponencial é a mais conhecida e a mais utilizada das distribuições devido ao fato da taxa de falha (λ) ser constante. Este é o mesmo requisito usado para a distribuição de Poisson conforme visto em B1. Na verdade, a distribuição exponencial é um caso especial da distribuição de Poisson, quando se considera somente a probabilidade da primeira falha. Fazendo $x=0$ na equação (B1), obtém-se (B4):

$$P_0(t) = e^{-\lambda t} \quad (B4)$$

A partir de B4, obtém-se (B5) a (B8).

$$Q_0(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (B5)$$

$$f_0(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (B6)$$

$$E_0(t) = \frac{1}{\lambda} \quad (B7)$$

$$\sigma_0(t) = \frac{1}{\lambda} \quad (B8)$$

onde:

$f_0(t)$ - função densidade de probabilidade;

$Q_0(t)$ - função distribuição de probabilidade;

$P_0(t)$ - função sobrevivência;

$E_0(t)$ - valor esperado;

$\sigma_0(t)$ - desvio padrão.

Na prática, a distribuição exponencial tem um significado mais amplo do que aquele relativo à primeira falha, sendo extensivamente usada na análise de sistemas reparáveis nos quais seus componentes alternam-se entre estados de operação e de falha.

A distribuição exponencial também é freqüentemente utilizada nos problemas de confiabilidade de sistemas sem evidência substancial de que a taxa de falha de seus componentes seja de fato constante. Isto ocorre devido às seguintes justificativas:

- simplificação da modelagem matemática e conseqüentemente da análise do problema;
- os dados disponíveis são normalmente insuficientes para definir a distribuição correta;
- os valores das probabilidades dos estados limites independem da distribuição utilizada.

Uma particularidade importante da distribuição exponencial é que a probabilidade de falha em qualquer intervalo fixo de tempo é independente do tempo anterior de operação do sistema. Esta propriedade caracteriza esta distribuição como sendo do tipo sem memória.

B3- Técnicas de Markov [51]

As técnicas de Markov podem ser aplicadas na modelagem do comportamento aleatório de sistemas que variam discretamente ou continuamente com o tempo e espaço. Para que as técnicas de Markov possam ser aplicáveis, o comportamento do sistema deve ser caracterizado pela falta de memória, isto é, os estados futuros de um sistema são independentes de todos os estados passados, exceto aquele imediatamente precedente. Portanto, o comportamento aleatório

futuro de um sistema depende somente do estado em que se encontra no momento presente e não onde esteve no passado ou como chegou a este estado presente.

Em adição, para que estas técnicas sejam aplicáveis, o processo deve ser estacionário, às vezes chamado de homogêneo. Isto significa que a probabilidade de transição de um estado para o outro é a mesma, ou seja, estacionária em qualquer instante de tempo, passado ou futuro.

As técnicas de Markov são aplicáveis a sistemas que podem ser descritos por uma distribuição de probabilidade que é caracterizada por uma taxa de risco constante, isto é, distribuição de Poisson e exponencial, visto que somente taxas de risco constantes fazem com que a probabilidade de transição entre os estados permaneça constante no tempo.

No caso geral dos modelos de Markov, ambos espaço ou tempo podem ser discretos ou contínuos. No caso particular da avaliação de confiabilidade de sistemas, o espaço é representado por um conjunto de estados discretos identificáveis nos quais o sistema pode residir, ao passo que o tempo pode ser considerado discreto ou contínuo. O caso discreto, é geralmente conhecido como cadeia de Markov; o caso contínuo, conhecido como processo de Markov.

B4- Processos Contínuos de Markov [51]

Os problemas práticos estão normalmente associados a sistemas discretos no espaço e contínuos no tempo. De modo a facilitar a solução dos processos de Markov, é desejável a construção do diagrama de espaço de estado incluindo as respectivas taxas de transição. Todos os estados relevantes nos quais o sistema pode residir devem ser incluídos em tais diagramas em conjunto com todas as maneiras conhecidas de transição entre os estados.

O diagrama de espaço de estados é um grafo cujos nós representam os estados e os seus ramos as transições de um estado para outro. A cada nó é associada uma probabilidade de permanência naquele estado e a cada ramo é associada uma probabilidade de transição entre os estados por ele unidos.

A equação diferencial que rege o sistema está descrita em (B9). A lei de formação da matriz A encontra-se em (B10) e (B11).

$$\dot{P}(t) = P(t) \cdot A \quad (\text{B9})$$

$$A_{ij} = \lambda_{ij} \quad (\text{B10})$$

$$A_{ii} = -\sum \lambda_{ij} \quad \text{para } i \neq j \quad (\text{B11})$$

onde:

$P(t)$ - vetor das probabilidades dos estados ao fim do tempo (t);

$\dot{P}(t)$ - vetor das primeiras derivadas das probabilidades dos estados;

A - matriz de coeficientes constantes do sistema de equações matriciais;

A_{ij} e A_{ii} - elementos da matriz A ;

λ_{ij} - taxas de transição entre os estados.

Na fase estacionária, ou seja, quando $t \rightarrow \infty$, a solução de (B9) encontra-se descrita em (B12).

$$P_{(e)} = O_m \cdot A_m^{-1} \quad (\text{B12})$$

onde:

$P_{(e)}$ - vetor das probabilidades dos estados na região estacionária;

A_m - matriz A original com o numeral 1 nos elementos da coluna i ;

O_m - vetor linha, com o numeral 1 na coluna i e zero nas demais colunas.

APÊNDICE C

CARACTERÍSTICAS DO PROGRAMA ANAFAS

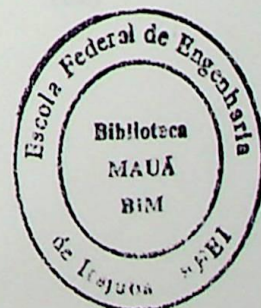
C1 Introdução

O ANAFAS [54] é um programa para a solução de diversos tipos e composições de faltas em sistemas elétricos de grande porte, tendo como principais características funcionais:

- grande capacidade, permitindo a solução direta de curtos-circuitos em sistemas elétricos, aliada à alta eficiência computacional, devido ao uso de técnicas de esparsidade (matrizes e vetores esparsos) resultando na execução rápida, independentemente do porte do sistema elétrico;
- permite modelagem mais fiel do sistema elétrico, com possibilidade de representação do carregamento pré-falta, representação de equipamentos “shunt”, capacitâncias de linhas, defasamento de transformadores e “tap” dos transformadores fora da posição nominal;
- permite a modelagem de faltas compostas (simultâneas), aplicadas sobre barras e/ou pontos intermediários de linhas de transmissão; modelagem de diversos tipos de defeito, incluindo curto- circuitos “shunt” e série, com ou sem impedância de falta; e de aberturas (interrupção) de circuito.

C2 Algoritmos de Solução

A metodologia utilizada combina a representação em coordenadas de fase para o sistema balanceado com a representação em coordenadas de seqüência para a parte desbalanceada do sistema (defeito). Esta combinação permite a representação acurada de faltas assimétricas simultâneas em um algoritmo de solução geral, sem comprometimento da eficiência computacional.



A rede é modelada por duas matrizes de admitâncias de barra esparsas, uma assimétrica com estrutura simétrica para a seqüência positiva, sendo que a de seqüência negativa é a transposta desta, e uma simétrica para a seqüência zero.

As duas matrizes esparsas de barras possuem estrutura única e são fatoradas simultaneamente, sendo que na fatoração da assimétrica de seqüência positiva é utilizado um esquema misto, no qual os eixos simétricos são fatorados por álgebra simétrica e os assimétricos por álgebra assimétrica.

O algoritmo de solução geral, para qualquer situação de falta, segue os seguintes passos:

1. construção de equivalentes em coordenadas de seqüência referentes às barras envolvidas na falta;
2. alterações balanceadas nos equivalentes (criação de barras fictícias devido às aberturas e às faltas intermediárias);
3. construção de equivalente em coordenadas de fase contendo somente as barras afetadas pela falta;
4. solução do sistema equivalente em coordenadas de fase;
5. transformação novamente para os equivalentes em coordenadas de seqüência, obtendo injeções correspondentes às correntes de curto;
6. obtenção, a partir das injeções de corrente, das tensões pós-falta em todas as barras do desejadas do sistema.

Como consequência da utilização de equivalentes de dimensões reduzidas e de técnicas de esparsidade, o tempo total gasto na simulação de uma falta é quase independente do porte do sistema, dependendo basicamente somente do número de barras em que se deseja calcular as grandezas pós-falta.

As transformações de coordenadas de fase-seqüência e seqüência-fase que são feitas pelo programa, segundo as expressões C1 e C2 e C3.

$$V_{abc} = T V_{012} \quad (C1)$$

$$V_{012} = T^{-1} V_{abc} \quad (C2)$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (C3)$$

onde:

V_{abc} - vetor de tensões ou correntes em coordenadas de fase (a,b,c);

V_{012} - vetor de tensões ou corrente em coordenadas de seqüência (0,1,2);

T- matriz de transformação.

C3 Modelagem do Sistema

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

- dados da barra: identificação, tensão-base, tensão pré-falta;
- dados de circuito: identificação (número de barras terminais, número de circuitos); tipo de circuito, resistência e reatância de seqüência positiva e zero em %;
- dados de mútua: identificação dos circuitos acoplados, resistência e reatância de acoplamento em %.

O ANAFAS permite a classificação dos ramos de circuito em 7 tipos, quais sejam: linha, transformador (ramo série e ramo shunt), gerador, capacitor série, reator de linha, reator/capacitor de barra, carga (modelada como impedância constante). A tensão pré-falta é determinada através de um estudo de fluxo de potência, utilizando a mesma rede de seqüência positiva.

C4 Capacidade

O ANAFAS tem grande capacidade permitindo a modelagem completa e detalhada de grandes sistemas. A versão atual do programa permite modelar: 3000 barras, 5000 circuitos (até 2000 transformadores e até 1500 geradores), 60 circuitos por barra, 1500 acoplamentos (impedâncias mútuas).

C5 Tipos de Falhas Simuladas

O ANAFAS suporta a modelagem dos seguintes tipos de defeito:

- curto-circuito “shunt” em barras e em pontos intermediários de linhas de transmissão e distribuição;
- curto-circuito série (aplicável em capacitores série);
- abertura de fases;
- remoção de circuitos.

As simulações de curtos-circuitos “shunt” podem ser realizadas através de impedâncias de falta diferentes de zero (curto-circuito sólido) entre fases ou entre fase (s) e terra. Os curtos-circuitos “shunt” podem ser aplicados em barras e em pontos intermediários de linhas de transmissão/distribuição.

No caso de aplicação de defeitos em pontos intermediários, a localização da falta é definida como um percentual do circuito, em intervalos ajustáveis de 1 a 50%, a partir da barra definida como barra de origem (barra “de” no banco de dados) na especificação de falta. A barra fictícia criada para aplicação da falta é designada como “barra interna” e só existirá durante a simulação da falta.

Os seguintes tipos de curtos-circuitos “shunt” podem ser simulados com e sem impedância de falta:

- fase-terra (fase A para a terra);
- fase-fase (fases B e C);
- fase-fase-terra (fases B e C para a terra);
- trifásico.

119	126	1L	73	286	188	1031	0
119	126	2L	73	286	188	1031	0
0	122	1G	41	571	-151	2008EQVL	0
122	124	1L	69	740	532	3042	0
122	124	2L	69	740	532	3042	0
0	123	1T9999999999999999			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	2H9999999999999999			0	16667	0
0	124	3H9999999999999999			0	16667	0
124	125	1T	0	474	0	474	0
124	144	1T	0	481	0	481	0
0	125	1T9999999999999999			0	1660	0
125	126	1T	0	-49	0	-49	0
126	144	1T	0	-57	0	-57	0
0	129	1 9999999999999999			0	998	0
0	144	1T9999999999999999			0	1637	0
0	119	1 9999999999999999			45	1514	0
0	119	2 9999999999999999			45	1513	0
0	701	1G	0	337299999999999999G1			0
0	702	1G	0	337299999999999999G2			0
119	701	1T	45	151499999999999999			0
119	702	1T	45	151399999999999999			0
9999							
99							

D3 Dados das Linhas de Transmissão e Sistema de Proteção

De	Para	C	Código	Tensão (kV)	Extensão (km)	Proteção Alcance	Atuação (ms)	Eventos 3F (*)	Eventos FT (*)	Eventos FF (*)	Eventos FFT (*)
1	2	1	0001	138	107	Distância 90%	150,00	0,11920	2,17540	0,17880	0,50660
						2ª Zona	550,00				
1	2	2	0001	138	107	Distância 90%	150,00	0,11920	2,17540	0,17880	0,50660
						2ª Zona	550,00				
2	40	1	0002	138	67	Distância 90%	150,00	0,11920	2,17540	0,17880	0,50660
						2ª Zona	550,00				
2	40	2	0002	138	67	Distância 90%	150,00	0,11920	2,17540	0,17880	0,50660
						2ª Zona	550,00				
36	48	1	0003	138	38	Distância 90%	150,00	0,11920	2,17540	0,17880	0,50660
						2ª Zona	550,00				
36	94	1	0004	138	21	Distância 90%	150,00	0,11920	2,17540	0,17880	0,50660
						2ª Zona	550,00				
36	94	2	0004	138	21	Distância 90%	150,00	0,11920	2,17540	0,17880	0,50660
						2ª Zona	550,00				
36	138	1	0005	138	20	Distância 90%	150,00	0,11920	2,17540	0,17880	0,50660
						2ª Zona	550,00				
40	41	1	0006	138	19	Sobrecorrente	300,00	0,11920	2,17540	0,17880	0,50660
40	41	2	0006	138	19	Sobrecorrente	300,00	0,11920	2,17540	0,17880	0,50660
40	48	1	0008	138	38	Distância 90%	150,00	0,11920	2,17540	0,17880	0,50660
						2ª Zona	550,00				
40	138	1	0007	138	45	Distância 90%	150,00	0,11920	2,17540	0,17880	0,50660
						2ª Zona	550,00				
48	69	1	0009	138	85	Distância 90%	150,00	0,11920	2,17540	0,17880	0,50660
						2ª Zona	550,00				
68	69	1	0010	138	66	Distância 90%	150,00	0,11920	2,17540	0,17880	0,50660
						2ª Zona	550,00				
68	75	1	0011	138	50	Distância 90%	150,00	0,11920	2,17540	0,17880	0,50660
						2ª Zona	550,00				
68	75	2	0011	138	50	Distância 90%	150,00	0,11920	2,17540	0,17880	0,50660
						2ª Zona	550,00				
68	94	1	0012	138	55	Distância 90%	150,00	0,11920	2,17540	0,17880	0,50660
						2ª Zona	550,00				
68	94	2	0012	138	55	Distância 90%	150,00	0,11920	2,17540	0,17880	0,50660
						2ª Zona	550,00				
68	113	1	0013	138	34	Sobrecorrente	300,00	0,11920	2,17540	0,17880	0,50660
68	113	2	0013	138	34	Sobrecorrente	300,00	0,11920	2,17540	0,17880	0,50660
68	180	1	0014	138	30	Distância 90%	150,00	0,11920	2,17540	0,17880	0,50660
						2ª Zona	550,00				

(*) Taxas de faltas (eventos/100 km/ano)

De	Para	C	Código	Tensão (kV)	Extensão (km)	Proteção Alcance	Atuação (ms)	Eventos 3F (*)	Eventos FT (*)	Eventos FF (*)	Eventos FFT (*)
69	180	1	0015	138	36	Distância 90%	150,00	0,11920	2,17540	0,17880	0,50660
						2ª Zona	550,00				
69	609	1	0016	138	66	Distância 90%	150,00	0,11920	2,17540	0,17880	0,50660
						2ª Zona	550,00				
74	76	1	0025	230	65	Distância 100%	110,00	0,02520	1,34400	0,02520	0,28560
75	77	1	0017	138	90	Distância 90%	150,00	0,11920	2,17540	0,17880	0,50660
						2ª Zona	550,00				
76	129	1	0026	230	60	Distância 100%	110,00	0,02520	1,34400	0,02520	0,28560
77	609	1	0018	138	49	Distância 90%	150,00	0,11920	2,17540	0,17880	0,50660
						2ª Zona	550,00				
94	95	1	0019	138	8	Sobrecorrente	300,00	0,11920	2,17540	0,17880	0,50660
94	95	2	0019	138	8	Sobrecorrente	300,00	0,11920	2,17540	0,17880	0,50660
94	126	1	0020	138	4	Distância 100%	110,00	0,11920	2,17540	0,17880	0,50660
94	126	2	0020	138	4	Distância 100%	110,00	0,11920	2,17540	0,17880	0,50660
94	126	3	0020	138	4	Distância 100%	110,00	0,11920	2,17540	0,17880	0,50660
94	126	4	0020	138	4	Distância 100%	110,00	0,11920	2,17540	0,17880	0,50660
110	126	1	0022	138	24	Sobrecorrente	300,00	0,11920	2,17540	0,17880	0,50660
111	126	1	0021	138	24	Sobrecorrente	300,00	0,11920	2,17540	0,17880	0,50660
119	126	1	0023	138	12	Distância 90%	150,00	0,11920	2,17540	0,17880	0,50660
						2ª Zona	550,00				
119	126	2	0023	138	12	Distância 90%	150,00	0,11920	2,17540	0,17880	0,50660
						2ª Zona	550,00				
122	124	1	0024	345	224	Distância 100%	83,00	0,02310	2,10210	0,02310	0,16170
122	124	2	0024	345	224	Distância 100%	83,00	0,02310	2,10210	0,02310	0,16170

(*) Taxas de faltas (eventos/100 km/ano)

DEZEMBRO / 2000

ESTE DOCUMENTO CONTÉM

UM TOTAL DE 146 PÁGINAS