

TESE

1062

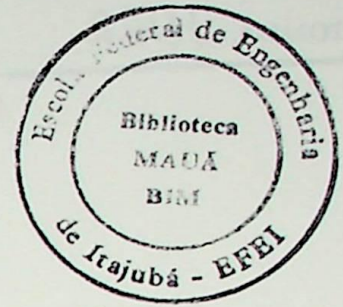
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

*Análise Computacional de "Voltage Sags"
em Consumidores com Cargas Sensíveis*

Júlia Cristina Caminha Noronha

ITAJUBÁ, ABRIL - 1999

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
EFEI



**ANÁLISE COMPUTACIONAL DE “VOLTAGE SAGS”
EM CONSUMIDORES COM CARGAS SENSÍVEIS**

JÚLIA CRISTINA CAMINHA NORONHA

Dissertação submetida ao
INSTITUTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA EFEI
como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em ciências em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Héctor Arango
Co-Orientadores: Prof. Dr. José Policarpo Gonçalves de Abreu
Engº MSc José Maria de Carvalho Filho

**ABRIL DE 1999
ITAJUBÁ - MG - BRASIL**

Agradecimentos

À Deus, por sua infinita presença e luz.

Ao meu esposo José Márcio,
companheiro de todos os momentos,
pela participação na conquista
da realização de mais um sonho.

Aos meus filhos, Cristiana, Juliana e Márcio,
pelo carinho, incentivo e compreensão.

Aos meus pais, Amadeu e Júlia,
que me deram vida, amor, exemplo e inspiração.

À colega Lêda Maria Lisbôa Rizzi Osório (in memoriam),
por me ensinar a valorizar cada dia de vida.

Agradecimentos

- Aos professores Dr. Héctor Arango e Dr. José Policarpo Gonçalves de Abreu, e ao MSc. engenheiro José Maria de Carvalho Filho, pela confiança depositada, a competente orientação e as valiosas críticas;
- À CAPES pelo suporte financeiro;
- À JP Eletric Engenharia e Representações Ltda. – Itajubá, Minas Gerais, Brasil, através de seu diretor, MSc. professor Ademir Carnevalli Guimarães, pela oportunidade de participar no desenvolvimento de projetos de consultoria de alto nível e alicerçar os conhecimentos aqui registrados. Também gostaria de agradecer a todos os clientes com os quais tive o prazer de trabalhar, cujas experiências e conhecimentos serviram de subsídio para o desenvolvimento da estrutura do presente trabalho.

*As torres que se elevam para as nuvens,
os palácios altivos, as igrejas majestosas,
o próprio globo imenso com tudo o que contém,
hão de sumir-se sem deixar vestígios.
Somos feitos da matéria dos sonhos;
nossa vida pequenina é cercada pelo sono.*

WILLIAM SHAKESPEARE

(Tempestade)

O objetivo deste trabalho é apresentar uma ferramenta computacional destinada à avaliação do impacto das *Depressões de Tensão* em instalações consumidoras com cargas sensíveis, durante a ocorrência de curtos-circuitos nas diversas linhas do sistema de transmissão e distribuição.

Esta metodologia probabilística associa o cálculo de faltas nas linhas do sistema e suas respectivas taxas de faltas com as características dos dispositivos de proteção para estimar a magnitude, duração e frequência de depressões de tensão em cada consumidor.

Ferramentas convencionais de análise de faltas são utilizadas para gerar as informações de curto-circuito requeridas pela análise de depressões de tensão. Os resultados são importados por rotinas especificamente desenvolvidas e armazenados no banco de dados da aplicação. O *software* aplicativo desenvolvido foi projetado para ser utilizado com os programas *ANAFAS* do CEPEL ou *CCINT* da COPEL.

Os índices de desempenho do sistema calculados contribuem para uma melhor análise de alternativas de investimentos, baseada naturalmente numa relação custo-benefício.

Para validar esta ferramenta, casos testes são apresentados e discutidos.

The aim of this work is to present a computational tool to evaluate remote fault-clearing voltage sag impact upon sensitive load customers plants.

This probabilistic methodology associates unbalanced fault calculation and lines fault rates data with fault-clearing device characteristics to estimate voltage sag magnitude, duration and frequency seen by every load busbar.

Conventional fault analysis tools have been used to generate the short circuit data required for the voltage sag analysis. The results are imported to the application database by specific routines. The developed tool is designed for use with ANAFAS or CCINT programs.

The system performance indices calculated can be used to obtain a better investment analysis, naturally based on a benefit-cost relation.

Case studies are presented and discussed.

Agradecimentos	2-31
Resumo	2-31
Abstract	2-31
Capítulo 1. Introdução	1-1
1.1 Considerações Gerais	1-1
1.2 Estrutura da Dissertação	1-11
Capítulo 2. Depressões de Tensão	2-1
2.1 A Importância da Qualidade da Energia Elétrica	2-1
2.2 Termos e Definições	2-4
2.2.1 <i>Qualidade da Energia Elétrica</i>	2-5
2.2.2 <i>Problema de Qualidade da Energia Elétrica</i>	2-5
2.2.3 <i>A Tensão como Padrão de Qualidade da Energia Elétrica</i>	2-6
2.2.4 <i>Principais Distúrbios Associados à Qualidade da Energia Elétrica</i>	2-7
2.3 Depressões de Tensão	2-9
2.4 Principais Causas das Depressões de Tensão	2-10
2.5 O Processo de Eliminação de Faltas	2-12
2.6 Efeitos das Depressões de Tensão	2-14
2.7 Sensibilidade de Equipamentos	2-15
2.8 Determinação das Características das Depressões de Tensão	2-16
2.8.1 <i>Magnitude de Depressões de Tensão e Área de Vulnerabilidade</i>	2-17

2.8.2	<i>Duração de Depressões de Tensão</i>	2-21
2.8.3	<i>Freqüência de Depressões de Tensão</i>	2-22
2.8.4	<i>Formas de Onda de Depressões de Tensão</i>	2-27
2.8.5	<i>Efeito de Conexões de Transformadores</i>	2-28
2.8.6	<i>Efeito da Tensão Pré-Falta</i>	2-29
2.9	Exemplos	2-31
2.9.1	<i>Exemplo de Sistema Radial de Distribuição</i>	2-31
2.9.2	<i>Exemplo de Sistema de Transmissão</i>	2-34
2.10	Contabilização de Eventos de Depressões de Tensão	2-37
2.10.1	<i>Número de Fases</i>	2-37
2.10.2	<i>Contabilização de Religamentos</i>	2-38
2.10.3	<i>Contabilização de Duração de Depressões de Tensão</i>	2-39
2.11	Coordenação de Cargas Sensíveis com as Características de Depressões de Tensão	2-40
2.11.1	<i>Elaboração de Gráficos de Coordenação de Depressões de Tensão</i>	2-41
2.11.2	<i>Traçado das Características de Depressão de Tensão do Sistema</i>	2-41
2.11.3	<i>Inclusão de Sensibilidade de Equipamento Retangular</i>	2-44
2.12	Conclusões	2-45
 Capítulo 3. Implementação Computacional		3-1
3.1	Introdução	3-1
3.2	O Estado da Arte no Desenvolvimento de Aplicativos para Análise de Depressões de Tensão	3-2
3.2.1	<i>Análise de Depressões de Tensão em Sistemas de Distribuição</i>	3-3
3.2.2	<i>Serviço de Análise de Depressões de Tensão nos Consumidores</i>	3-6
3.2.3	<i>Power Quality ToolboxTM – Módulo de Análise de Depressões de Tensão</i>	3-9
3.3	Metodologia Utilizada	3-11
3.3.1	<i>Funções de Distribuição e Densidade de Probabilidade das Tensões nas Barras Monitoradas</i>	3-13
3.3.2	<i>Representação por Espaço de Estados</i>	3-15
3.3.3	<i>O Método de Freqüência e Duração</i>	3-18
3.4	A Ferramenta Computacional Desenvolvida	3-25
3.4.1	<i>Arquitetura Tecnológica</i>	3-28
3.4.2	<i>Arquitetura de Dados</i>	3-28
3.4.3	<i>Arquitetura da Aplicação</i>	3-33
3.4.3.1	<i>Criação de um Banco de Dados</i>	3-33
3.4.3.2	<i>Abertura de um Banco de Dados</i>	3-35

3.4.3.3	<i>Visualização das Tabelas de um Banco de Dados</i>	3-36
3.4.3.4	<i>Gráficos de Tensão num Consumidor</i>	3-38
3.4.3.5	<i>Estudo de Depressões de Tensão</i>	3-42
3.4.3.6	<i>Estudo de Sensibilidade de Cargas</i>	3-48
3.3	Conclusões	3-54

Capítulo 4. Exemplos de Aplicação - Resultados e Discussões 4-1

4.1	Introdução	4-1
4.2	Exemplo de Sistema Radial de Distribuição	4-1
4.3	Exemplo de Sistema de Transmissão	4-11
4.3.1	<i>Análise de Depressões de Tensão na Barra 41</i>	4-18
4.3.2	<i>Análise de Depressões de Tensão na Barra 95</i>	4-32
4.3.3	<i>Análise de Depressões de Tensão na Barra 113</i>	4-36
4.3.4	<i>Análise de Depressões de Tensão na Barra 119</i>	4-40
4.3.5	<i>Análise Comparativa de Depressões de Tensão</i>	4-44
4.3.6	<i>Análise de Sensibilidade de Cargas à Depressões de Tensão</i>	4-46
4.4	Conclusões	4-53

Capítulo 5. Conclusões 5-1

Referências Bibliográficas

Introdução

1. Prefácio

Este capítulo apresenta uma visão geral dos objetivos e alcances deste trabalho e uma descrição sintetizada da estrutura da dissertação e seu conteúdo por Capítulo.

1.1 Considerações Gerais

O conceito “Qualidade de Energia Elétrica” está vinculado a um conjunto de alterações que podem ocorrer, devido a inúmeros fatores, no fornecimento de energia elétrica aos consumidores.

Em geral, os fenômenos envolvendo a qualidade da energia afetam a tensão de suprimento na forma de um ou mais dos seguintes distúrbios:

- Variações instantâneas de tensão, englobando surtos, transitórios oscilatórios e cortes na tensão;
- Variações momentâneas de tensão, compreendendo interrupções, subtensões e sobretensões momentâneas;
- Variações momentâneas de frequência;
- Distúrbios “quase-permanentes” ocasionados pela operação de cargas não lineares, incluindo distorção harmônica, flutuação e desequilíbrio de tensão.

Estes distúrbios podem originar-se e/ou manifestar-se nos diversos pontos do sistema elétrico de transmissão e distribuição ou nas instalações dos consumidores.

A interligação dos sistemas elétricos aumenta a severidade do impacto dos distúrbios.

Com a proliferação das cargas elétricas de alto desempenho, e sua concomitante sensibilidade a distúrbios, fica enfatizada a importância dos estudos da qualidade da energia para as empresas de energia elétrica e seus consumidores.

O estudo da qualidade da energia em sistemas elétricos engloba a análise, o diagnóstico, a proposição de possíveis soluções para os problemas identificados e sua avaliação técnico-econômica. Além das instalações em operação, a questão da qualidade deve ser considerada na fase de planejamento de novas instalações ou expansão de instalações existentes.

A avaliação de soluções alternativas para problemas de Qualidade da Energia Elétrica envolve aspectos técnicos, econômicos e políticos, além de questões relativas à divisão de custos e responsabilidades entre consumidores, concessionárias e fabricantes de equipamentos. No contexto do novo modelo do setor elétrico, a atuação do Estado como agente fiscalizador dos serviços e indutor do crescimento se reveste de particular importância. Para alcançar um estágio qualitativo de compatibilidade entre a energia oferecida pelos sistemas supridores e os requisitos operacionais dos equipamentos empregados nos modernos processos industriais, é necessário o esforço conjunto de todas as partes envolvidas, devido à sua interdependência, pois que os problemas específicos podem ser oriundos de qualquer delas.

Em resposta ao crescente interesse pela Qualidade da Energia Elétrica, as empresas de energia elétrica estão desenvolvendo programas, para ajudá-las a responder às preocupações de seus consumidores. A filosofia desses programas varia de reativa, onde a empresa de energia elétrica responde às reclamações de consumidores, à filosofia proativa, na qual a empresa de energia elétrica está envolvida na educação do consumidor e na promoção de serviços que podem auxiliar no desenvolvimento de soluções para problemas de Qualidade da Energia Elétrica.

Dentre os distúrbios da Qualidade da Energia Elétrica, a *Depressão de Tensão*, *Subtensão Momentânea* ou *Afundamento Momentâneo de Tensão*, também conhecida como *Voltage Sag* ou *Dip*, constitui um grande desafio a ser enfrentado pelas empresas de energia, consumidores e fornecedores de equipamentos, devido ao seu expressivo alcance e impacto econômico.

As avançadas tecnologias empregadas nas instalações industriais, incluem a utilização maciça de processos controlados eletronicamente e dispositivos baseados em eletrônica de potência, que constituem cargas sensíveis aos distúrbios de depressão de tensão, inevitáveis no sistema elétrico e cuja principal causa é a ocorrência de faltas nas instalações dos consumidores ou em qualquer linha do sistema de transmissão ou distribuição, mesmo as localizadas em pontos remotos.

Os principais efeitos das depressões de tensão sobre os equipamentos industriais são a disfunção de *Controladores Lógicos Programáveis (PLC's)*, a perda de programação em microprocessadores e *PLC's*, a atuação dos dispositivos de proteção de *Acionamentos a Velocidade Variável (Adjustable-Speed Drives - ASD's)*, o desatracamento das bobinas de contadores e relés auxiliares pertencentes ao sistema de controle de motores e a atuação indevida de relés de subtensão.

Ocorrências de depressões de tensão, combinadas com a sensibilidade dos equipamentos modernos, têm resultado em um número expressivo de interrupções de processos industriais. Como consequência, os índices de produtividade preconizados pelos projetos industriais freqüentemente não têm sido atingidos, seja quantitativa, seja qualitativamente, contabilizando perdas da ordem de milhões de dólares anuais para os consumidores.

Portanto, torna-se premente o estabelecimento de estratégias para a análise e a prevenção dos distúrbios de depressão de tensão, em busca de soluções efetivas e integradas para estes complexos problemas. O desenvolvimento de soluções para mitigar ou minimizar o impacto das depressões de tensão nos consumidores implica na análise das causas perturbadoras e dos efeitos do distúrbio. Deste modo, deve-se

atuar em dois sentidos, ou seja, analisar medidas para minimizar as características de magnitude, duração e frequência de ocorrências das depressões de tensão e reduzir o nível de sensibilidade dos equipamentos que sofrem os efeitos do distúrbio.

Dentro deste contexto, este trabalho tem por objetivo principal apresentar o sistema de informações **VISAGE - Voltage Sag Estimation**, uma ferramenta computacional destinada à análise de depressões de tensão devido à ocorrência de faltas nas diversas linhas de transmissão e distribuição de sistemas elétricos com cargas sensíveis.

A análise de depressões de tensão tem o objetivo de determinar as características dos distúrbios de depressão de tensão que possam ocorrer num sistema elétrico, possibilitando a avaliação do desempenho da operação deste sistema e do impacto em seus consumidores.

Possibilita adicionalmente, analisar o desempenho dos componentes do sistema e oferece a oportunidade de avaliar configurações alternativas, visando minimizar as características das depressões de tensão.

As estimativas de incidências de depressões de tensão nas instalações dos consumidores constituem importantes subsídios na especificação de equipamentos para processos críticos e na avaliação de investimentos alternativos visando minimizar os problemas decorrentes da sensibilidade dos equipamentos/processos aos distúrbios de depressão de tensão.

A metodologia empregada na implementação computacional do processo de previsão das características das depressões de tensão em consumidores de sistemas de fornecimento de energia elétrica, integrará um novo capítulo na próxima revisão do *IEEE Standard 493 – “IEEE Recommended Practice for Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems”* [1] e é baseada no trabalho *“Proposed Chapter 9 for Predicting Voltage Sags (Dips) in Revision to IEEE Std 493, The Gold Book”* [2].

Esta metodologia probabilística associa o cálculo de faltas ao longo das linhas do sistema e suas respectivas taxas de falta com as características dos dispositivos de proteção contra faltas nestas linhas, para estimar a magnitude, duração e frequência de depressões de tensão em cada consumidor.

Um programa de análise de faltas é utilizado no processo de aplicação de faltas em vários pontos ao longo das linhas do sistema, para a obtenção das magnitudes de tensão resultantes no ponto de acoplamento das instalações consumidoras com cargas sensíveis.

Para o *software* aplicativo desenvolvido, foram desenvolvidas rotinas específicas destinadas à importação dessas informações, à partir do processamento dos programas *ANAFAS*, do *CEPEL*, ou *CCINT*, da *COPEL*. Podem ser aplicadas faltas trifásicas, fase-terra, fase-fase-terra e fase-fase. O sistema não armazena faltas série ou faltas compostas (simultâneas). São armazenadas na base de dados do sistema:

- As informações da topologia do sistema utilizado no processamento do programa de curto-circuito (dados de barra, circuito e mútuas);
- As informações de curto-circuito deslizante, ou seja, as tensões fase-fase (V_{ab} , V_{bc} e V_{ca}), e fase-neutro (V_{an} , V_{bn} e V_{cn}) nas barras consumidoras, correspondentes a cada tipo de falta aplicada nos vários pontos ao longo de cada linha do sistema.

A evolução da tensão fase-fase ou fase-neutro de um consumidor referente à aplicação de um determinado tipo de falta ao longo de uma das linhas do sistema pode ser visualizada em gráficos como o da Figura 1-1.

Estes gráficos apresentam as tensões de cada fase, a média das três fases, e o valor mínimo entre as três fases e permitem a identificação dos trechos das linhas onde a ocorrência de faltas ocasiona valores significativos de magnitudes de depressões de tensão no consumidor, constituindo áreas vulneráveis do sistema.

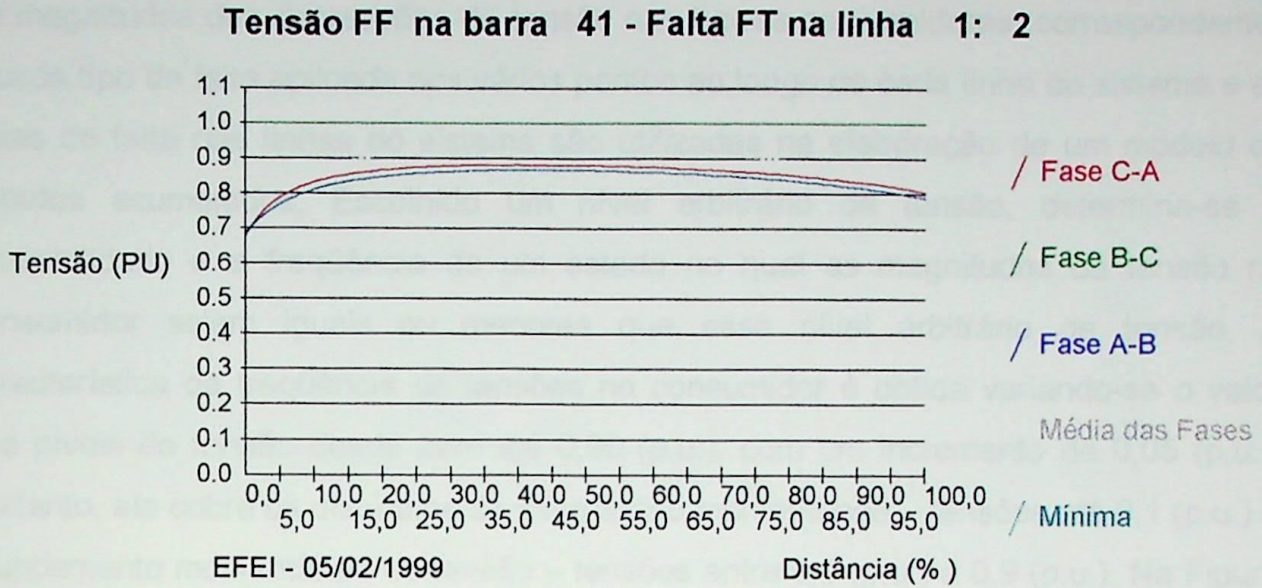


Figura 1-1 Evolução da tensão fase-fase no consumidor para faltas fase-terra aplicadas ao longo de uma linha

A distribuição por frequência das tensões fase-fase ou fase-neutro num consumidor, resultantes da aplicação de um tipo de falta ao longo de uma das linhas do sistema pode ser exibida num gráfico como o da Figura 1-2.

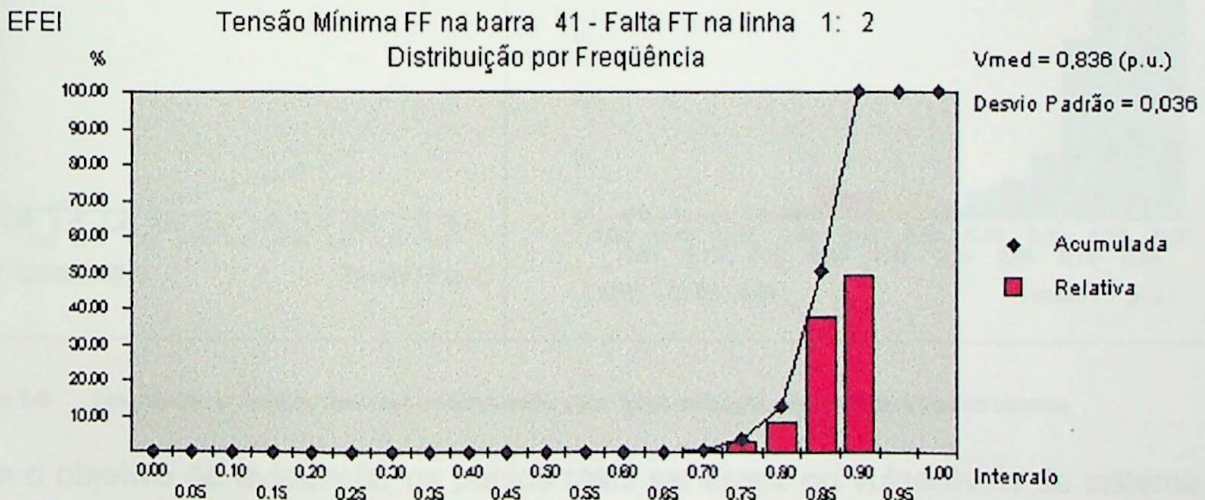


Figura 1-2 Distribuição da tensão mínima fase-fase no consumidor para faltas fase-terra aplicadas ao longo de uma linha

Considerando a riqueza das informações processadas, são mostrados todos os valores de tensão, e não apenas aqueles caracterizados como depressões de tensão.

As magnitudes das depressões de tensão nas barras consumidoras, correspondentes a cada tipo de falta aplicada nos vários pontos ao longo de cada linha do sistema e as taxas de falta nas linhas do sistema são utilizadas na elaboração de um modelo de estados acumulados. Escolhido um nível arbitrário de tensão, determina-se a probabilidade e a frequência de um estado no qual as magnitudes da tensão no consumidor sejam iguais ou menores que esse nível arbitrário de tensão. A característica da frequência de tensões no consumidor é obtida variando-se o valor dos níveis de tensão desde zero até 0,90 (p.u.), com um incremento de 0,05 (p.u.). Portanto, ela cobre os distúrbios de interrupção momentânea – tensões até 0,1 (p.u.) e afundamento momentâneo de tensão – tensões entre 0,1 (p.u.) e 0,9 (p.u.). Na Figura 1-3 são mostrados exemplos de gráficos da frequência de tensões, ou seja, o total estimado de eventos numa barra consumidora para cada nível de tensão.

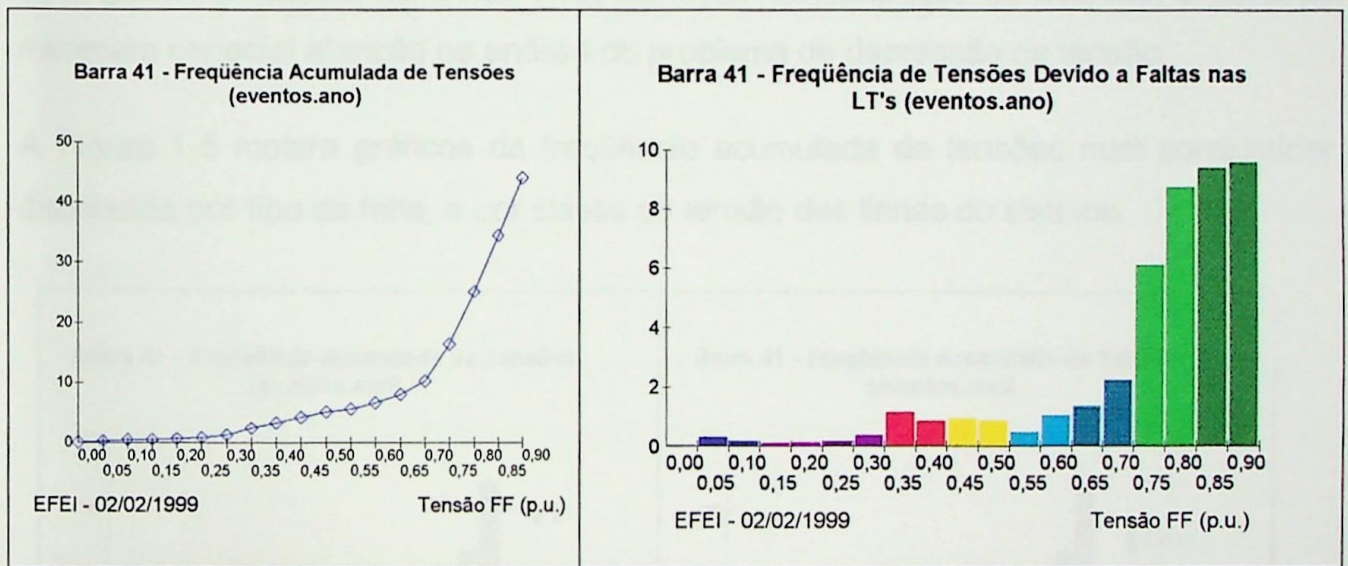


Figura 1-3 Frequência de tensões fase-fase no consumidor para faltas aplicadas ao longo das linhas do sistema

Com o objetivo de evidenciar os pontos mais sensíveis ou vulneráveis do sistema, as frequências das tensões nos consumidores são detalhadas de forma a exibir a distribuição do total de eventos por linha do sistema, por tipo de falta, e por classe de tensão das linhas do sistema.

O gráfico da Figura 1-4 mostra a frequência de ocorrências de tensões até 0,90 (p.u.) num consumidor, devido à aplicação de faltas nas diversas linhas do sistema.

Barra 41 - Freqüência de Voltage Sags Devido a Faltas nas LT's (eventos.ano)

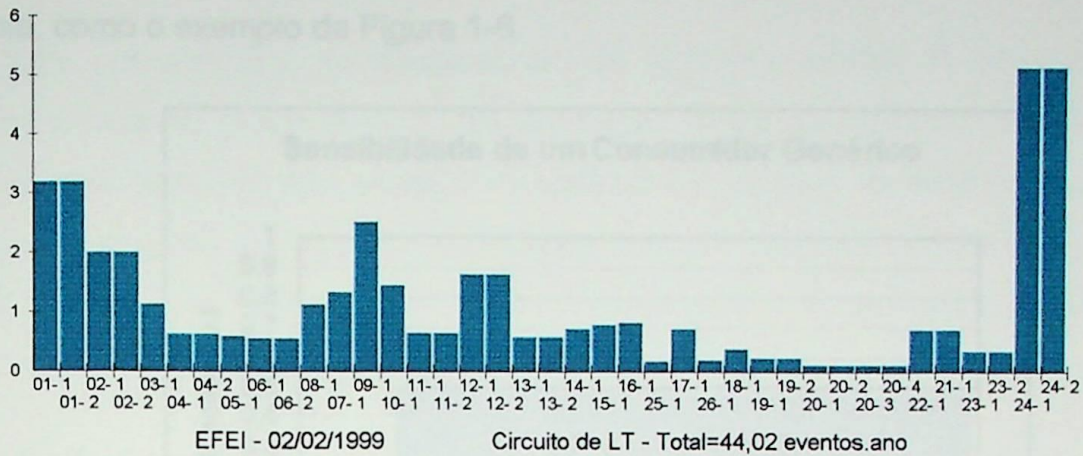


Figura 1-4 Freqüência de tensões fase-fase até 0,90 (p.u.) no consumidor para faltas aplicadas ao longo de cada linha do sistema

Este gráfico evidencia as linhas onde há maior concentração de eventos, e portanto merecem especial atenção na análise do problema de depressão de tensão.

A Figura 1-5 mostra gráficos da freqüência acumulada de tensões num consumidor distribuída por tipo de falta, e por classe de tensão das linhas do sistema.

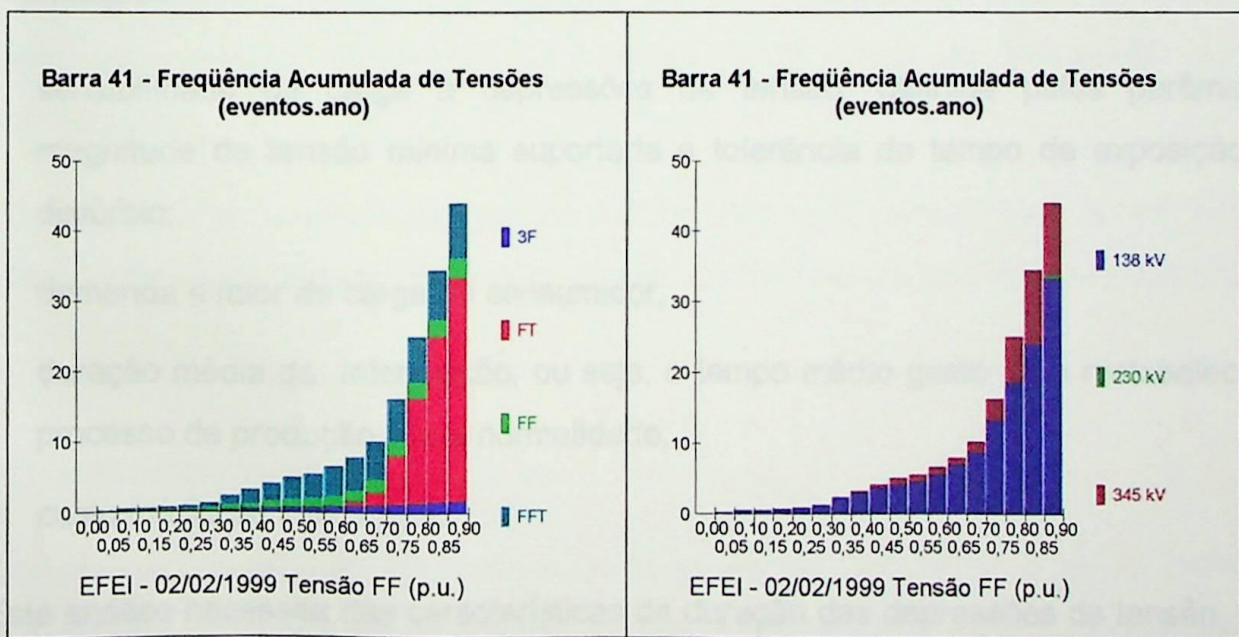


Figura 1-5 Freqüência acumulada de tensões fase-fase no consumidor distribuída por tipo de falta e por classe de tensão do sistema

A representação de uma carga sensível a depressões de tensão é fornecida através de uma curva num sistema cartesiano tensão *versus* tempo, indicando seus limites de tolerância, como o exemplo da Figura 1-6.

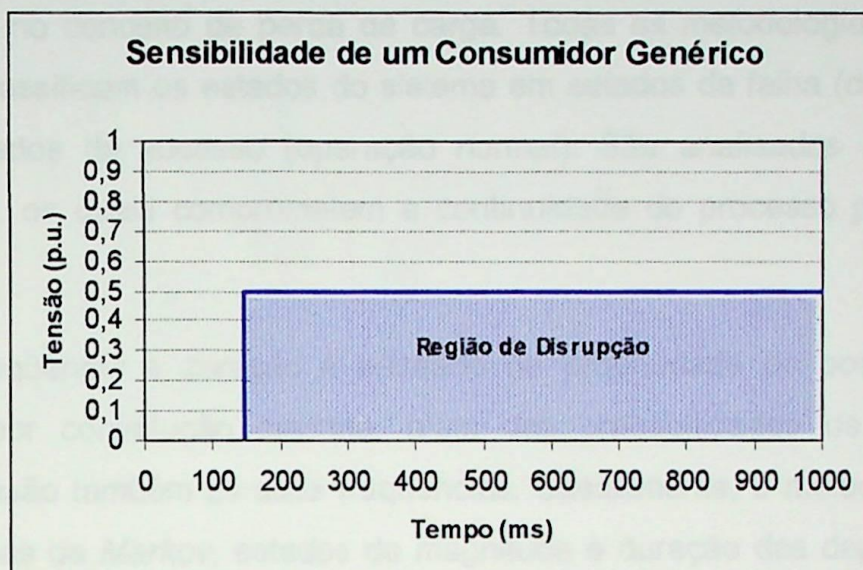


Figura 1-6 Sensibilidade de um Consumidor Genérico

Para a análise de uma carga específica no consumidor, são necessárias as seguintes informações:

- sensibilidade da carga à depressões de tensão, definida pelos parâmetros magnitude de tensão mínima suportada e tolerância de tempo de exposição ao distúrbio;
- demanda e fator de carga do consumidor;
- duração média da interrupção, ou seja, o tempo médio gasto para restabelecer o processo de produção à sua normalidade;
- custo médio da interrupção.

Esta análise necessita das características de duração das depressões de tensão, cuja previsão requer uma estimativa do tempo total despendido pelos dispositivos de proteção (relé+disjuntor) no processo de eliminação das faltas em cada linha do

sistema. A versão atual do aplicativo desenvolvido considera apenas a proteção de tempo definido, caracterizada por um tempo de atuação constante.

A avaliação probabilística do desempenho de sistemas sujeitos à depressões de tensão baseia-se no conceito de perda de carga. Todas as metodologias baseadas nesse conceito classificam os estados do sistema em estados de falha (desligamento da carga) e estados de sucesso (operação normal). São analisados somente os estados de falha, os quais comprometem a continuidade do processo produtivo do consumidor.

O método de frequência e duração é baseado na propriedade de poder resolver recursivamente por convolução discreta, além das probabilidades de estado de depressão de tensão também as suas frequências. Basicamente, o método combina, através de técnicas de *Markov*, estados de magnitude e duração das depressões de tensão na barra do consumidor devido à aplicação de faltas nas linhas do sistema, com estados de sensibilidade da carga.

Na análise de uma carga específica no consumidor, são calculados os seguintes índices de desempenho: disponibilidade, indisponibilidade, frequência, demanda não distribuída, energia não distribuída e custo médio anual da interrupção para o consumidor.

Os índices de desempenho podem ser obtidos para cada consumidor e para o sistema como um todo, considerando-se os seguintes critérios para a sensibilidade da carga:

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

Através da comparação dos índices de desempenho calculados, pode-se definir as alternativas que resultem na melhor relação custo-benefício para os investimentos, tanto sob o enfoque da concessionária como sob a ótica do consumidor.

Também é informada a distribuição da frequência anual de desligamentos por linha, conforme o gráfico ilustrado na Figura 1-7.

Barra 41 - Desligamentos da Carga - Sensibilidade: 0,80 (p.u.) e 120,00 (ms)

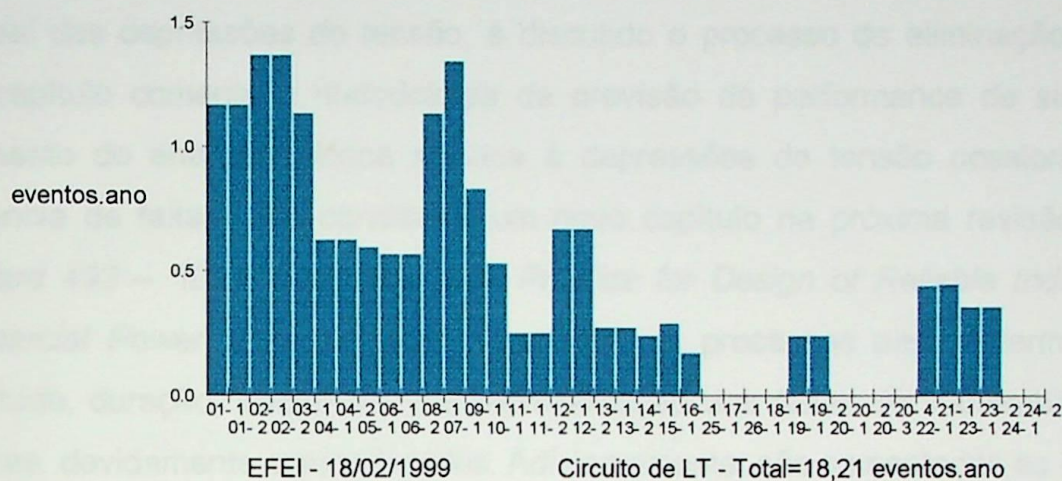


Figura 1-7 Frequência de tensões no consumidor devido à faltas em cada circuito de linha, considerando a sensibilidade da carga

Isto contribui efetivamente na tomada de medidas apropriadas e oportunas nos circuitos de linha com maior risco de depressões de tensão.

Nesta apresentação, foram demonstrados os principais aspectos do sistema de informações *VISAGE*, objeto dessa dissertação. O desenvolvimento dessa ferramenta computacional constitui uma contribuição técnica para a metodologia de análise e prevenção dos distúrbios de depressão de tensão, atendendo de forma compatível às necessidades das concessionárias e consumidores no processo de melhoria da Qualidade da Energia Elétrica.

1.2 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos, incluindo o atual.

O Capítulo 2 apresenta uma visão geral sobre a Qualidade da Energia Elétrica, enfocando a relevância do assunto e apresentando as definições e os conceitos gerais envolvendo os principais distúrbios que podem ocorrer no suprimento de energia

elétrica. A seguir, é abordado o distúrbio depressão de tensão, destacando suas características, causas e efeitos. São apresentadas as curvas de sensibilidade dos equipamentos conectados ao sistema elétrico. Como as faltas ocorridas nos sistemas das concessionárias ou nas instalações dos consumidores constituem a causa principal das depressões de tensão, é discutido o processo de eliminação de faltas. Este capítulo comenta a metodologia de previsão da performance de sistemas de suprimento de energia elétrica sujeitos à depressões de tensão ocasionados pela ocorrência de faltas, que constituirá um novo capítulo na próxima revisão do *IEEE Standard 493 – “IEEE Recommended Practice for Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems”*. São abordados os processos para determinação da magnitude, duração, frequência e a representação das áreas de vulnerabilidade dos sistemas, devidamente exemplificados. Adicionalmente, são comentadas as influências das conexões de transformadores e tensões pré-falta, e discutidas as metodologias de contabilização de eventos de depressões de tensão. Finalmente é abordada a metodologia de coordenação de cargas sensíveis com as características de depressões de tensão.

O Capítulo 3 se refere à implementação computacional, principal contribuição desse trabalho. O tópico de estado da arte no desenvolvimento de aplicativos para análise de depressões de tensão comenta ferramentas disponíveis, processos e tecnologias de *hardware* e *software* utilizadas. Seguindo a descrição da metodologia utilizada, é descrita a ferramenta computacional implementada.

No Capítulo 4 serão apresentados e comentados exemplos de aplicação da ferramenta computacional desenvolvida.

Finalmente, no Capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões obtidas no desenvolvimento desta dissertação, bem como as propostas para possíveis desenvolvimentos futuros.

Referências Bibliográficas

- [1] - IEEE Standard 493. IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems. *IEEE Gold Book*, 1990.
- [2] - Power System Reliability Subcommittee Voltage Sag Working Group (Chairman: L. E. Conrad), Proposed Chapter 9 for Predicting Voltage Sags (Dips) in Revision to IEEE Std 493, *The Gold Book. IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 30, n. 3, May/Jun. 1994, p. 805-821.
- [3] - DUGAN, R. C; MCGRANAGHAN, M. F. and BEATY, H. W. *Electrical Power Systems Quality*. McGraw-Hill, 1996.
- [4] - PEREIRA, F. C.; OLIVEIRA, J. C.; OLIVEIRA A. e VILAÇA, A. L. A. Uma Proposta de Procedimento para a Análise da Qualidade da Energia Elétrica. In: II SEMINÁRIO BRASILEIRO DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, nov. 1997, São Lourenço. Anais ... Itajubá : *EFEI*, Grupo de Estudos de Energia Elétrica. 1997. Disco compacto.
- [5] - ALVES, M. F.; RIBEIRO, T. N. Considerações sobre a Qualidade da Tensão Suprida e o Desempenho dos Acionamentos a Velocidade Variável. In: II SEMINÁRIO BRASILEIRO DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, nov. 1997, São Lourenço. Anais ... Itajubá : *EFEI*, Grupo de Estudos de Energia Elétrica. 1997. Disco compacto.
- [6] - ABREU, J. P. G.; FILHO, J. M.; FREITAS, O. P. O. Reflexos da Conservação na Qualidade da Energia Elétrica. In: II SEMINÁRIO BRASILEIRO DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, nov. 1997, São Lourenço. Anais ... Itajubá : *EFEI*, Grupo de Estudos de Energia Elétrica. 1997. Disco compacto.

- [7] - BRASIL, D. O. C.; KAGAN, N.; TAHAN, C. M. V.; GOUVÊA, M. R. Qualidade de Potência – Aspectos Metodológicos e de Custos. In: II SEMINÁRIO BRASILEIRO DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, nov. 1997, São Lourenço. Anais ... Itajubá : *EFEI*, Grupo de Estudos de Energia Elétrica. 1997. Disco compacto.
- [8] - BRONZEADO, H. S.; RAMOS, A. J. P.; OLIVEIRA, J. C.; ABREU, J. P. G.; ARRUDA, A. A. C. e BRANDÃO, A. C. Uma Proposta de Nomenclatura Nacional de Termos e Definições Associados à Qualidade da Energia Elétrica In: II SEMINÁRIO BRASILEIRO DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, nov. 1997, São Lourenço. Anais ... Itajubá : *EFEI*, Grupo de Estudos de Energia Elétrica. 1997. Disco compacto.
- [9] - 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.
- [10] - CARVALHO FILHO, J. M.; ABREU, J. P. G.; ARANGO, H. e CAMINHA NORONHA, J. C. *Voltage Sag*: Proposta de Novo Critério para Avaliação do Atendimento a Consumidores com Cargas Sensíveis. In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, set. 1998, Uberlândia. Anais ... Uberlândia: *UFU*, 1998, p. 1569-1574.
- [11] - 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.
- [12] - 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.
- [13] - GOLDSTEIN, L.; SPERANZA, P. The Quality of U.S. Commercial AC Power. *IEEE paper CH1818-4/82/000-00028*, 1982.
- [14] - GULACHENSKI, E. New England Electric's Power Quality Research Study. In: 2nd INTERNATIONAL CONFERENCE POWER QUALITY, Palo Alto, CA. Anais ... *Electric Power Research Institute*, 1992, p. E-23:1-9.
- [15] - DORR, D. Power Quality Study – 1990 to 1995, Initial Results. In: *IEEE-APEC 1992 CONFERENCE*, paper 92CH3089-0/0303.
- [16] - MCGRANAGHAN, M.; MUELLER, D.; SAMOTYJ, M. Voltage Sags in Industrial Systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 29, n. 2, Mar./Apr. 1993, p. 297-397.

- [17] - BOLLEN, M. H. J. Characterization of Voltage Sags Experienced by Three-Phase Adjustable-Speed Drives. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 12, n. 4, Oct. 1997, p. 1665-1672.
- [18] - YALÇINKAYA, G.; BOLLEN, M. H. J.; CROSSLEY, P. A. Characterization of Voltage Sags in Industrial Distribution Systems, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 34, n. 4, Jul/Aug 1998, p. 1665-1672.
- [19] - CONRAD, L. E.; 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.
- [20] - EDWIN LIU, W.-H.; TU, L. G.; WAYNE HONG, H.; ZHONG, W. An Integrated Application For Voltage Sag Analysis. In: 20th INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER INDUSTRY COMPUTER APPLICATIONS, Columbus, Ohio, May 11-16, 1997. Anais ... *IEEE*, 1997, p. 119-124.
- [21] - STECIUK, P. B.; REDMON, J. R. Voltage Sag Analysis Peaks Customer Service. *IEEE Computer Applications in Power*, Oct. 1996, p. 48-51.
- [22] - ELETROTEK CONCEPTS, Inc.; EPRI Customer Assistance Center. Power Quality Toolbox™- Voltage Sag Analysis Module, Version 1.0, Beta Release: User's Guide. *EPRI – Electric Power Research Institute*, May 1997.
- [23] - ALVAREZ, G. P. Determinação do Valor da Confiabilidade em Sistemas de Geração. Itajubá, *Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI*, 1996, fev. Dissertação (mestrado em Engenharia Elétrica).
- [24] - LEITE DA SILVA, A. M.; MELO, A.C.G.; CUNHA, S.H.F. Frequency and Duration Method for Reliability Evaluation of Large-Scale Hydrothermal Generating Systems, *IEE Proceedings-C*, v. 138, n. 1, Jan. 1991, p. 94-102.
- [25] - COUTINHO, I. P. Curto-Circuito Probabilístico. Itajubá, *Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI*, 1991, out. Dissertação (mestrado em Engenharia Elétrica).
- [26] - CEPEL. ANAFAS – Programa de Análise de Falhas Simultâneas : Manual do Usuário. *Centro de Pesquisas de Energia Elétrica*, ago. 1996.

Depressões de Tensão

2.1 A Importância da Qualidade da Energia Elétrica

O conceito “Qualidade da Energia Elétrica” (QEE), como dito anteriormente, está vinculado a um conjunto de alterações que podem ocorrer no fornecimento de energia elétrica aos consumidores. Estes distúrbios podem originar-se e/ou manifestar-se nos diversos pontos do sistema elétrico de transmissão e distribuição ou dentro das instalações dos consumidores.

O crescente interesse e preocupação com a Qualidade de Energia é justificado pelos seguintes motivos [3,4]:

- A maior sensibilidade dos equipamentos recentemente utilizados, em relação às variações na qualidade do fornecimento de energia elétrica, que pode prejudicar seu desempenho ou ocasionar seu desligamento. O baixo nível de suportabilidade dos componentes empregados (circuitos integrados, transistores, tiristores, etc.) [5], vem exigindo da comunidade científica, o desenvolvimento de técnicas que garantam a compatibilidade eletromagnética de componentes, equipamentos e sistema elétrico;
- A utilização cada vez maior da eletrônica de potência na fabricação de equipamentos e a concomitante proliferação das cargas elétricas sensíveis, que inclusive podem ser fonte de geração de alguns distúrbios de qualidade de energia.

Operações normais na indústria e no comércio estão ficando cada vez mais dependentes do desempenho de equipamentos. Multiplica-se a aplicação de microprocessadores. A eletrônica de potência tem produzido uma nova geração de equipamentos de elevada eficiência e flexibilidade, garantindo uma utilização mais racional da energia, o que tem disseminado sua aplicação. O interessante é que os equipamentos instalados para aumentar a produtividade, são também aqueles que sofrem a maioria das interrupções de energia. Sendo esses equipamentos freqüentemente aplicados em processos industriais críticos, que exigem continuidade, uma interrupção implica em perdas econômicas que justificam providências para garantir a qualidade da energia elétrica fornecida;

- A atual ênfase sobre a eficiência global do sistema elétrico, incluindo o interesse pela conservação e melhor aproveitamento da energia elétrica, tanto por parte das concessionárias como dos consumidores, tem resultado na adoção de medidas que proporcionem economia e maior eficiência energética. Em contrapartida, muitas medidas tomadas, freqüentemente são também aquelas que afetam a qualidade da energia [6];
- O crescimento do nível de exigência dos consumidores quanto à qualidade da energia elétrica e dos serviços prestados por seus fornecedores;
- Muitos sistemas elétricos estão interligados. Processos integrados significam que a falha de algum componente implica em conseqüências muito mais importantes.

Considerando estes aspectos, observa-se que os problemas tendem a se agravar com o crescimento dos consumos e das exigências do mercado de energia elétrica. Portanto, o estudo da Qualidade da Energia Elétrica torna-se imprescindível para o desenvolvimento de soluções para os problemas que surgem nesta área, de forma a reduzir os prejuízos decorrentes desses distúrbios.

Esta nova área de pesquisa na engenharia elétrica, engloba a análise e a solução, assim como o impacto econômico, dos vários distúrbios do sistema elétrico,

incorporando-os no contexto de uma abordagem sistêmica, em vez de considera-los problemas individuais.

A avaliação de soluções alternativas para um problema de Qualidade da Energia Elétrica envolve aspectos técnicos, econômicos e políticos, além de questões relativas à divisão de custos e responsabilidades entre consumidor, concessionária e fabricante. No contexto do novo modelo do setor elétrico, a atuação do Estado como agente fiscalizador dos serviços e indutor do crescimento se reveste de particular importância [7].

“*Compatibilidade*” é um termo genericamente definido como qualidade ou condição de coexistência. Para alcançar um estágio qualitativo de compatibilidade entre a energia oferecida pelos sistemas supridores e os requisitos operacionais dos equipamentos empregados nos modernos processos industriais, é necessário o esforço conjunto de todas as partes envolvidas, devido à sua interdependência, pois que os problemas específicos podem ser oriundos de qualquer delas.

Soluções efetivas e integradas, somente serão desenvolvidas quando as Empresas de Energia Elétrica, as instalações consumidoras e também os fabricantes de equipamentos, atuarem em parceria, com alto grau de comprometimento [3,8]. Os engenheiros das empresas de energia elétrica devem conhecer a sensibilidade e as características dos equipamentos dos seus consumidores. Estas características podem influenciar os projetos do sistema de potência, de práticas de proteção a procedimentos de chaveamento de capacitores. Uma falta momentânea em algum ponto do sistema, pode causar uma depressão da tensão num consumidor industrial, que implique, por exemplo, no desligamento de um ASD. O chaveamento de capacitores, muito comum no sistema da concessionária, pode ocasionar sobretensões transitórias que interrompam equipamentos de uma indústria. As instalações consumidoras devem conhecer em detalhes a sensibilidade de seus equipamentos e levar em consideração as interações entre o seu sistema elétrico e o sistema da concessionária. Por exemplo, a correção do fator de potência deve ser coordenada com requisitos de controle de harmônicos para evitar ressonâncias no sistema.

Finalmente, estudando o ambiente no qual seus clientes operam e conhecendo as dificuldades peculiares que eles podem ter tido tentando operar seus equipamentos, os fabricantes podem contribuir, projetando e construindo equipamentos compatíveis com a realidade das características dos sistemas de potência. Isto pode significar por exemplo, equipamentos com níveis mais baixos de geração de harmônicos, ou menor sensibilidade a depressões de tensão.

Citando Marek Samotyj [3], *“Eu acredito que estamos fazendo tremendos progressos dentro desse conceito de compatibilidade. E continuo aguardando o dia quando todos os padrões de Qualidade de Energia Elétrica sejam internacionais em escopo e reflitam os pensamentos de todas as partes interessadas”*.

Em resposta ao crescente interesse pela Qualidade da Energia Elétrica, as empresas de energia elétrica estão desenvolvendo programas, para ajudá-las a responder às preocupações de seus consumidores. A filosofia desses programas varia de reativa, onde a empresa de energia elétrica responde às reclamações de consumidores, à filosofia proativa, na qual a empresa de energia elétrica está envolvida na educação do consumidor e na promoção de serviços que podem auxiliar no desenvolvimento de soluções para problemas de Qualidade da Energia Elétrica.

2.2 Termos e Definições de Qualidade da Energia Elétrica

Ainda não nos parece existir um consenso efetivo na conceituação da Qualidade da Energia Elétrica. De uma forma geral, o termo tem sido empregado para englobar uma grande variedade de distúrbios nos sistemas elétricos, que sempre constituíram objeto de preocupação e estudo no âmbito das empresas de energia elétrica, dos consumidores industriais e dos fabricantes de equipamentos. As crescentes discussões sobre o tema, têm sido acompanhadas pelo desenvolvimento de uma terminologia específica desta área de concentração de estudos. Muitos tem sido os esforços conjuntos no sentido de contribuir para a uniformização dos conceitos, termos e definições dos distúrbios associados à Qualidade da Energia Elétrica. Se por um lado, a diversidade das partes envolvidas dificulta o processo de padronização, por

outro lado, tal diversidade estimula e enriquece o diálogo entre as várias áreas na busca do desejável consenso.

2.2.1 Qualidade da Energia Elétrica

Existem muitas definições do termo “qualidade”. Porém, é consenso geral que a qualidade é definitivamente um conceito direcionado para o cliente. E para o consumidor final, a Qualidade da Energia Elétrica é fundamentalmente uma questão do usufruto contínuo e eficiente do produto energia elétrica [8].

Igualmente à qualidade de outros produtos e serviços, a Qualidade da Energia Elétrica é difícil de quantificar. Existem padrões para tensão e outros critérios técnicos que podem ser medidos, mas a medida básica de Qualidade da Energia Elétrica é determinada pela performance e produtividade do equipamento no consumidor final. Assim, o nível de Qualidade da Energia Elétrica requerido é aquele que resultará em uma operação apropriada do equipamento numa determinada instalação. Para resumir as considerações feitas, será adotada no presente trabalho a conceituação proposta na referência [8]:

Energia elétrica de boa qualidade, é aquela que garante o funcionamento contínuo, seguro e adequado dos equipamentos elétricos e processos associados, sem afetar o meio ambiente e o bem estar das pessoas.

2.2.2 Problema de Qualidade da Energia Elétrica

No contexto da Qualidade Total, “problema” é consequência do resultado indesejável de um determinado processo. Deste modo, será também considerada a seguinte definição de problema de qualidade de energia elétrica [3]:

Qualquer problema de energia, que resulte na falha ou operação incorreta do equipamento de um consumidor.

Adicionalmente aos distúrbios de Qualidade da Energia Elétrica, também são percebidos problemas que atualmente podem ser relacionados a operações inadequadas de *hardware*, *software* ou de sistemas de controle. O *software* de controle pode não ter previsto uma determinada ocorrência. Componentes eletrônicos podem envelhecer prematuramente devido a repetidas tensões transitórias e eventualmente podem falhar devido a um evento de magnitude de tensão relativamente baixa. Portanto, às vezes é difícil associar uma falha a uma causa específica.

2.2.3A Tensão como Padrão de Qualidade da Energia Elétrica

Tecnicamente, em termos de engenharia, a energia elétrica é a integral, no tempo, do produto da tensão pela corrente da carga [8]. Seria difícil definir a qualidade dessa grandeza de maneira significativa. De fato, o sistema de suprimento de energia pode controlar somente a qualidade da tensão que fornece. Não há controle efetivo e único sobre as correntes que determinadas cargas podem consumir. Portanto, os padrões de qualidade da energia elétrica, são fundamentalmente referentes à qualidade da tensão elétrica no ponto onde a carga está ligada, ou seja, pode-se dizer que [3,8]:

$$\text{Qualidade da Energia} \cong \text{Qualidade da Tensão}$$

Naturalmente, sempre existe na prática um forte relacionamento entre a tensão e a corrente em qualquer sistema elétrico. Ainda que os geradores possam fornecer uma forma de onda senoidal quase perfeita, a corrente que flui através das impedâncias do sistema pode causar uma variedade de distúrbios na tensão. Por exemplo, a corrente resultante de um curto-circuito, causa uma depressão da tensão, ou uma interrupção da tensão, conforme o caso. Correntes distorcidas, resultantes de cargas que produzem harmônicos, também distorcem a tensão quando circulam através das impedâncias do sistema. Assim, uma tensão distorcida é apresentada a outros consumidores. Portanto, embora a tensão seja o padrão de aferição escolhido para os estudos de qualidade de energia elétrica, o estudo dos fenômenos vinculados à

corrente são igualmente fundamentais para entender a base de muitos problemas de qualidade.

2.2.4 Principais Distúrbios Associados à Qualidade da Energia Elétrica

Em um sistema elétrico trifásico ideal, as tensões em qualquer ponto deveriam ser, de forma permanente, perfeitamente senoidais, equilibradas, e com amplitude e frequência constantes [8], como mostrado na Figura 2-1.

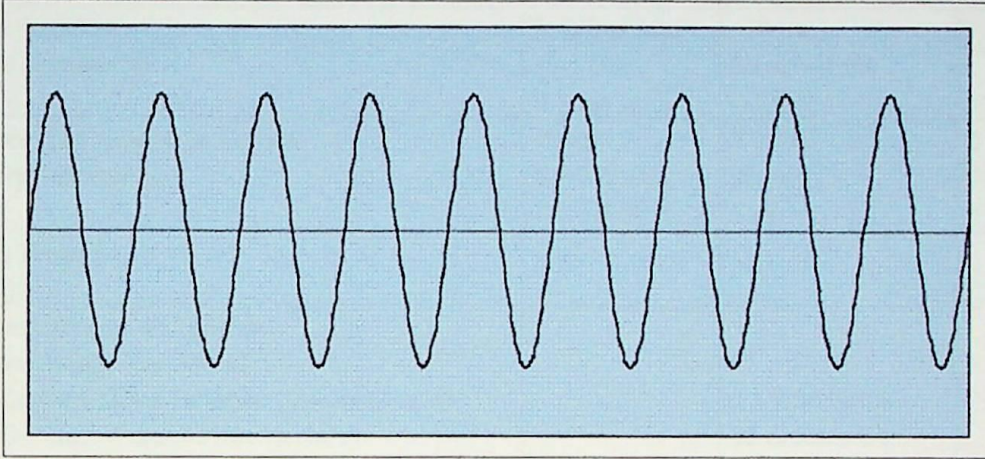


Figura 2-1 Forma de onda de tensão ideal

Qualquer desvio, acima de certos limites, na característica desses parâmetros é considerado um distúrbio de Qualidade da Energia Elétrica, como ilustra a Figura 2-2.

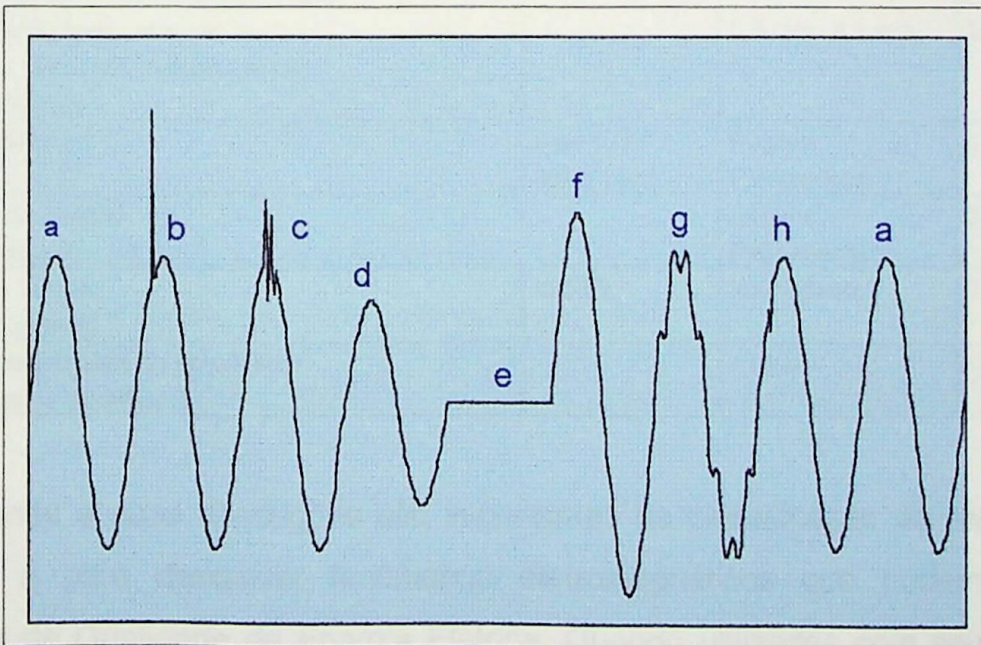


Figura 2-2 Distúrbios associados à Qualidade de Energia Elétrica [6]:
 a) Tensão normal; b) Surto de Tensão; c) Transitório Oscilatório de Tensão; d) Subtensão Momentânea ou Depressão de Tensão; e) Interrupção Momentânea de Tensão; f) Sobretensão Momentânea; g) Distorção Harmônica; h) Corte na Tensão

Neste contexto, será adotada a proposição da referência [8], de nomenclatura e classificação dos principais fenômenos eletromagnéticos associados à Qualidade da Energia Elétrica conforme transcrito na Tabela 2-1.

TABELA 2-1
PRINCIPAIS DISTÚRBIOS ASSOCIADOS À QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Categoria	Conteúdo Espectral Típico	Duração Típica	Magnitude de Tensão Típica
Variações Instantâneas de Tensão (Transient Voltages)			
• Surtos de Tensão (Impulsive Transients)	5 ns (subida) 1 μ s 0,1 ms	<50 ns 50 ns – 1 ms > 1 ms	
• Transitórios Oscilatórios de Tensão (Oscillatory Transients)	<5 kHz 5 – 500 kHz 0,5 – 5 MHz	0,3 – 50 ms 20 μ s 5 μ s	0 – 4 p.u. 0 – 8 p.u. 0 – 4 p.u.
• Cortes na Tensão (Notching)			
Variações Momentâneas de Tensão (Short Duration Voltage Variations)			
▪ De Curtíssima Duração (Instantaneous)		0,5 a 30 ciclos	
▪ De Curta Duração (Momentary)		30 ciclos a 3 s	
▪ Temporária (Temporary)		3 s a 1 minuto	
• Interrupções Momentâneas de Tensão (Short Duration Interruptions)		0,5 ciclo a 1 min	< 0,1 p.u.
• Subtensões Momentâneas ou Afundamentos Momentâneos de Tensão ou Depressões de Tensão (Voltage Sags)		0,5 ciclo a 1 min	0,1 a 0,9 pu
• Sobretensões Momentâneas ou Elevações Momentâneas de Tensão (Voltage Swells)		0,5 ciclo a 1 min	1,1 a 1,8 p.u.
Distorção Harmônica (Harmonics)	0 ao 100° harmônico	Regime Permanente	0 a 20%
Desequilíbrio de Tensão (Voltage Imbalance)		Regime Permanente	0,5 a 2%
Flutuações de Tensão (Voltage Fluctuations)	<25 Hz	Intermitente	0,1 a 7%
Variações Momentâneas de Frequência (Power Frequency Variations)		<10 s	

As categorias e suas descrições são importantes na classificação de resultados de medições e para descrever fenômenos eletromagnéticos que podem ocasionar problemas de Qualidade da Energia Elétrica. Quando utilizadas com seus atributos, constituem um meio de definir com clareza um distúrbio eletromagnético.

2.3 Depressões de Tensão

As Subtensões Momentâneas ou Afundamentos Momentâneos de Tensão, ou Depressões de Tensão, também são conhecidos como *Voltage Sags* ou *Dips*, são reduções momentâneas do valor eficaz da tensão, em uma ou mais fases do sistema elétrico, para valores entre 10% e 90% da tensão nominal, e duração entre $\frac{1}{2}$ ciclo e 1 (um) minuto [8].

O estudo desse problema de Qualidade de Energia é de extrema importância para a confiabilidade industrial. Modernos processos industriais controlados eletronicamente, constituem cargas sensíveis às depressões de tensão. Ocorrências de depressões de tensão, combinadas com a sensibilidade dos equipamentos modernos, têm resultado em um número expressivo de interrupções de processos industriais. Como consequência, os índices de produtividade preconizados pelos projetos industriais freqüentemente não têm sido atingidos, seja quantitativa, seja qualitativamente, contabilizando perdas da ordem de milhões de dólares anuais para os consumidores.

O conhecimento das características das depressões de tensão do sistema elétrico é fundamental para uma especificação apropriada de equipamentos para processos críticos, auxiliando na seleção das melhores opções entre confiabilidade e custo.

Este capítulo aborda, com especial ênfase, a metodologia de previsão do desempenho de sistemas de suprimento de energia elétrica sujeitos à depressões de tensão, proposta na referência [2] e que constituirá um novo capítulo na próxima revisão do IEEE Std. 493 [1]. As depressões de tensão são muito diferentes das interrupções de serviço cobertas por outros capítulos do IEEE Std 493. Uma interrupção é uma separação completa de uma carga da fonte de energia elétrica, enquanto numa depressão de tensão a carga permanece conectada ao sistema de fornecimento de energia elétrica.

A referida metodologia combina ferramentas convencionais de análise de sistemas para determinação das características importantes das depressões de tensão. As

ferramentas básicas incluem um programa de computador para calcular correntes e tensões de faltas desequilibradas, dados de confiabilidade, e características dos dispositivos de eliminação de faltas. Os programas de análise de faltas disponíveis atualmente permitem aos usuários modelar o sistema elétrico com precisão, aplicar faltas ao sistema e monitorar a tensão resultante em qualquer barra de interesse.

A habilidade de previsão das características de depressões de tensão, oferece uma oportunidade ímpar para avaliação de configurações alternativas visando a otimização da performance do sistema. Estas técnicas possibilitam aos engenheiros, antecipar e possivelmente minimizar problemas de depressão de tensão atuando na melhoria de suas características de magnitude, freqüência de ocorrência e/ou duração.

2.4 Principais Causas das Depressões de Tensão

Os processos industriais são sensíveis a depressões de tensão. Vários artigos têm identificado as depressões de tensão como a principal causa de interrupções em Centros de Processamento de Dados e de desligamentos de equipamentos tais como ASDs [9].

As principais causas das depressões de tensão são as faltas que ocorrem tanto na instalação industrial quanto no sistema da concessionária. Outras causas são a partida de grandes motores, a entrada de grandes blocos de cargas e a saída de grandes blocos de geração, que não serão tratadas nesta dissertação.

O gráfico da Figura 2-3 é o resultado de cinco anos de coleta e análise de dados de instalações industriais, visando a identificação das causas de depressões de tensão, que ocasionaram desligamentos indevidos de ASDs [9]. A conclusão do estudo é que 83% das depressões de tensão disruptivas foram atribuídas a processos de eliminação de faltas dentro das próprias instalações dos consumidores ou nas linhas da concessionária de energia elétrica. Outros 8% foram indicados como prováveis, somente porque o horário exato da falta não era absolutamente preciso.

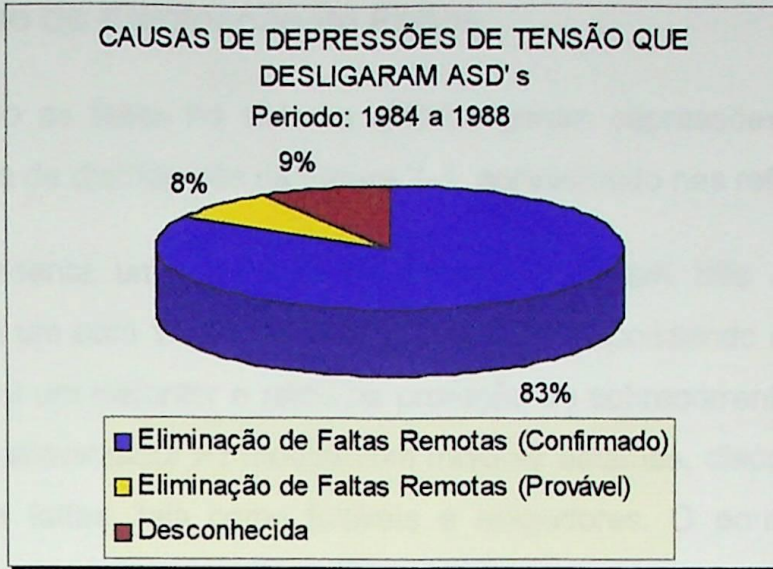


Figura 2-3 Causas de depressões de tensão resultantes no desligamento de Acionamentos a Velocidade Variável

Este e outros estudos demonstram que a maioria das depressões de tensão disruptivas é ocasionada por correntes fluindo para faltas ocorridas nas instalações dos consumidores ou nas linhas de concessionárias na vizinhança elétrica [2,9].

Este trabalho se concentra em depressões de tensão associadas a curtos-circuitos, ou seja, faltas no sistema de fornecimento de energia elétrica.

As depressões de tensão ocorrem somente enquanto circulam correntes de falta. A tensão no ponto de falta pode chegar a zero, dependendo do valor da impedância de falta, e os elementos do sistema pertencentes à sua zona de proteção sofrem uma interrupção completa quando é aberto o dispositivo de eliminação de falta. A tensão se normaliza assim que a falta é eliminada por um dispositivo de proteção que interrompe o fluxo de corrente. A atuação de dispositivos de proteção com características de religamento poderá resultar em depressões de tensão sucessivas.

Estas faltas podem ocorrer a muitas milhas do processo interrompido, mas do ponto de vista elétrico, suficientemente perto para ocasionar problemas.

2.5 O Processo de Eliminação de Falhas

Para ilustrar como as falhas no sistema elétrico geram depressões de tensão, será utilizado o sistema de distribuição da Figura 2-4, apresentado nas referências [2] e [9].

O exemplo representa uma subestação de 20 MVA com três alimentadores de distribuição, cada um com 10 milhas de extensão, correspondendo a 16,09 km. Cada alimentador possui um disjuntor e relés de proteção de sobrecorrente para detectar e eliminar falhas. O alimentador *F1* mostra com maiores detalhes, dispositivos adicionais de eliminação de falhas, tais como fusíveis e religadores. O ponto "C" é de um consumidor industrial ou comercial típico, alimentado por um transformador de distribuição 480/277 V.

A Figura 2-4 é muito similar à sistemas de distribuição industrial maiores, exceto pelos comprimentos das linhas de distribuição, que geralmente são mais curtas.

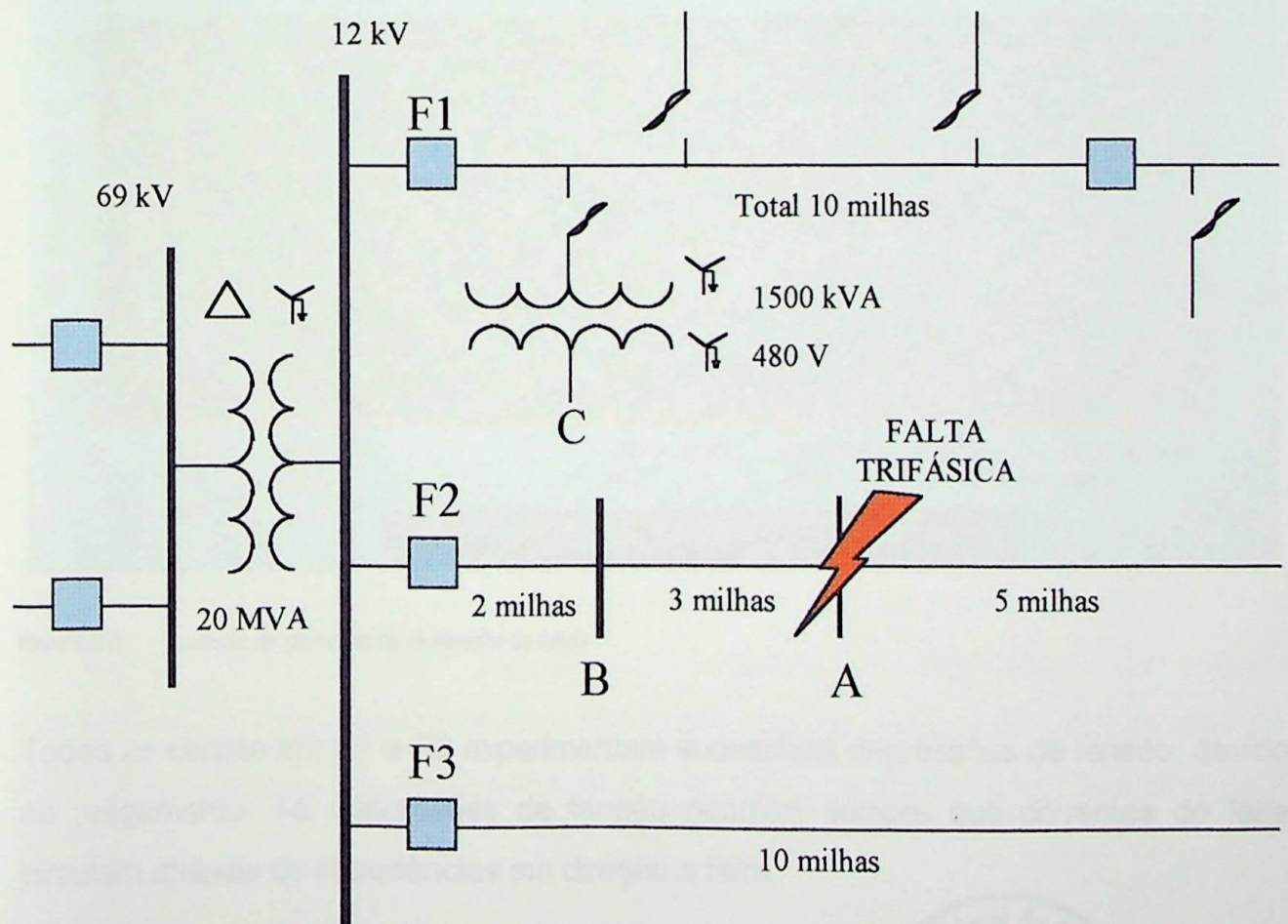


Figura 2-4 Sistema de distribuição típico

A Figura 2-5 ilustra o que acontece à tensão rms quando ocorre uma falta trifásica temporária no ponto "A" do alimentador $F2$. A linha pontilhada amarela mostra a tensão rms no ponto "B", e a linha sólida vermelha representa a tensão rms nos alimentadores $F1$ e $F3$ durante a mesma falta. A carga no ponto "C" também verá a tensão representada pela linha sólida. O eixo de tempo indica a seqüência dos eventos.

Todas as cargas em $F2$, incluindo "B", sofrem uma interrupção completa quando o disjuntor de $F2$ é aberto para eliminar a falta trifásica ocorrida em "A". O declínio de tensão verificado na primeira interrupção representa um decaimento de tensão de motor. Os motores desligam (*trip off*) antes do religamento. Observe que $F2$ usa relés de religamento. Religamentos podem ocasionar várias depressões de tensão para uma falta permanente.

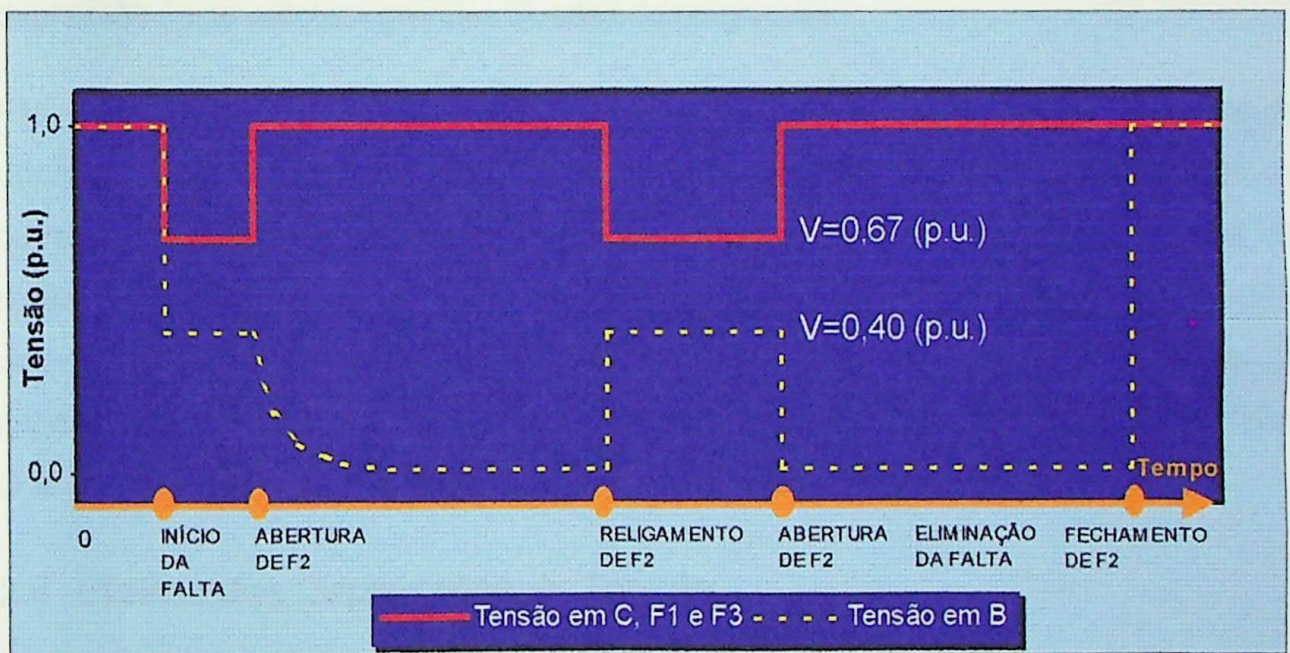
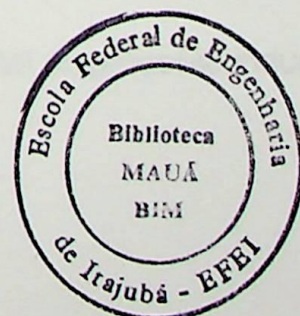


Figura 2-5 Evolução do processo de eliminação de faltas

Todas as cargas em $F1$ e $F3$ experimentam sucessivas depressões de tensão, devido ao religamento. As depressões de tensão ocorrem sempre que correntes de falta circulam através de impedâncias em direção a falta.



Depois que o disjuntor em $F2$ interrompe o fluxo da corrente de defeito, a tensão nos alimentadores $F1$ e $F3$ retorna ao normal. Desafortunadamente, muitas cargas sensíveis em $F1$ e $F3$ são desligadas caso a magnitude e duração da depressão de tensão estiverem fora da região de operação determinada pela suportabilidade das cargas sensíveis.

As depressões de tensão também ocorrem para faltas apenas em uma única fase ou em duas fases. A sua magnitude pode ser diferente para cada fase. Usualmente, ocorre um significativo desequilíbrio de fases, porque as faltas trifásicas equilibradas são raras.

Devido às configurações típicas de fornecimento de energia elétrica, a probabilidade de ocorrência de depressões de tensão cuja magnitude corresponde a pequenas quedas em relação à tensão pré-falta, é geralmente muito superior à probabilidade de depressões que refletem grandes quedas de magnitude.

Faltas em sistemas elétricos industriais e comerciais produzem o mesmo fenômeno de depressão de tensão. Uma falta em um alimentador abaixa a tensão em todos os outros alimentadores. A depressão de tensão aparece até mesmo no sistema da concessionária de energia elétrica. A magnitude da depressão de tensão numa determinada localização, depende da corrente de falta, da impedância do sistema, da impedância de falta, das conexões dos transformadores, e do nível da tensão pré-falta. O impacto da depressão de tensão depende da sensibilidade do equipamento.

2.6 Efeitos das Depressões de Tensão

Como as faltas no sistema não podem ser totalmente evitadas, todos os consumidores de energia elétrica estão sujeitos à incidência de depressões de tensão. Evidentemente, os maiores prejuízos são contabilizados pelas instalações industriais. Os principais efeitos das depressões de tensão sobre os equipamentos industriais são [10]:

- Disfunção de PLC's, causando a parada parcial ou total do processo industrial;

- Perda de programação de PLC's e de microprocessadores;
- Desligamento de ASD's, com conseqüentes paradas e perdas de produção;
- Desatracamento das bobinas de contadores e relés auxiliares que integram o sistema de comando dos motores;
- Atuação indevida de relés de subtensão.

2.7 Sensibilidade de Equipamentos

A representação da tolerância de uma carga sensível a depressões de tensão é fornecida através de uma curva cujos eixos representam a magnitude e a duração de variações de tensão no sistema elétrico. A *região de ruptura* é aquela onde certamente o equipamento irá falhar.

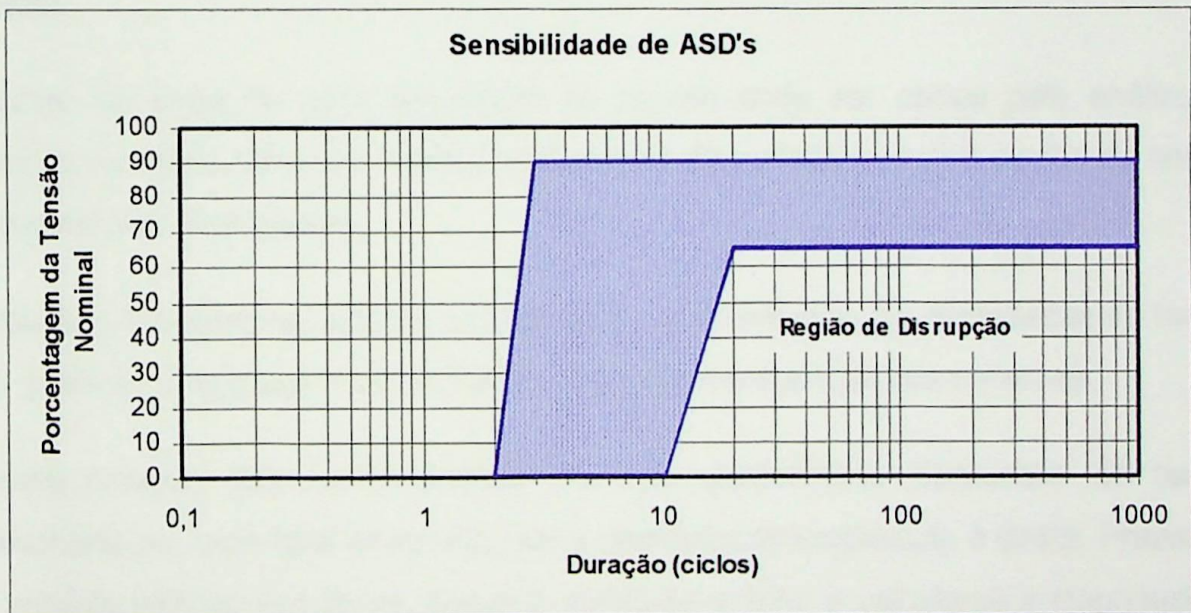


Figura 2-6 Sensibilidade dos ASD's

No gráfico, os limites de tolerância dos equipamentos são representados por uma faixa devido aos seguintes fatores:

- diferenças entre as tecnologias de fabricação dos fornecedores;
- diferenças entre as condições operacionais e de carregamento dos equipamentos;
- fatores ambientais do local onde o equipamento está instalado.

2.8 Determinação das Características das Depressões de Tensão

As depressões de tensão associadas ao processo de eliminação de faltas têm muitas características previsíveis:

Magnitude	- Valor rms da depressão de tensão
Duração	- Tempo de permanência da depressão de tensão
Forma de Onda	- Evolução da depressão de tensão ao longo do tempo
Frequência	- Número de ocorrências de depressões de tensão, num determinado período de tempo.

É possível determinar a magnitude da depressão de tensão na ocorrência de determinadas faltas calculando-se a tensão na carga crítica.

A previsão do tempo de duração de uma depressão de tensão requer uma estimativa do tempo total dispendido pelos dispositivos de proteção no processo de eliminação da falta.

A forma de onda de uma depressão de tensão pode ser obtida pela análise de registros de depressões de tensão monitorados disponíveis e com o auxílio da análise de transitórios de sistemas.

Todavia, é fundamental estimar a quantidade de ocorrências de depressões de tensão que poderão prejudicar o desempenho de equipamentos elétricos sensíveis.

A determinação das características de uma determinada depressão de tensão ocasionada por uma falta específica numa determinada localização é direta. Preparado um modelo elétrico preciso do sistema, aplica-se a falta, e calcula-se a magnitude da depressão de tensão na carga crítica. As características dos dispositivos de proteção são utilizadas para estimar a duração da depressão de tensão. Finalmente, as características de magnitude e duração da depressão de tensão são comparadas com a capacidade do equipamento sensível para determinar se o processo sofrerá uma interrupção.

A previsão das características de depressão de tensão que uma carga sensível poderá experimentar durante vários anos de operação requer uma abordagem probabilística.

É impossível prever exatamente onde ocorrerá cada falta, mas é razoável assumir que ocorrem muitas faltas. Estimativas precisas requerem cálculos de depressões de tensão para toda falta possível no sistema elétrico e as taxas de ocorrência de cada falta. A frequência global das depressões de tensão é a soma das frequências individuais. Uma aproximação prática é estabelecer intervalos de tensão onde magnitudes específicas de depressões de tensão forem prováveis e então calcular a frequência de faltas nestas faixas.

2.8.1 Magnitude de Depressões de Tensão e Áreas de Vulnerabilidade

A Figura 2-7 mostra o divisor de impedâncias básico necessário para calcular a magnitude de uma depressão de tensão, cuja equação é:

$$V_{sag} = \frac{Z_2 + Z_f}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad (1)$$

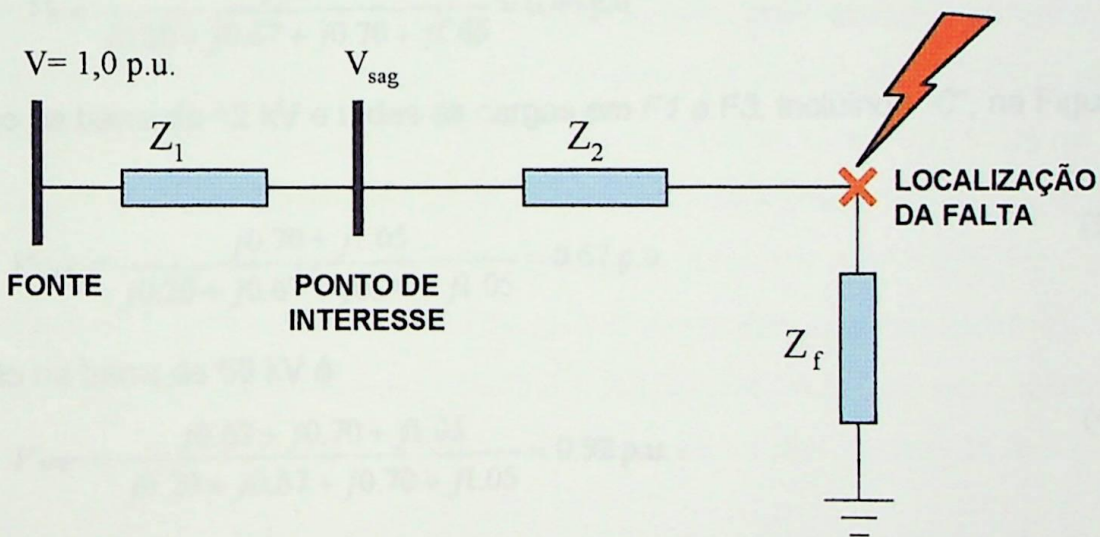


Figura 2-7 Divisor de impedâncias básico para a determinação da magnitude de depressões de tensão.

O diagrama de reatâncias de seqüência positiva da Figura 2-8 e as equações (2)-(4) ilustram a determinação das depressões de tensão para uma falta trifásica com uma impedância de falta zero ($Z_f = 0$) no ponto "A" do sistema exemplo da Figura 2-4.

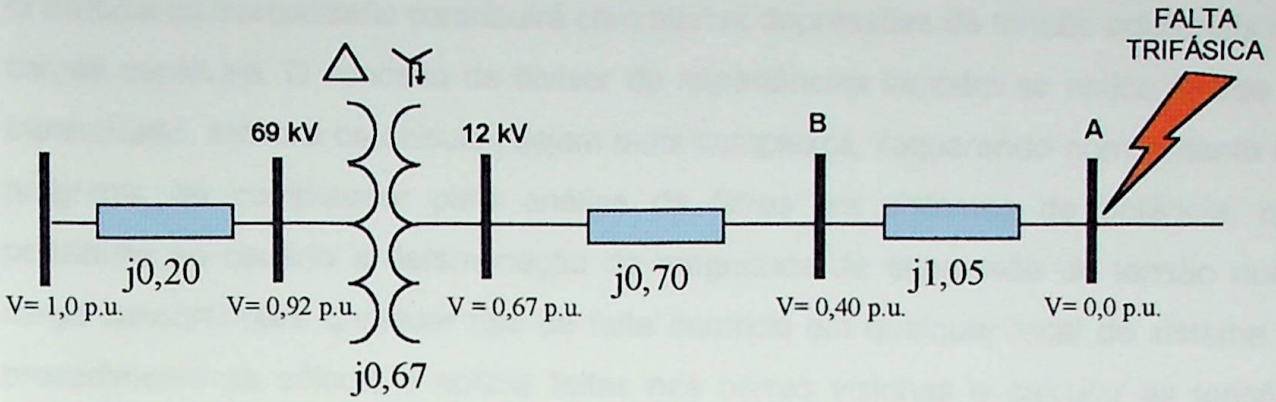


Figura 2-8 Diagrama de impedâncias e depressões de tensão para o sistema da Figura 2.4

As equações (2) a (4) demonstram a determinação das magnitudes das depressões de tensão.

Enquanto a corrente de falta estiver fluindo da barra infinita para o ponto de falta "A", a tensão em "B" é:

$$V_B = \frac{j1,05}{j0,20 + j0,67 + j0,70 + j1,05} = 0,40 \text{ p.u.} \quad (2)$$

A tensão na barra de 12 kV e todas as cargas em F1 e F3, incluindo "C", na Figura 2-4 é:

$$V_{12kV} = \frac{j0,70 + j1,05}{j0,20 + j0,67 + j0,70 + j1,05} = 0,67 \text{ p.u.} \quad (3)$$

A tensão na barra de 69 kV é:

$$V_{69kV} = \frac{j0,67 + j0,70 + j1,05}{j0,20 + j0,67 + j0,70 + j1,05} = 0,92 \text{ p.u.} \quad (4)$$

Estes cálculos simples mostram como uma falta num alimentador pode provocar desligamentos indevidos de equipamentos sensíveis em toda uma vizinhança elétrica. Os cálculos utilizaram somente as reatâncias para demonstrar o princípio do divisor de impedâncias. Estudos precisos requerem a consideração de todas as informações das impedâncias do sistema, da impedância da falta, e da localização da falta em relação à carga sensível. É também necessário conhecer as conexões dos transformadores e as tensões pré-falta.

O sistema de transmissão contribuirá com muitas depressões de tensão adicionais nas cargas sensíveis. O conceito de divisor de impedâncias também se aplica à rede de transmissão, embora os cálculos sejam mais complexos, requerendo normalmente um programa de computador para análise de faltas em sistemas de potência, que possibilite ao usuário a determinação da magnitude da depressão de tensão numa carga sensível para qualquer tipo de falta ocorrida em qualquer local do sistema. O procedimento de cálculo é aplicar faltas nas barras vizinhas e calcular as tensões resultantes nas barras críticas.

A Tabela 2-2 mostra alguns resultados da análise computacional [2] de uma rede constituída por mais de 1000 barras, para faltas trifásicas, fase-fase, e fase-terra numa barra de Extra Alta Tensão (EHV). Foi assumido o valor de 1,0 (p.u.) para todas as tensões pré-falta do estudo. A tabela apresenta a tensão *per unit* em barras selecionadas do sistema para cada tipo de falta. As magnitudes representam tensões de saída de subestações de distribuição alimentadas pelo sistema de transmissão através de um transformador delta-estrêla. Por exemplo, uma barra 35 milhas distante da barra de defeito verá a tensão de 0,67 (p.u.) durante uma falta trifásica. Outra barra, situada a 97 milhas da mesma falta trifásica, também experimentará uma queda em sua tensão, cujo valor passará a ser 0,88 (p.u.) durante a ocorrência. No caso das faltas fase-fase e fase-terra, foi indicado na tabela apenas o menor valor de tensão dentre os registrados nas três fases. Para um defeito fase-terra na mesma barra EHV, a menor tensão de fase numa barra a 40 milhas de distância será de 0,84 (p.u.)

TABELA 2-2

TENSÃO PER UNIT DO SISTEMA VERSUS DISTÂNCIA DE UMA FALTA EHV

Distância do Ponto da Falta (milhas)	Tipo da Falta		
	3 Φ	Φ - Φ	Φ -T
0 a 5	0,4 a 0,6	0,6 a 0,7	0,7 a 0,75
26	0,71	0,82	0,87
35	0,67	0,76	0,81
40	0,71	0,78	0,84
55	0,84	0,88	0,91
95	0,94	0,97	0,95
97	0,88	0,91	0,92

Conseqüentemente, conclui-se que uma falta no sistema de alta tensão pode produzir depressões de tensão disruptivas em muitas cidades e numa área de centenas de milhas quadradas. Observa-se também, que as depressões de tensão devido a eliminação de faltas no sistema de transmissão, "significantes" em ordem de magnitude, ocorrem muito mais vezes do que as interrupções sustentadas. Outro aspecto a ser enfatizado, é que a distância física não traduz diretamente em "distância" elétrica. Uma barra 26 milhas distante da falta experimenta uma depressão de tensão menos severa do que uma outra barra a 35 milhas de distância da mesma falta. Realmente, a depressão de tensão de 0,71 (p.u.) devido à uma falta trifásica à 26 milhas de distância, representa uma queda de magnitude menor em relação à tensão pré-falta 1 (p.u.), do que na depressão de tensão de 0,67 (p.u.) para o ponto de falta localizado à 35 milhas de distância.

A Figura 2-9 mostra um diagrama unifilar simplificado com magnitudes de depressões de tensão em parte de uma rede de transmissão alimentando cargas sensíveis. A figura representa graficamente as áreas de vulnerabilidade para depressões de tensão na barra EHV até 0,60 (p.u.), de 0,60 (p.u.) a 0,80 (p.u.) e acima de 0,80 (p.u.), referentes à ocorrência de curtos-circuitos trifásicos no sistema analisado.

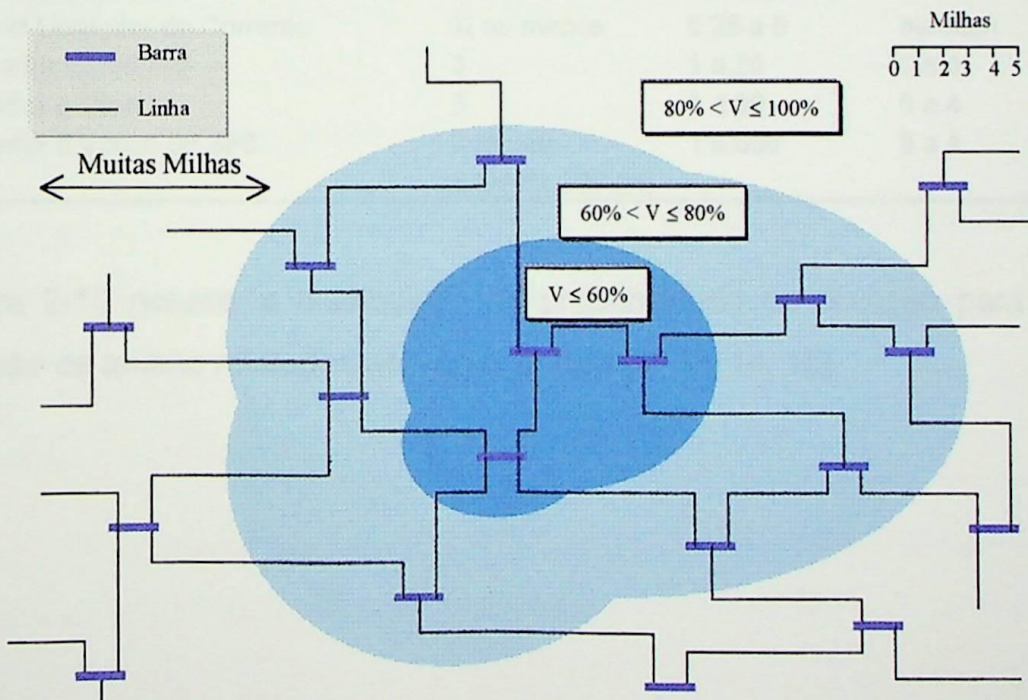


Figura 2-9 Área de Vulnerabilidade a Depressões de Tensão num Sistema de Transmissão

2.8.2 Duração de Depressões de Tensão

Cada depressão de tensão dura o tempo no qual o equipamento de proteção permite a circulação da corrente de falta. Existem muitos tipos de equipamentos de eliminação de faltas, e a cada um deles está associado um tempo mínimo absoluto dispendido para eliminar a falta. Para a coordenação de dispositivos de proteção em série, comumente é introduzido um retardo de tempo (time delay) adicional. Além disso, muitas faltas em linhas são temporárias, e pode ser utilizado religamento automático para re-energizar a linha e restaurar o serviço em poucos segundos, como no exemplo da Figura 2-4.

A Tabela 2-3 indica os tempos de eliminação de defeito para alguns equipamentos comumente utilizados, juntamente com um provável número de tentativas de religamento automático [11,12].

TABELA 2-3
TEMPOS TÍPICOS DE ELIMINAÇÃO DE FALTA

Tipo do equipamento de eliminação de falta	Tempo de Eliminação de falta em ciclos		
	Mínimo Típico	<i>Time Delay</i> Típico	Tentativas de Religamento
Fusível de Expulsão	½	0,5 a 60	nenhum
Fusível Limitador de Corrente	¼ ou menos	0,25 a 6	nenhum
Religador Eletrônico	3	1 a 30	0 a 4
Disjuntor a Óleo	5	1 a 60	0 a 4
Disjuntor a Vácuo ou SF6	3 (atual) 5 (ANSI C37.04)	1 a 600	0 a 4

A Figura 2-10 resume a distribuição da probabilidade de duração para dados de depressão de tensão relatados em vários artigos [9, 13, 14, 15].

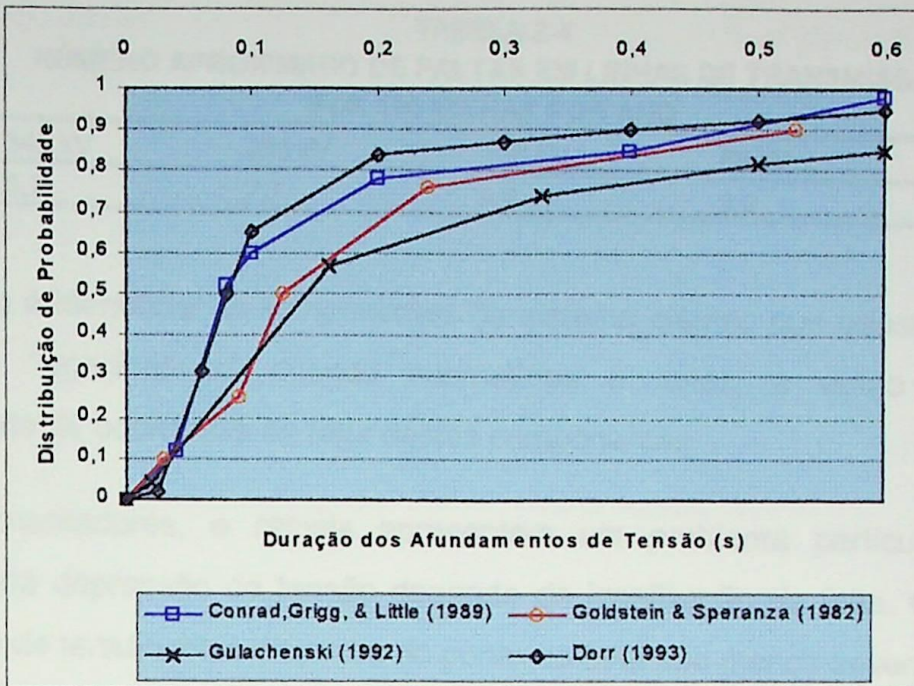


Figura 2-10 Distribuição de Probabilidade de Duração de Depressões de Tensão

Observa-se que 60 a 80% das depressões de tensão duram menos que 0,2 segundos.

2.8.3 Freqüência de Depressões de Tensão

A previsão da freqüência de depressões de tensão, ou seja, a determinação do número de eventos de depressões de tensão num determinado período, requer um modelo preciso das impedâncias do sistema e dados de confiabilidade de todos os equipamentos na vizinhança elétrica.

Os dados de confiabilidade de transformadores, linhas e outros equipamentos de distribuição estão disponíveis nos apêndices do *IEEE Gold Book* [1].

As linhas de transmissão longas e expostas a condições atmosféricas adversas são freqüentemente a principal causa das depressões de tensão.

A Tabela 2-4 apresenta um resumo de dados de confiabilidade coletados durante 16 anos para cerca de 5000 linhas de transmissão em Indiana [9].

TABELA 2-4
 NÚMERO APROXIMADO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO
 POR 100 MILHAS POR ANO

345 kV	230 kV	138 kV	69 kV
3,7	2,7	4,8	9,9

O problema é identificar os componentes do sistema elétrico que causam depressões de tensão “*significativas*” quando submetidos à faltas, e então determinar a probabilidade de ocorrência de falta destes componentes.

Linhas, alimentadores, e ramais apresentam um problema particular, porque a magnitude da depressão de tensão depende da localização da falta. Geralmente as depressões de tensão mais distantes do ponto de falta são menos severas. Portanto, é conveniente identificar os trechos de cada linha que podem ocasionar depressões de tensão “*significativas*” quando experimentam uma falta. Uma avaliação completa requer cálculos para todas as faltas possíveis e todas as impedâncias de falta possíveis.

Os exemplos apresentados a seguir mostram o processo genérico aplicado à sistemas radiais e à grandes sistemas.

A Figura 2-11 mostra magnitudes de depressões de tensão na barra de 12 kV do sistema radial da Figura 2-4, para curtos-circuitos trifásicos em pontos ao longo do alimentador *F2* de 10 milhas. Foi considerada uma reatância de 0,35 (p.u.) por milha para o alimentador. Desprezando-se a queda de tensão provocada pelo fluxo de corrente através da impedância do alimentador de *F1* até o ponto “*C*”, pode-se considerar que a tensão na carga “*C*” será a mesma calculada para o barramento de 12 kV.

Observa-se que a depressão de tensão para a carga “*C*” torna-se menos severa, à medida em que a falta ocorre mais longe da barra de 12 kV. Uma falta a 2,5 milhas da barra de 12 kV ocasionará uma depressão de tensão de magnitude 50% da nominal. Qualquer falta trifásica entre a barra de 12 kV e 2,5 milhas de distância pode ocasionar uma queda de tensão de 50% da nominal ou pior. Similarmente, uma falta a 9,95 milhas fará a tensão da barra de 12 kV cair para 80% da tensão pré-falta. Logo,

faltas em qualquer lugar de $F2$ entre zero e 9,95 milhas da subestação podem ocasionar depressões de tensão de 80% ou menos.

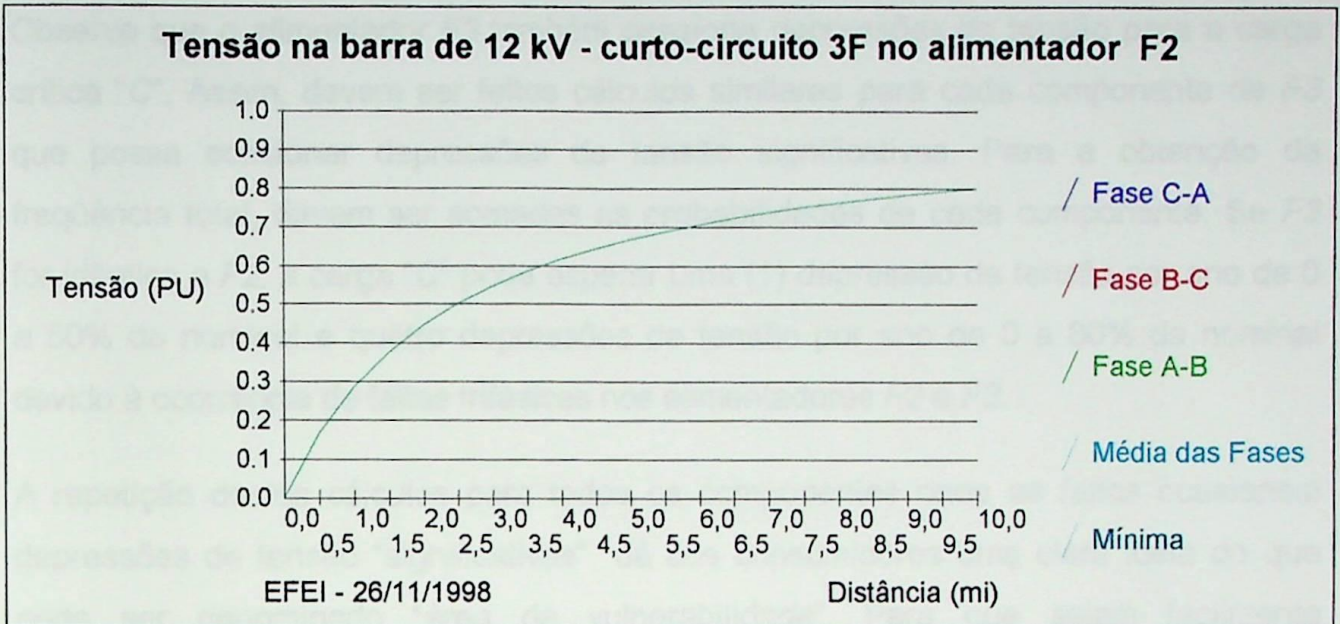


Figura 2-11 Depressão de Tensão na barra de 12 kV devido à curtos-circuitos ao longo do alimentador $F2$

Para calcular a freqüência de ocorrências de depressões de tensão na carga "C", devido a curtos-circuitos trifásicos no alimentador $F2$, será assumida uma taxa de falta uniforme de 0,20 faltas trifásicas por milha por ano, ou seja, supor-se-á que o alimentador experimenta 20 faltas trifásicas por 100 milhas/ano. Como existem 2,5 milhas do alimentador $F2$ que podem ocasionar depressões de tensão 50% ou piores, os cálculos em (5) mostram que pode ocorrer 0,5 (meia) ocorrência de depressão de tensão menor ou igual a 50% da tensão pré-falta para a carga em "C".

$$Sag_{50\%} = 0,2 \frac{\text{faltas}}{\text{milha} \cdot \text{ano}} \times 2,5 \text{ milhas} = 0,5 \frac{\text{sags}}{\text{ano}} \quad (5)$$

Similarmente, (6) mostra que a carga "C" experimentará duas depressões de tensão por ano, de magnitude menor ou igual a 80% da tensão pré-falta, devido à faltas trifásicas em $F2$.

$$Sag_{80\%} = 0,2 \frac{\text{faltas}}{\text{milha} \cdot \text{ano}} \times 9,95 \text{ milhas} = 2,0 \frac{\text{sags}}{\text{ano}} \quad (6)$$

Observe que o alimentador *F3* também ocasiona depressões de tensão para a carga crítica “*C*”. Assim, devem ser feitos cálculos similares para cada componente de *F3* que possa ocasionar depressões de tensão significativas. Para a obtenção da frequência total, devem ser somadas as probabilidades de cada componente. Se *F3* for idêntico a *F2*, a carga “*C*” pode esperar uma (1) depressão de tensão por ano de 0 a 50% da nominal e quatro depressões de tensão por ano de 0 a 80% da nominal devido à ocorrência de faltas trifásicas nos alimentadores *F2* e *F3*.

A repetição destes cálculos para todos os componentes onde as faltas ocasionem depressões de tensão “significativas” dá aos consumidores uma clara idéia do que pode ser denominado “área de vulnerabilidade”. Para que sejam facilmente identificadas, estas áreas podem ser destacadas nos diagramas unifilares por meio de cores ou texturas, semelhantes às utilizadas nas Figuras 2-9 e 2-12.

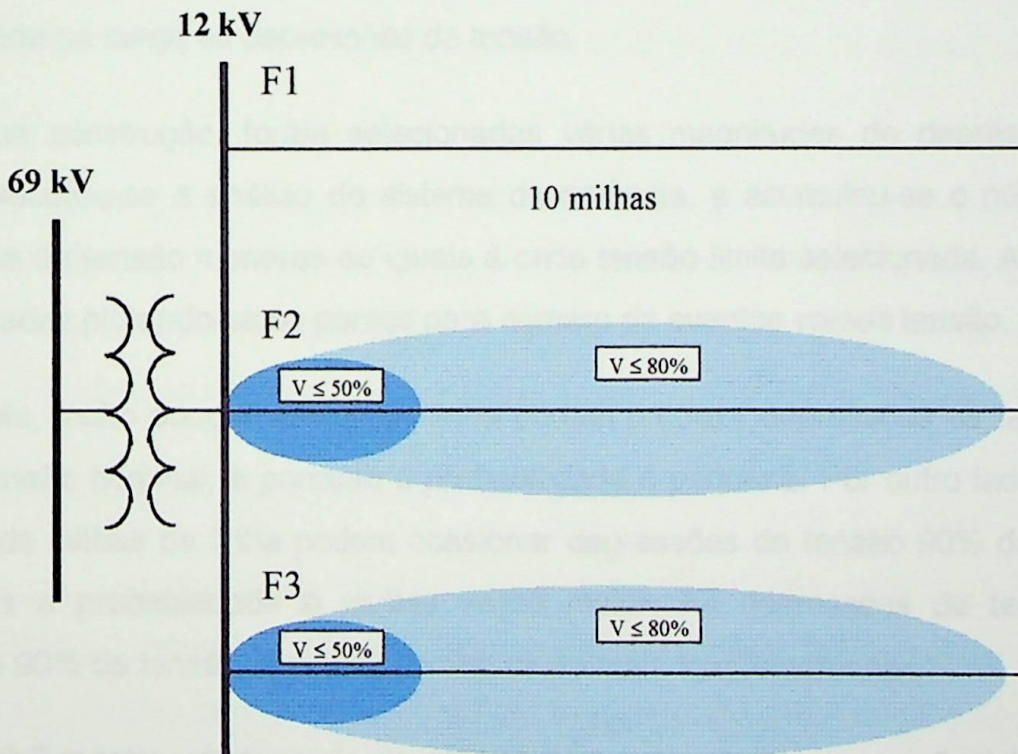


Figura 2-12 Áreas de vulnerabilidade a depressões de tensão na barra de 12 kV devido à faltas trifásicas em *F2* e *F3*

Uma boa maneira de exibir a frequência de depressões de tensão é plotar o número de eventos *versus* a depressão de tensão como mostrado na Figura 2-13.

Barra 12 kV - Frequência Acumulada Devido a Faltas em F2
(eventos.ano)

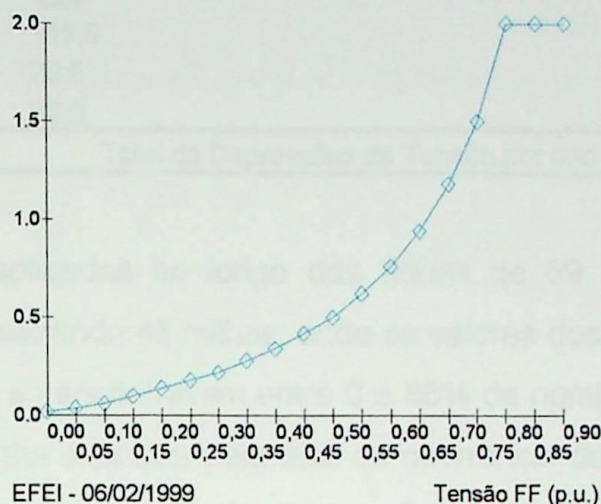


Figura 2-13 Frequência acumulada de depressões de tensão na barra de 12 kV devido à faltas trifásicas em F2

O gráfico mostra a quantidade esperada de desligamentos indevidos, em função da sensibilidade da carga às depressões de tensão.

Para a sua construção, foram selecionadas várias magnitudes de depressões de tensão, executou-se a análise do sistema de potência, e acumulou-se o número de depressões de tensão menores ou iguais à cada tensão limite selecionada. As curvas foram traçadas plotando-se os pontos para número de eventos *versus* tensão.

Tipicamente, muito poucas milhas de linha podem produzir depressões de tensão de 50% da tensão nominal, e portanto a probabilidade é pequena. Por outro lado, várias centenas de milhas de linha podem ocasionar depressões de tensão 90% da tensão nominal, e a probabilidade é muitas vezes maior. As depressões de tensão de magnitude 90% da tensão nominal ocorrem muito mais freqüentemente.

A Tabela 2-5 mostra um exemplo de cálculo da frequência de depressões de tensão entre 0 e 85% da nominal numa barra monitorada, resultantes da ocorrência de faltas em linhas de transmissão.

TABELA 2-5
CÁLCULO DA FREQUÊNCIA DE DEPRESSÕES DE TENSÃO
PARA TENSÕES DE 0-85% DA NOMINAL

Classe de Tensão	Faltas por 100 Milhas	Milhas de Linha com Depressões de Tensão 0-85% da Nominal	Depressões de Tensão por ano
69 kV	9,9	45,0	4,5
138 kV	4,8	115,0	5,5
230 kV	2,7	70,0	1,9
345 kV	3,7	60,0	2,2
Total de Depressões de Tensão por ano =			14,1

Na análise de faltas aplicadas ao longo das linhas de 69 kV do sistema, foram encontrados trechos totalizando 45 milhas, onde os valores das depressões de tensão numa barra monitorada se encontravam entre 0 e 85% da nominal. A multiplicação do número de milhas de linha expostas pela taxa de ocorrência de faltas por ano dessas linhas, fornece a quantidade total de depressões de tensão por ano, ou seja, $45 \times 9,9/100 = 4,5$. Este processo deve ser repetido para as demais classes de tensão das linhas do sistema, neste caso, 138, 230 e 345 kV. O somatório dos totais de depressões de cada classe de tensão de linha resulta no total geral de 14,1 ocorrências por ano quando a tensão na barra monitorada estiver entre 0 e 85% da nominal.

A previsão global da frequência deve considerar várias magnitudes diferentes de depressão de tensão. Deste modo, para cada patamar de tensão selecionado, deve-se executar a respectiva análise de faltas do sistema, e recalculá-la a Tabela 2-5, como foi feito com o patamar de 85%.

2.8.4 Formas de Onda de Depressões de Tensão

A maioria das depressões de tensão devido à processos de eliminação de faltas possui características muito similares. Usualmente as faltas iniciam quando a tensão de meio ciclo é pouco maior que zero porque o arco se inicia antes do contato físico. Isto cria uma rápida transição para a tensão mais baixa e alguma assimetria. A depressão de tensão termina quando o equipamento de eliminação de defeito interrompe a corrente de falta. Normalmente isto ocorre próximo a uma corrente zero.

Portanto, a depressão de tensão termina com uma rápida transição da onda senoidal de magnitude reduzida para a de magnitude normal.

A Figura 2-14 mostra a forma de onda de uma depressão de tensão típica com 80% de magnitude e duração de 0,08 (s).

Voltage Sag - Magnitude = 80% Duração = 0,08 s

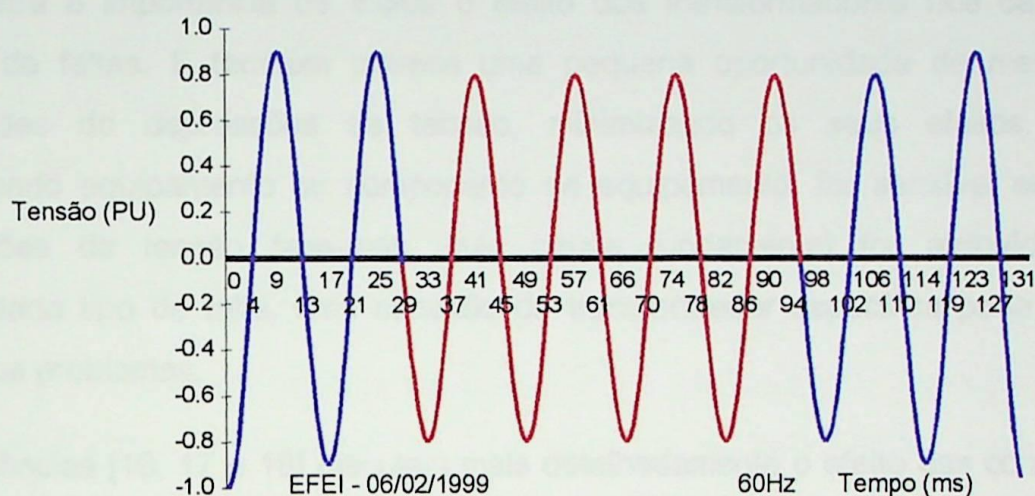


Figura 2-14 Forma de onda típica de uma depressão de tensão

2.8.5 Efeito de Conexões de Transformadores

Instalações com transformadores conectados em delta-estrêla ou estrêla-delta alteram as depressões de tensão devido à faltas desequilibradas. A “*grosso modo*”, quando uma depressão de tensão ocasionada por uma falta fase-terra passa através de um transformador delta-estrêla, ela se transforma numa depressão de tensão causada por uma falta fase-fase, sem a componente de seqüência zero. A passagem desta depressão de tensão através de outro transformador delta-estrêla resulta em algo semelhante à depressão de tensão devido à falta fase-terra original, sem a componente de seqüência zero.

A Tabela 2-6 mostra o efeito produzido por conexões de transformadores numa depressão de tensão ocasionada por uma falta fase-terra num sistema específico solidamente aterrado.

TABELA 2-6

IMPACTO DE CONEXÕES DE TRANSFORMADORES EM DEPRESSÕES DE TENSÃO

Tipo de Conexão De Transformador	Tensão fase-neutro (p.u.)			Tensão fase-fase (p.u.)		
	A	B	C	A-B	B-C	C-A
Y-Y	0,644	0,986	0,988	0,796	1,000	0,835
Primeiro Δ -Y	0,835	0,796	1,000	0,745	0,926	0,959
Segundo Δ -Y	0,959	0,745	0,926	0,835	0,796	1,000

Isto mostra a importância de incluir o efeito dos transformadores nos cálculos de análise de faltas. E também oferece uma pequena oportunidade de melhorar as magnitudes de depressões de tensão, minimizando os seus efeitos. Se um determinado equipamento ou componente de equipamento, for sensível somente à depressões de tensão fase-fase, cuja causa fundamental for atribuída a um determinado tipo de falta, uma conexão de transformador específica pode ajudar a reduzir os problemas.

As referências [16, 17 e 18] discutem mais detalhadamente o efeito das conexões de transformadores.

2.8.6 Efeito da Tensão Pré-Falta

Todos os cálculos de magnitude de depressões de tensão neste capítulo assumiram uma tensão pré-falta de 100% da tensão nominal. Os cálculos resultam em valores de depressões de tensão referidos à tensão pré-perturbação. Portanto, quando a tensão pré-falta for diferente da tensão nominal, será requerida uma compensação. Isto é importante para equipamentos sensíveis, pois tensões pré-perturbação diferentes de 1 (p.u.) podem ocasionar erros significativos na previsão do número de eventos de depressões de tensão.

Por exemplo, considere uma análise de desligamentos de equipamentos sensíveis a depressões de tensão de 80%. Uma depressão de tensão de magnitude 82% na barra do consumidor, calculada considerando-se uma tensão pré-falta 100%, está acima da tolerância de 80% do equipamento. Portanto, esta depressão não provoca o desligamento do equipamento. Mas, se a tensão pré-falta real for 95%, a depressão de

tensão produzida corresponde a $82 \times (95/100) = 78\%$, o que estaria abaixo da tolerância de 80%. O equipamento pode ser indevidamente desligado mesmo que a previsão baseada na tensão pré-falta de 100% indique que isto não ocorreria. Uma depressão de tensão de 77% calculada com referência à uma tensão de 100%, pode não provocar o desligamento indevido do equipamento se a tensão pré-falta for 105%, pois seria igual a $77 \times (105/100) = 81\%$, e portanto estaria acima da tolerância de 80%.

A operação de sistemas abaixo da tensão nominal, aumenta a *sensibilidade aparente* (calculada com base em 1 p.u.) e também eleva a probabilidade de desligamentos indevidos devido a distúrbios de depressão de tensão. A operação acima da tensão nominal, diminui a *sensibilidade aparente* e reduz a probabilidade de desligamentos ocasionados por depressões de tensão.

A Figura 2-15 mostra o impacto da aplicação da compensação de depressões de tensão calculadas com base em 1 (p.u.) para tensões pré-falta 0,95 (p.u.) e 1,05 (p.u.), na barra de 12 kV do sistema radial da Figura 2-4, para faltas no alimentador F2.

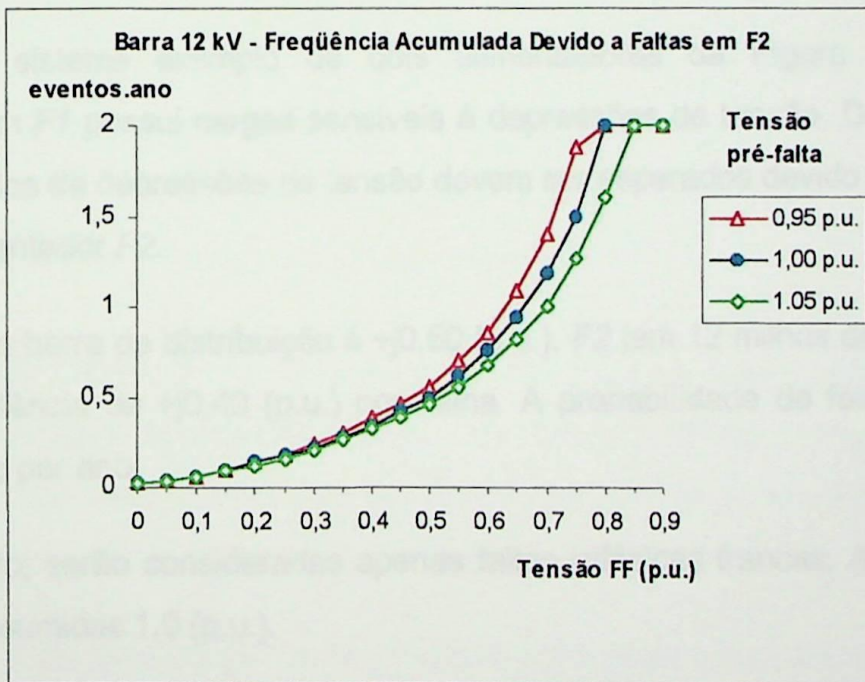


Figura 2-15 Frequência acumulada de depressões de tensão considerando diferentes tensões pré-falta

Para depressões de tensão até 0,7 (p.u.), as frequências para tensão pré-falta 0,95, 1,00, e 1,05 (p.u.) são respectivamente, 1,40, 1,18 e 1,00 (eventos.ano), o que corresponde à diferenças entre 15% e 19% em relação ao valor encontrado para tensão pré-falta 1 (p.u.).

2.9 Exemplos

Os exemplos da referência [2] a seguir ilustram cálculos de previsão do desempenho de depressões de tensão. O primeiro exemplo utiliza apenas faltas trifásicas com impedância de falta igual a zero num sistema radial. O segundo exemplo demonstra uma análise de faltas com componentes simétricas num grande sistema assumindo impedâncias de falta iguais a zero. Os leitores devem ser advertidos de que previsões mais acuradas, requerem modelos precisos, incluindo tipo de falta, impedância de falta, conexões de transformadores, modelos de impedância do sistema, e consideração de tensões pré-falta.

2.9.1 Exemplo de Sistema Radial de Distribuição

Considere o sistema exemplo de dois alimentadores da Figura 2-16 [2]. Um consumidor em $F1$ possui cargas sensíveis à depressões de tensão. Deseja-se saber quantos eventos de depressões de tensão devem ser esperados devido à aplicação de faltas no alimentador $F2$.

A reatância da barra de distribuição é $+j0,50$ (p.u.). $F2$ tem 12 milhas de comprimento, com uma reatância de $+j0,40$ (p.u.) por milha. A probabilidade de faltas trifásicas é 0,15 por milha por ano.

Neste exemplo, serão consideradas apenas faltas trifásicas francas. As tensões pré-falta serão assumidas 1,0 (p.u.).

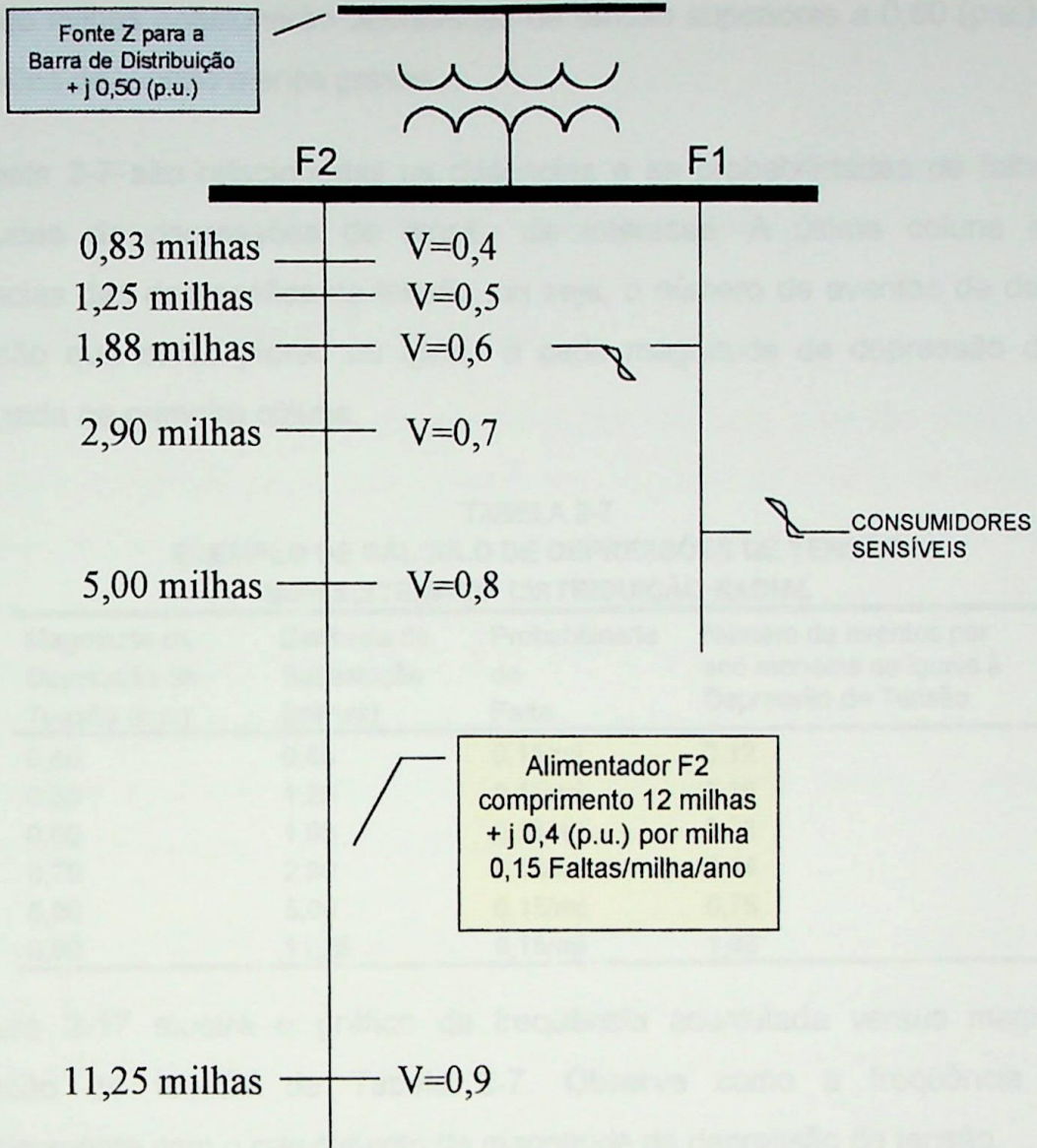


Figura 2-16 Diagrama Unifilar do Exemplo de Distribuição Radial

Inicialmente são determinados os pontos de $F2$ onde as faltas podem ocasionar depressões de tensão de várias magnitudes. Na Figura 2-16 são indicados os pontos em $F2$ correspondentes à depressões desde 0,40 até 0,90 (p.u.) em relação à tensão pré-falta, variando com um incremento igual a 0,10 (p.u.).

Qualquer falta mais próxima da barra de distribuição pode ocasionar depressões de tensão piores do que no ponto de interesse. Por exemplo, faltas trifásicas entre a barra de distribuição e o ponto de $F2$ situado à cinco milhas de distância dessa barra ocasionam depressões de tensão de pelo menos 0,80 (p.u.). Faltas mais distantes do

que cinco milhas ocasionarão depressões de tensão superiores a 0,80 (p.u.), ou seja, depressões de tensão menos graves.

Na Tabela 2-7 são relacionadas as distâncias e as probabilidades de falta para as magnitudes de depressões de tensão de interesse. A última coluna indica as freqüências das depressões de tensão, ou seja, o número de eventos de depressões de tensão que serão piores ou iguais à cada magnitude de depressão de tensão relacionada na primeira coluna.

TABELA 2-7
EXEMPLO DE CÁLCULO DE DEPRESSÕES DE TENSÃO
NUM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO RADIAL

Magnitude da Depressão de Tensão (p.u.)	Distância da Subestação (milhas)	Probabilidade de Falta	Número de eventos por ano menores ou iguais à Depressão de Tensão
0,40	0,83	0,15/mi	0,12
0,50	1,25	0,15/mi	0,19
0,60	1,88	0,15/mi	0,28
0,70	2,90	0,15/mi	0,44
0,80	5,00	0,15/mi	0,75
0,90	11,25	0,15/mi	1,69

A Figura 2-17 mostra o gráfico da freqüência acumulada *versus* magnitude de depressão de tensão da Tabela 2-7. Observe como a freqüência aumenta dramaticamente com o crescimento da magnitude da depressão de tensão.

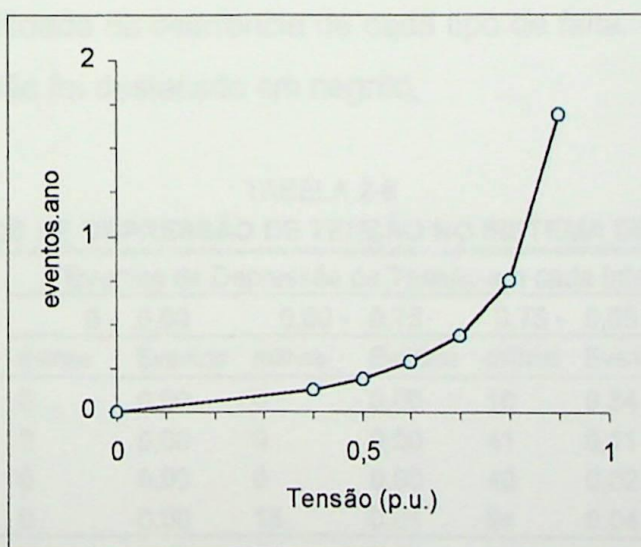


Figura 2-17 Freqüência Acumulada de Depressões de Tensão do Exemplo de Distribuição Radial

A adição de um segundo alimentador idêntico à $F2$ dobra a probabilidade de ocorrência de depressões de tensão.

A avaliação completa do sistema deve incluir também a probabilidade de depressões de tensão da instalação do consumidor e do sistema de transmissão.

2.9.2 Exemplo de Sistema de Transmissão

As Tabelas 2-8 até 2-11 indicam os resultados de uma previsão detalhada num sistema de transmissão de grande porte [2]. Um programa de análise de faltas calculou a tensão numa barra de carga sensível monitorada, para faltas trifásicas, fase-terra, fase-fase e fase-fase-terra. Foram estabelecidos os seguintes intervalos de tensão no consumidor: 0,00 a 0,60, 0,60 a 0,75, 0,75 a 0,85, e 0,85 a 0,90 (p.u.) em relação à tensão pré-falta. Na análise de faltas foram aplicadas faltas em todas as barras e em muitos pontos ao longo de cada linha para identificar as partes do sistema que ocasionavam tensões nas faixas de interesse.

Os limites de vulnerabilidade de cada componente e linha foram destacados num diagrama similar ao da Figura 2-9. O total de milhas de linha exposto à depressões de tensão foi determinado para cada intervalo e tipo de falta considerado, e agrupado em quatro tabelas referentes às classes de tensão do sistema (345, 230, 138 e 69 kV). Em cada tabela, o número de eventos é obtido pela multiplicação do total de milhas expostas pela probabilidade de ocorrência de cada tipo de falta. O total de eventos de cada intervalo de tensão foi destacado em negrito.

TABELA 2-8
EVENTOS DE DEPRESSÃO DE TENSÃO NO SISTEMA DE 345 kV

Tipo de Falta	Eventos por milha por ano	Eventos de Depressão de Tensão em cada Intervalo de Tensão							
		0 - 0,60		0,60 - 0,75		0,75 - 0,85		0,85 - 0,90	
		milhas	Eventos	milhas	Eventos	milhas	Eventos	milhas	Eventos
Fase-Terra	0,0337	0	0,00	0	0,00	10	0,34	33	1,11
Fase-Fase-Terra	0,0026	0	0,00	0	0,00	41	0,11	119	0,31
Fase-Fase	0,0004	0	0,00	0	0,00	40	0,02	116	0,05
Trifásico	0,0004	0	0,00	14	0,01	94	0,04	95	0,04
Total	0,0371	0	0,00	14	0,01	185	0,50	363	1,51

TABELA 2-9
EVENTOS DE DEPRESSÃO DE TENSÃO NO SISTEMA DE 230 kV

Tipo de Falta	Eventos por milha por ano	Eventos de Depressão de Tensão em cada Intervalo de Tensão							
		0 - 0,60		0,60 - 0,75		0,75 - 0,85		0,85 - 0,90	
		milhas	Eventos	milhas	Eventos	milhas	Eventos	milhas	Eventos
Fase-Terra	0,0216	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Fase-Fase-Terra	0,0046	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Fase-Fase	0,0004	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Trifásico	0,0004	0	0,00	0	0,00	0	0,00	34	0,01
Total	0,0270	0	0,00	0	0,00	0	0,00	34	0,01

TABELA 2-10
EVENTOS DE DEPRESSÃO DE TENSÃO NO SISTEMA DE 138 kV

Tipo de Falta	Eventos por milha por ano	Eventos de Depressão de Tensão em cada Intervalo de Tensão							
		0 - 0,60		0,60 - 0,75		0,75 - 0,85		0,85 - 0,90	
		milhas	Eventos	milhas	Eventos	milhas	Eventos	milhas	Eventos
Fase-Terra	0,0350	0	0,00	37	1,30	44	1,54	48	1,68
Fase-Fase-Terra	0,0082	6	0,05	68	0,56	65	0,53	48	0,39
Fase-Fase	0,0029	6	0,02	60	0,17	61	0,18	43	0,12
Trifásico	0,0019	44	0,08	51	0,10	63	0,12	61	0,12
Total	0,0480	56	0,15	216	2,12	233	2,37	200	2,31

TABELA 2-11
EVENTOS DE DEPRESSÃO DE TENSÃO NO SISTEMA DE 69 kV

Tipo de Falta	Eventos por milha por ano	Eventos de Depressão de Tensão em cada Intervalo de Tensão							
		0 - 0,60		0,60 - 0,75		0,75 - 0,85		0,85 - 0,90	
		milhas	Eventos	milhas	Eventos	milhas	Eventos	milhas	Eventos
Fase-Terra	0,0644	4	0,26	11	0,71	20	1,29	42	2,70
Fase-Fase-Terra	0,0218	15	0,33	29	0,63	82	1,79	137	2,99
Fase-Fase	0,0069	15	0,10	24	0,17	81	0,56	126	0,87
Trifásico	0,0059	23	0,14	43	0,25	105	0,62	119	0,70
Total	0,0990	57	0,82	107	1,76	288	4,25	424	7,26

A Tabela 2-12 resume as contribuições de cada classe de tensão do sistema para os intervalos de tensão considerados, que correspondem aos valores apresentados em negrito nas Tabelas 2-8 a 2-11. Os totais de cada linha da Tabela 2-12 correspondem ao número total de eventos por ano de cada intervalo de magnitude de tensão.

TABELA 2-12
SUMÁRIO DE CONTRIBUIÇÕES DE CADA SISTEMA

Intervalo De Tensão (p.u.)	Contribuições por Classe de Tensão de Linha (Número de Eventos por Ano)				Totais
	345 kV	230 kV	138 kV	69 kV	
0 - 0,60	0,00	0,00	0,15	0,82	0,97
0,60 - 0,75	0,01	0,00	2,12	1,76	3,89
0,75 - 0,85	0,50	0,00	2,37	4,25	7,12
0,85 - 0,90	1,51	0,01	2,31	7,26	11,09

A Tabela 2-13 e a Figura 2-18 são o produto final do processo de previsão de magnitudes de depressões de tensão. Elas comparam as estimativas probabilísticas das freqüências acumuladas de ocorrência de desligamentos indevidos para vários níveis de sensibilidade de equipamentos. Estas estimativas assumem que a tensão pré-perturbação do equipamento corresponde exatamente à tensão nominal, caso contrário elas devem ser modificadas.

TABELA 2-13
EXEMPLO DE NÚMERO DE EVENTOS DE DEPRESSÃO DE TENSÃO
DEPENDENDO DA SENSIBILIDADE DE EQUIPAMENTO

Depressão de Tensão (p.u.)	Eventos de Depressão de Tensão em cada Intervalo de Tensão				Eventos por ano
	0-0,60	0,60-0,75	0,75-0,85	0,85-0,90	
0,60	0,97	No Trip	No Trip	No Trip	0,97
0,75	0,97	3,89	No Trip	No Trip	4,86
0,85	0,97	3,89	7,12	No Trip	11,98
0,90	0,97	3,89	7,12	11,09	23,07

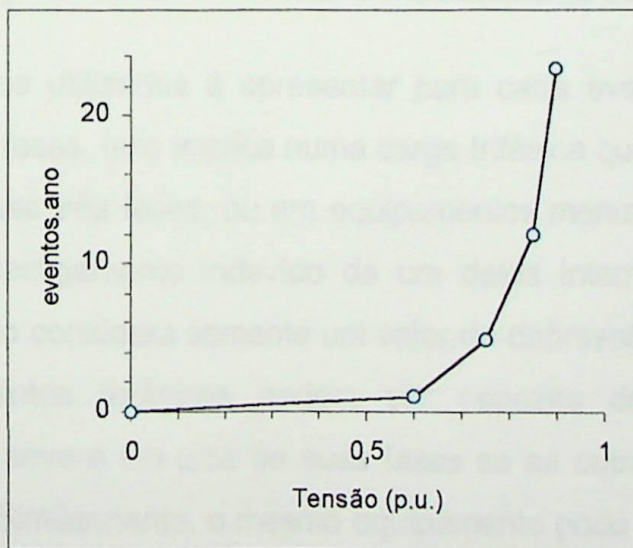


Figura 2-18 Freqüência Acumulada de Depressões de Tensão do Exemplo de Sistema de Transmissão [2]

2.10 Contabilização de Eventos de Depressões de Tensão

Após a proposição de inclusão do Capítulo 9 no *IEEE Std. 493*, o *Golden Book* [1], publicada na referência [2], pelo *Grupo de Estudos de Voltage Sags do Subcomitê de Confiabilidade de Sistemas Elétricos do IEEE*, os trabalhos de elaboração desse referido capítulo continuam. Uma variedade de definições e filosofias de contabilização de eventos nos estudos de depressão de tensão estão sendo consideradas no processo de padronização. A discussão a seguir apresenta vários métodos que podem ser aplicados em situações individuais. Ela demonstra a necessidade de clareza na apresentação dos resultados. É altamente recomendado que os relatórios de previsões de depressões de tensão ou resultados de monitoração de Qualidade de Energia identifiquem claramente os métodos que foram utilizados.

2.10.1 Número de Fases

Normalmente as depressões de tensão afetam diferentemente cada fase de um sistema. Durante a ocorrência de uma falta, uma, duas ou todas as três fases podem ver tensões suficientemente baixas para serem classificadas como depressões de tensão. Mesmo se todas as três fases experimentam depressões de tensão, freqüentemente suas magnitudes serão diferentes. Deste modo, em casos de depressões de tensão nas três fases, a identificação da magnitude que foi adotada para caracterizar a depressão de tensão não é imediatamente evidente.

Um dos procedimentos utilizados é apresentar para cada evento, apenas a menor tensão dentre as três fases. Isso implica numa carga trifásica que é sensível ao menor valor de tensão de suas três fases, ou em equipamentos monofásicos instalados nas três fases, onde o desligamento indevido de um deles interrompe o processo de produção. Este método considera somente um valor de depressão de tensão por falta. Entretanto, equipamentos trifásicos podem ser capazes de sobreviver a uma depressão de tensão severa em uma de suas fases se as outras fases permanecem razoavelmente boas. Similarmente, o mesmo equipamento pode não sobreviver a uma

depressão de tensão menos severa se as tensões das outras fases estiverem igualmente baixas.

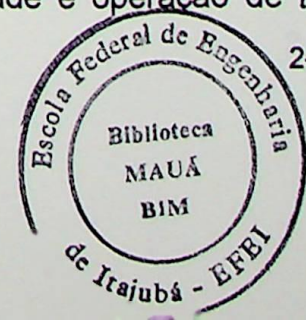
Um segundo procedimento empregado considera cada uma das três fases como eventos separados. Isso implica em cargas monofásicas ou ao menos controladores monofásicos. Para resultados de monitoração, a média do número de depressões de tensão em cada uma das três fases é necessária para a obtenção de uma estimativa do número de depressões de tensão esperado para uma carga monofásica. Observe que uma carga conectada entre duas fases pode experimentar um número de depressões de tensão diferente do total de eventos de uma carga conectada fase-neutro. Nos métodos de previsão, o cálculo das tensões decorrentes de faltas fase-terra é realizado aplicando-se a falta em apenas uma das três fases, por exemplo, a fase A. Na realidade, todas as três fases têm probabilidades iguais de sofrerem a falta. Isso implica que uma depressão de tensão devido a uma falta fase-terra ou a uma falta fase-fase conta como 1/3 de depressão de tensão com a magnitude de tensão na fase A, 1/3 na fase B, e 1/3 na fase C. Uma depressão de tensão devido a uma falta trifásica é contabilizada como 1 (uma) depressão de tensão.

Um terceiro procedimento assume a média das tensões das três fases para cargas sensíveis trifásicas. Este método informa apenas uma depressão de tensão por evento. Normalmente esta magnitude de depressão de tensão é diferente de qualquer das tensões das fases individuais.

2.10.2 Contabilização de Religamentos

O religamento automático é comumente empregado em sistemas de média e alta tensão expostos à fenômenos meteorológicos. O religamento é um outro problema no cálculo da frequência de depressões de tensão. Existem dois métodos de contabilização do número de depressões de tensão na presença de religamentos.

Um método considera múltiplas depressões de tensão como uma única se elas ocorrem dentro de um curto período de tempo, i.e., 5 minutos. Por exemplo, duas depressões ocasionadas por um religamento de alta velocidade e operação de *trip*



contam como uma única depressão. Este procedimento é baseado no argumento de que a utilização do equipamento ficará impossibilitada desde a primeira depressão de tensão. As depressões adicionais que vierem a ocorrer antes do equipamento sensível retornar ao serviço são de pouco interesse, porque elas não afetam a produção. A dificuldade é estabelecer um período de tempo onde a repetição de depressões conte como um único evento. Este período pode variar de acordo com o processo de produção. Algumas vezes, durante tempo adverso, a próxima depressão também pode ocorrer antes que o equipamento sensível retorne à operação normal. Um problema relatado, mas não documentado, é que um dispositivo pode ser capaz de sobreviver à primeira depressão de tensão, mas desliga na segunda ou terceira.

Um segundo método conta todos os eventos, mesmo se eles ocorrem em poucos segundos. Ou seja, duas depressões de tensão ocasionadas por um religamento de alta velocidade e operação de *trip* contam como duas depressões. Esta contagem de depressões de tensão é mais precisa, mas pode superestimar o número de desligamentos indevidos de equipamentos.

Para monitoração de Qualidade de Energia, qualquer um destes métodos pode ser implementado no dispositivo de monitoração, mas as técnicas de previsão dependem dos dados de falha reportados. Os dados de falha podem contar cada evento ou podem considerar vários eventos como um único se todos eles ocorrerem numa mesma seqüência de religamento automático. Para produzir resultados precisos, as previsões de depressões de tensão devem considerar cuidadosamente todas essas variações.

2.10.3 Contabilização de Duração de Depressões de Tensão

A contabilização da duração de depressões de tensão apresenta problemas para depressões não retangulares. A maioria das técnicas neste capítulo assume depressões de tensão retangulares, onde a duração é clara. Contudo, existem alguns casos onde as depressões não são retangulares. Às vezes as faltas trocam de impedância e fases envolvidas durante o desenvolvimento do evento. A depressão

pode ter duas ou mais magnitudes durante um único evento. Grandes cargas de motores podem modificar o perfil das depressões de tensão [18]. A duração pode ser o tempo total em que o nível de tensão configura uma depressão de tensão, ou pode ser um tempo um pouco maior definido pelo usuário. A previsão acurada do número de desligamentos espúrios de equipamentos do processo necessitará de uma perfeita compreensão dos resultados reportados.

2.11 Coordenação de Cargas Sensíveis com as Características de Depressões de Tensão

A magnitude e a duração das depressões de tensão são características essenciais para a determinação do comportamento de equipamentos. Portanto, elas são importantes no esforço de coordenação dos equipamentos. As apresentações anteriores dos dados de depressões de tensão mostraram a magnitude em um gráfico e a duração em outro gráfico. A técnica de coordenação de equipamentos sensíveis com as características de depressões de tensão medidas ou provenientes de previsões, propõe a elaboração de um único gráfico relacionando as características de magnitude e duração. Uma importante vantagem desse método, é que a curva de sensibilidade de um equipamento a ser analisado também pode ser traçada neste mesmo gráfico, permitindo uma identificação direta do número de desligamentos indevidos do equipamento por ano.

Conforme definido anteriormente, as magnitudes das depressões de tensão variam de 10% a 90% da tensão nominal e as durações variam de meio ciclo a 1 (um) minuto.

O método de coordenação de depressões de tensão descrito na referência [19], e proposto para ser incluído no Capítulo 9 do *IEEE Std. 493*, o *Golden Book* [1], independe destes limites de depressão de tensão. Atualmente, do ponto de vista de um equipamento ou processo de produção, não importa se um desligamento indevido é ocasionado por uma depressão de tensão (*Voltage Sag*), elevação de tensão (*Voltage Swell*), ou por uma interrupção momentânea de tensão.

2.11.1 Elaboração de Gráficos de Coordenação de Depressões de Tensão

O gráfico de coordenação fornece as características de duração e magnitude das depressões de tensão do sistema e a performance da utilização de um equipamento sensível neste ambiente. A base para a exibição dos dados é uma grade X-Y com a magnitude no eixo vertical e a duração no eixo horizontal. No método aqui exposto, uma família de curvas de contorno mostra as características das depressões de tensão do sistema elétrico analisado. Cada curva de contorno representa um número de depressões de tensão por ano.

No mesmo gráfico, é traçada a curva de sensibilidade do equipamento. A utilização apropriada do gráfico de coordenação possibilita a determinação da estimativa do número de desligamentos indevidos do equipamento devido à depressões de tensão por unidade de tempo.

Dois conjuntos de dados são fundamentais para o processo de coordenação. Primeiro, as características das depressões de tensão do sistema elétrico devem ser obtidas por processos de monitoração de dados ou previsão. Segundo, a resposta de utilização do equipamento em condições de depressão de tensão deve ser obtida, a partir de especificações do fabricante ou através de dados de teste de desempenho do equipamento.

2.11.2 Traçado das Características de Depressão de Tensão do Sistema

Os eventos de depressão de tensão correspondentes a cada par de magnitude e duração, devem ser incluídos numa matriz ou tabela, ou planilha de computador. Estes dados são apresentados graficamente como linhas de contorno. Um exemplo muito simples mostrará os conceitos apresentados. A Tabela 2-14 mostra uma grade com nove linhas referentes aos intervalos de magnitude de tensão e cinco colunas com intervalos de duração. A combinação das nove linhas com as cinco colunas produz uma matriz com um total de 45 elementos correspondentes a pares de intervalos magnitude/duração.

TABELA 2-14
NÚMERO DE EVENTOS DE DEPRESSÃO DE TENSÃO
PARA CADA INTERVALO DE MAGNITUDE E DURAÇÃO

Magnitude	Intervalo de Duração (segundos)				
	0,0<0,2	0,2<0,4	0,4<0,6	0,6<0,8	>=0,8
>80-90%	1	1	1	1	1
>70-80%	1	1	1	1	1
>60-70%	1	1	1	1	1
>50-60%	1	1	1	1	1
>40-50%	1	1	1	1	1
>30-40%	1	1	1	1	1
>20-30%	1	1	1	1	1
>10-20%	1	1	1	1	1
0-10%	1	1	1	1	1

Cada depressão de tensão medida ou obtida por previsão terá uma magnitude e uma duração que corresponderá a um dos 45 elementos da matriz. Neste exemplo, foi assumido que cada um destes 45 elementos tem uma depressão de tensão por ano associada. Isto significa que são 45 depressões por ano, e as características de cada depressão são armazenadas num único elemento da matriz. Os 15 elementos da parte inferior esquerda da matriz foram destacados em itálico para facilitar a explicação da seqüência do exemplo.

A tabela 2-15 mostra o número acumulado de depressões de tensão que são piores ou iguais a cada elemento da Tabela 2-14. “Pior que” significa que a magnitude é menor e a duração é maior (ou seja, as depressões são mais severas do ponto de vista do equipamento). Em vez de intervalos de valores, os cabeçalhos de linha e coluna agora mostram apenas um valor.

TABELA 2-15
SOMA DE EVENTOS DE DEPRESSÃO DE TENSÃO
PIORES QUE OU IGUAIS A CADA MAGNITUDE E DURAÇÃO

Magnitude	Duração (segundos)				
	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8
90%	45	36	27	18	9
80%	40	32	24	16	8
70%	35	28	21	14	7
60%	30	24	18	12	6
50%	25	20	15	10	5
40%	20	16	12	8	4

30%	15	12	9	6	3
20%	10	8	6	4	2
10%	5	4	3	2	1

Por exemplo, na matriz da Tabela 2-15 existem 15 depressões de tensão na posição correspondente à magnitude de 50% e duração de 0,4 segundos. O número 15 destacado em negrito na Tabela 2-15 corresponde à soma de todas as 15 entradas destacadas na tabela 2-14. Isto significa que 15 depressões de tensão terão magnitude menor ou igual a 50% e duração mais longa do que 0,4 segundos.

O próximo passo converte a Tabela 2-15 em um conjunto de curvas de contorno similar às linhas de contorno de um mapa geográfico.

A Figura 2-19 mostra a plotagem da Tabela 2-15. As linhas da parte inferior esquerda até a parte superior direita representam o número de eventos de depressões de tensão por ano.

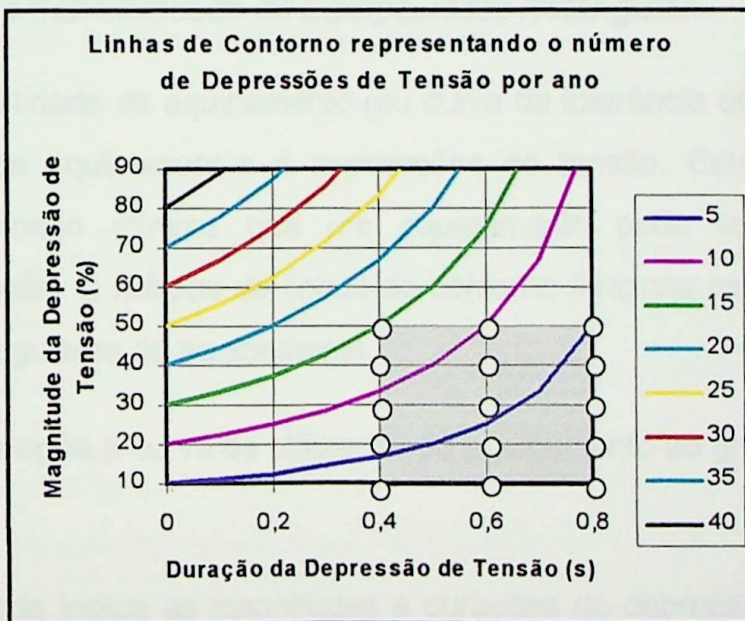


Figura 2-19 Linhas de Contorno de Desempenho de Depressões de Tensão e Mapeamento de Pontos

Continuando o exemplo, a linha de contorno referente à 15 eventos intercepta a linha vertical de 0,40 segundos para a magnitude horizontal de 50%. Isto significa que 15

depressões de tensão terão duração maior ou igual a 0,40 segundos e magnitude menor ou igual a 50%.

Os pontos no canto inferior direito da Figura 2-19 mostram as 15 depressões de tensão destacadas na Tabela 2-14. Existem 15 pontos na área retangular abaixo e à direita da linha de contorno de 15 eventos. Similarmente, a linha de contorno referente à 20 eventos de depressões de tensão mostra que existem 20 depressões de tensão de piores ou iguais à 0,2 segundos e magnitude 50%. Normalmente, os pontos não aparecem nos gráficos de coordenação e as depressões não estão diretamente sobre os eixos.

A interpolação linear entre as linhas de contorno e os eixos funciona razoavelmente bem, especialmente neste caso, onde as depressões estão uniformemente distribuídas. Por exemplo, cerca de 32 depressões serão piores ou iguais a 0,2 segundos e magnitude 80% na Figura 2-19.

2.11.3 Inclusão de Sensibilidade de Equipamento Retangular

A curva de sensibilidade de equipamento (ou curva de tolerância de tensão) descreve a sensibilidade de equipamentos à depressões de tensão. Esta curva fornece a magnitude de tensão mínima que um equipamento pode suportar para uma determinada duração. O método de linhas de contorno funciona muito facilmente com estas curvas retangulares de equipamento.

A Figura 2-20 sobrepõe a curva de utilização do equipamento ao gráfico com as linhas de contorno.

A região sombreada indica as magnitudes e durações de depressões de tensão que ocasionarão o desligamento indevido do equipamento.

A interseção da quina da área retangular de sensibilidade com as linhas de contorno fornece o número de desligamentos indevidos do equipamento devido às depressões de tensão.

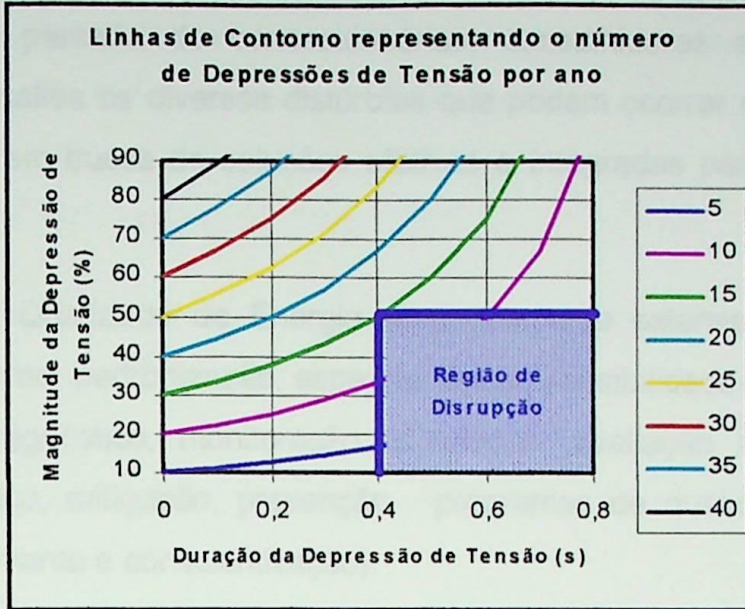


Figura 2-20 Linhas de Contorno de Desempenho de Depressões de Tensão e Sensibilidade do Equipamento

No exemplo da Figura 2-20, a quina de sensibilidade intercepta a linha de contorno de 15 eventos de depressões de tensão. Logo, este equipamento específico experimentará 15 interrupções de processo por ano.

2.12 Conclusões

O emergente cenário de mercado competitivo de energia expandirá extremamente as opções para os seus consumidores, promovendo a abertura de novos serviços de fornecimento de energia e criando novas oportunidades e expectativas.

As concessionárias necessitam de soluções que as auxiliem a reduzir custos e a permanecer financeiramente viáveis, e ao mesmo tempo a conservar e satisfazer seus consumidores.

Os consumidores necessitam soluções que os possibilitem automatizar e melhorar tecnologicamente seus processos, renovar e/ou substituir equipamentos, e selecionar fornecedores de energia elétrica que satisfaçam suas necessidades de qualidade de energia com confiabilidade e economia.

A Qualidade de Energia Elétrica é uma área de inovação tecnológica a nível global, que através da parceria de concessionárias, consumidores e fornecedores de equipamentos, analisa os diversos distúrbios que podem ocorrer no fornecimento de energia elétrica, em busca de soluções efetivas e integradas para estes complexos problemas.

Os esforços em Qualidade de Energia abrangem uma extensa gama de tópicos relevantes tais como: padronização, aspectos legais, sensibilidade de equipamentos e componentes, diagnóstico, monitoração, simulação, avaliação de desempenho e impacto econômico, mitigação, prevenção, programas de qualidade de energia e educação (treinamento e conscientização).

Com a crescente utilização de equipamentos baseados em complexas *eletrotecnologias*, as irregularidades na tensão estão se tornando alarmantemente problemáticas tanto para os consumidores quanto para as concessionárias. Além da nova geração de equipamentos ser mais sensível às variações de tensão, ela também é parte responsável pelo aumento da incidência de distúrbios de Qualidade da Energia Elétrica.

Dentre os distúrbios associados à Qualidade da Energia Elétrica, as depressões de tensão (*Voltage Sags*) causam um profundo impacto econômico e operacional nos consumidores com cargas sensíveis, pois provocam a disfunção ou o desligamento indevido de equipamentos, afetando especialmente a confiabilidade industrial, ocasionando a parada parcial ou total de processos, com conseqüentes perdas de produção.

As características de uma depressão de tensão são a magnitude, a duração, a forma de onda e a sua freqüência de ocorrência.

As principais causas das depressões de tensão são as faltas que ocorrem tanto na instalação industrial quanto no Sistema da Concessionária. Outras causas são a partida de grandes motores, a entrada de grandes blocos de cargas e a saída de grandes blocos de geração.

Este capítulo apresentou e discutiu a metodologia de previsão da performance de sistemas de fornecimento de energia elétrica sujeitos à depressões de tensão ocasionadas pela ocorrência de faltas [2], que constituirá um novo capítulo na próxima revisão do *IEEE Standard 493* [1] – “*IEEE Recommended Practice for Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems*”.

Na referida metodologia, a previsão das características das depressões de tensão tem uma abordagem probabilística e suas ferramentas básicas incluem um programa de computador para calcular correntes e tensões de faltas desequilibradas, dados de confiabilidade relativos à faltas, e características dos dispositivos de eliminação de faltas.

A habilidade de previsão das características de depressões de tensão, oferece uma oportunidade ímpar para avaliação de configurações alternativas visando a otimização da performance do sistema, possibilitando a identificação e a possível minimização dos problemas de depressão de tensão.

A representação da tolerância de uma carga sensível a depressões de tensão é fornecida através de uma curva cujos eixos representam a magnitude e a duração de variações de tensão no sistema elétrico. O conhecimento das características das depressões de tensão do sistema elétrico é fundamental para uma especificação apropriada de equipamentos para processos críticos, auxiliando na seleção das melhores opções entre confiabilidade e custo.

Finalmente, foi abordada a técnica de coordenação de equipamentos sensíveis com as características das depressões de tensão do sistema, a qual propõe a elaboração de um único gráfico relacionando as características de magnitude e duração. Uma importante vantagem desse método, é que a curva de sensibilidade de um equipamento a ser analisado também pode ser traçada neste mesmo gráfico, permitindo uma identificação direta do número de desligamentos indevidos do equipamento por ano.

Implementação Computacional

3.1 Introdução

Muitas das atividades do mundo moderno e sua sociedade requerem o fornecimento contínuo de uma energia elétrica dentro de padrões de qualidade. A principal preocupação de todo o setor elétrico é minimizar os impactos causados aos consumidores quando da ocorrência de uma perturbação no sistema de potência. Portanto, todas as concessionárias do setor, para poder cumprir com este compromisso, devem fazer investimentos nos seus sistemas.

As depressões de tensão têm um impacto significativo nos equipamentos dos consumidores, degradando a sua performance, diminuindo seu tempo de vida ou ocasionando significativas perdas de produção. As depressões de tensão (reduções entre 10% e 90% da tensão nominal), afetam muito mais consumidores do que as interrupções momentâneas de tensão (reduções para valores inferiores a 10% da tensão nominal). Contudo, esses dois distúrbios de Qualidade de Energia Elétrica ocorrem na mesma faixa de duração (entre $\frac{1}{2}$ ciclo e 1 minuto) e as conseqüências das ocorrências de ambos são igualmente transtornantes, tanto operacionalmente, quanto financeiramente. Por isso, usualmente os dois distúrbios são englobados numa única análise.

No âmbito das concessionárias de energia elétrica, a análise de depressões de tensão visa conhecer o comportamento do sistema durante esses distúrbios, possibilitando a avaliação de sua performance global e o impacto em seus consumidores. Possibilita adicionalmente, analisar o desempenho dos componentes do sistema e oferece a oportunidade de avaliar configurações alternativas, visando reduzir o número de desligamentos indevidos, tão incômodos para os consumidores.

Outro propósito da análise de depressões de tensão, é melhor informar novos e atuais consumidores sobre as estimativas de incidências de depressões de tensão e desligamentos indevidos em suas instalações. Estas informações podem ser usadas para assessorar os consumidores na especificação de equipamentos e no processo de avaliação de investimentos alternativos visando minimizar os problemas decorrentes da sensibilidade de seus equipamentos/processos à distúrbios de depressão de tensão. No ambiente competitivo do setor elétrico contemporâneo, existe uma definitiva necessidade das concessionárias proporcionarem maiores informações concernentes a depressões de tensão para os seus consumidores.

Este Capítulo comenta o desenvolvimento e implementação de uma ferramenta computacional para análise de depressões de tensão em consumidores com cargas sensíveis, ocasionados por faltas ocorridas ao longo das linhas do sistema elétrico.

3.2 O Estado da Arte no Desenvolvimento de Aplicativos para Análise de Depressões de Tensão

Em resposta ao crescente interesse de seus consumidores pela Qualidade da Energia Elétrica, as empresas de energia elétrica estão desenvolvendo programas de filosofia reativa, visando atender as reclamações de consumidores, ou de filosofia proativa, onde as concessionárias estão envolvidas na educação dos consumidores e na promoção de serviços que possam auxiliar no desenvolvimento de soluções para problemas de Qualidade da Energia Elétrica.

Visando apresentar experiências bem sucedidas na área de análise de depressões de tensão, três aplicativos são comentados a seguir.

3.2.1 *Análise de Depressões de Tensão em Sistemas de Distribuição*

A aplicação integrada **VSAG**, foi desenvolvida e implementada num projeto do Departamento de R&D da *PG&E - Pacific Gas and Electric Company*, San Francisco, Califórnia [20]. Este aplicativo analisa as depressões de tensão associadas a faltas ocorridas nos alimentadores de distribuição de energia elétrica.

A maioria das ocorrências de depressões de tensão é ocasionada por faltas no sistema de suprimento de energia elétrica, ou nas instalações dos consumidores. Tradicionalmente, as concessionárias documentam os eventos de falta, registrando informações tais como a data e o horário da ocorrência, o tipo de falta, a localização da falta, e a impedância de falta. Cada evento de falta relatado pela equipe de campo, pode resultar em uma ou mais depressões de tensão. Por outro lado, existem ferramentas computacionais, como os programas de curto-circuito, que podem simular as tensões pós-falta baseadas nas informações do sistema e nas informações relativas aos eventos de faltas. As informações do sistema elétrico incluem a topologia da rede, estados de chaves, impedâncias do sistema, condições de carga, impedâncias de falta, conexões de transformadores, as tensões pré-falta e características dos dispositivos de proteção.

O objetivo desse aplicativo é utilizar o histórico de interrupções e as informações do sistema para calcular, através de um algoritmo analítico, as depressões de tensão ocorridas em consumidores individuais do sistema, visando fornecer informações úteis tanto para a concessionária quanto para os seus consumidores.

Tecnologias computacionais de estado da arte são utilizadas para garantir a eficiência, compatibilidade, e flexibilidade do processo de integração de informações e seus múltiplos benefícios. O ambiente de *software* é baseado em tecnologia de programação *Winsock*, para ambiente *UNIX* e *Windows*. As fontes de dados incluem os bancos de dados (*Oracle*) do sistema de distribuição, e o histórico de interrupções, ambos residentes em estações *SUN/UNIX*, disponíveis via redes de comunicação de dados.

O **VSAG** possui três componentes principais: a análise de curto-circuito residente em uma estação SUN/UNIX dedicada, uma interface gráfica para usuários de microcomputadores como ferramenta de exibição de dados, e um *software* de integração de aplicações, também residente nos microcomputadores, para gerenciar a execução da aplicação e controlar o fluxo de informações das diferentes plataformas, possibilitando o seu intercâmbio.

Visando fornecer uma solução mais precisa na análise de curtos-circuitos de distribuição, as tensões pré-falta são calculadas por um poderoso fluxo de potência trifásico para sistemas de distribuição em tempo real, com parâmetros de carga sazonal apropriados. A seguir, o algoritmo de curto-circuito utiliza o método de compensação híbrida para calcular tensões pós-falta trifásicas para sistemas de distribuição equilibrados ou desequilibrados. A magnitude da depressão de tensão devido à falta é obtida a partir das tensões pré-falta e pós-falta.

Um aplicativo computacional baseado em *CAD (Computer-Aided-Drawing)* e residente em microcomputadores com ambiente *Windows* é utilizado para exibir os dados do **VSAG**. Este produto está disponível no mercado e seu manuseio é similar aos sistemas de automação da distribuição. A tecnologia *CAD* tem sido empregada em vários campos, por suas facilidades de atualização e reaproveitamento de elementos. Um arquivo *CAD* pode ser descrito como uma descrição vetorial de desenhos com representações orientadas a objeto das entidades desenhadas. Diferentes objetos podem ser armazenados em *layers* distintos para controle de visualização. A interface com o usuário do **VSAG** permite exibir os alimentadores do sistema, integrados à mapas de ruas da cidade, e detalhar os seus equipamentos conforme a necessidade. Este produto permite a visualização dos diagramas do sistema em vários fatores de escala e possibilita a exportação de dados e figuras para produtos tais como os do *Microsoft Office*.

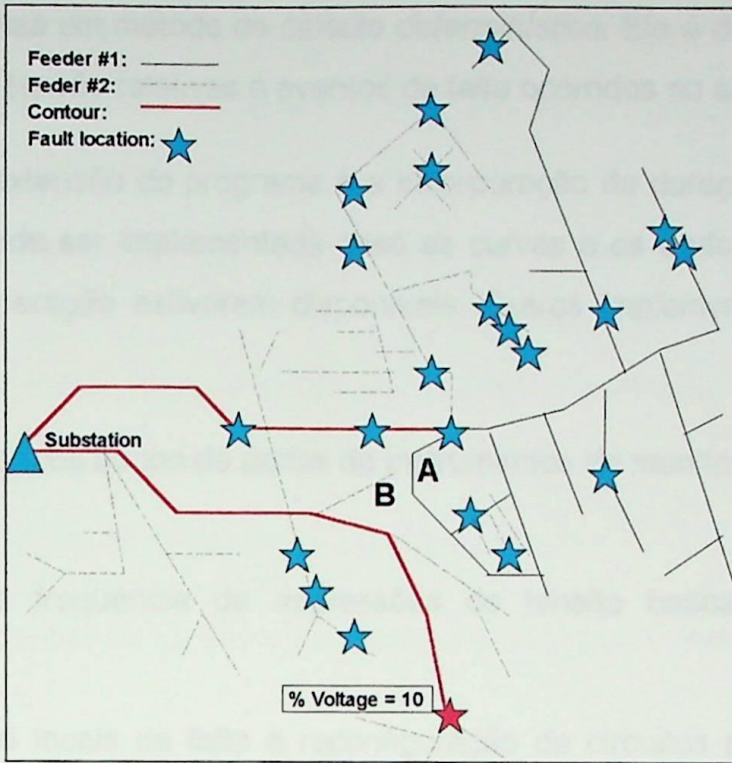


Figura 3-1 Exibição de um alimentador no Sistema VSAG

Através da interface gráfica, o usuário informa o consumidor desejado e o período de tempo a ser estudado. O software de integração pesquisa os bancos de dados, prepara as informações necessárias e desencadeia o processamento do programa de análise de curto-circuito. Os resultados obtidos são gravados no microcomputador do usuário em padrão *Microsoft Access*, ou *Excel*, ou *Word*. A interface gráfica recupera os resultados e os exibe em mapas geográficos com os alimentadores de distribuição, identificando inclusive as linhas de contorno representando áreas de vulnerabilidade, como na Figura 3-1. Também são fornecidos gráficos estatísticos, como na Figura 3-2.

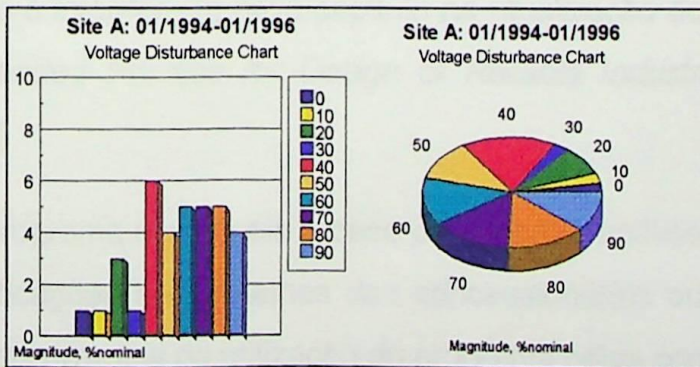


Figura 3-2 Gráficos de Distúrbios de Tensão gerados pelo Sistema VSAG

Este aplicativo utiliza um método de cálculo *determinístico*. Ele é destinado ao cálculo de depressões de tensão relativas à eventos de falta ocorridos no sistema.

Uma importante extensão do programa é a incorporação da duração das depressões de tensão, que pode ser implementada caso as curvas e os dados de operação dos dispositivos de operação estiverem disponíveis. Outras implementações planejadas são:

- a integração com os banco de dados de instrumentos de monitoração de qualidade da energia;
- a previsão da frequência de depressões de tensão baseada em dados de confiabilidade;
- a simulação de locais de falta e reconfiguração de circuitos para determinar os impactos nas características das depressões de tensão;
- o cálculo de índices de depressão de tensão para o sistema e para consumidores individuais;
- a determinação do impacto das interrupções de transmissão nas depressões de tensão da distribuição.

3.2.2 Serviço de Análise de Depressões de Tensão nos Consumidores

O programa de análise de depressões de tensão desenvolvido pela *Power Technologies, Inc. (PTI)* [21] utiliza a metodologia discutida no Capítulo 2 e proposta na referência [9] para integrar um novo capítulo na atualização do *IEEE Standard 493 – “IEEE Recommended Practice for Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems”* [1].

Os resultados do programa constituem a base para futuras análises de custo-benefício de possíveis modificações nos sistemas das concessionárias ou dos consumidores. Outros benefícios decorrentes da utilização do programa pelas concessionárias são:

- atração de novos consumidores pelo fornecimento de energia de melhor qualidade;
- conservação dos clientes existentes através da rápida correção do desempenho do sistema;
- identificação de localidades com baixa incidência de depressões de tensão para novos consumidores;
- identificação de áreas do sistema que necessitam de melhorias;
- melhoria da relação empresa-cliente;
- avaliação do sistema de proteção contra sobrecorrente.

A análise de depressões de tensão executada pelo programa consiste basicamente de quatro procedimentos:

- Análise de fluxo de potência considerando a representação de componentes de seqüência zero e das reatâncias X_d'' ou X_d' das máquinas.
- Cálculo de depressões de tensão pelo processo de aplicação de faltas deslizantes trifásicas, fase-fase, fase-terra e fase-fase-terra ao longo de todas as linhas do sistema de potência. Para a aplicação das faltas, cada linha é dividida em seções iguais. O número de seções varia de acordo com o comprimento da linha. As tensões de fase ou linha no consumidor são gravadas para cada condição de falta.
- Cálculo do número de depressões de tensão no consumidor, utilizando as taxas de faltas das linhas do sistema, os resultados do fluxo de potência e as tensões determinadas no processo de aplicação de faltas deslizantes. Dependendo da conexão da carga do consumidor, a taxa de ocorrência de depressões de tensão pode ser calculada em função da tensão de linha e/ou da tensão de fase.
- Os dados obtidos do fluxo de potência, do processo de aplicação de faltas e do cálculo das ocorrências de depressões de tensão podem ser ordenados por magnitude, tipo de falta, local da falta e tensão nominal do sistema no ponto da falta. As áreas de vulnerabilidade podem ser plotadas num mapa geográfico ou diagrama unifilar, que podem ser usados para destacar linhas de transmissão ou

distribuição que necessitem de investimentos em confiabilidade. Também podem ser exibidos gráficos de barras (Figura 3-3) ou setores (Figura 3-4) mostrando o número total de depressões de tensão distribuído por classe de tensão no ponto de falta, área/região da falta, ou tipo da falta para facilitar a identificação de focos.

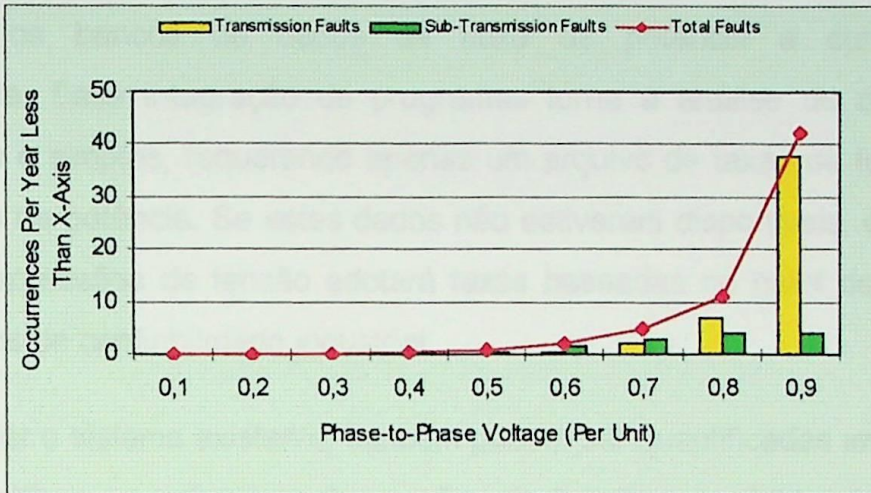


Figura 3-3 Ocorrências de Depressões de Tensão para Falhas de Transmissão e Distribuição

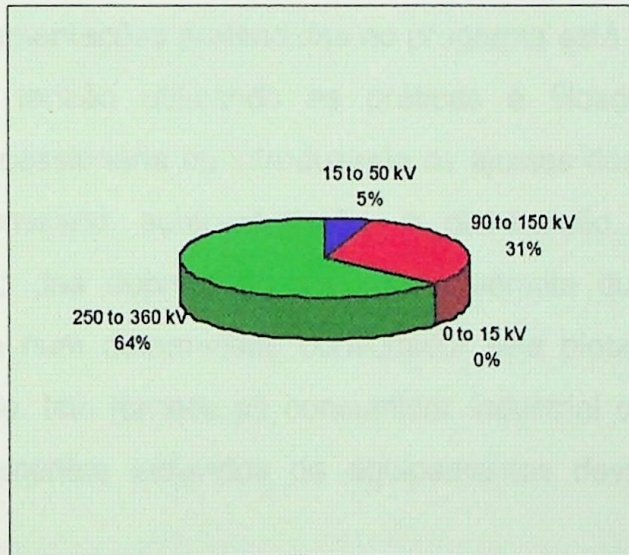


Figura 3-4 Ocorrências de Depressões de Tensão por Classe de Tensão no Local da Falta

Embora muitos pacotes de fluxo de potência e análise de faltas fossem capazes de calcular a magnitude e o número de ocorrências para uma determinada falta, poucos tinham a capacidade de integrar as quatro etapas num único programa. Por este motivo, os estudos de depressão de tensão no passado eram comumente limitados a

pequenas áreas geográficas. Entretanto, a execução dos programas de fluxo de potência e análise de faltas pode ser automatizada para executar todas as referidas etapas num único programa. Essa automação é realizada por uma poderosa linguagem de programação que pode controlar e acessar dados e resultados com o *IPLAN*, um programa de análise de faltas. Como o *IPLAN* faz parte do *PSS/E*, podem ser usados os bancos de dados de fluxo de potência e curto-circuito da concessionária. Essa integração de programas torna a análise de depressões de tensão rápida e simples, requerendo apenas um arquivo de taxas de falta para cada ramo do fluxo de potência. Se estes dados não estiverem disponíveis, o programa de análise de depressões de tensão adotará taxas baseadas no nível de tensão e em valores médios de confiabilidade industrial.

Alem de avaliar o sistema existente, também podem ser quantificadas implementações que podem mitigar ou reduzir as depressões de tensão, possibilitando a análise de custo-benefício.

Entre as futuras implementações pretendidas no programa está a inclusão da duração das depressões de tensão utilizando as práticas e filosofias de proteção de sobrecorrente da concessionária ou introduzindo os ajustes dos relés e fusíveis para cada linha de transmissão, subtransmissão, e distribuição. O conhecimento da magnitude e duração das depressões de tensão permite que o desempenho da depressão de tensão num determinado consumidor seja plotado diretamente numa curva de sensibilidade. Isto fornece ao consumidor industrial o número médio anual esperado de desligamentos indevidos de equipamentos devido a depressões de tensão.

3.2.3 *Power Quality Toolbox*TM - Módulo de Análise de Depressões de Tensão

O ***VSAT*** Módulo de Análise de Depressões de Tensão (*Voltage Sag Analysis Module*) da ferramenta computacional *Power Quality Toolbox*TM do Electric Power Research Institute – EPRI, foi preparado em parceria com a Electrotek Concepts, Inc. [22].

O programa foi projetado para ambiente *Windows 95* ou *Windows NT* e utiliza bancos de dados tipo *.mdb* compatíveis com o *Microsoft Access*.

A Figura 3-5 ilustra o processo básico utilizado no **VSAT** para a previsão do desempenho de depressões de tensão numa determinada localização.

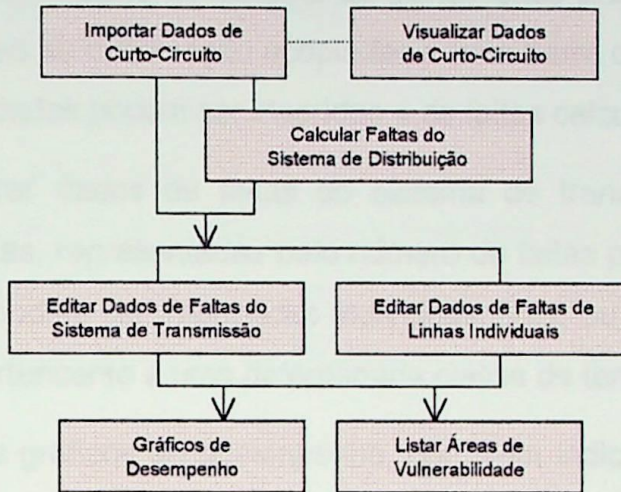


Figura 3-5 Processos Básicos do VSAT - Voltage Sag Analysis Tool

As etapas básicas de utilização do **VSAT** são:

- Abrir/criar um novo banco de dados de depressões de tensão.
- Importar dados de curto-circuito previamente gerados no *Aspen OneLiner*. O *Aspen OneLiner* é um aplicativo de grande capacidade de armazenamento de dados, largamente utilizado no setor elétrico mundial. Sua habilidade de converter arquivos de diversos formatos, tais como *PECO*, *PTI*, e *Electrocon*, garante a compatibilidade com os dados de várias concessionárias. Além de manusear vários componentes do sistema tais como auto-transformadores, geradores, acoplamentos mútuos, capacitores, etc., também inclui um banco de dados de relés onde podem ser efetuados estudos de coordenação da proteção. Além de permitir o processamento automático de faltas em segmentos de linhas especificados, o *Aspen OneLiner* possui um módulo *batch* de curto-circuito, que processa análises de depressões de tensão conforme as especificações do usuário, que podem ser

armazenadas em arquivos. Estes arquivos são utilizados pelo **VSAT** para importar os dados de curto-circuito.

- Visualizar dados de curto-circuito importados do *Aspen OneLiner*.
- Calcular Faltas de Sistemas de Distribuição. Quando os dados do sistema de distribuição não fazem parte do sistema de transmissão processado, mas o efeito das faltas nas linhas de distribuição acopladas a uma barra comum for considerado importante, estes dados podem ser inseridos e as faltas calculadas.
- Introduzir ou alterar dados de faltas do sistema de transmissão. As taxas de frequências de faltas, representadas pelo número de faltas por 100 milhas de cada linha do sistema, podem ser informadas individualmente, ou para grupos de linhas de transmissão pertencente a uma determinada classe de tensão.
- As opções para os gráficos de desempenho, permitem indicar os tipos de faltas a serem aplicados, especificar como a carga crítica está conectada, e determinar como o desempenho será calculado e exibido graficamente.
- As opções para listagem de áreas de vulnerabilidade possibilitam ao usuário especificar os parâmetros de sensibilidade de um equipamento. O sistema será então pesquisado para que sejam indicadas as suas partes que são vulneráveis à ocorrência de faltas que possam afetar o equipamento.

3.3 Metodologia Utilizada

Um sistema elétrico é usualmente composto por um conjunto de componentes estatisticamente independentes, tais como geradores, linhas de transmissão, subestações e proteções que dão segurança a todos eles. Nenhum destes componentes opera livre de falhas, isto é, estes não são completamente confiáveis em sua operação. Se um ou mais componentes do sistema de potência falham devido a uma perturbação inesperada, uma parte ou todos os usuários poderão sofrer interrupção de energia [23].

No processo de determinação do desempenho de sistemas sujeitos à depressões de tensão, os únicos componentes do sistema considerados são as linhas de transmissão e distribuição sujeitas à faltas, que são representadas por modelos discretos de múltiplos estados de tensão, referentes aos segmentos das linhas onde são aplicadas as faltas. Supõe-se que todos os locais de falta ao longo de uma linha sejam equiprováveis, obedecendo a uma distribuição uniforme.

Outro evento a ser considerado no processo é o comportamento da carga, determinado por suas características de sensibilidade ao distúrbio de depressão de tensão. Embora uma seqüência de níveis de sensibilidade de carga não represente um componente físico, ela pode ser interpretada como tal, porque modelos de carga também são representados por múltiplos estados de sensibilidades discretas.

A avaliação probabilística do desempenho de sistemas sujeitos à depressões de tensão baseia-se no conceito de perda de carga. Todas as metodologias baseadas nesse conceito classificam os estados do sistema em estados de falha (não atendimento da carga) e estados de sucesso (operação normal), sendo analisados somente os estados de falha, os quais comprometem a confiabilidade do atendimento ao consumidor.

O método de frequência e duração é baseado na propriedade de poder resolver recursivamente por convolução discreta, além das probabilidades de estado de depressão de tensão também as suas frequências [24].

Basicamente, o método da frequência e duração combina, através de técnicas de *Markov*, estados de magnitude e duração da depressão de tensão na barra do consumidor devido à aplicação de faltas nas linhas do sistema, com estados de sensibilidade da carga, igualmente definidos por limites de tolerância de magnitude e duração.

O desempenho do sistema é medido através de índices calculados, que auxiliam na avaliação de alternativas de investimento que resultem na melhor relação custo-benefício, tanto sob o enfoque da concessionária como sob a ótica do consumidor.

3.3.1 Funções de Distribuição e Densidade de Probabilidade das Tensões nas Barras Monitoradas

As tensões decorrentes de faltas em um sistema elétrico são funções de muitas variáveis, cujos valores são afetados tanto por procedimentos determinísticos quanto por condições probabilísticas [25].

Assim, durante determinado período de observação, em qualquer data ou horário pode ocorrer uma falta em qualquer componente do sistema. São também possíveis curtos-circuitos trifásicos equilibrados ou curtos-circuitos assimétricos. Portanto as tensões decorrentes de faltas devem ser representadas por variáveis aleatórias.

As tensões decorrentes de faltas num sistema de potência dependem fundamentalmente:

- Das características estruturais do sistema, tais como as impedâncias dos diversos componentes e os comprimentos das linhas de transmissão. Estas características são usualmente bem conhecidas e invariantes.
- Das características operacionais do sistema, definidas em função do nível de solicitação (demanda) e da topologia da rede no instante da ocorrência da falta, que são grandezas que variam estatisticamente.
- Das características inerentes às próprias faltas, tais como a localização e o tipo das mesmas, que pela sua própria natureza, variam de forma casual ou aleatória.

A função de distribuição $F_J(V)$ da variável aleatória contínua *Tensão no Consumidor* devido à uma falta ocorrida numa das linhas do sistema é determinada considerando-se J como uma variável aleatória dependente das variáveis aleatórias discretas *Estado do Sistema*, *Linha Faltosa* e *Tipo da Falta*, e da variável aleatória contínua *Local da Falta*. O local da falta é expresso em função de sua distância em relação aos dois terminais da linha. Para os estados de operação do sistema, podem, por exemplo, ser consideradas configurações referentes aos estados de carga baixa, o de carga média e o de alta, ponderados por suas respectivas probabilidades de ocorrência. Na análise

de faltas o estado do sistema se reflete nas tensões pré-falta, que devem ser obtidas através de estudos preliminares de fluxo de potência.

Através de um programa de análise de faltas, os vários tipos de faltas, com suas probabilidades, são aplicados em vários pontos ao longo das linhas do sistema como indicado na Figura 3-6, obtendo-se como resultado do processo as funções de distribuição e densidade de probabilidade da variável aleatória *Tensão no Consumidor*.

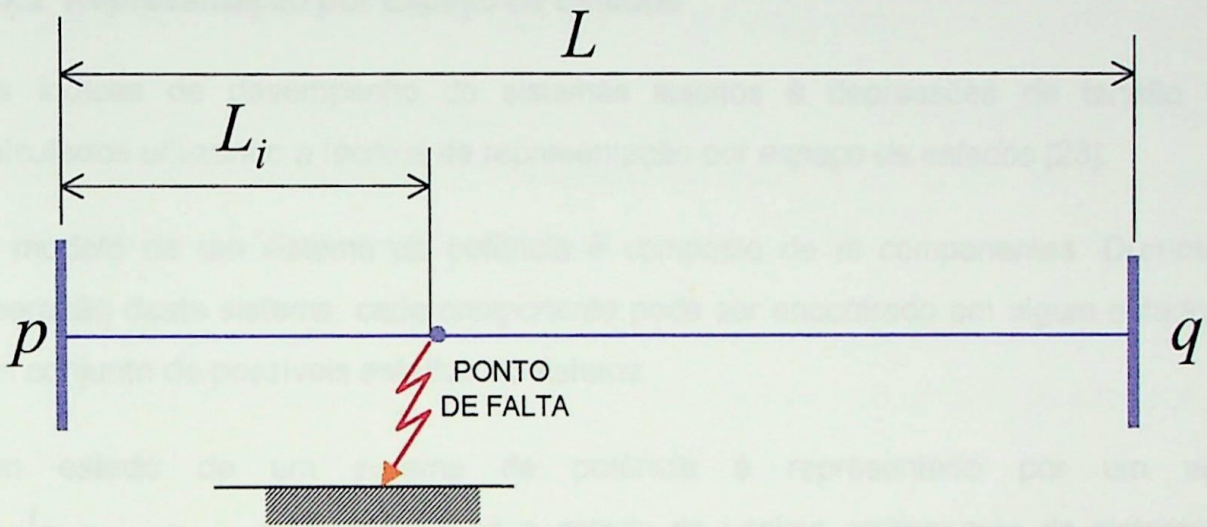


Figura 3-6 Falta aplicada a uma distância L_i da linha pq de comprimento L .

Supõe-se que todos os locais de falta ao longo de uma linha sejam equiprováveis, obedecendo a uma distribuição uniforme, como indica a função de densidade de probabilidade da Figura 3-7.

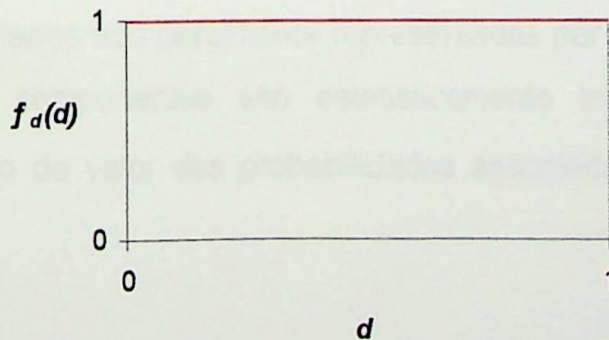


Figura 3-7 Função de densidade de probabilidade da variável aleatória contínua *Local da Falta*: $d=L_i/L$ definida no intervalo $[0,1]$

A formulação probabilística para a previsão do desempenho das tensões decorrentes de faltas num sistema elétrico de potência e a análise dos resultados daí decorrentes permitem obter maior riqueza de informações, traduzida pela obtenção das funções de densidade de probabilidade e de distribuição das tensões nas barras monitoradas, permitindo deste modo quantificar as incertezas associadas à ocorrência das faltas, levando em conta as possíveis condições de operação do sistema e a variabilidade estatística das variáveis envolvidas.

3.3.2 Representação por Espaço de Estados

Os índices de desempenho de sistemas sujeitos à depressões de tensão são calculados utilizando a técnica de representação por *espaço de estados* [23].

O modelo de um sistema de potência é composto de m componentes. Durante a operação deste sistema, cada componente pode ser encontrado em algum estado de um conjunto de possíveis estados do sistema.

Um estado de um sistema de potência é representado por um vetor $x = (x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_m)$, onde, x_j é o estado do j -ésimo componente do sistema. O conjunto de todos os possíveis estados x é denominado espaço de estados X e resulta da combinação de todos os estados dos componentes do sistema.

Cada estado do j -ésimo componente tem uma probabilidade de ocorrência associada, $P(x_j)$. Dado o estado de cada componente, é possível determinar a probabilidade do vetor de estado x , $P(x)$, e as suas respectivas taxas de transição entre estados. As transições entre os estados são geralmente representadas por modelos *Markovianos*. Quando os estados componentes são estatisticamente independentes, $P(x)$ é calculada pelo produto do valor das probabilidades associadas ao estado de cada componente.

A adequação de cada estado x é avaliada através de funções teste $F(x)$. As funções de teste fornecem uma medida do desempenho do sistema em cada um de seus estados. $F(x)$ é função de um vetor aleatório x , sendo portanto uma variável aleatória.

As metodologias para avaliação probabilística do desempenho de sistemas sujeitos à depressões de tensão baseiam-se no conceito de perda de carga, classificando os estados do sistema em estados de falha (desligamento da carga) e estados de sucesso (operação normal), e analisando somente os estados de falha, os quais comprometem a confiabilidade do atendimento ao consumidor.

A aproximação básica para avaliar a adequação de uma configuração particular do sistema à distúrbios de depressão de tensão ocasionados por faltas nas linhas desse sistema envolve três passos fundamentais:

- Construir um modelo da tensão disponível no consumidor C em condições de falta nas linhas do sistema, traduzido por vetores aleatórios de magnitude e duração de depressões de tensão (variáveis aleatórias V_C e D_C).
- Obter um modelo apropriado da sensibilidade da carga L à depressões de tensão, igualmente definido por limites de tolerância de magnitude e duração (vetores aleatórios V_L e D_L) num período de estudo.
- Comparar o modelo de tensão disponível no consumidor com o modelo de sensibilidade da carga para obter o modelo probabilístico do desempenho do sistema.

Seja um consumidor genérico C com uma carga L cuja sensibilidade está representada na curva da Figura 3-8 através dos limites de tolerância de magnitude de depressão de tensão e duração do distúrbio.



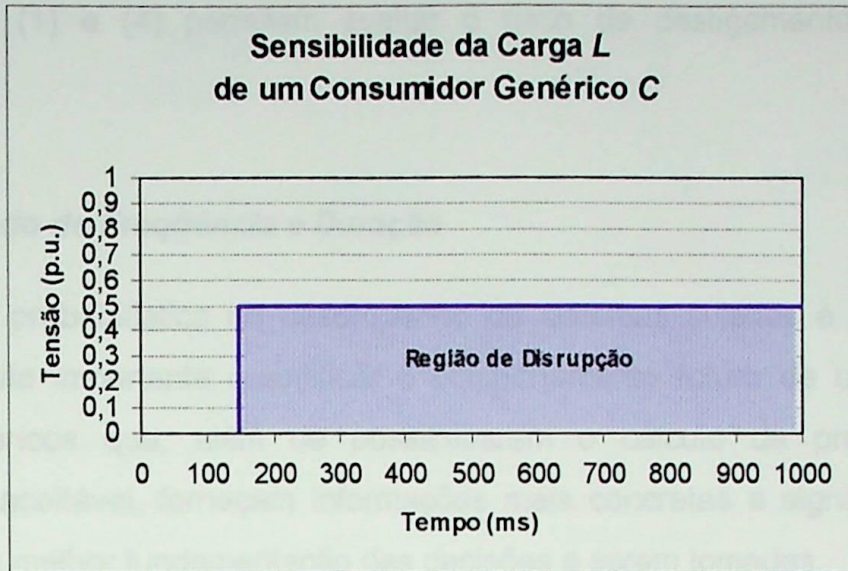


Figura 3-8 Sensibilidade da carga de um consumidor genérico à depressões de tensão.

As condições para a disrupção da carga sensível são:

$$\{V_C < V_L\} \text{ e } \{D_C > D_L\}$$

A probabilidade de desligamento da carga do consumidor é:

$$P_F = P[V_C < V_L \text{ e } D_C > D_L] \quad (1)$$

Quando se avaliam somente as magnitudes de depressão de tensão, a função de desempenho do sistema é definida como:

$$g(V_C, V_L) = V_C - V_L \quad (2)$$

A função de falha representando a condição de desligamento da carga é:

$$g(V_C, V_L) < 0 \quad (3)$$

Portanto, a probabilidade de desligamento da carga é simplesmente:

$$P_F = F_g(0) = P[(V_C - V_L) < 0] \quad (4)$$

As equações (1) e (4) permitem avaliar o risco de desligamento da carga no consumidor.

3.3.3 O Método de Frequência e Duração

Na avaliação probabilística do desempenho de sistemas sujeitos à depressões de tensão, é muito importante quantificar o comportamento futuro de um sistema por índices numéricos que, além de possibilitarem o cálculo da probabilidade de desempenho aceitável, forneçam informações mais concretas e significativas e que permitam uma melhor fundamentação das decisões a serem tomadas.

A metodologia de Frequência e Duração [23,24] toma como ponto de partida, a existência de experiências (observação dos estados de um sistema ao longo do tempo) que admitem ser modeladas por processos contínuos de Markov (espaço discreto, tempo contínuo e taxas constantes de transição entre estados). A representação *Markoviana* dos componentes do sistema considera que o tempo de residência em cada estado do sistema, e também para os seus componentes, é representado por uma distribuição exponencial.

No método de frequência e duração, o comportamento de um componente ou sistema é descrito por um modelo matemático e, os índices de desempenho desejados são obtidos pela solução deste modelo, em forma explícita ou numérica. A tensão disponível no consumidor e a sensibilidade da carga são representadas por seus respectivos modelos *Markovianos*, os quais são combinados num processo de convolução e, utilizando a enumeração de estados, obtém-se os estados de sucesso e falha na operação da carga sensível, resultando o modelo probabilístico do desempenho sistema.

A frequência de ocorrência de um determinado estado pertencente a um espaço de estados representativo de um processo contínuo de Markov é determinada considerando as taxas de transição entre os estados.

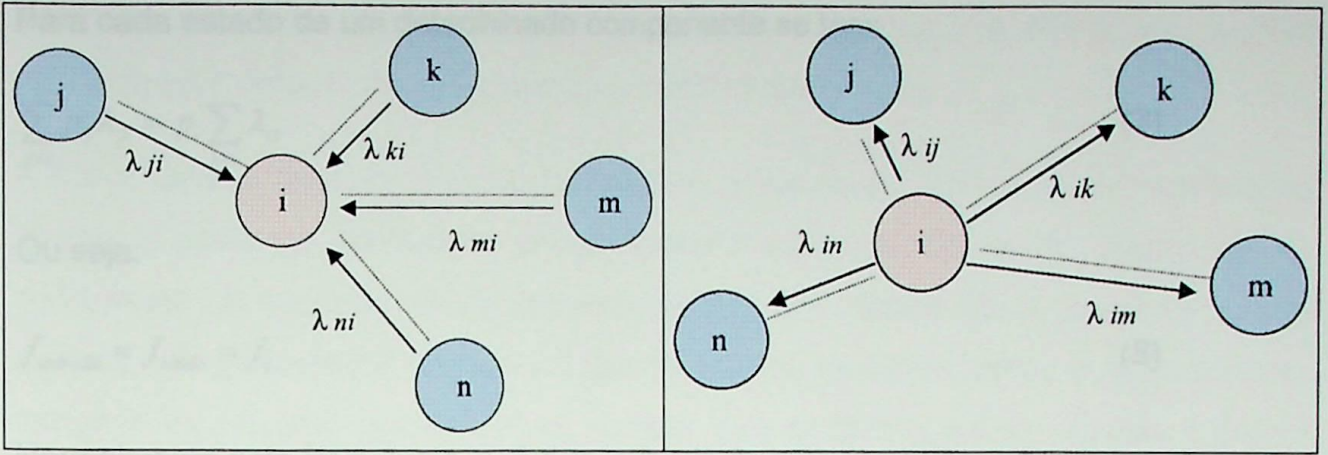


Figura 3-9 a) Diagrama de Espaço de Estados, representando a entrada do sistema no Estado i [23]
 b) Diagrama de Espaço de Estados, representando a saída do sistema do Estado i [23]

Considerando todas as taxas de transição que entram no estado i , conforme ilustrado na figura 3-9-a, pode-se determinar o número de vezes, por unidade de tempo, em que o sistema entra no estado i :

$$f_{entrada} = \sum_{j \neq i} p_j \lambda_{ji} \tag{5}$$

Onde,

p_j Probabilidade estacionária do estado j

λ_{ji} Taxa de transição do estado j para o estado i

O número de vezes, por unidade de tempo, em que o sistema sai do estado i é determinado considerando todas as taxas de transição que saem do estado i na figura 3-9-b.

$$f_{saida} = p_i \sum_{j \neq i} \lambda_{ij} \tag{6}$$

Onde,

p_i Probabilidade estacionária do estado i

λ_{ij} Taxa de transição do estado i para o estado j

Para cada estado de um determinado componente se tem:

$$\sum_{j \neq i} p_j \lambda_{ji} = p_i \sum_{k \neq i} \lambda_{ik} \quad (7)$$

Ou seja:

$$f_{entrada} = f_{saida} = f_i \quad (8)$$

Normalmente esta frequência f_i é denominada *freqüência de ocorrência* do estado i .

A duração média do estado i , é calculada pela seguinte expressão:

$$D_i = \frac{P_i}{f_i} \quad (9)$$

Nos estudos de avaliação da performance de sistemas elétricos sujeitos à depressões de tensão é importante a combinação de algumas das grandezas características (probabilidade, freqüência, etc.) de dois ou mais estados para possibilitar a obtenção de um estado equivalente.

Os modelos da tensão disponível no consumidor, da sensibilidade da carga e do risco de desligamento da carga são obtidos pelas técnicas de convolução da seguinte forma:

Para obter o modelo da tensão disponível no consumidor, todos os valores de tensão no consumidor devido à aplicação de faltas ao longo das linhas do sistema devem ser combinados por um processo recursivo para produzir uma unidade equivalente de tensão. A técnica básica deste método consiste em desenvolver de uma maneira seqüencial, uma tabela de probabilidades e freqüências relativas a incrementos de tensão selecionados, acrescentando-se um a um os valores relativos às faltas aplicadas em cada circuito de linha do sistema, ou simplesmente usando equações de convolução. Quando uma linha tiver vários circuitos (comprimento e taxas de falta

iguais) e se supõe a não existência de estados de avaria parciais, tais tabelas podem ser facilmente desenvolvidas utilizando a distribuição binomial.

A maior parcela do esforço computacional no processo de análise de depressões de tensão é gasta na construção de um modelo adequado da tensão disponível no consumidor. A aplicação direta das equações de convolução não é desejável porque durante este processo o número de estados cresce de forma rápida e desordenada, tornando os cálculos morosos. Para superar este problema, as seqüências a serem convoluídas são preparadas de acordo com um incremento de tensão pré-especificado Δ . O processo de convolução utilizando seqüências de impulsos padronizadas é conhecido como *convolução discreta arredondada*, *RDC* (i.e. *Rounded Discrete Convolution*)[24] e possibilita a consecução de uma boa redução, especialmente nos tempos de processamento. A redução da dimensão dos modelos probabilísticos é realizada através da incorporação de determinados estados em outros, especificados previamente. A Figura 3-10 e as equações (10) e (11) demonstram como a probabilidade e a freqüência de um estado i a ser eliminado, são repartidas entre os estados de arredondamento r e s imediatamente adjacentes a ele.

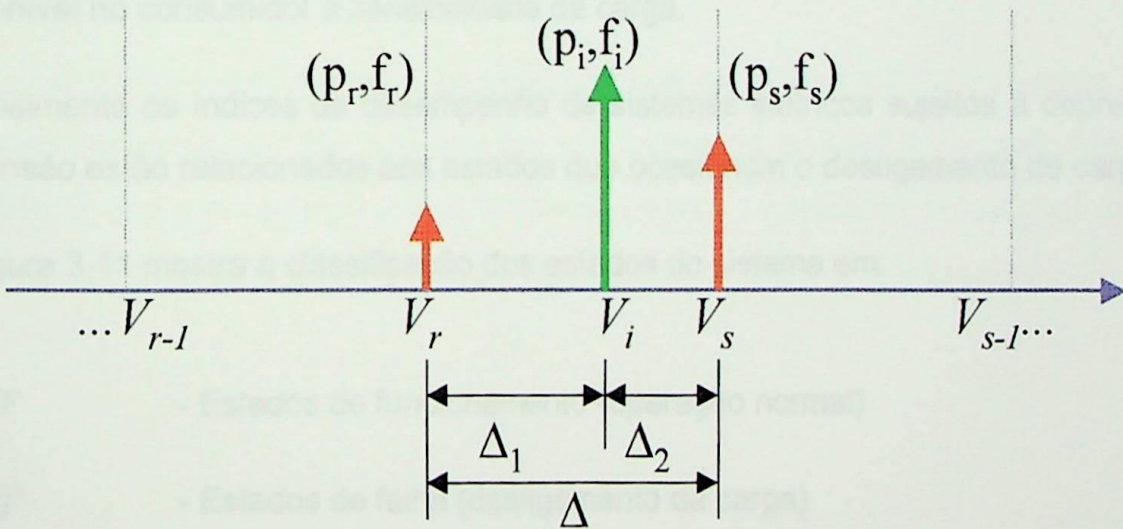


Figura 3-10 Preparação da seqüência de impulsos no processo de Convolução Discreta Arredondada

$$p_r = (\Delta_2 / \Delta)p_i \quad \text{e} \quad p_s = (\Delta_1 / \Delta)p_i \tag{10}$$

$$f_r = (\Delta_2 / \Delta)f_i \quad \text{e} \quad f_s = (\Delta_1 / \Delta)f_i \tag{11}$$

Deve-se salientar que nas técnicas de otimização do processo de convolução, alguns ou todos os estados assim determinados não terão significado real, mas para cada sistema é possível escolher um intervalo ótimo, logrando minimizar os erros inerentes a este tipo de aproximação.

Embora na atual versão do programa sejam utilizados apenas os limites de tolerância ao distúrbio de depressão de tensão, a sensibilidade da carga pode ser representada cronologicamente como um *modelo Markoviano multiestado* (modelo da carga a estados individuais) no qual usualmente a carga é expressa por uma seqüência de níveis discretos definidos sobre um período de análise, cujos intervalos de carga podem ou não ser iguais.

Finalmente, conforme comentado anteriormente, os modelos da tensão disponível no consumidor e da sensibilidade da carga são combinados para a obtenção do modelo de risco de desligamento de cargas e o cálculo de índices de desempenho.

Os índices podem ser determinados a partir dos estados individuais de risco de desligamento de cargas ou através dos estados individuais ou acumulados de tensão disponível no consumidor e sensibilidade da carga.

Normalmente os índices de desempenho de sistemas elétricos sujeitos à depressões de tensão estão relacionados aos estados que ocasionam o desligamento de cargas.

A Figura 3-11 mostra a classificação dos estados do sistema em:

- SF - Estados de funcionamento (operação normal)
- \overline{SF} - Estados de falha (desligamento da carga)

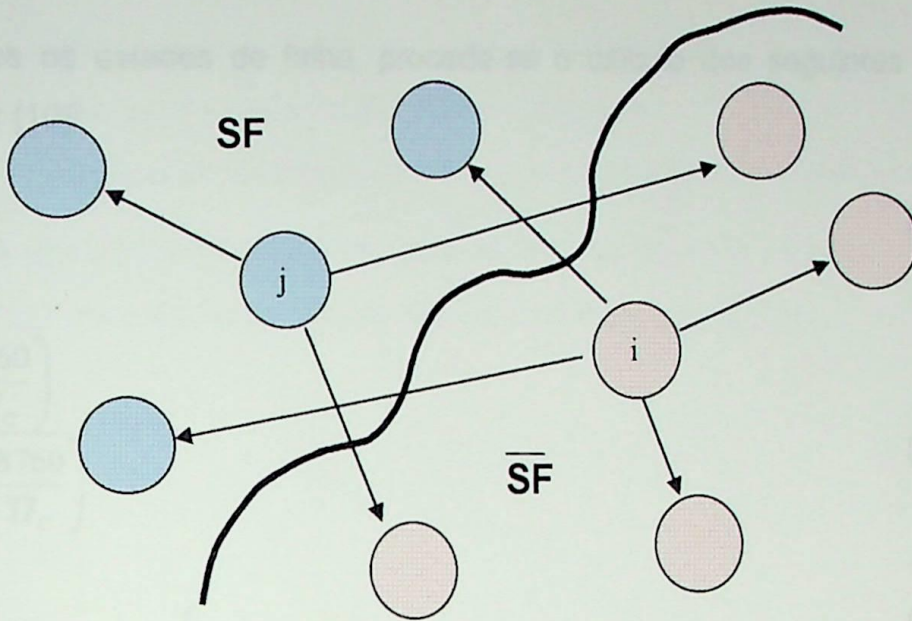


Figura 3-11 Diagrama de Espaço de Estados, representando os estados de sucesso e falha

A identificação dos estados de falha é realizada através da verificação de todos os estados de tensão no consumidor devido à aplicação de faltas ao longo das linhas do sistema. Estes estados de tensão no consumidor têm uma magnitude de tensão e uma duração associadas, sendo que a duração é referente ao tempo de atuação da proteção na linha onde foi aplicada a falta.

Conforme citado anteriormente, as características de magnitude V_C e duração D_C na barra do consumidor C são comparadas aos limites de tolerância de magnitude V_L e duração D_L que expressam a sensibilidade da carga L , e portanto, os estados de falha são aqueles que satisfazem as seguintes condições para o desligamento da carga sensível:

$$\{V_C < V_L\}$$

e

$$\{D_C > D_L\}$$

Identificados os estados de falha, procede-se o cálculo dos seguintes índices por consumidor [10]:

$$f_c = \sum_{i \in SF} l_i \lambda_i \quad (12)$$

$$A_c = \frac{\left(\frac{8760}{TI_c} \right)}{\left(f_c + \frac{8760}{TI_c} \right)} \quad (13)$$

$$P_c = U_c = 1 - A_c = \frac{f_c}{\left(f_c + \frac{8760}{TI_c} \right)} \quad (14)$$

$$DND_c = P_c \cdot W_c \quad (15)$$

$$END_c = DND_c \cdot FC_c \cdot 8760 \quad (16)$$

$$C_c = f_c \cdot CI_c \quad (17)$$

Onde,

l_i	Comprimento do trecho incremental da linha exposto à falta (km) ou (mi)
λ_i	Taxa de ocorrência de faltas na linha para o tipo de curto-circuito aplicado (eventos/mi.ano) ou (eventos/km.ano)
TI_c	Tempo médio de restabelecimento do processo de produção no consumidor (h)
W_c	Demanda do consumidor (MW)
FC_c	Fator de Carga do consumidor
CI_c	Custo médio da interrupção para o consumidor (\$)
f_c	Frequência (número de eventos) anual de desligamento da carga no consumidor
P_c	Probabilidade de desligamento da carga ou indisponibilidade da carga no consumidor
U_c	Indisponibilidade da carga no consumidor
A_c	Disponibilidade da carga no consumidor

DND_c	Demanda anual não distribuída para o consumidor (W)
END_c	Energia não distribuída para o consumidor (kWh)
C_c	Custo anual das interrupções devido à depressões de tensão no consumidor (\$)

A partir dos índices de desempenho para os N consumidores do sistema, os índices globais podem ser calculados através das seguintes equações [10]:

$$DND_s = \frac{\sum_{c=1}^N DND_c}{N} \quad (18)$$

$$END_s = \frac{\sum_{c=1}^N END_c}{N} \quad (19)$$

$$C_s = \frac{\sum_{c=1}^N C_c}{N} \quad (20)$$

3.4 A Ferramenta Computacional Desenvolvida

A ferramenta computacional desenvolvida, objeto da presente dissertação, denominada **VISAGE – Voltage Sag Estimating**, destina-se à análise de depressões de tensão devido à ocorrência de faltas em sistemas elétricos com cargas sensíveis.

O desempenho do sistema é traduzido por índices calculados a nível global e por consumidor, considerando-se os seguintes critérios para a sensibilidade da carga:

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

Alem da agilização do processo de análise de depressões de tensão, as informações disponibilizadas contribuem para uma melhor análise de configurações alternativas visando a otimização da performance dos sistemas das concessionárias e das instalações dos consumidores, baseada naturalmente numa relação custo-benefício.

A metodologia de previsão da performance de sistemas de suprimento de energia elétrica sujeitos à depressões de tensão ocasionados pela ocorrência de faltas, foi discutida no Capítulo 2 e proposta em [2] para integrar um novo capítulo na próxima revisão do *IEEE Standard 493 – “IEEE Recommended Practice for Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems”* [1].

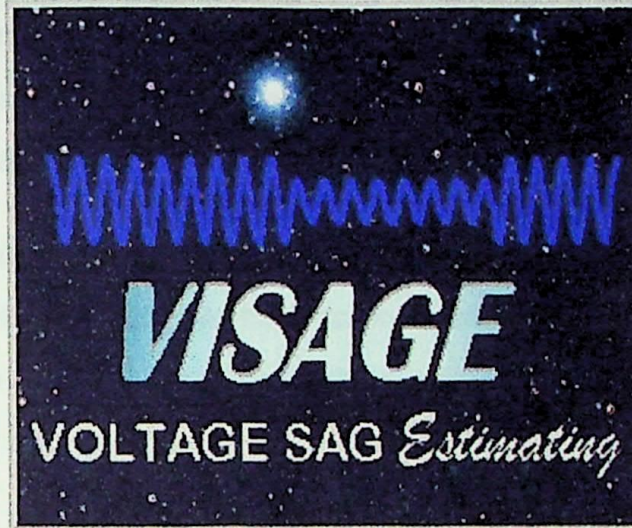


Figura 3-12 Logotipo do VISAGE para a versão Windows 95

A base de dados do VISAGE é constituída por:

- Informações relativas à análise de faltas ao longo das linhas do sistema elétrico, executadas pelos programas ANAFAS do CEPEL ou CCINT da COPEL, incluindo a topologia do sistema, as correntes nos pontos de curto-circuito e as tensões pré e pós-falta nos barramentos dos consumidores monitorados;
- Barramentos dos consumidores monitorados, e características da carga ou processo em análise (sensibilidade à depressões de tensão, demanda, fator de carga, tempo médio de retomada de produção e custo médio da interrupção para o consumidor);
- Taxas de faltas, comprimento e informações de atuação da proteção das linhas do sistema. A versão atual do *software* considera somente proteção de tempo definido.

Os principais produtos gerados pelo aplicativo são:

- A visualização gráfica e numérica do comportamento das tensões nos barramentos de carga monitorados durante a ocorrência de faltas trifásicas, fase-terra, fase-fase-terra e fase-fase ao longo das linhas de transmissão e distribuição do sistema, incluindo diagramas unifilares, gráficos de evolução da tensão com o local da falta e funções de densidade e distribuição de probabilidade das tensões no consumidor. Com relação à conexão da carga, as informações podem ser obtidas para tensões fase-fase ou fase-neutro e são fornecidos os valores por fase, a tensão média, e a mínima dentre as três fases.
- Através das informações da evolução da tensão com o local da falta, podem ser identificadas as áreas de vulnerabilidade do sistema à depressões de tensão. Para facilitar esta tarefa, as informações também podem ser classificadas por ordem de magnitude de tensão.
- A análise do desempenho do sistema em função da frequência de ocorrências de depressões de tensão num determinado consumidor, incluindo o fornecimento das funções de densidade e distribuição de frequência de ocorrências por consumidor, para as linhas do sistema, por classe de tensão das linhas e por tipo de falta.
- A análise do desempenho do sistema para uma carga específica do consumidor, fornecendo a frequência global ou distribuída por linha do sistema e tipo de falta, e calculando os seguintes índices de desempenho: disponibilidade e indisponibilidade da carga ou processo industrial, frequência de ocorrências de interrupções por ano, custo anual de interrupção do processo do consumidor, demanda e energia não distribuída. Esta análise considera dados de desempenho da proteção das linhas do sistema.

Ambas as análises de desempenho citadas podem ser obtidas considerando-se tensões fase-fase ou fase-neutro e segundo os critérios de fase mínima ou média das três fases. Além dessas opções, os dados dos consumidores e das linhas podem ser alterados interativamente, proporcionando grande versatilidade de utilização.

3.4.1 Arquitetura Tecnológica

O sistema de informações *VISAGE* foi projetado para ambiente *Windows* e desenvolvido em *Microsoft Visual Basic*. O aplicativo deve ser instalado num microcomputador 486 com pelo menos 16 MB de *RAM* e *Windows 3.1.1*.

3.4.2 Arquitetura de Dados

O *VISAGE* utiliza bancos de dados tipo *.mdb* compatíveis com o *Microsoft Access*, compostos pelas seguintes tabelas (ENTIDADES):

- BARRA
- CIRCUITO
- ACOPLAMENTO MÚTUO
- CONSUMIDOR
- LINHA
- CURTO-CIRCUITO DESLIZANTE

Segue o detalhamento das tabelas do banco de dados.

- ENTIDADE: BARRA

ATRIBUTO	TIPO	DESCRIÇÃO
Número da Barra	Chave	Número da barra, com 4 caracteres. A barra de referência (barra zero) não deve ser especificada.
Área	Chave	Número da área (subsistema).
Tipo da barra		0 – barra externa 1 – barra interna utilizada na representação de transformadores ("mid-point") 2 – barra de derivação ("line-tap") utilizada para representação de um ponto de derivação em linhas de transmissão
Nome da barra		Nome da barra
Módulo da tensão pré-falta		Valor eficaz fase-fase da tensão pré-falta (p.u.)

Ângulo da tensão pré-falta		Ângulo da tensão pré-falta (graus)
Tensão base		Valor eficaz fase-fase da tensão base (kV)

▪ ENTIDADE: CIRCUITO

ATRIBUTO	TIPO	DESCRIÇÃO
Número da primeira barra terminal	Chave	Número da barra "de", com 4 caracteres.
Número da segunda barra terminal	Chave	Número da barra "para", com 4 caracteres.
Número do circuito	Chave	Número do circuito
Área	Chave	Número da área (subsistema).
Tipo do circuito		G – gerador L – linha de transmissão T – transformador C – carga de impedância constante H – reator ou capacitor "shunt" R – reator de linha (reator "shunt" associado à linha) S – capacitor série
Nome do circuito		Descrição do circuito
R_1		Valor da resistência de seqüência positiva na base de potência 100 MVA (%)
X_1		Valor da reatância de seqüência positiva na base de potência 100 MVA (%)
R_0		Valor da resistência de seqüência zero na base de potência 100 MVA (%)
X_0		Valor da reatância de seqüência zero na base de potência 100 MVA (%)
S_1		Valor da susceptância de seqüência positiva total da linha ("line charging") (MVAr)
S_0		Valor da susceptância de seqüência zero total da linha ("line charging") (MVAr)
TAP		Relação de transformação em relação à primeira barra terminal (TAP:1) (p.u.)
TB		Número da barra terminal do ramo série associado ao ramo em derivação
TC		Número do circuito do ramo série associado ao ramo em derivação
Defasagem de transformador		Ângulo da defasagem de transformador (graus)

▪ ENTIDADE: ACOPLAMENTO MÚTUO

ATRIBUTO	TIPO	DESCRIÇÃO
Número da primeira barra da linha 1	Chave	Número da barra "de" da linha 1 do acoplamento mútuo
Número da segunda barra da linha 1	Chave	Número da barra "para" da linha 1 do acoplamento mútuo
Número do circuito da linha 1	Chave	Número do circuito da linha 1 do acoplamento mútuo
Número da primeira barra da linha 2	Chave	Número da barra "de" da linha 2 do acoplamento mútuo
Número da segunda barra da linha 2	Chave	Número da barra "para" da linha 2 do acoplamento mútuo
Número do circuito da linha 2	Chave	Número do circuito da linha 2 do acoplamento mútuo
R_M		Valor da resistência de seqüência zero da impedância mútua na base de potência 100 MVA (%)
X_M		Valor da reatância de seqüência zero da impedância mútua na base de potência 100 MVA (%)

▪ ENTIDADE: CONSUMIDOR

ATRIBUTO	TIPO	DESCRIÇÃO
Número da barra do consumidor	Chave	Número da barra, com 4 caracteres. A barra de referência (barra zero) não deve ser especificada.
Área	Chave	Número da área (subsistema).
Nome do consumidor		Descrição do Consumidor
Sensibilidade de magnitude de depressões de tensão		Tensão mínima suportada pela carga ou processo industrial (p.u.).
Sensibilidade de exposição à depressões de tensão		Limite de tolerância de tempo de exposição da carga ou processo industrial à depressões de tensão (ms).
Demanda		Demanda (MW)
Fator de Carga		Fator de Carga do Consumidor
Duração da interrupção		Duração média da interrupção, ou seja, o tempo médio necessário para o restabelecimento do processo (h)
Custo da interrupção		Custo médio de interrupção do processo para o consumidor (\$)

▪ ENTIDADE: LINHA

ATRIBUTO	TIPO	DESCRIÇÃO
Número da primeira barra terminal	Chave	Número da barra "de", com 4 caracteres.
Número da segunda barra terminal	Chave	Número da barra "para", com 4 caracteres.
Número do circuito	Chave	Número do circuito
Área	Chave	Número da área (subsistema).
Código da linha		Número da linha, com 4 caracteres.
Nome da linha		Descrição da linha
Tensão da linha		Valor eficaz fase-fase da tensão nominal da linha (kV)
Extensão da linha		Valor da extensão da linha, discriminando inclusive a unidade: mi - milhas km - quilômetros
Taxa de Falta		Taxa de Falta global da linha (eventos/km.ano) ou (eventos/mi.ano)
Percentual de faltas trifásicas		Percentual de faltas trifásicas na linha (%)
Percentual de faltas fase-terra		Percentual de faltas fase-terra na linha (%)
Percentual de faltas fase-fase		Percentual de faltas fase-fase na linha (%)
Percentual de faltas fase-fase-terra		Percentual de faltas fase-fase-terra na linha (%)
Alcance 1ª zona de proteção		Alcance da primeira zona de proteção da linha (%)
Atuação 1ª zona		Tempo de atuação (relé+disjuntor) referente à primeira zona de proteção da linha (ms)
Alcance 2ª zona de proteção		Alcance da segunda zona de proteção da linha (%)
Atuação 2ª zona		Tempo de atuação (relé+disjuntor) referente à segunda zona de proteção da linha (ms)

▪ ENTIDADE: CURTO-CIRCUITO DESLIZANTE

ATRIBUTO	TIPO	DESCRIÇÃO
Código da linha	Chave	Número da linha, com 4 caracteres.
Local da falta	Chave	Valor da distância em relação à primeira barra terminal da linha, discriminando inclusive a unidade: % - porcentagem, mi - milhas, ou km - quilômetros
Número da barra do consumidor	Chave	Número da barra, com 4 caracteres. A barra de referência (barra zero) não deve ser especificada.

Tipo da Falta	Chave	3F – trifásica FT – fase-terra FF – fase-fase 2T – fase-fase-terra
Módulo da tensão na fase A		Módulo da tensão na fase A do consumidor (p.u.)
Ângulo da tensão na fase A		Ângulo da tensão na fase A do consumidor (graus)
Módulo da tensão na fase B		Módulo da tensão na fase B do consumidor (p.u.)
Ângulo da tensão na fase B		Ângulo da tensão na fase B do consumidor (graus)
Módulo da tensão na fase C		Módulo da tensão na fase C do consumidor (p.u.)
Ângulo da tensão na fase C		Ângulo da tensão na fase C do consumidor (graus)
Módulo da tensão de seqüência positiva		Módulo da tensão de seqüência positiva na barra do consumidor (p.u.)
Ângulo da tensão de seqüência positiva		Ângulo da tensão de seqüência positiva na barra do consumidor (graus)
Módulo da tensão de seqüência negativa		Módulo da tensão de seqüência negativa na barra do consumidor (p.u.)
Ângulo da tensão de seqüência negativa		Ângulo da tensão de seqüência negativa na barra do consumidor (graus)
Módulo da tensão de seqüência zero		Módulo da tensão de seqüência zero na barra do consumidor (p.u.)
Ângulo da tensão de seqüência zero		Ângulo da tensão de seqüência zero na barra do consumidor (graus)
Módulo da tensão AB		Módulo da tensão AB na barra do consumidor (p.u.)
Ângulo da tensão AB		Ângulo da tensão AB na barra do consumidor (graus)
Módulo da tensão BC		Módulo da tensão BC na barra do consumidor (p.u.)
Ângulo da tensão BC		Ângulo da tensão BC na barra do consumidor (graus)
Módulo da tensão CA		Módulo da tensão CA na barra do consumidor (p.u.)
Ângulo da tensão CA		Ângulo da tensão CA na barra do consumidor (graus)

3.4.3 Arquitetura da Aplicação

O Diagrama de Estrutura do *VISAGE* está ilustrado na Figura 3-13.

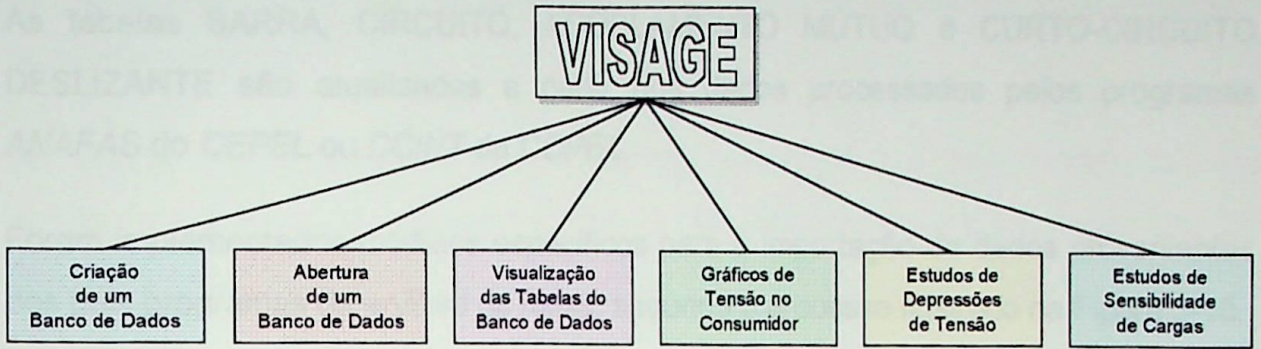


Figura 3-13 *VISAGE* - Diagrama de Estrutura

Os Diagramas de Estrutura exibem a hierarquização dos módulos implementados no sistema desenvolvido. Cada módulo representa uma unidade de programa que executa uma determinada função.

3.4.3.1 Criação de um Banco de Dados

O processo de criação de um Banco de Dados está representado no Diagrama de Estrutura da Figura 3-14.

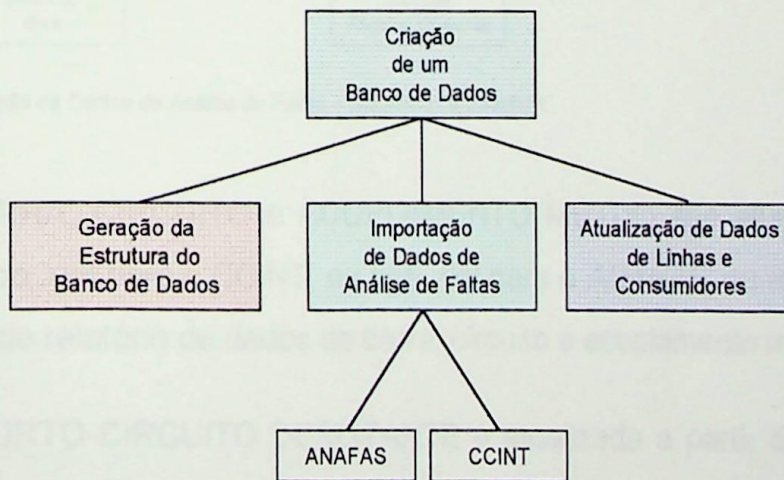


Figura 3-14 *Criação de um Banco de Dados* - Diagrama de Estrutura

Inicialmente, o Banco de Dados é criado conforme a arquitetura de dados detalhada anteriormente e gravado num arquivo tipo *.mdb* especificado pelo usuário.

As tabelas BARRA, CIRCUITO, ACOPLAMENTO MÚTUO e CURTO-CIRCUITO DESLIZANTE são atualizadas a partir dos dados processados pelos programas ANAFAS do CEPEL ou CCINT da COPEL.

Foram implementados módulos específicos para a importação de dados provenientes dos dois programas de análise de faltas, segundo o processo ilustrado na Figura 3-15.

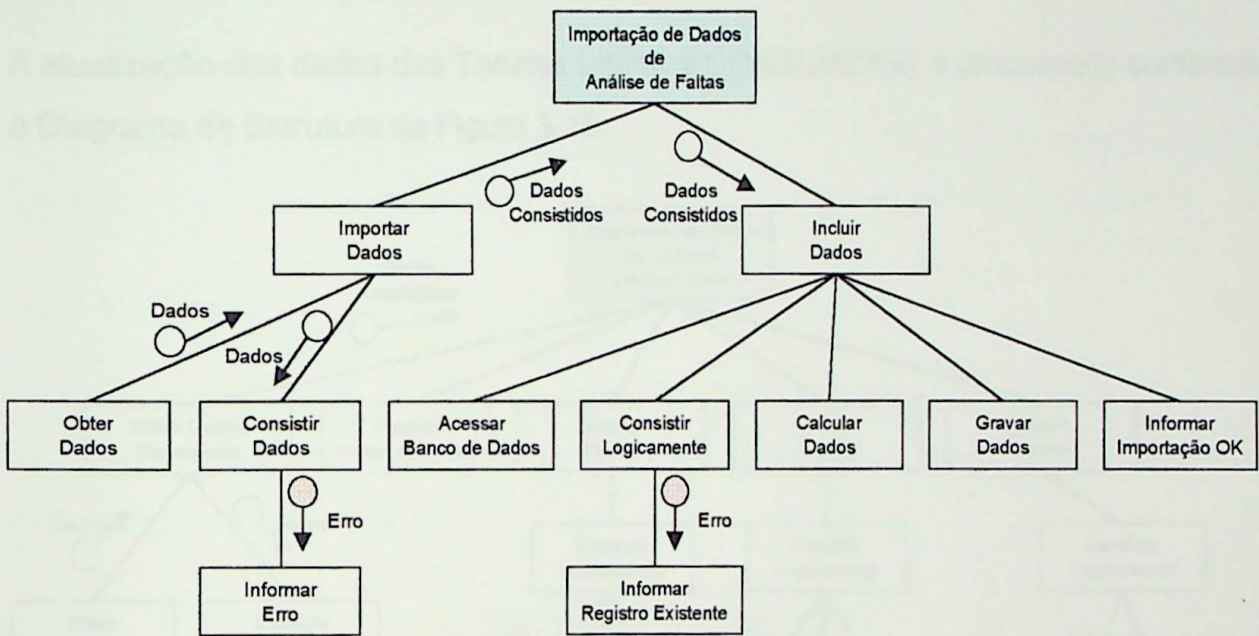


Figura 3-15 Importação de Dados de Análise de Faltas - Diagrama de Estrutura

As tabelas BARRA, CIRCUITO e ACOPLAMENTO MÚTUO são atualizadas a partir dos arquivos tipo *.ent* para o CCINT, ou tipo *.dat* para o ANAFAS, ou através da leitura de um arquivo de relatório de dados de barra, circuito e acoplamento mútuo.

A tabela de CURTO-CIRCUITO DESLIZANTE é atualizada a partir dos relatórios de curtos-circuitos trifásico, fase-terra, fase-fase e fase-fase-terra aplicados nas barras terminais de cada linha do sistema, e em pontos intermediários com intervalo de 1% do comprimento do circuito, monitorando as barras dos consumidores.

No caso do ANAFAS, são processados estudos *macro* [26] orientados a *pontos de falta*, com pontos intermediários de falta aplicados simetricamente em relação ao centro do circuito, para o intervalo de aplicação de 0% a 50% e intervalo entre pontos de 1%. Os resultados dos estudos são gerados em arquivos formato *tabela*, que são lidos pelo VISAGE.

No caso do programa CCINT, foi desenvolvido um módulo que gera a entrada formato cartão para a execução desses estudos de curto-circuito. Após o processamento do caso, o arquivo de relatório é utilizado pelo VISAGE no processo de importação de dados.

A atualização dos dados das Tabelas LINHA e CONSUMIDOR é processada conforme o Diagrama de Estrutura da Figura 3-16.

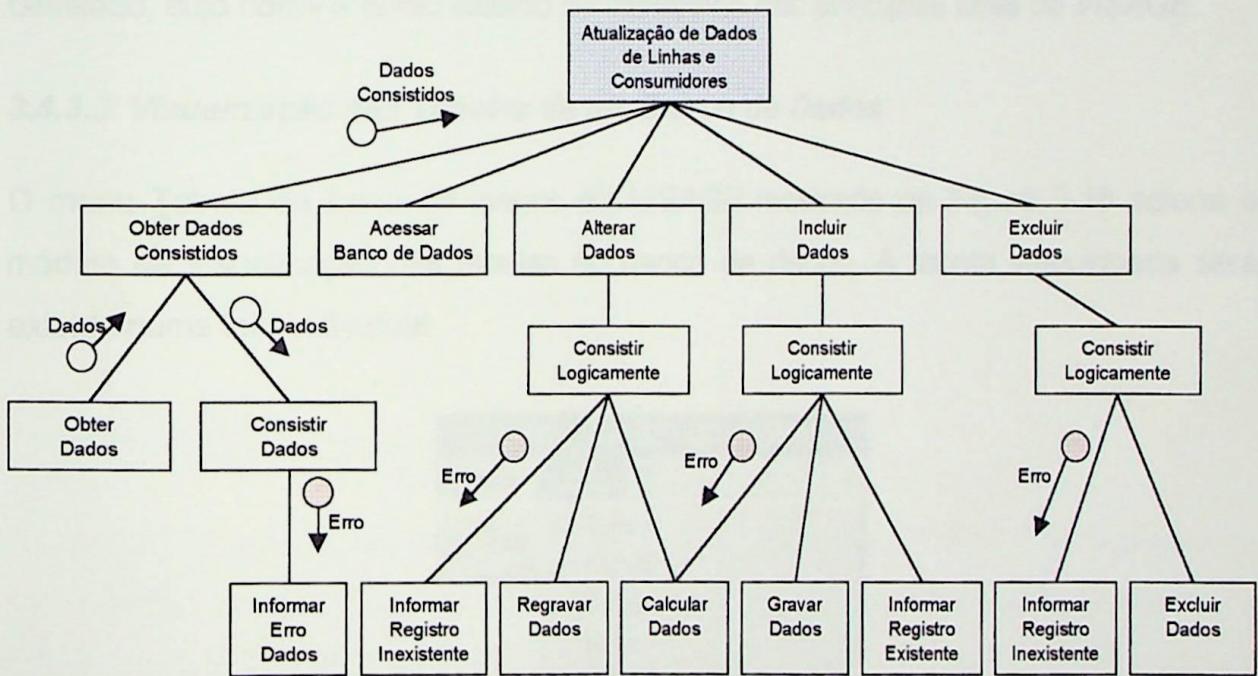


Figura 3-16 Atualização das tabelas de dados de LINHA e CONSUMIDOR - Diagrama de Estrutura

3.4.3.2 Abertura de um Banco de Dados

O módulo de abertura de um banco de dados é acionado na barra de menus do VISAGE, selecionando o menu Arquivo e escolhendo sua opção Abrir. Então, é exibida a tela de seleção de arquivos mostrada na Figura 3-17.

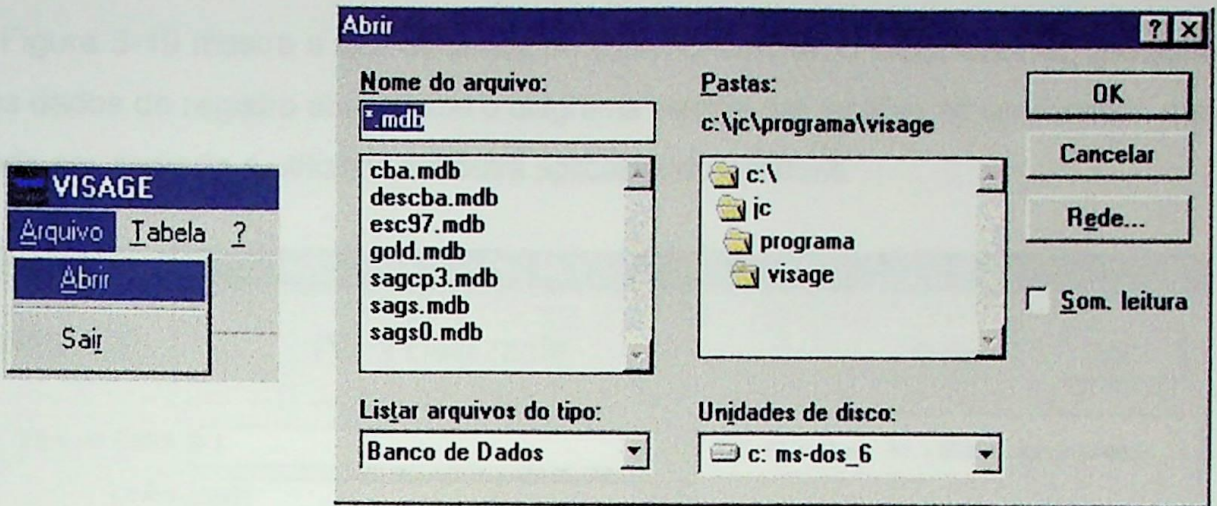


Figura 3-17 Abertura de um Banco de Dados - Telas

Selecionado o arquivo e pressionado o botão **OK**, o programa acessa o arquivo desejado, cujo nome é então exibido no cabeçalho das principais telas do VISAGE.

3.4.3.3 Visualização das Tabelas de um Banco de Dados

O menu **Tabela** da barra de menus do VISAGE mostrado na Figura 3-18 aciona o módulo de visualização das tabelas do banco de dados. A tabela selecionada será exibida numa tela individual.

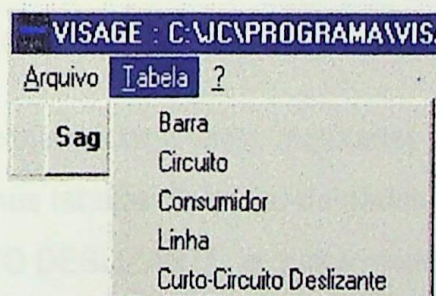


Figura 3-18 Menu de visualização de Tabelas de um Banco de Dados

A Figura 3-19 mostra a tela da tabela de CURTO-CIRCUITO DESLIZANTE, que além dos dados do registro atual, exibe o diagrama vetorial das tensões no consumidor, que pode ser copiado e utilizado em outra aplicação do Windows.

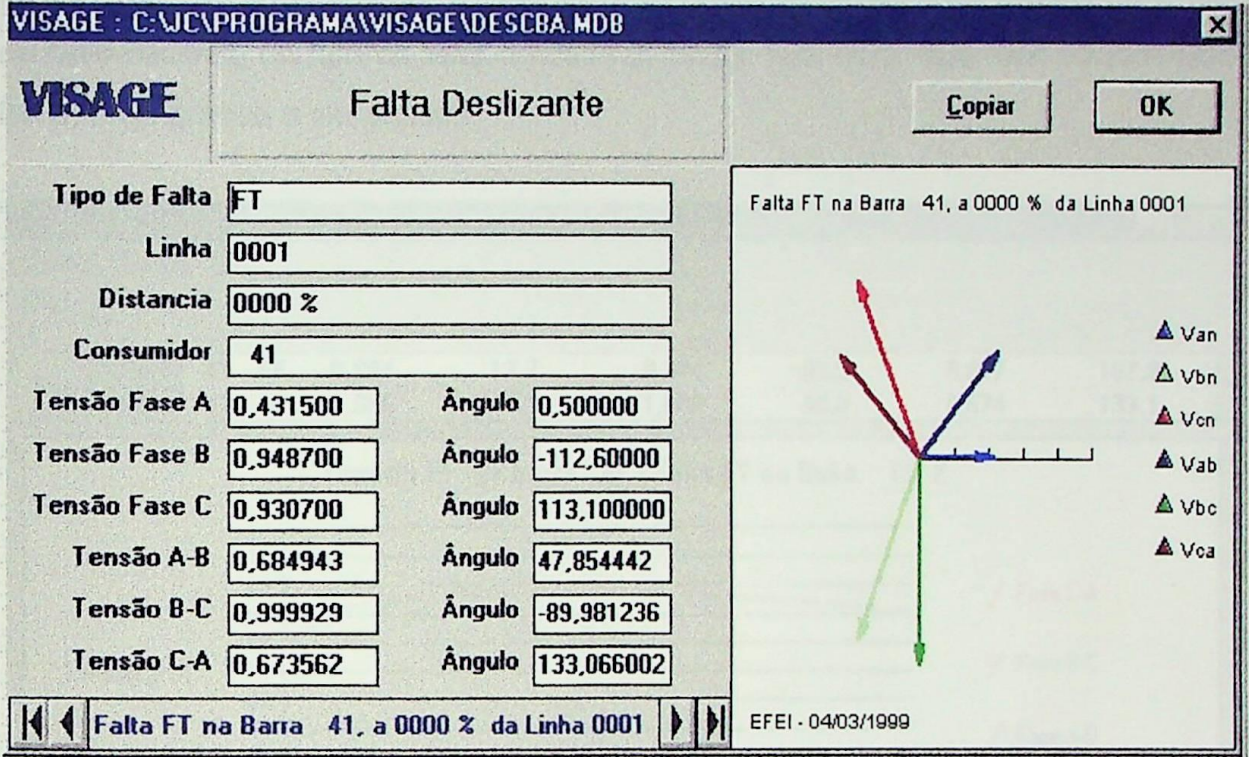


Figura 3-19 Tela da Tabela de CURTO-CIRCUITO DESLIZANTE.

O botão **OK** encerra a exibição da tabela.

As barras de seleção de consumidor e linha mostradas na Figura 3-20 possibilitam uma pesquisa direcionada nas tabelas do banco de dados, muito útil principalmente na tabela de CURTO-CIRCUITO DESLIZANTE, a qual é muito extensa.

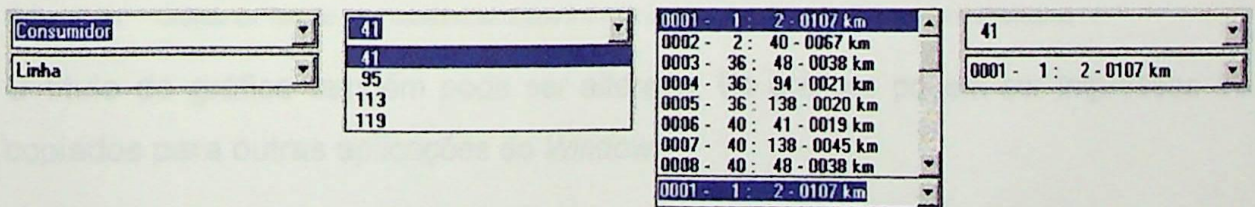


Figura 3-20 Barras de seleção de consumidor e linha

3.4.3.4 Gráficos de Tensão num Consumidor

Os gráficos de tensão num consumidor devido à faltas aplicadas ao longo de uma linha do sistema são exibidos na tela da Figura 3-21, após a seleção de um consumidor, da linha onde foram aplicadas as faltas, da tensão a ser exibida (fase-fase ou fase-neutro), do tipo de falta aplicada (trifásica, fase-terra, fase-fase ou fase-fase-terra) e do gráfico a ser exibido.

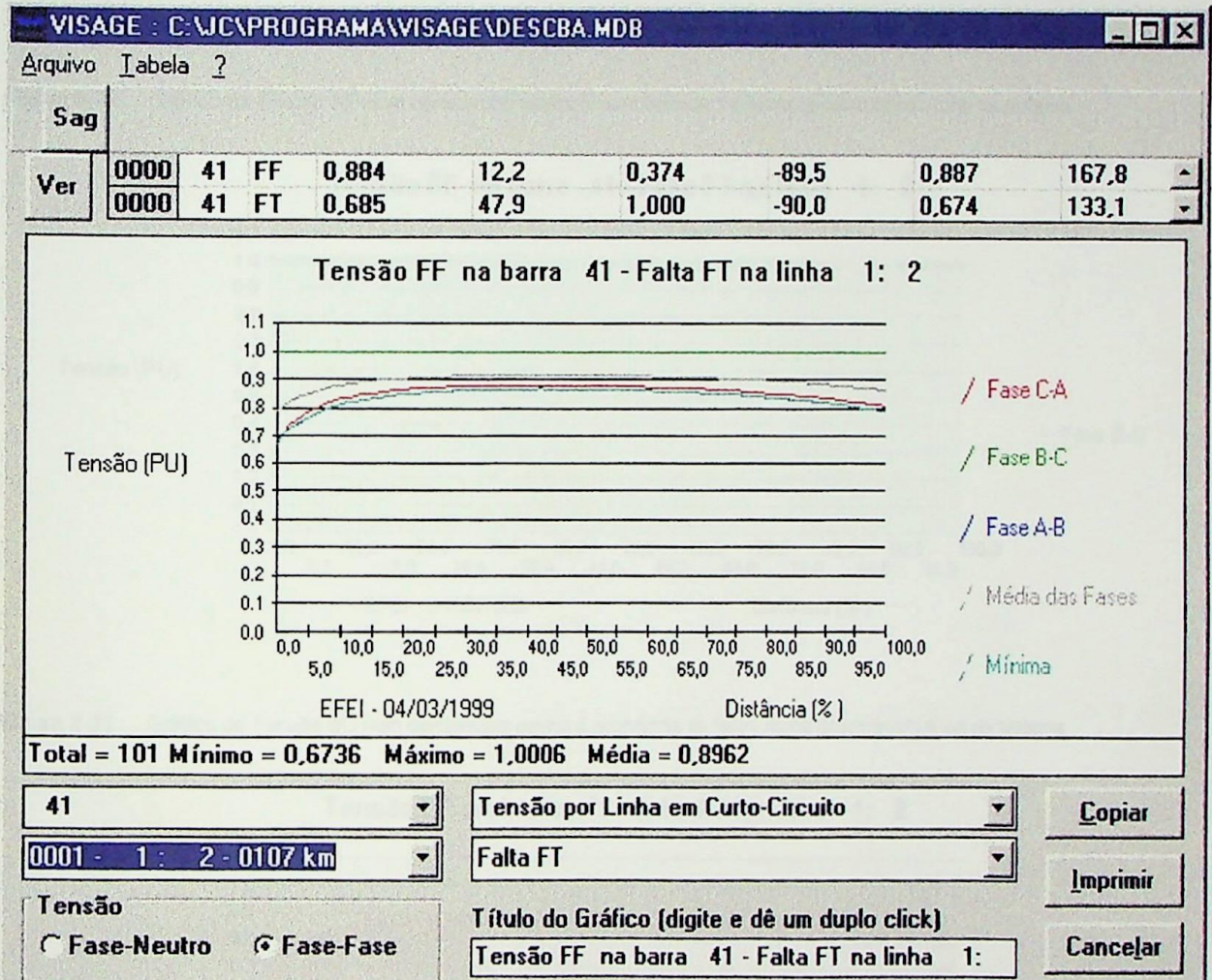


Figura 3-21 Gráfico de Tensão num consumidor devido à ocorrência de faltas numa determinada linha do sistema

O título do gráfico também pode ser alterado. Os gráficos podem ser impressos ou copiados para outras aplicações do *Windows*.

As Figuras 3-22 a 3-30 ilustram os demais tipos de gráficos disponíveis.

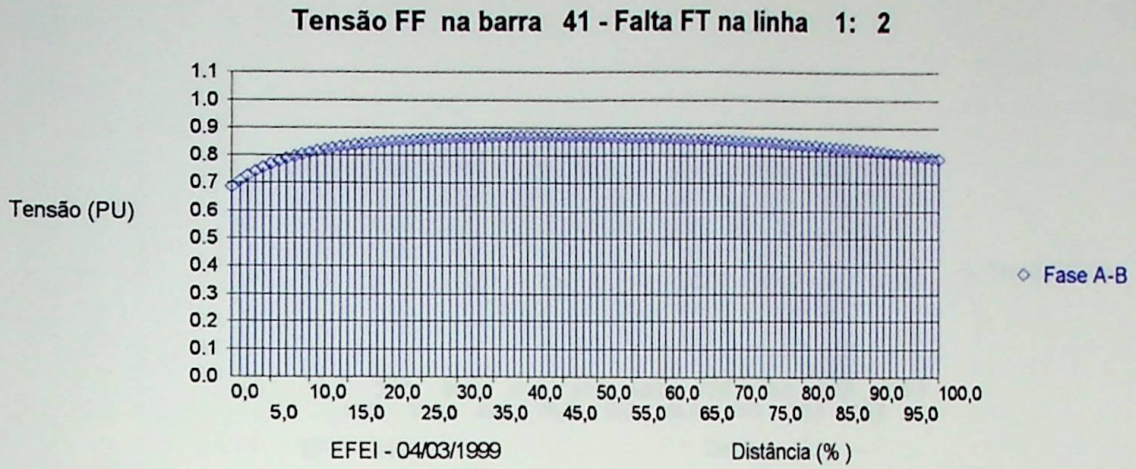


Figura 3-22 Gráfico da Tensão AB num consumidor devido à ocorrência de faltas numa determinada linha do sistema

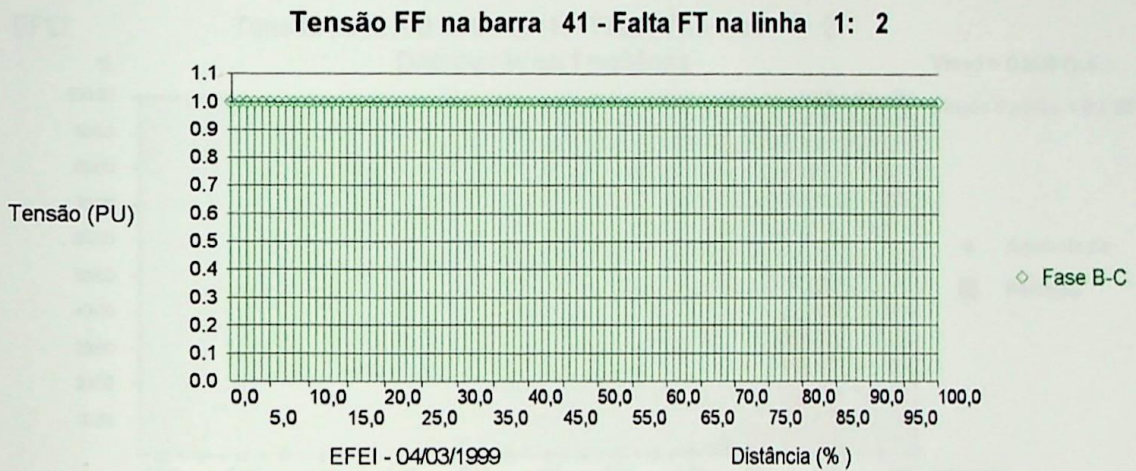


Figura 3-23 Gráfico da Tensão BC num consumidor devido à ocorrência de faltas numa determinada linha do sistema

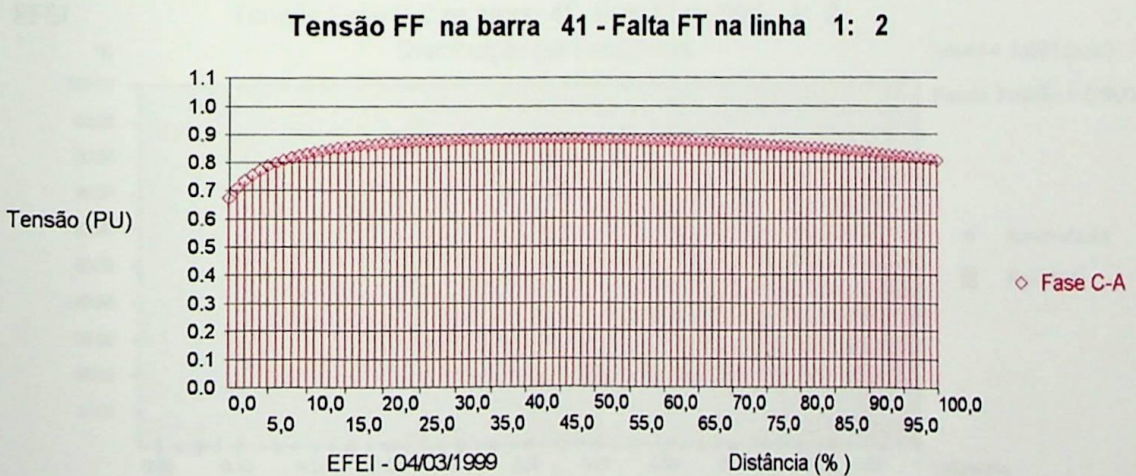


Figura 3-24 Gráfico da Tensão CA num consumidor devido à ocorrência de faltas numa determinada linha do sistema

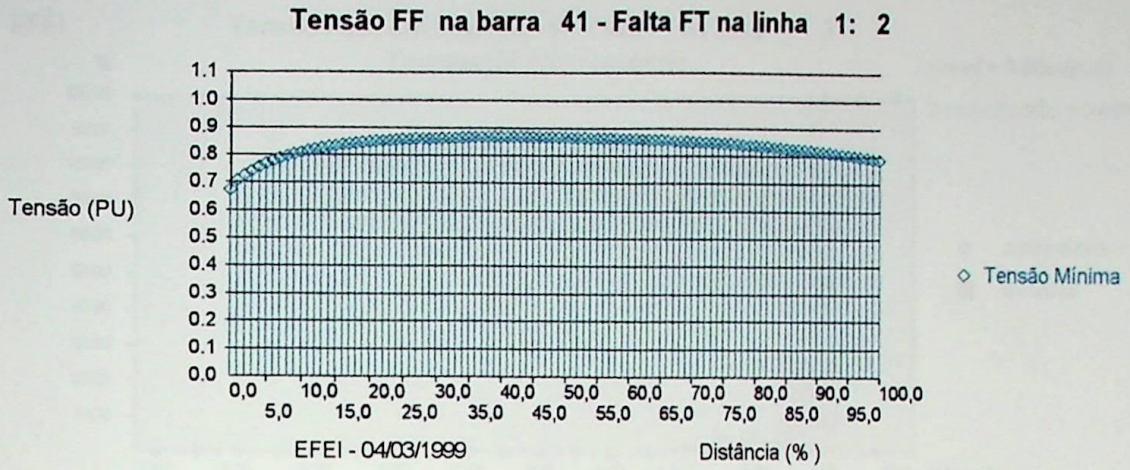


Figura 3-25 Gráfico de Tensão mínima num consumidor devido à ocorrência de faltas numa determinada linha do sistema

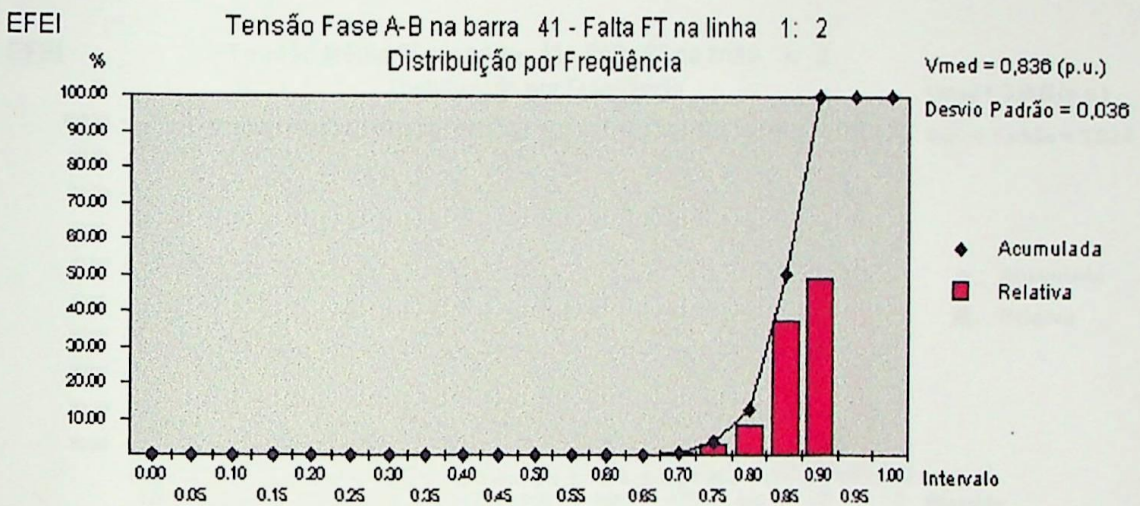


Figura 3-26 Função de Distribuição da Tensão AB num consumidor devido à ocorrência de faltas numa determinada linha do sistema

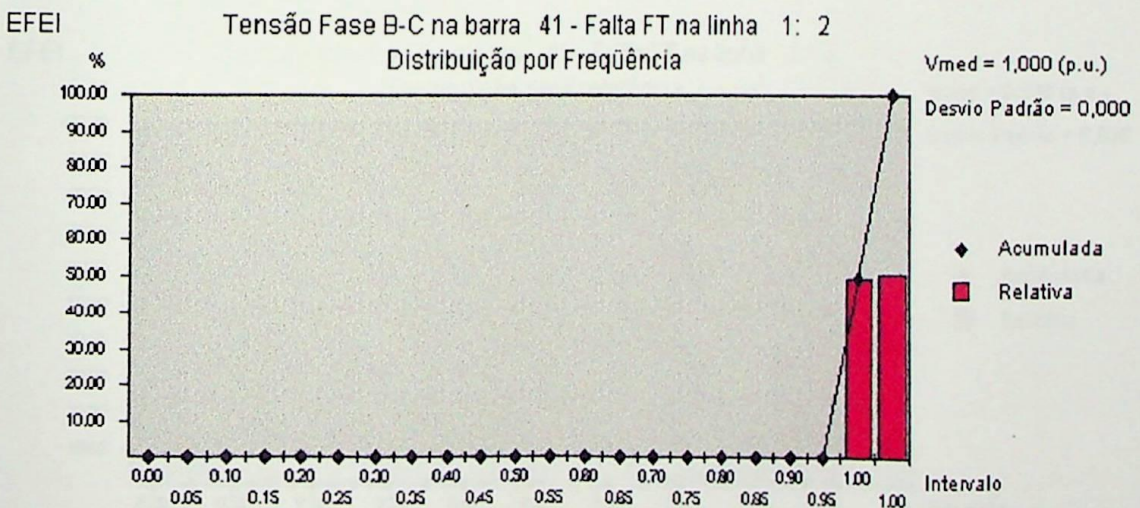


Figura 3-27 Função de Distribuição da Tensão BC num consumidor devido à ocorrência de faltas numa determinada linha do sistema

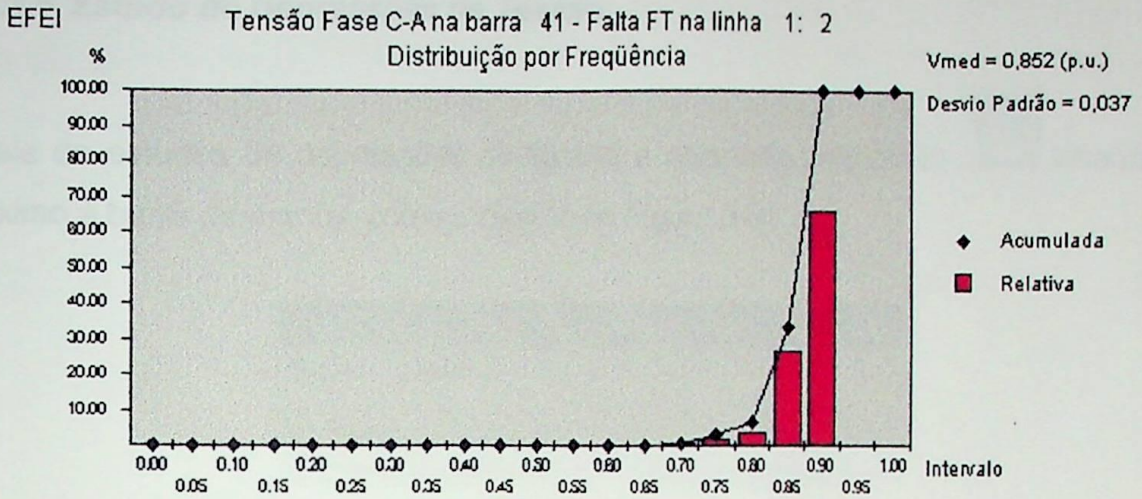


Figura 3-28 Função de Distribuição da Tensão CA num consumidor devido à ocorrência de faltas numa determinada linha do sistema

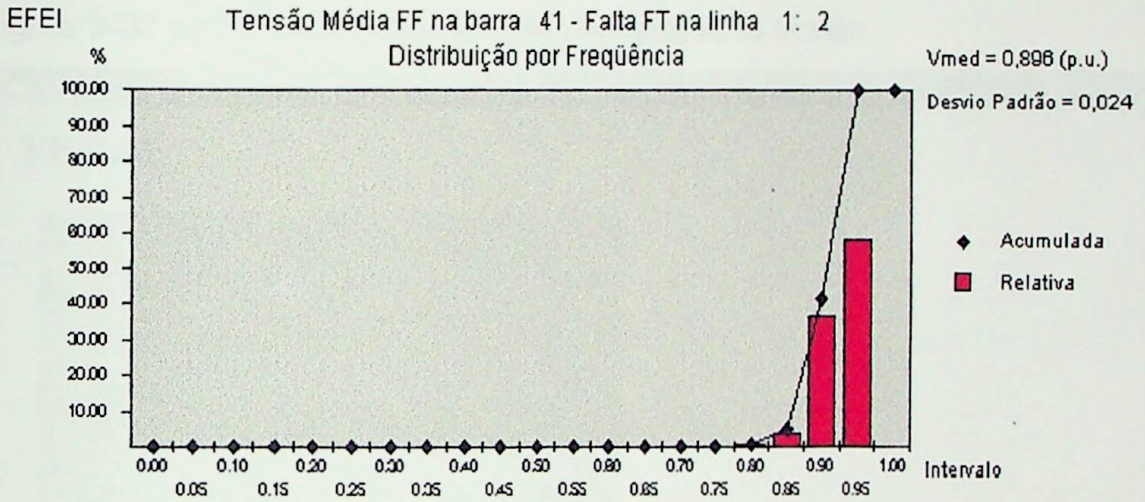


Figura 3-29 Função de Distribuição da tensão média num consumidor devido à ocorrência de faltas numa determinada linha

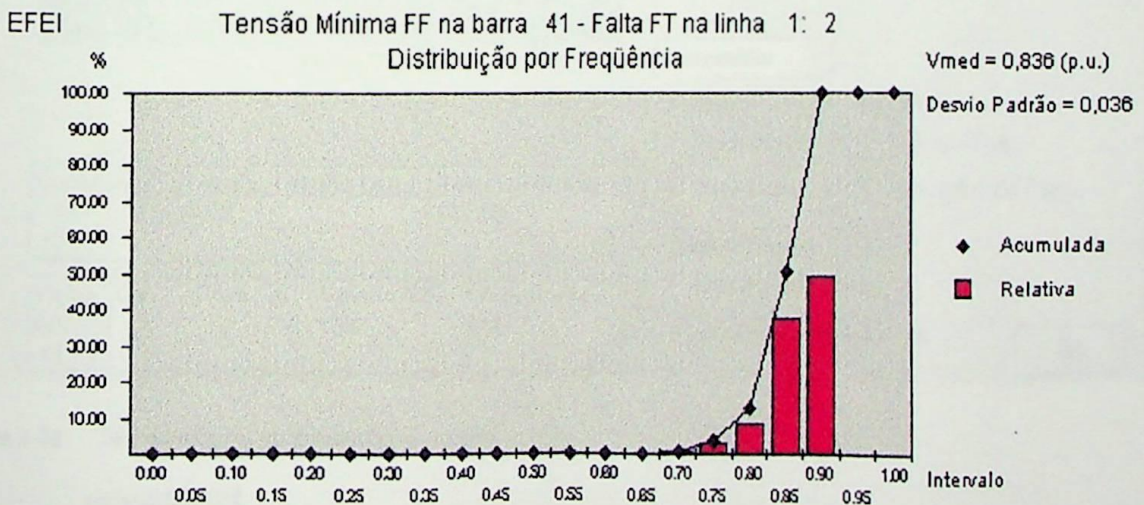



Figura 3-30 Função de Distribuição da tensão mínima num consumidor devido à ocorrência de faltas numa determinada linha

3.4.3.5 Estudo de Depressões de Tensão

A tela de estudos de depressões de tensão é acionada pelo botão  localizado próximo à barra de menus, como indicado na Figura 3-31.

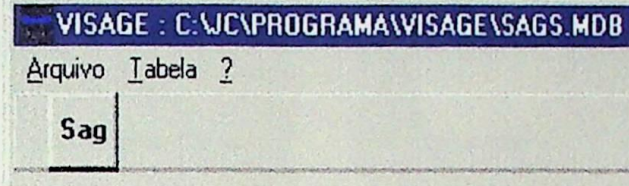


Figura 3-31 Botão Sag para acesso à tela de depressões de tensão

A Figura 3-32 exibe a tela de estudos de depressões de tensão.

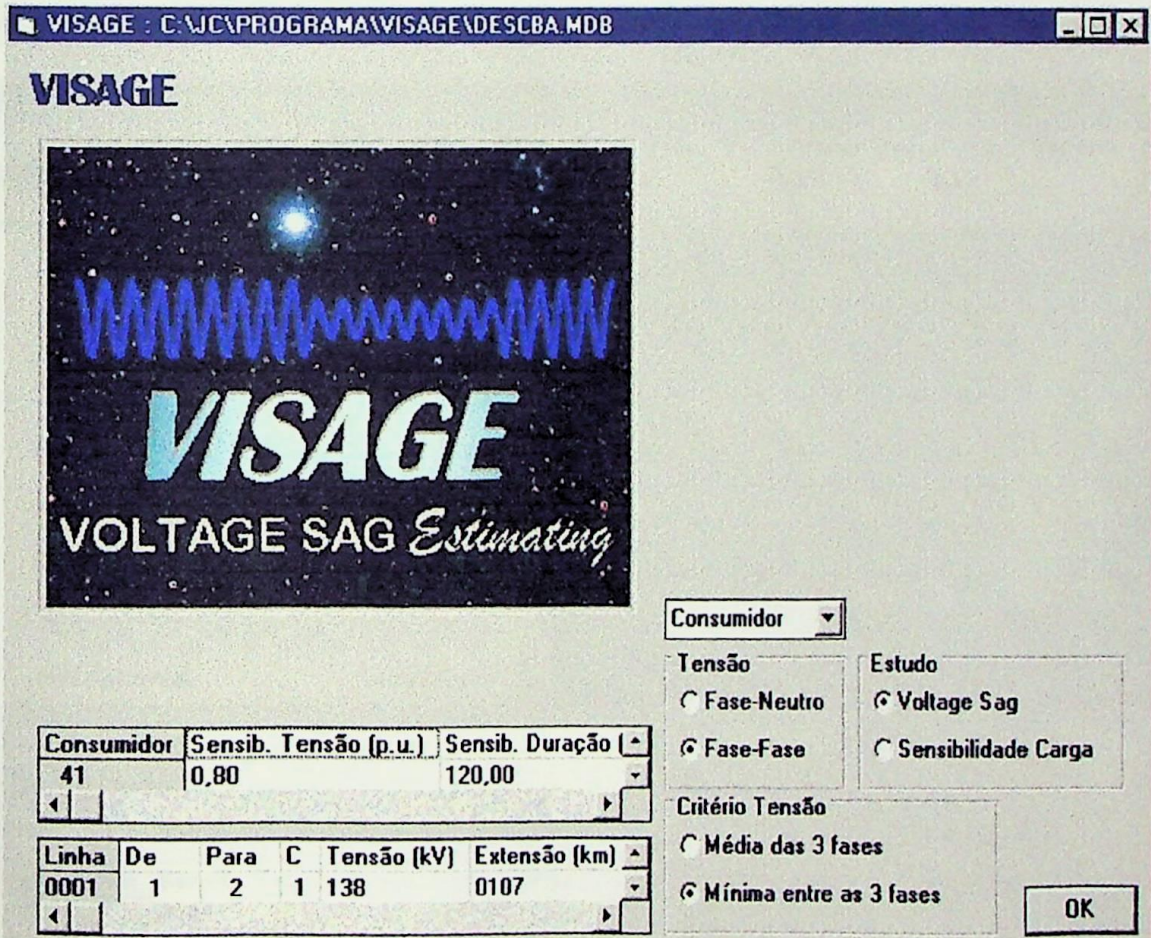
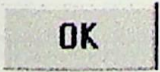
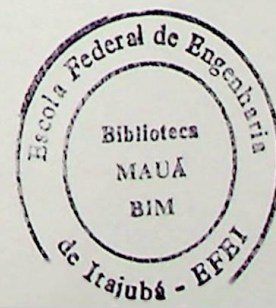


Figura 3-32 Tela de estudos de depressões de tensão

O botão  fecha a tela e encerra as atividades de estudos de depressões de tensão.



Conforme as opções enfocadas na Figura 3-33, os estudos de depressões de tensão num consumidor podem ser executados considerando-se tensões fase-fase ou fase-neutro e segundo os critérios de fase mínima ou média das três fases. A seleção do consumidor inicia o processamento do estudo, que está ilustrado na Figura 3-34.

Figura 3-33 Seleção de critérios de tensão e do consumidor para um estudo de depressões de tensão

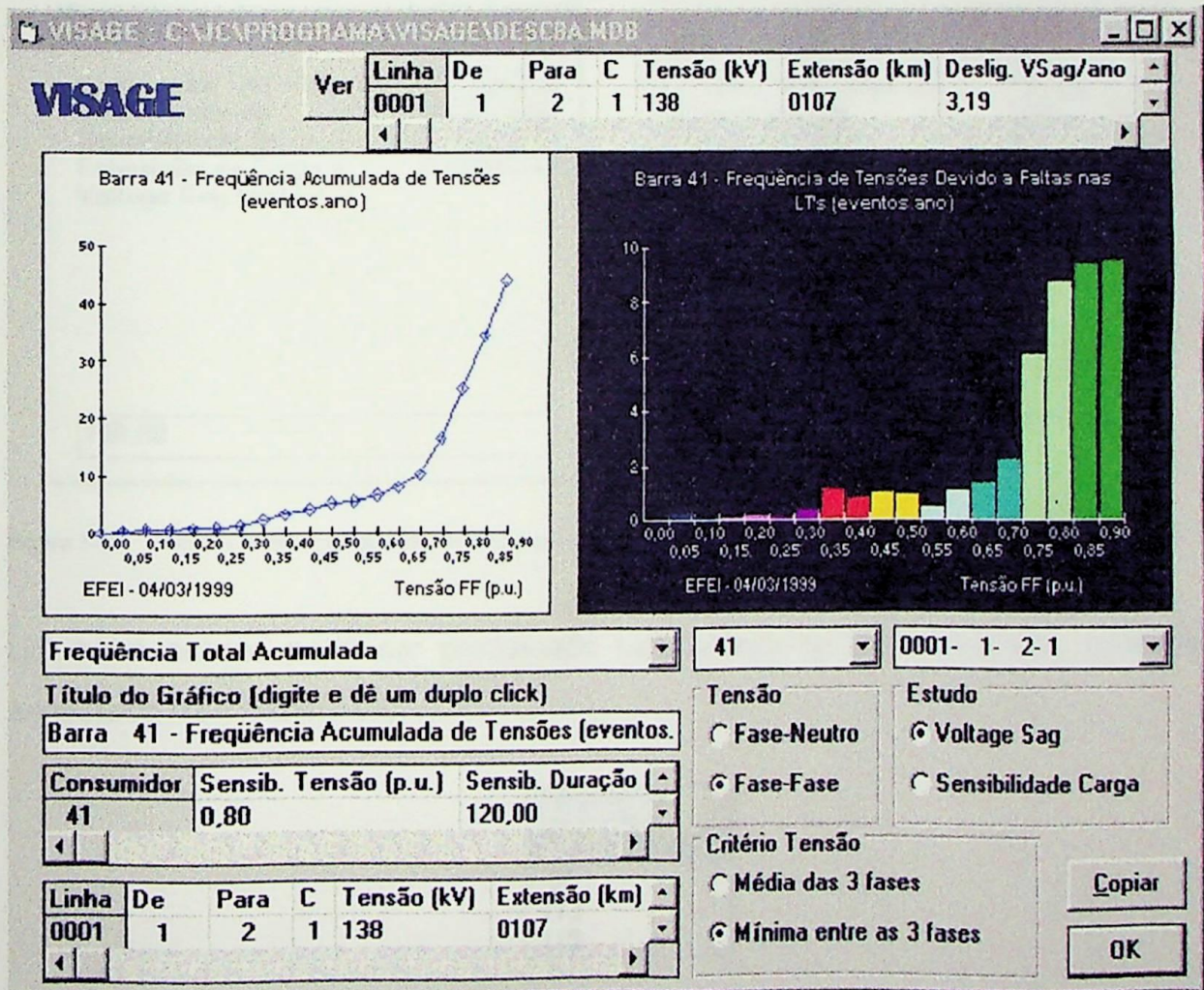


Figura 3-34 Tela de estudo de depressões de tensão para o consumidor 41 – tensão fase-fase e critério de tensão mínima

Os dados dos consumidores e das linhas podem ser alterados interativamente, como demonstrado na Figura 3-35, proporcionando grande versatilidade de simulação.

Consumidor	Sensib. Tensão (p.u.)	Sensib. Duração (s)
41	0,80	120,00

Linha	De	Para	C	Tensão (kV)	Extensão (km)
0001	1	2	1	138	0107

Figura 3-35 Grades de dados de consumidores e linhas

Basta dar um duplo “click” com o mouse na célula cujos valores se deseja alterar, para acessar a tela de atualização de dados. A Figura 3-36 mostra as telas de alteração de dados do consumidor e de dados de ramos.

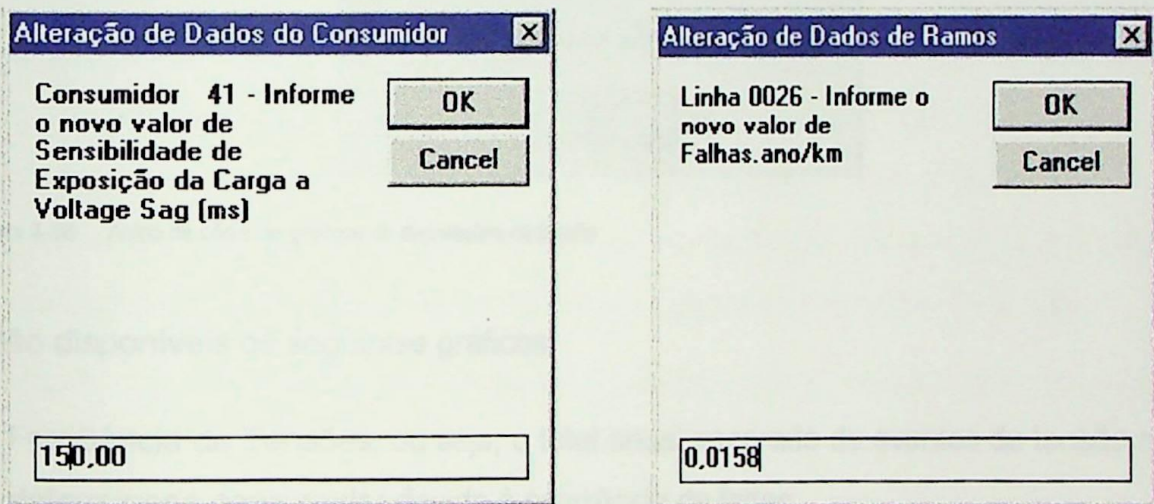


Figura 3-36 Telas de atualização de dados de consumidor e linha

Um novo estudo pode ser processado selecionando-se um consumidor, conforme executado na Figura 3-37.

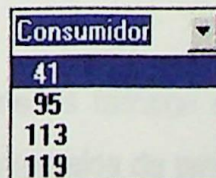


Figura 3-37 Seleção de um consumidor para um estudo de depressões de tensão

A seleção dos gráficos a serem exibidos na tela de estudos de depressões de tensão é feita através da barra de gráficos exibida na Figura 3-38.

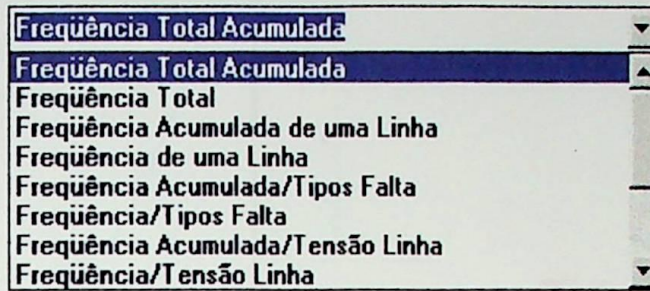
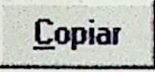


Figura 3-38 Barra de gráficos de depressões de tensão

O botão  permite a cópia do gráfico selecionado para outra aplicação do *Windows*.

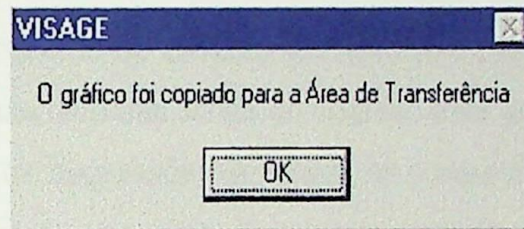


Figura 3-39 Aviso de cópia de gráficos de depressões de tensão

Estão disponíveis os seguintes gráficos:

- Frequência de Tensões, ou seja, o total anual esperado de eventos de tensão num determinado consumidor devido à ocorrência de faltas.

A Figura 3-40 mostra exemplos de dois gráficos.

O gráfico de frequência acumulada indica os totais anuais esperados de eventos no consumidor com tensões menores ou iguais a cada valor de abscissa de tensão.

O gráfico de frequência de tensões fornece a quantidade anual de eventos no consumidor para cada um dos intervalos de tensão exibidos.

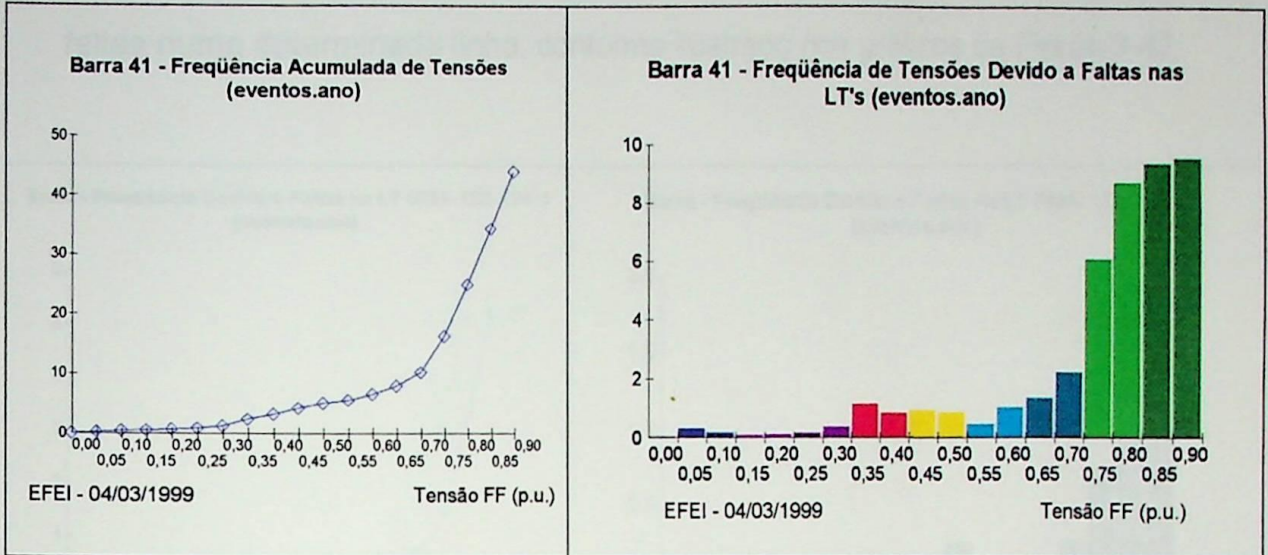


Figura 3-40 Frequência de tensões fase-fase no consumidor para faltas aplicadas ao longo das linhas do sistema

- Frequência de ocorrências de tensões até 0,90 (p.u.) num consumidor, devido à aplicação de faltas nas diversas linhas do sistema. Este gráfico, ilustrado na Figura 3-41, mostra o total de depressões de tensão no consumidor atribuído à ocorrência de faltas em cada um dos circuitos de linha do sistema. Seu objetivo é facilitar a identificação das linhas onde há maior concentração de eventos, e portanto merecem especial atenção na análise do problema de depressão de tensão.

Barra 41 - Frequência de Voltage Sags Devido a Faltas nas LT's (eventos.ano)

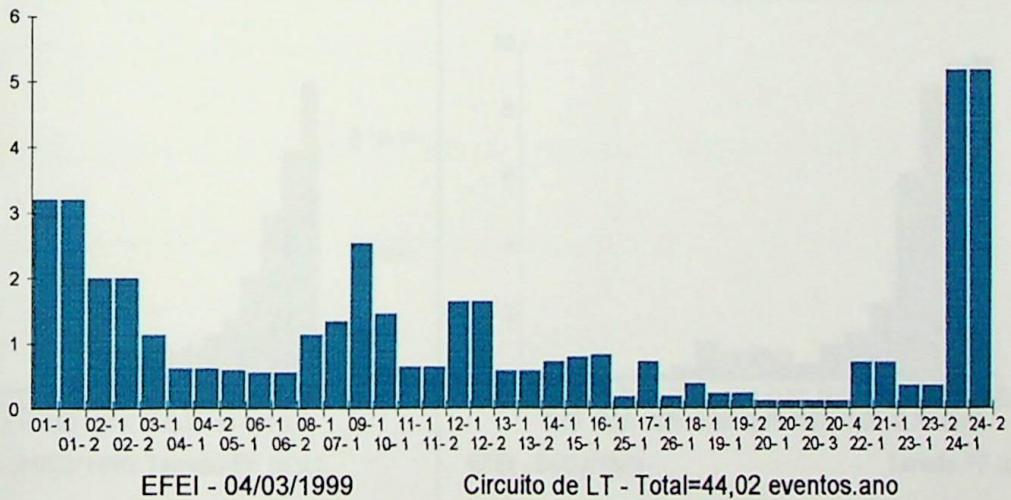


Figura 3-41 Frequência de tensões fase-fase até 0,90 (p.u.) no consumidor para faltas aplicadas ao longo de cada linha do sistema

- Frequência de ocorrências de tensões num consumidor, devido à aplicação de faltas numa determinada linha, conforme ilustrado nos gráficos da Figura 3-42.

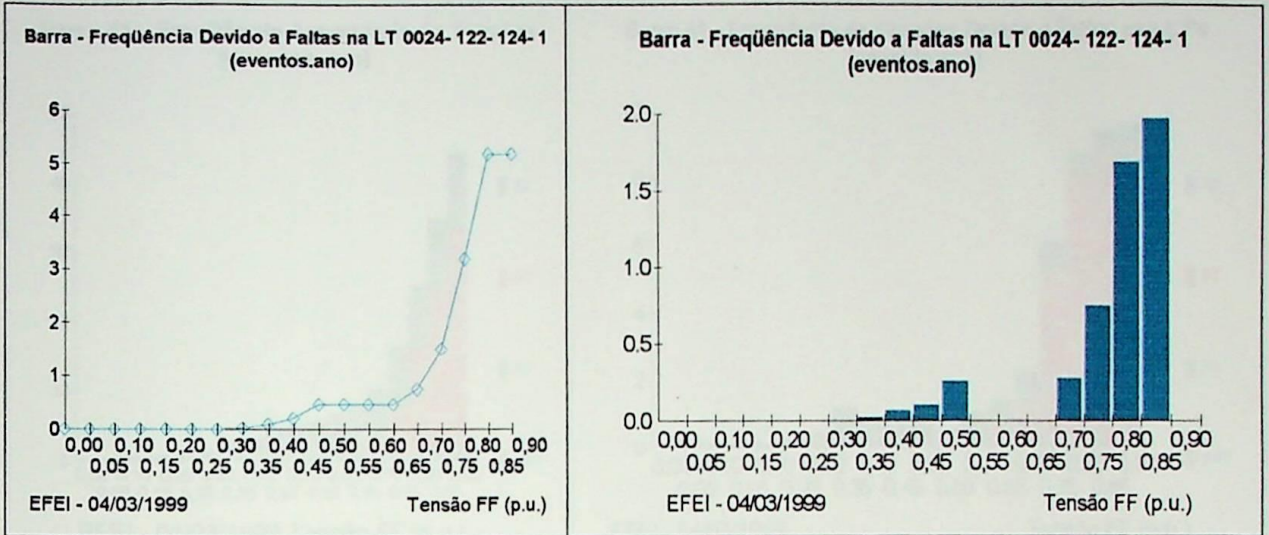


Figura 3-42 Frequência de tensões fase-fase no consumidor para faltas aplicadas ao longo de uma linha do sistema

- Frequência de ocorrências de tensões num consumidor, para as várias classes de tensão das linhas do sistema, conforme exemplos da Figura 3-43.

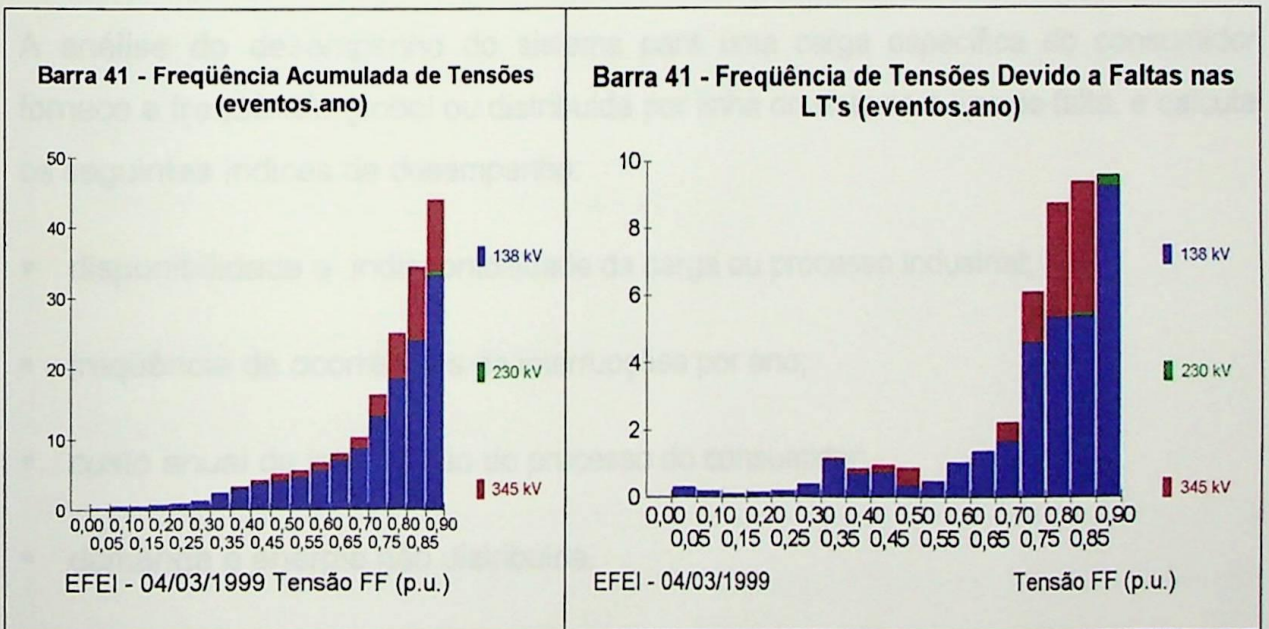


Figura 3-43 Frequência de tensões fase-fase no consumidor por classe de tensão das linhas do sistema

- Frequência de ocorrências de tensões num consumidor, por tipo de falta aplicada no sistema, conforme exemplos da Figura 3-44.

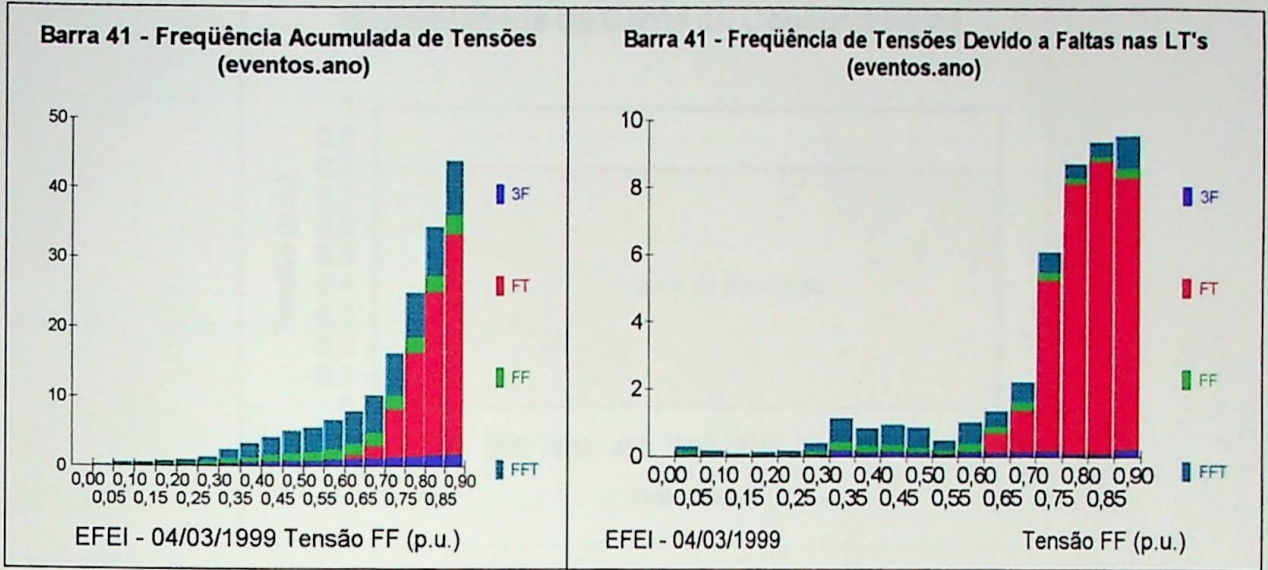


Figura 3-44 Frequência de tensões fase-fase no consumidor por tipo de falta aplicada ao longo das linhas do sistema

3.4.3.6 Estudo de Sensibilidade de Cargas

Outro tipo de estudo disponível é o de sensibilidade de uma determinada carga.

A análise do desempenho do sistema para uma carga específica do consumidor fornece a frequência global ou distribuída por linha do sistema e tipo de falta, e calcula os seguintes índices de desempenho:

- disponibilidade e indisponibilidade da carga ou processo industrial;
- frequência de ocorrências de interrupções por ano;
- custo anual de interrupção do processo do consumidor;
- demanda e energia não distribuída.

A representação de uma carga sensível a depressões de tensão é fornecida através de uma curva como a da Figura 3-45, indicando seus limites de tolerância.

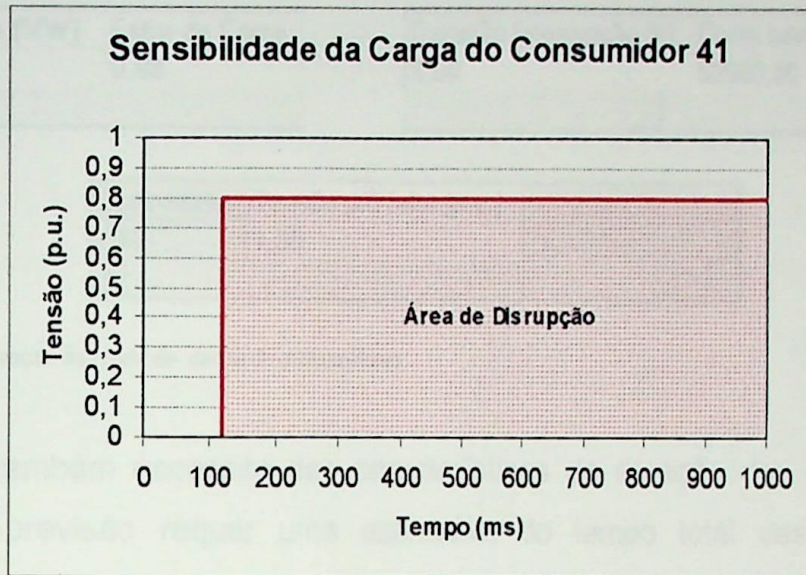


Figura 3-45 Sensibilidade da Carga do Consumidor 41

Para a análise de uma carga específica no consumidor, são necessárias as seguintes informações:

- sensibilidade da carga à depressões de tensão, definida pelos parâmetros magnitude de tensão mínima suportada e tolerância de tempo de exposição ao distúrbio;
- demanda e fator de carga do consumidor;
- duração média da interrupção, ou seja, o tempo médio gasto para restabelecer o processo de produção à sua normalidade;
- custo médio da interrupção.

No banco de dados, estas informações estão armazenadas na Tabela de Consumidor e podem ser visualizadas na grade de dados de consumidores, conforme ilustrado na Figura 3-46.

Consumidor	Sensib. Tensão (p.u.)	Sensib. Duração (h)
41	0,80	120,00

Demanda (MW)	Fator de Carga	Duração Interrupção (h)	Custo Interrupção (\$)
20,00	0,80	8,00	50000,00

Consumidor	Tensão pré-falta (p.u.)
41	1,00

Figura 3-46 Visualização da grade de dados de consumidores

Esta análise também necessita das características de duração das depressões de tensão, cuja previsão requer uma estimativa do tempo total despendido pelos dispositivos de proteção no processo de eliminação das faltas em cada linha do sistema.

A atual versão do aplicativo desenvolvido considera apenas a proteção de tempo definido, caracterizada por um tempo de atuação constante.

No banco de dados, estas informações estão armazenadas na Tabela de Linha e podem ser visualizadas na grade de dados de linhas, conforme ilustrado na Figura 3-47.

Linha	De	Para	C	Tensão (kV)	Extensão (km)
0001	1	2	1	138	0107

Faltas.ano/km	%Faltas 3F	%Faltas FT	%Faltas FF	%Faltas FFT	%Alcance Zona 1
0,029832	4,00	73,00	6,00	17,00	90

Linha	%Alcance Zona 2	Zona 1 (ms)	Zona 2 (ms)
0001	10	150	550

Figura 3-47 Visualização da grade de dados de linhas

Para alterar o valor de uma célula selecionada nestas grades, basta dar um duplo "click" com o mouse, conforme demonstrado nas Figuras 3-35 e 3-36. Este procedimento permite a realização de várias simulações considerando por exemplo, valores alternativos de ajustes de proteção das linhas, ou de sensibilidade da carga.

Antes de iniciar um estudo, devem ser selecionados os critérios de tensão desejados. Escolhida a opção de estudo de sensibilidade da carga, conforme exemplificado na Figura 3-48, basta selecionar um consumidor para que o estudo seja processado.

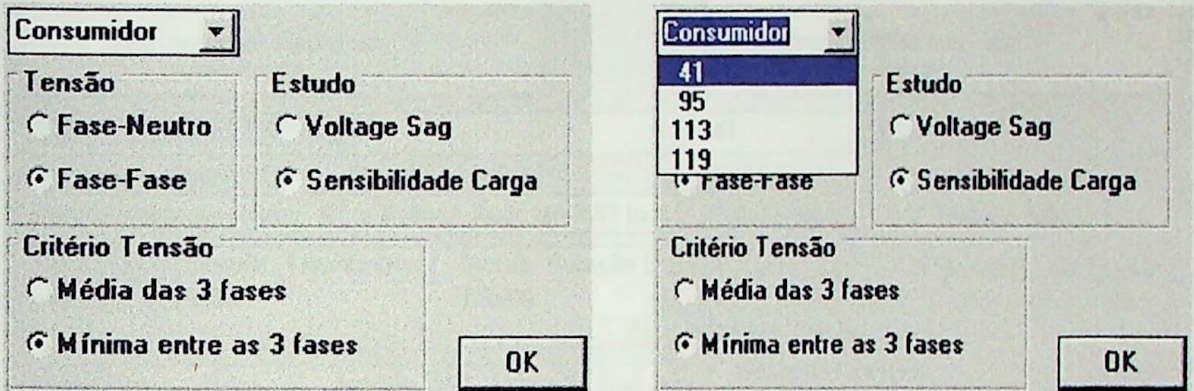


Figura 3-48 Seleção de critérios de tensão e do consumidor para um estudo de sensibilidade de carga

A Figura 3-49 mostra os resultados obtidos para um estudo de sensibilidade de carga.

A tela exibe dois gráficos referentes à frequência de depressões de tensão na barra do consumidor, distribuída por tipo de falta aplicado. Na parte inferior dos gráficos é indicado o total esperado de eventos por ano.

O gráfico à esquerda na tela apresenta os resultados de frequência obtidos considerando-se apenas o limite de magnitude de depressões de tensão da carga (0,80 p.u.).

O gráfico exibido à direita exibe as frequências calculadas representando a sensibilidade da carga por seus respectivos limites de magnitude de depressão de tensão e tolerância de exposição ao distúrbio (0,80 p.u. e 120 ms). Neste caso, os totais de eventos que ocasionam o desligamento indevido da carga são bem menores.

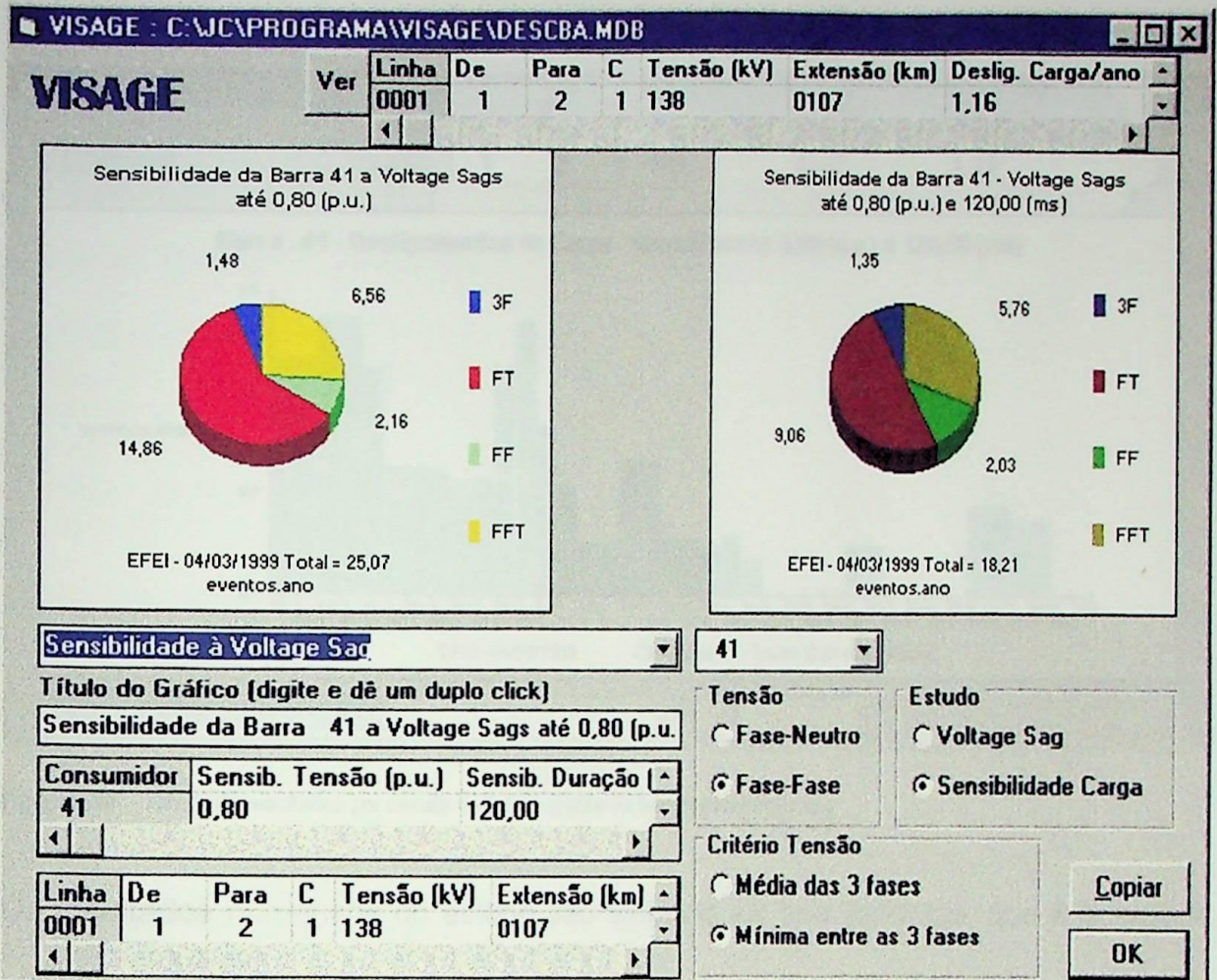


Figura 3-49 Tela de estudo de sensibilidade de carga para o consumidor 41 – tensão fase-fase e critério de tensão mínima

Outro gráfico disponível, exibido na Figura 3-50, fornece a distribuição da frequência acumulada por linha do sistema. Este gráfico facilita a identificação dos circuitos de linha que merecem investimentos em proteção.

Na parte superior da tela é exibida uma grade contendo os valores de frequência para cada circuito de linha do sistema.

A frequência global esperada para a carga sensível é indicada no rodapé do gráfico.

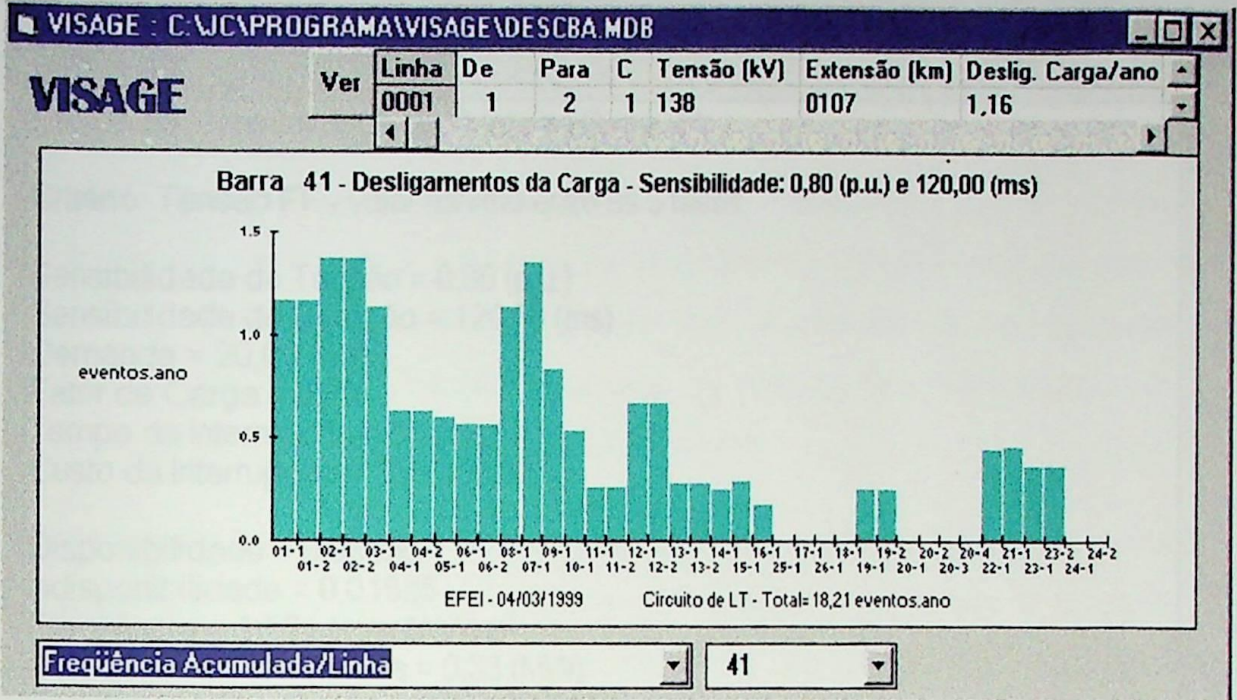



Figura 3-50 Grade de resultados por circuito de linha e gráfico de frequências resultantes

Os resultados numéricos do estudo são exibidos em tela separada, que é acessada

pelo botão  da tela de depressões de tensão.

A tela da Figura 3-51 mostra um trecho dos resultados do estudo, onde constam os critérios de tensão adotados, os dados do consumidor e da carga sensível analisada, e os valores obtidos para os seguintes índices de desempenho:

- disponibilidade e indisponibilidade da carga ou processo industrial;
- frequência de ocorrências de interrupções por ano;
- custo anual de interrupção do processo do consumidor;
- demanda e energia não distribuída.

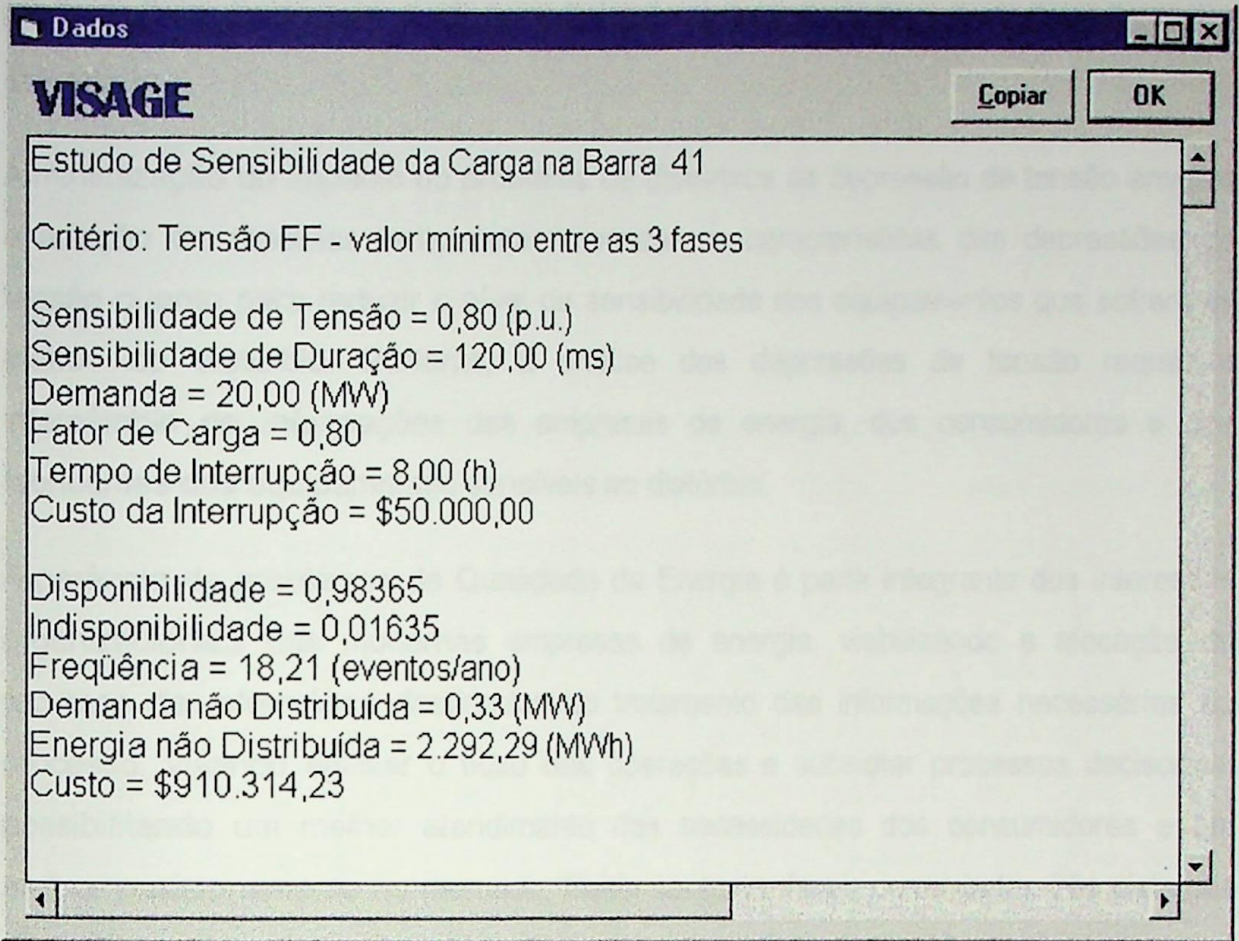


Figura 3-51 Tela de resultados do estudo de depressões de tensão

O botão **Copiar** viabiliza a cópia de dados selecionados na tela para outras aplicações do *Windows*.

O botão **OK** encerra a exibição dessa tela.

3.5 Conclusões

Neste Capítulo foram abordados os aspectos da informatização do processo de análise de depressões de tensão, cujo principal objetivo é conhecer o comportamento do sistema durante esses distúrbios, possibilitando a avaliação do seu desempenho e do impacto nos seus consumidores, fornecendo informações que contribuam para o desenvolvimento integrado de soluções que promovam a compatibilidade qualitativa

entre a energia fornecida e os requisitos operacionais dos modernos processos industriais.

A minimização do impacto do problema de distúrbios de depressão de tensão envolve a adoção de medidas tanto para minimizar as características das depressões de tensão quanto para reduzir o nível de sensibilidade dos equipamentos que sofrem os efeitos do distúrbio. Portanto, a análise das depressões de tensão requer o intercâmbio de informações das empresas de energia, dos consumidores e dos fabricantes dos equipamentos sensíveis ao distúrbio.

A gerência de problemas de Qualidade da Energia é parte integrante dos interesses organizacionais das modernas empresas de energia, viabilizando a alocação de recursos de informática destinados ao tratamento das informações necessárias ao processo, visando agilizar o fluxo das operações e subsidiar processos decisórios, possibilitando um melhor atendimento das necessidades dos consumidores e um melhor posicionamento no mercado. Neste contexto, foram comentados três sistemas de informação destinados à análise de depressões de tensão, enfocando seus processos de tratamento de informações e as tecnologias de informática empregadas.

A primeira aplicação apresentada é destinada à análise das características das depressões de tensão associadas a faltas já ocorridas nos alimentadores de distribuição da empresa de energia elétrica. Avançados algoritmos de fluxo de potência e curto-circuito trifásicos são utilizados para calcular as magnitudes das depressões de tensão ocorridas nos consumidores do sistema durante cada evento de falta registrado no histórico de ocorrências da empresa. É um sistema de informações com capacidade de acessar um grande volume de informações corporativas na busca da configuração do sistema no instante da ocorrência da falta. Esta aplicação foi comentada porque além de empregar recursos de estado da arte de informática, tanto para acesso a dados quanto para apresentação das informações, ela tem uma filosofia reativa, visando fornecer aos seus consumidores, informações precisas relacionadas aos eventos ocorridos, atendendo a uma importante necessidade das empresas de energia.

As outras duas aplicações, assim como o aplicativo *VISAGE* objeto dessa dissertação, têm uma filosofia proativa, visando subsidiar o desenvolvimento e a avaliação de soluções para minimizar o impacto das depressões de tensão. Elas se baseiam na metodologia probabilística para a previsão de características de depressões de tensão em consumidores providos de cargas sensíveis, discutida no Capítulo 2 e proposta na referência [2].

A utilização de critérios probabilísticos reflete a natureza probabilística ou aleatória do comportamento dos sistemas e da ocorrência de faltas nos seus componentes, quantificando as incertezas e aleatoriedades que acompanham as ocorrências das depressões de tensão, empregando um processo relativamente simples. Um programa de análise de faltas é utilizado no processo de aplicação de faltas deslizantes trifásicas, fase-terra, fase-fase-terra e fase-fase ao longo das linhas do sistema, para a obtenção das magnitudes de tensão resultantes nos consumidores. As magnitudes das depressões de tensão e as taxas de falta nas linhas do sistema são utilizadas na previsão da frequência de ocorrência das depressões de tensão. Com o objetivo de evidenciar os pontos mais sensíveis ou vulneráveis do sistema, as frequências das tensões nos consumidores são detalhadas de forma a exibir a distribuição do total de eventos por intervalos de magnitude de tensão, por linha do sistema, por tipo de falta, ou por classe de tensão das linhas do sistema. Dependendo da conexão carga do consumidor, as características das depressões de tensão podem ser expressas em função da tensão de linha e/ou da tensão de fase.

A modelagem probabilística do aplicativo *VISAGE* foi estendida para viabilizar a estimativa de índices de desempenho refletindo o impacto das depressões de tensão numa carga específica de um consumidor, cuja sensibilidade é definida pela magnitude de tensão mínima suportada e pela tolerância de tempo de exposição ao distúrbio. Esta metodologia considera a característica de duração das depressões de tensão, cuja previsão requer uma estimativa do tempo total despendido pelos dispositivos de proteção no processo de eliminação das faltas em cada linha do sistema. A versão atual do aplicativo desenvolvido considera apenas a proteção de tempo definido,

caracterizada por um tempo de atuação constante. Para cada falta aplicada nas linhas do sistema, a magnitude e a duração da depressão de tensão na barra consumidor são comparadas aos parâmetros de sensibilidade da carga. A frequência de desligamentos na barra do consumidor é estimada considerando-se apenas as depressões de tensão que ocasionem o desligamento da carga e aplicando-se as respectivas taxas de falta das linhas do sistema. Também é informada a distribuição da frequência por tipo de falta e por linha. Isto contribui efetivamente na tomada de medidas apropriadas e oportunas nos circuitos de linha com maior risco de depressões de tensão.

Alem da previsão da frequência anual de desligamentos, o fornecimento de dados referentes ao tempo de retomada da produção, a duração média da interrupção, a demanda e o fator de carga do consumidor possibilita cálculo de outros índices de desempenho como a disponibilidade e a indisponibilidade da carga ou processo industrial, o custo anual de interrupção do processo do consumidor, a demanda e a energia não distribuída. Os índices de desempenho podem ser obtidos para cada consumidor ou para o sistema como um todo considerando-se critérios de tensão mínima ou média das fases.

O Capítulo seguinte comenta exemplos de aplicação do sistema de informações *VISAGE*, detalhado neste Capítulo, com o objetivo de validar o aplicativo e demonstrar a sua potencialidade e utilidade na análise de depressões de tensão.

Exemplos de Aplicação - Resultados e Discussões

4.1 Introdução

Este Capítulo é dedicado à aplicação da ferramenta computacional desenvolvida e à discussão e interpretação dos resultados.

4.2 Exemplo de Sistema Radial de Distribuição

Considere o exemplo de sistema radial de distribuição da referência [2] apresentado no item 2.9.1.

O sistema, cujo diagrama unifilar foi repetido na Figura 4-1, possui dois alimentadores. A reatância da barra de distribuição é $+j0,50$ (p.u.). *F2* tem 12 milhas de comprimento, com uma reatância de $+j0,40$ (p.u.) por milha.

A probabilidade de faltas trifásicas é 0,15 por milha por ano.

As tensões pré-falta foram assumidas 1,0 (p.u.).

Um consumidor em *F1* possui cargas sensíveis à depressões de tensão. Deseja-se saber quantos eventos de depressões de tensão devem ser esperados devido à aplicação de faltas no alimentador *F2*.

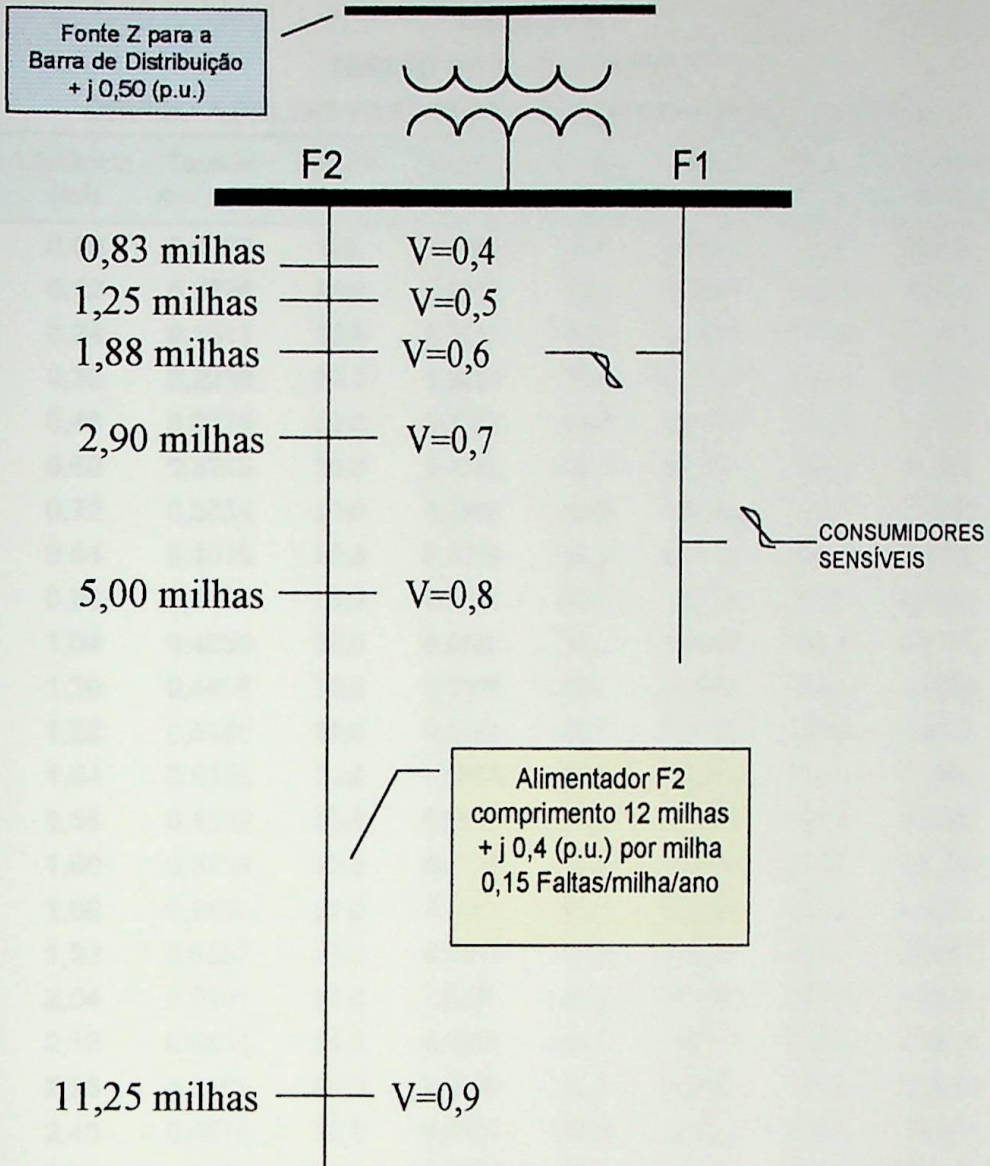


Figura 4-1 Diagrama Unifilar do Exemplo de Distribuição Radial do item 2.9.1

A tabela 4-1 mostra os valores de tensão em *F1* resultantes da aplicação de faltas trifásicas ao longo de pontos do alimentador *F2* de 0% a 100%, com um incremento de 1%.

Os dados foram processados no programa ANAFAS e importados para o aplicativo VISAGE.

TABELA 4-1
TENSÃO NO ALIMENTADOR F1
DEVIDO A FALTAS TRIFÁSICAS NO ALIMENTADOR F2 COM 12 (mi)

Distância (%)	Distância (mi)	Tensão A-B ou A	Ângulo	Tensão B-C ou B	Ângulo	Tensão C-A ou C	Ângulo	Tensão Média	Tensão Mínima
0000	0,00	0,0000	0,0	0,0000	0,0	0,0000	0,0	0,0000	0,0000
0001	0,12	0,0876	30,0	0,0876	-90,0	0,0876	150,0	0,0876	0,0876
0002	0,24	0,1611	30,0	0,1611	-90,0	0,1611	150,0	0,1611	0,1611
0003	0,36	0,2236	30,0	0,2236	-90,0	0,2236	150,0	0,2236	0,2236
0004	0,48	0,2775	30,0	0,2775	-90,0	0,2775	150,0	0,2775	0,2775
0005	0,60	0,3243	30,0	0,3243	-90,0	0,3243	150,0	0,3243	0,3243
0006	0,72	0,3655	30,0	0,3655	-90,0	0,3655	150,0	0,3655	0,3655
0007	0,84	0,4019	30,0	0,4019	-90,0	0,4019	150,0	0,4019	0,4019
0008	0,96	0,4344	30,0	0,4344	-90,0	0,4344	150,0	0,4344	0,4344
0009	1,08	0,4635	30,0	0,4635	-90,0	0,4635	150,0	0,4635	0,4635
0010	1,20	0,4898	30,0	0,4898	-90,0	0,4898	150,0	0,4898	0,4898
0011	1,32	0,5136	30,0	0,5136	-90,0	0,5136	150,0	0,5136	0,5136
0012	1,44	0,5353	30,0	0,5353	-90,0	0,5353	150,0	0,5353	0,5353
0013	1,56	0,5552	30,0	0,5552	-90,0	0,5552	150,0	0,5552	0,5552
0014	1,68	0,5734	30,0	0,5734	-90,0	0,5734	150,0	0,5734	0,5734
0015	1,80	0,5902	30,0	0,5902	-90,0	0,5902	150,0	0,5902	0,5902
0016	1,92	0,6057	30,0	0,6057	-90,0	0,6057	150,0	0,6057	0,6057
0017	2,04	0,6201	30,0	0,6201	-90,0	0,6201	150,0	0,6201	0,6201
0018	2,16	0,6334	30,0	0,6334	-90,0	0,6334	150,0	0,6334	0,6334
0019	2,28	0,6459	30,0	0,6459	-90,0	0,6459	150,0	0,6459	0,6459
0020	2,40	0,6575	30,0	0,6575	-90,0	0,6575	150,0	0,6575	0,6575
0021	2,52	0,6684	30,0	0,6684	-90,0	0,6684	150,0	0,6684	0,6684
0022	2,64	0,6787	30,0	0,6787	-90,0	0,6787	150,0	0,6787	0,6787
0023	2,76	0,6883	30,0	0,6883	-90,0	0,6883	150,0	0,6883	0,6883
0024	2,88	0,6973	30,0	0,6973	-90,0	0,6973	150,0	0,6973	0,6973
0025	3,00	0,7059	30,0	0,7059	-90,0	0,7059	150,0	0,7059	0,7059
0026	3,12	0,7140	30,0	0,7140	-90,0	0,7140	150,0	0,7140	0,7140
0027	3,24	0,7216	30,0	0,7216	-90,0	0,7216	150,0	0,7216	0,7216
0028	3,36	0,7289	30,0	0,7289	-90,0	0,7289	150,0	0,7289	0,7289
0029	3,48	0,7357	30,0	0,7357	-90,0	0,7357	150,0	0,7357	0,7357
0030	3,60	0,7423	30,0	0,7423	-90,0	0,7423	150,0	0,7423	0,7423
0031	3,72	0,7485	30,0	0,7485	-90,0	0,7485	150,0	0,7485	0,7485
0032	3,84	0,7544	30,0	0,7544	-90,0	0,7544	150,0	0,7544	0,7544
0033	3,96	0,7601	30,0	0,7601	-90,0	0,7601	150,0	0,7601	0,7601
0034	4,08	0,7655	30,0	0,7655	-90,0	0,7655	150,0	0,7655	0,7655
0035	4,20	0,7706	30,0	0,7706	-90,0	0,7706	150,0	0,7706	0,7706
0036	4,32	0,7756	30,0	0,7756	-90,0	0,7756	150,0	0,7756	0,7756

Exemplos de Aplicação - Resultados e Discussões

0037	4,44	0,7803	30,0	0,7803	-90,0	0,7803	150,0	0,7803	0,7803
0038	4,56	0,7849	30,0	0,7849	-90,0	0,7849	150,0	0,7849	0,7849
0039	4,68	0,7892	30,0	0,7892	-90,0	0,7892	150,0	0,7892	0,7892
0040	4,80	0,7934	30,0	0,7934	-90,0	0,7934	150,0	0,7934	0,7934
0041	4,92	0,7974	30,0	0,7974	-90,0	0,7974	150,0	0,7974	0,7974
0042	5,04	0,8013	30,0	0,8013	-90,0	0,8013	150,0	0,8013	0,8013
0043	5,16	0,8050	30,0	0,8050	-90,0	0,8050	150,0	0,8050	0,8050
0044	5,28	0,8086	30,0	0,8086	-90,0	0,8086	150,0	0,8086	0,8086
0045	5,40	0,8120	30,0	0,8120	-90,0	0,8120	150,0	0,8120	0,8120
0046	5,52	0,8154	30,0	0,8154	-90,0	0,8154	150,0	0,8154	0,8154
0047	5,64	0,8186	30,0	0,8186	-90,0	0,8186	150,0	0,8186	0,8186
0048	5,76	0,8217	30,0	0,8217	-90,0	0,8217	150,0	0,8217	0,8217
0049	5,88	0,8247	30,0	0,8247	-90,0	0,8247	150,0	0,8247	0,8247
0050	6,00	0,8276	30,0	0,8276	-90,0	0,8276	150,0	0,8276	0,8276
0051	6,12	0,8304	30,0	0,8304	-90,0	0,8304	150,0	0,8304	0,8304
0052	6,24	0,8331	30,0	0,8331	-90,0	0,8331	150,0	0,8331	0,8331
0053	6,36	0,8357	30,0	0,8357	-90,0	0,8357	150,0	0,8357	0,8357
0054	6,48	0,8383	30,0	0,8383	-90,0	0,8383	150,0	0,8383	0,8383
0055	6,60	0,8408	30,0	0,8408	-90,0	0,8408	150,0	0,8408	0,8408
0056	6,72	0,8432	30,0	0,8432	-90,0	0,8432	150,0	0,8432	0,8432
0057	6,84	0,8455	30,0	0,8455	-90,0	0,8455	150,0	0,8455	0,8455
0058	6,96	0,8477	30,0	0,8477	-90,0	0,8477	150,0	0,8477	0,8477
0059	7,08	0,8499	30,0	0,8499	-90,0	0,8499	150,0	0,8499	0,8499
0060	7,20	0,8521	30,0	0,8521	-90,0	0,8521	150,0	0,8521	0,8521
0061	7,32	0,8541	30,0	0,8541	-90,0	0,8541	150,0	0,8541	0,8541
0062	7,44	0,8562	30,0	0,8562	-90,0	0,8562	150,0	0,8562	0,8562
0063	7,56	0,8581	30,0	0,8581	-90,0	0,8581	150,0	0,8581	0,8581
0064	7,68	0,8600	30,0	0,8600	-90,0	0,8600	150,0	0,8600	0,8600
0065	7,80	0,8619	30,0	0,8619	-90,0	0,8619	150,0	0,8619	0,8619
0066	7,92	0,8637	30,0	0,8637	-90,0	0,8637	150,0	0,8637	0,8637
0067	8,04	0,8654	30,0	0,8654	-90,0	0,8654	150,0	0,8654	0,8654
0068	8,16	0,8672	30,0	0,8672	-90,0	0,8672	150,0	0,8672	0,8672
0069	8,28	0,8688	30,0	0,8688	-90,0	0,8688	150,0	0,8688	0,8688
0070	8,40	0,8705	30,0	0,8705	-90,0	0,8705	150,0	0,8705	0,8705
0071	8,52	0,8721	30,0	0,8721	-90,0	0,8721	150,0	0,8721	0,8721
0072	8,64	0,8736	30,0	0,8736	-90,0	0,8736	150,0	0,8736	0,8736
0073	8,76	0,8751	30,0	0,8751	-90,0	0,8751	150,0	0,8751	0,8751
0074	8,88	0,8766	30,0	0,8766	-90,0	0,8766	150,0	0,8766	0,8766
0075	9,00	0,8780	30,0	0,8780	-90,0	0,8780	150,0	0,8780	0,8780
0076	9,12	0,8795	30,0	0,8795	-90,0	0,8795	150,0	0,8795	0,8795
0077	9,24	0,8808	30,0	0,8808	-90,0	0,8808	150,0	0,8808	0,8808
0078	9,36	0,8822	30,0	0,8822	-90,0	0,8822	150,0	0,8822	0,8822

Exemplos de Aplicação - Resultados e Discussões

0079	9,48	0,8835	30,0	0,8835	-90,0	0,8835	150,0	0,8835	0,8835
0080	9,60	0,8848	30,0	0,8848	-90,0	0,8848	150,0	0,8848	0,8848
0081	9,72	0,8861	30,0	0,8861	-90,0	0,8861	150,0	0,8861	0,8861
0082	9,84	0,8873	30,0	0,8873	-90,0	0,8873	150,0	0,8873	0,8873
0083	9,96	0,8885	30,0	0,8885	-90,0	0,8885	150,0	0,8885	0,8885
0084	10,08	0,8897	30,0	0,8897	-90,0	0,8897	150,0	0,8897	0,8897
0085	10,20	0,8908	30,0	0,8908	-90,0	0,8908	150,0	0,8908	0,8908
0086	10,32	0,8920	30,0	0,8920	-90,0	0,8920	150,0	0,8920	0,8920
0087	10,44	0,8931	30,0	0,8931	-90,0	0,8931	150,0	0,8931	0,8931
0088	10,56	0,8942	30,0	0,8942	-90,0	0,8942	150,0	0,8942	0,8942
0089	10,68	0,8952	30,0	0,8952	-90,0	0,8952	150,0	0,8952	0,8952
0090	10,80	0,8963	30,0	0,8963	-90,0	0,8963	150,0	0,8963	0,8963
0091	10,92	0,8973	30,0	0,8973	-90,0	0,8973	150,0	0,8973	0,8973
0092	11,04	0,8983	30,0	0,8983	-90,0	0,8983	150,0	0,8983	0,8983
0093	11,16	0,8993	30,0	0,8993	-90,0	0,8993	150,0	0,8993	0,8993
0094	11,28	0,9002	30,0	0,9002	-90,0	0,9002	150,0	0,9002	0,9002
0095	11,40	0,9012	30,0	0,9012	-90,0	0,9012	150,0	0,9012	0,9012
0096	11,52	0,9021	30,0	0,9021	-90,0	0,9021	150,0	0,9021	0,9021
0097	11,64	0,9030	30,0	0,9030	-90,0	0,9030	150,0	0,9030	0,9030
0098	11,76	0,9039	30,0	0,9039	-90,0	0,9039	150,0	0,9039	0,9039
0099	11,88	0,9048	30,0	0,9048	-90,0	0,9048	150,0	0,9048	0,9048
0100	12,00	0,9057	30,0	0,9057	-90,0	0,9057	150,0	0,9057	0,9057

A Figura 4-2 mostra diagramas vetoriais da tensão em *F1* para faltas em *F2*.

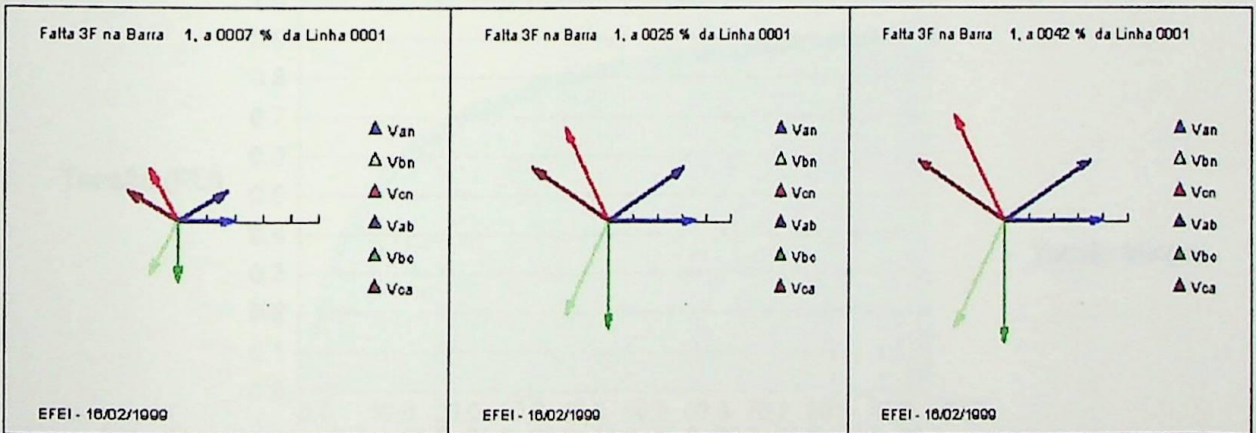


Figura 4-2 Diagramas Vetoriais da Tensão em *F1* devido a Faltas Trifásicas, a 7% (0,4 p.u.), 25% (0,7 p.u.) e 42% (0,8 p.u.) de *F2*

Os vetores estão em escala. A linha preta indica marcações correspondentes a 0,20, 0,40, 0,60, 0,80 e 1 (p.u.).

As Figuras 4-3 e 4-4 mostram a evolução das magnitudes de tensão em $F1$ com os locais de aplicação de faltas no alimentador $F2$, cujos valores foram apresentados na Tabela 4-1.

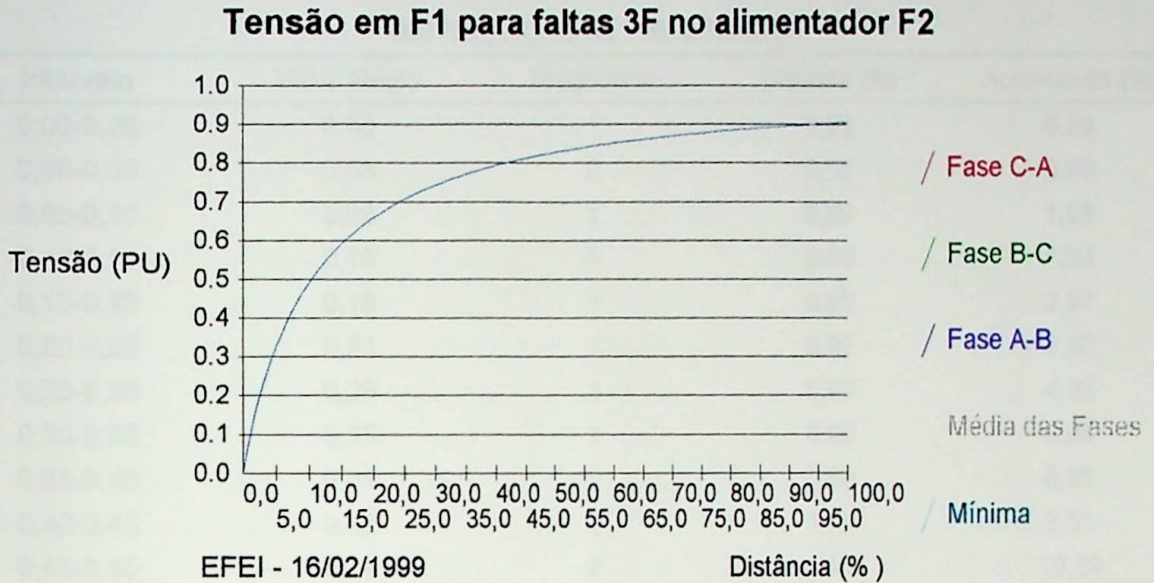


Figura 4-3 Evolução da tensão no consumidor $F1$ para faltas trifásicas aplicadas ao longo do alimentador $F2$

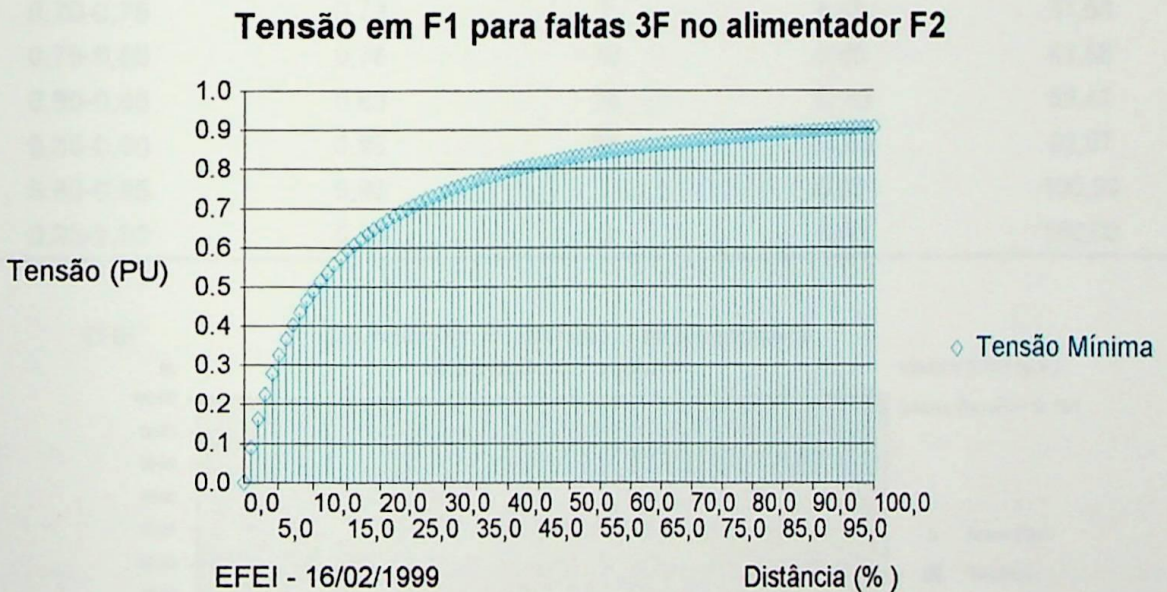


Figura 4-4 Evolução da tensão mínima no consumidor $F1$ para faltas trifásicas aplicadas ao longo do alimentador $F2$

A Tabela 4-2 e a Figura 4-5 mostram a distribuição de frequência das 101 magnitudes de tensão em $F1$ da Tabela 4-1, onde a média é 0,7510 e a máxima é 0,9057 (p.u.).

TABELA 4-2

TENSÃO NO ALIMENTADOR $F1$ DEVIDO A FALTAS TRIFÁSICAS NO ALIMENTADOR $F2$
DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA

Intervalo	Valor Médio	Frequência	Discreta (%)	Acumulada (%)
0,00-0,00	0,00	1	0,99	0,99
0,00-0,05	0,03	0	0,00	0,99
0,05-0,10	0,08	1	0,99	1,98
0,10-0,15	0,13	0	0,00	1,98
0,15-0,20	0,18	1	0,99	2,97
0,20-0,25	0,23	1	0,99	3,96
0,25-0,30	0,28	1	0,99	4,95
0,30-0,35	0,33	1	0,99	5,94
0,35-0,40	0,38	1	0,99	6,93
0,40-0,45	0,42	2	1,98	8,91
0,45-0,50	0,48	2	1,98	10,89
0,50-0,55	0,52	2	1,98	12,87
0,55-0,60	0,58	3	2,97	15,84
0,60-0,65	0,63	4	3,96	19,80
0,65-0,70	0,68	5	4,95	24,75
0,70-0,75	0,73	7	6,93	31,68
0,75-0,80	0,78	10	9,90	41,58
0,80-0,85	0,83	18	17,82	59,41
0,85-0,90	0,88	34	33,66	93,07
0,90-0,95	0,93	7	6,93	100,00
0,95-1,00	0,98	0	0,00	100,00

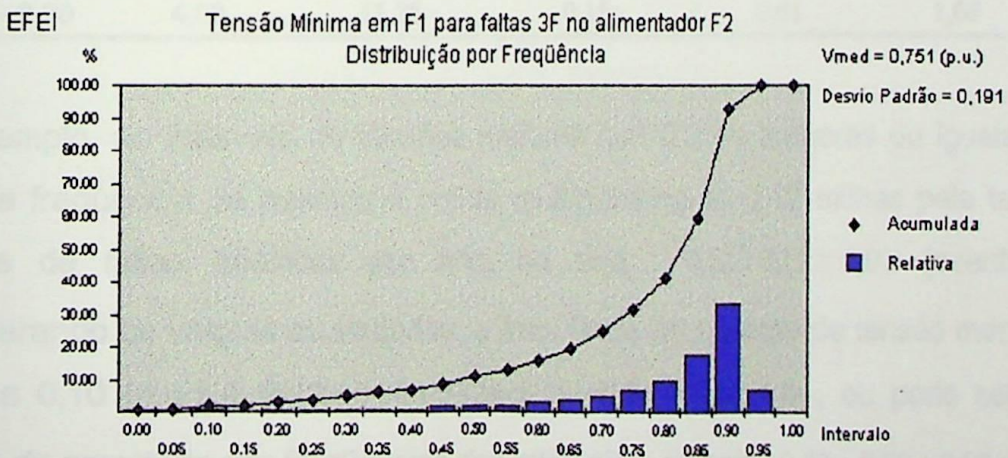


Figura 4-5 Distribuição da tensão mínima fase-fase no consumidor $F1$ para faltas trifásicas aplicadas ao longo do alimentador $F2$

A Tabela 4-3 exibe o cálculo da frequência de depressões de tensão, obtido pela multiplicação do total de milhas pela taxa de probabilidade de faltas trifásicas por ano (0,15 p.u.). O total acumulado é obtido somando-se ao intervalo atual, todos os valores dos intervalos anteriores.

TABELA 4-3
**FREQÜÊNCIA DE EVENTOS DE DEPRESSÃO DE TENSÃO
 NO ALIMENTADOR F1 DEVIDO A FALTAS TRIFÁSICAS NO ALIMENTADOR F2**

Intervalo de Tensão (p.u.)	Milhas de Eventos		Eventos de Faltas 3F por milha por ano	Frequência de Eventos	
	No Intervalo	Acumulado		No Intervalo	Acumulada
0,00 - 0,00	0,12	0,12	0,15	0,02	0,02
0,00 - 0,05	0,00	0,12	0,15	0,00	0,02
0,05 - 0,10	0,12	0,24	0,15	0,02	0,04
0,10 - 0,15	0,00	0,24	0,15	0,00	0,04
0,15 - 0,20	0,12	0,36	0,15	0,02	0,05
0,20 - 0,25	0,12	0,48	0,15	0,02	0,07
0,25 - 0,30	0,12	0,60	0,15	0,02	0,09
0,30 - 0,35	0,12	0,72	0,15	0,02	0,11
0,35 - 0,40	0,12	0,84	0,15	0,02	0,13
0,40 - 0,45	0,24	1,08	0,15	0,04	0,16
0,45 - 0,50	0,24	1,32	0,15	0,04	0,20
0,50 - 0,55	0,24	1,56	0,15	0,04	0,23
0,55 - 0,60	0,36	1,92	0,15	0,05	0,29
0,60 - 0,65	0,48	2,40	0,15	0,07	0,36
0,65 - 0,70	0,60	3,00	0,15	0,09	0,45
0,70 - 0,75	0,84	3,84	0,15	0,13	0,58
0,75 - 0,80	1,20	5,04	0,15	0,18	0,76
0,80 - 0,85	2,16	7,20	0,15	0,32	1,08
0,85 - 0,90	4,08	11,28	0,15	0,61	1,69

Por exemplo, no intervalo de tensões maiores que 0,05 e menores ou iguais a 0,10 (p.u.), a frequência de eventos é obtida multiplicando-se 0,12 milhas pela taxa 0,15 eventos de faltas trifásicas por ano, ou seja, $0,12 \times 0,15 \cong 0,02$ (eventos.ano). Considerando os valores acumulados, a frequência de eventos de tensão menores ou iguais a 0,10 (p.u.) é $(0,12 + 0,00 + 0,12) \times 0,15 \cong 0,24 \times 0,15 \cong 0,04$, ou pode ser obtida através do somatório das frequências dos intervalos, ou seja, $0,02 + 0,00 + 0,02 \cong 0,04$.

A Figura 4-6 mostra gráficos das freqüências acumuladas e das freqüências para cada intervalo de tensão, conforme os valores da Tabela 4-3. O gráfico dos intervalos de tensão foi elaborado utilizando uma cor diferente para cada incremento de 0,10 (p.u.).

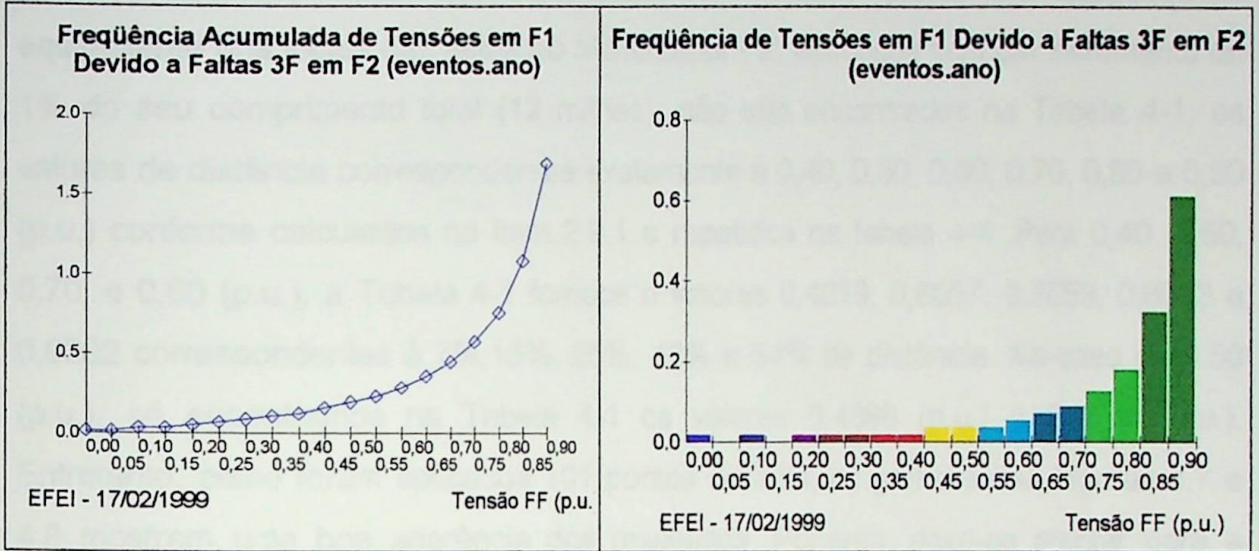


Figura 4-6 Freqüência de tensões no consumidor F1 para faltas aplicadas ao longo do alimentador F2

A seguir, os resultados obtidos com o VISAGE são comparados aos cálculos do item 2.9.1, com o objetivo de validar a ferramenta computacional desenvolvida.

A Tabela 4-4 relaciona as distâncias e as probabilidades de falta calculadas no item 2.9.1 para as magnitudes de depressão de tensão de interesse. A última coluna indica as freqüências de ocorrência de depressões de tensão que serão piores ou iguais à cada magnitude de depressão de tensão relacionada na primeira coluna.

TABELA 4-4
EXEMPLO DE CÁLCULO DE DEPRESSÕES DE TENSÃO
NUM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO RADIAL

Magnitude da Depressão de Tensão (p.u.)	Distância da Subestação (milhas)	Probabilidade de Falta	Número de eventos por ano menores ou iguais à Depressão de Tensão
0,40	0,83	0,15/mi	0,12
0,50	1,25	0,15/mi	0,19
0,60	1,88	0,15/mi	0,28
0,70	2,90	0,15/mi	0,44
0,80	5,00	0,15/mi	0,75
0,90	11,25	0,15/mi	1,69

As Figuras 4-7 e 4-8 comparam os resultados de magnitude de tensão e frequência de ocorrência de depressões de tensão mostrados no exemplo de sistema de distribuição do item 2.9.1 com os valores obtidos com a aplicação da ferramenta computacional desenvolvida. No caso das magnitudes de tensão, devido ao espaçamento equidistante dos locais das faltas no alimentador F2, aplicadas com um incremento de 1% do seu comprimento total (12 milhas), não são encontrados na Tabela 4-1, os valores de distância correspondentes exatamente à 0,40, 0,50, 0,60, 0,70, 0,80 e 0,90 (p.u.) conforme calculados no item 2.9.1 e repetidos na tabela 4-4. Para 0,40, 0,60, 0,70, e 0,80 (p.u.), a Tabela 4-1 fornece o valores 0,4019, 0,6057, 0,7059, 0,8013 e 0,9002 correspondentes à 7%,16%, 25%, 42% e 94% de distância. No caso de 0,50 (p.u.), só encontramos na Tabela 4-1 os valores 0,4898 (p.u.) e 0,5136 (p.u.). Entretanto, como foram aplicados 101 pontos de falta, os gráficos das Figuras 4.7 e 4.8 mostram uma boa aderência dos resultados. Portanto, deve-se atentar para a importância da amostra de faltas selecionada, que deve ser adequada à precisão que se deseja obter.

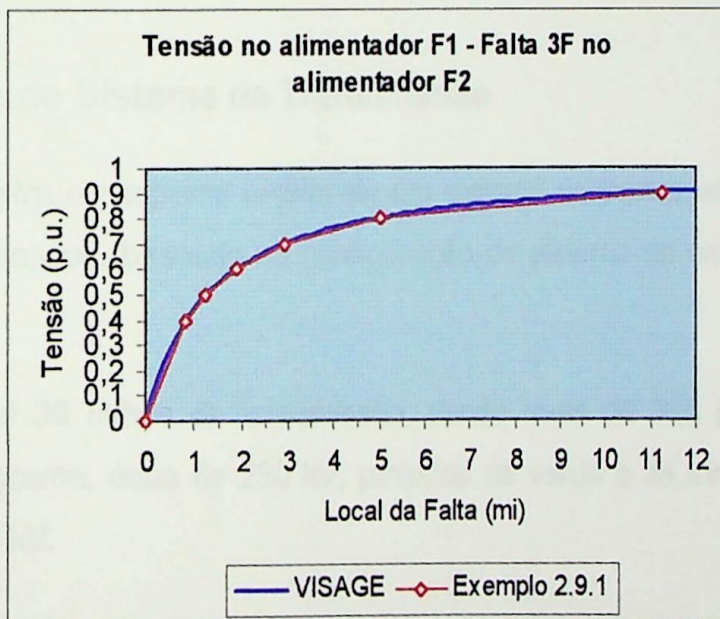


Figura 4-7 Tensão em F1 devido a Faltas Trifásicas em F2 – Comparação dos resultados do VISAGE com os do Exemplo 2.9.1

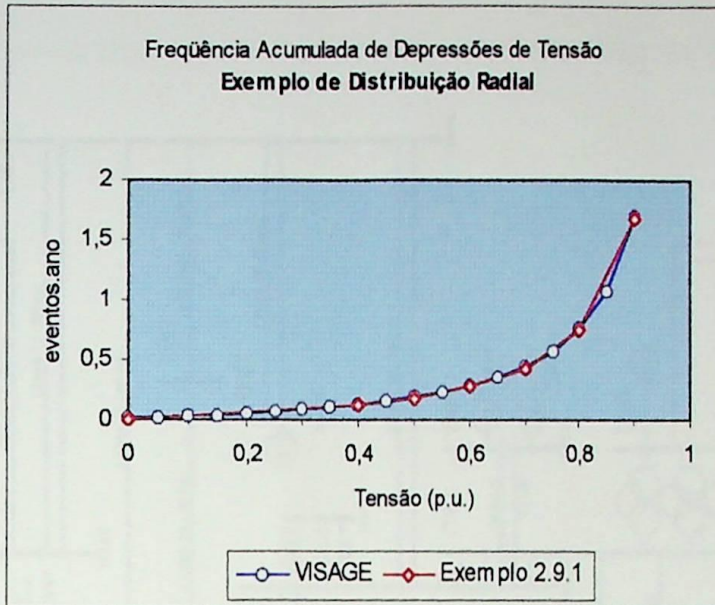


Figura 4-8 Frequência Acumulada de Depressões de Tensão em F1 – Comparação dos resultados do VISAGE com os do Exemplo 2.9.1

Os resultados do *VISAGE* são valores semelhantes aos valores do exemplo 2.9.1, publicados na referência [2], ratificando a condição de validade do algoritmo desenvolvido.

4.3 Exemplo de Sistema de Transmissão

A Figura 4-9 mostra o diagrama unifilar de um sistema de transmissão para teste do programa desenvolvido, baseado na configuração do sistema de uma concessionária brasileira.

O sistema possui 39 linhas de transmissão, sendo duas de 345 kV, indicadas em vermelho no diagrama, duas de 230 kV, pintadas de verde e as trinta e cinco linhas azuis são de 138 kV.

Foram destacadas em amarelo no diagrama quatro barras de ponto de acoplamento comum de consumidores: 41, 95, 113 e 119.

As tensões pré-falta foram assumidas 1,0 (p.u.).

Exemplos de Aplicação - Resultados e Discussões

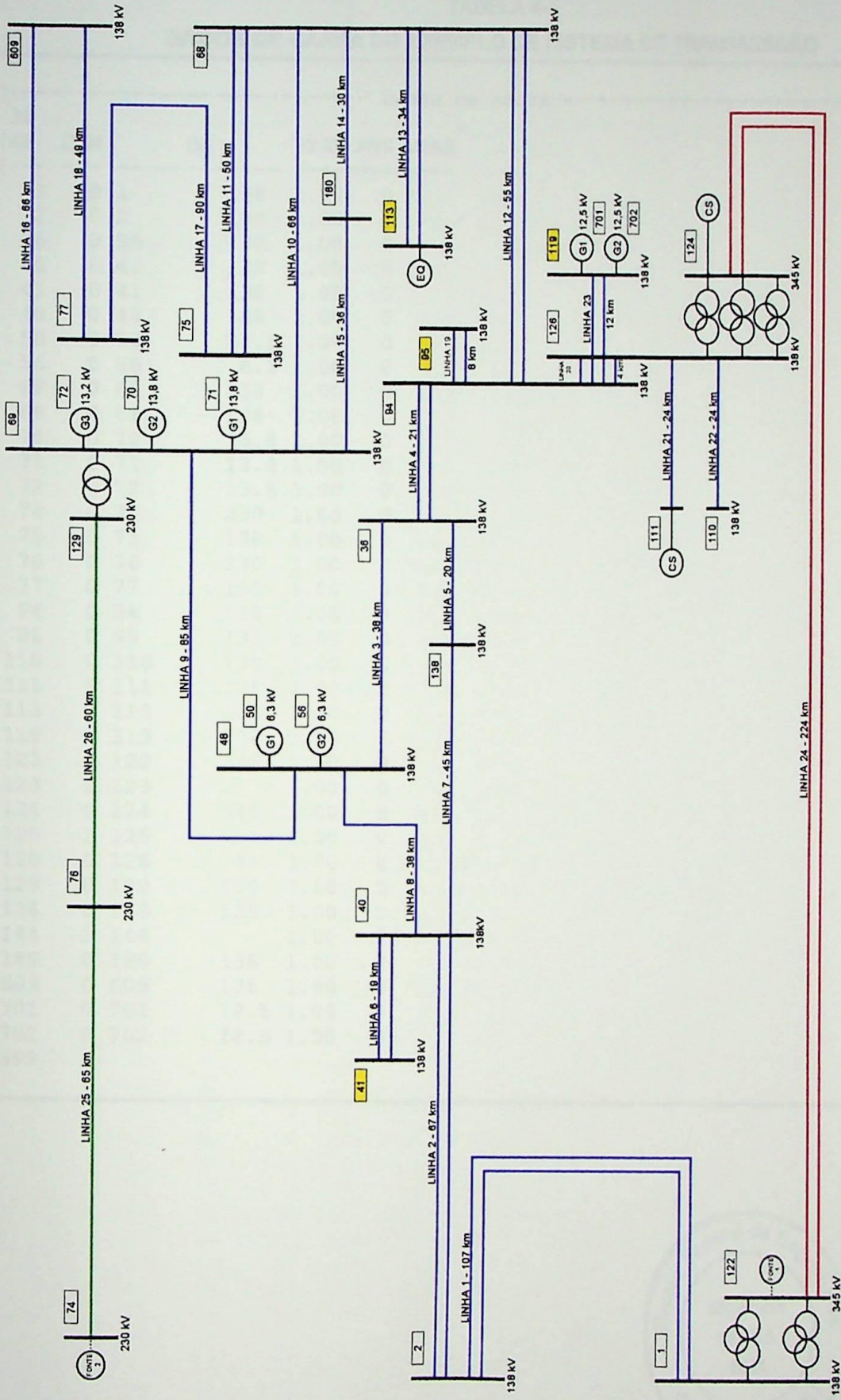


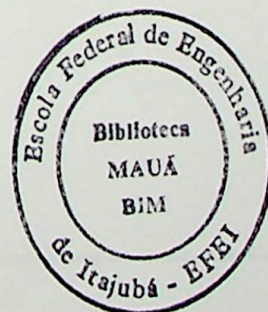
Figura 4-9 Sistema de Transmissão

Os dados para o programa ANAFAS são relacionados nas Tabelas 4-5 e 4-6.

TABELA 4-5

DADOS DE BARRA DO EXEMPLO DE SISTEMA DE TRANSMISSÃO

----- Dados de Barra -----							
(NB	C	M	BN	VPRE	ANG	VBAS	IA
38							
1	0	1	138	1.00	0		0
2	0	2	138	1.00	0		0
36	0	36	138	1.00	0		0
40	0	40	138	1.00	0		0
41	0	41	138	1.00	0		0
48	0	48	138	1.00	0		0
50	0	50	34.5	1.00	0		0
56	0	56	6.3	1.00	0		0
68	0	68	138	1.00	0		0
69	0	69	138	1.00	0		0
70	0	70	13.8	1.00	0		0
71	0	71	13.8	1.00	0		0
72	0	72	13.8	1.00	0		0
74	0	74	230	1.00	0		0
75	0	75	138	1.00	0		0
76	0	76	230	1.00	0		0
77	0	77	138	1.00	0		0
94	0	94	138	1.00	0		0
95	0	95	138	1.00	0		0
110	0	110	138	1.00	0		0
111	0	111	138	1.00	0		0
113	0	113	138	1.00	0		0
119	0	119	138	1.00	0		0
122	0	122	345	1.00	0		0
123	1	123		1.00	0		0
124	0	124	345	1.00	0		0
125	1	125		1.00	0		0
126	0	126	138	1.00	0		0
129	0	129	230	1.00	0		0
138	0	138	138	1.00	0		0
144	1	144		1.00	0		0
180	0	180	138	1.00	0		0
609	0	609	138	1.00	0		0
701	0	701	12.5	1.00	0		0
702	0	702	12.5	1.00	0		0
9999							



94	126	3L	21	71	80	374	0
94	126	4L	21	71	80	374	0
0	110	1H9999999999999999			0	2388	0
0	111	1G	0	40447	0	2208	0
111	126	1L	148	578	598	2161	0
110	126	1L	148	578	598	2161	0
0	113	1G	0	2200	0	4000	0
119	126	1L	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							

As taxas de faltas nas linhas de transmissão adotadas são as do exemplo do item 2.9.2 da referência [2], devidamente convertidas para eventos.ano por quilômetro de linha, conforme a Tabela 4-7.

TABELA 4-7
TAXAS DE FALTA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Nível de Tensão	Taxa de Faltas (eventos/km.ano)	Tipo de Falta			
		Trifásica	Fase-Terra	Fase-Fase	Fase-Fase-Terra
345 kV	0,023058	1%	91%	1%	7%
230 kV	0,016781	1,5%	80%	1,5%	17%
138 kV	0,029382	4%	73%	6%	17%

O tempo total de atuação da proteção (relé+disjuntor) seguiu os seguintes critérios e parâmetros:

- Teleproteção
 - Linhas de 345 kV (50+33) = 83 ms
 - Linhas de 230 kV (60+50) = 110 ms
- Proteção Fio Piloto
 - Linha 20 de 138 kV (60+50) = 110 ms
- Proteção de Sobrecorrente - Tempo Definido
 - Linhas 6,13,19,21 e 22 de 138 kV = 300 ms
- Proteção de Distância – Demais linhas de 138 kV
 - Primeira Zona – Alcance 90% (70+80) = 150 ms
 - Segunda Zona – (500+50) = 550 ms

A Tabela 4-8 mostra os dados das linhas do sistema.

TABELA 4-8
DADOS DAS LINHAS DO EXEMPLO DE SISTEMA DE TRANSMISSÃO

De	Para	C	Código	Tensão (kV)	Extensão (km)	Proteção Alcance	Atuação (ms)	Taxa de Falhas (eventos/km.ano)			
								3F	FT	FF	FFT
1	2	1	0001	138	107	Distância 90%	150,00	0,11933	2,17774	0,17899	0,50714
						2ª Zona	550,00				
1	2	2	0001	138	107	Distância 90%	150,00	0,11933	2,17774	0,17899	0,50714
						2ª Zona	550,00				
2	40	1	0002	138	67	Distância 90%	150,00	0,11933	2,17774	0,17899	0,50714
						2ª Zona	550,00				
2	40	2	0002	138	67	Distância 90%	150,00	0,11933	2,17774	0,17899	0,50714
						2ª Zona	550,00				
36	48	1	0003	138	38	Distância 90%	150,00	0,11933	2,17774	0,17899	0,50714
						2ª Zona	550,00				

Exemplos de Aplicação - Resultados e Discussões

36	94	1	0004	138	21	Distância 90%	150,00	0,11933	2,17774	0,17899	0,50714
						2ª Zona	550,00				
36	94	2	0004	138	21	Distância 90%	150,00	0,11933	2,17774	0,17899	0,50714
						2ª Zona	550,00				
36	138	1	0005	138	20	Distância 90%	150,00	0,11933	2,17774	0,17899	0,50714
						2ª Zona	550,00				
40	41	1	0006	138	19	Sobrecorrente 100%	300,00	0,11933	2,17774	0,17899	0,50714
40	41	2	0006	138	19	Sobrecorrente 100%	300,00	0,11933	2,17774	0,17899	0,50714
40	48	1	0008	138	38	Distância 90%	150,00	0,11933	2,17774	0,17899	0,50714
						2ª Zona	550,00				
40	138	1	0007	138	45	Distância 90%	150,00	0,11933	2,17774	0,17899	0,50714
						2ª Zona	550,00				
48	69	1	0009	138	85	Distância 90%	150,00	0,11933	2,17774	0,17899	0,50714
						2ª Zona	550,00				
68	69	1	0010	138	66	Distância 90%	150,00	0,11933	2,17774	0,17899	0,50714
						2ª Zona	550,00				
68	75	1	0011	138	50	Distância 90%	150,00	0,11933	2,17774	0,17899	0,50714
						2ª Zona	550,00				
68	75	2	0011	138	50	Distância 90%	150,00	0,11933	2,17774	0,17899	0,50714
						2ª Zona	550,00				
68	94	1	0012	138	55	Distância 90%	150,00	0,11933	2,17774	0,17899	0,50714
						2ª Zona	550,00				
68	94	2	0012	138	55	Distância 90%	150,00	0,11933	2,17774	0,17899	0,50714
						2ª Zona	550,00				
68	113	1	0013	138	34	Sobrecorrente 100%	300,00	0,11933	2,17774	0,17899	0,50714
68	113	2	0013	138	34	Sobrecorrente 100%	300,00	0,11933	2,17774	0,17899	0,50714
68	180	1	0014	138	30	Distância 90%	150,00	0,11933	2,17774	0,17899	0,50714
						2ª Zona	550,00				
69	180	1	0015	138	36	Distância 90%	150,00	0,11933	2,17774	0,17899	0,50714
						2ª Zona	550,00				
69	609	1	0016	138	66	Distância 90%	150,00	0,11933	2,17774	0,17899	0,50714
						2ª Zona	550,00				
74	76	1	0025	230	65	Teleproteção 100%	110,00	0,02517	1,34248	0,02517	0,28528

Exemplos de Aplicação - Resultados e Discussões

75	77	1	0017	138	90	Distância 90%	150,00	0,11933	2,17774	0,17899	0,50714
						2ª Zona	550,00				
76	129	1	0026	230	60	Teleproteção 100%	110,00	0,02517	1,34248	0,02517	0,28528
77	609	1	0018	138	49	Distância 90%	150,00	0,11933	2,17774	0,17899	0,50714
						2ª Zona	550,00				
94	95	1	0019	138	8	Sobrecorrente 100%	300,00	0,11933	2,17774	0,17899	0,50714
94	95	2	0019	138	8	Sobrecorrente 100%	300,00	0,11933	2,17774	0,17899	0,50714
94	126	1	0020	138	4	Fio Piloto 100%	110,00	0,11933	2,17774	0,17899	0,50714
94	126	2	0020	138	4	Fio Piloto 100%	110,00	0,11933	2,17774	0,17899	0,50714
94	126	3	0020	138	4	Fio Piloto 100%	110,00	0,11933	2,17774	0,17899	0,50714
94	126	4	0020	138	4	Fio Piloto 100%	110,00	0,11933	2,17774	0,17899	0,50714
110	126	1	0022	138	24	Sobrecorrente 100%	300,00	0,11933	2,17774	0,17899	0,50714
111	126	1	0021	138	24	Sobrecorrente 100%	300,00	0,11933	2,17774	0,17899	0,50714
119	126	1	0023	138	12	Distância 90%	150,00	0,11933	2,17774	0,17899	0,50714
						2ª Zona	550,00				
119	126	2	0023	138	12	Distância 90%	150,00	0,11933	2,17774	0,17899	0,50714
						2ª Zona	550,00				
122	124	1	0024	345	224	Teleproteção 100%	83,00	0,02306	2,09828	0,02306	0,16141
122	124	2	0024	345	224	Teleproteção 100%	83,00	0,02306	2,09828	0,02306	0,16141

4.3.1 Análise de Depressões de Tensão na Barra 41

Critério: Tensão fase-fase - valor mínimo entre as 3 fases

As Figuras 4-10 a 4-13 mostram a evolução das magnitudes de tensão fase-fase no consumidor da barra 41 com os locais de aplicação de faltas nas linhas 1-2 e 122-124, para faltas trifásicas, fase-terra, fase-fase e fase-fase-terra respectivamente.

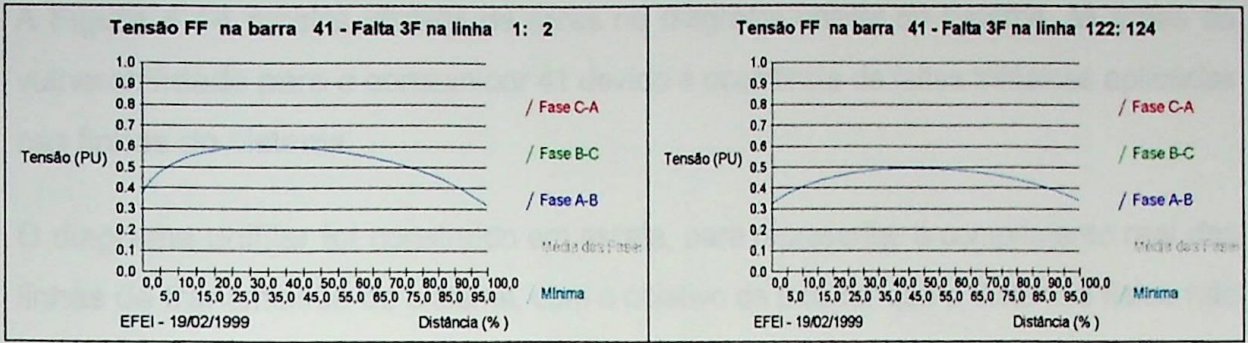


Figura 4-10 Evolução da tensão fase-fase no consumidor 41 para faltas trifásicas aplicadas ao longo das linhas 1-2 e 122-124

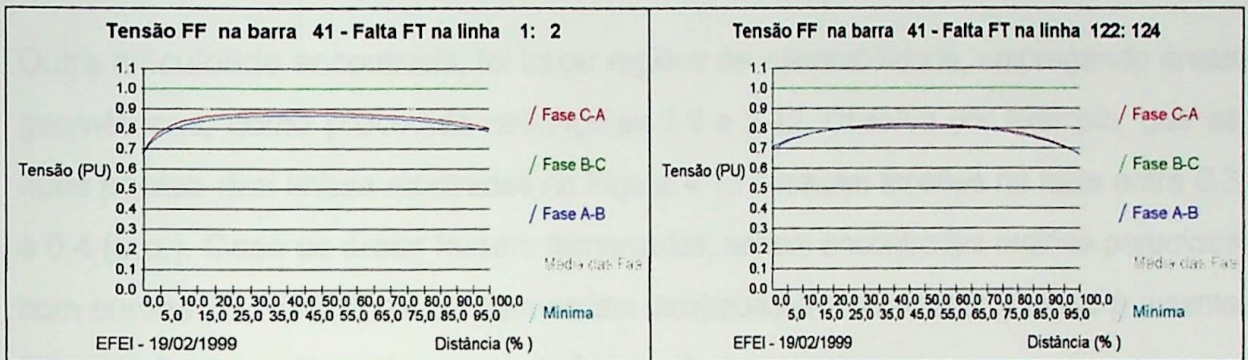


Figura 4-11 Evolução da tensão fase-fase no consumidor 41 para faltas fase-terra aplicadas ao longo das linhas 1-2 e 122-124

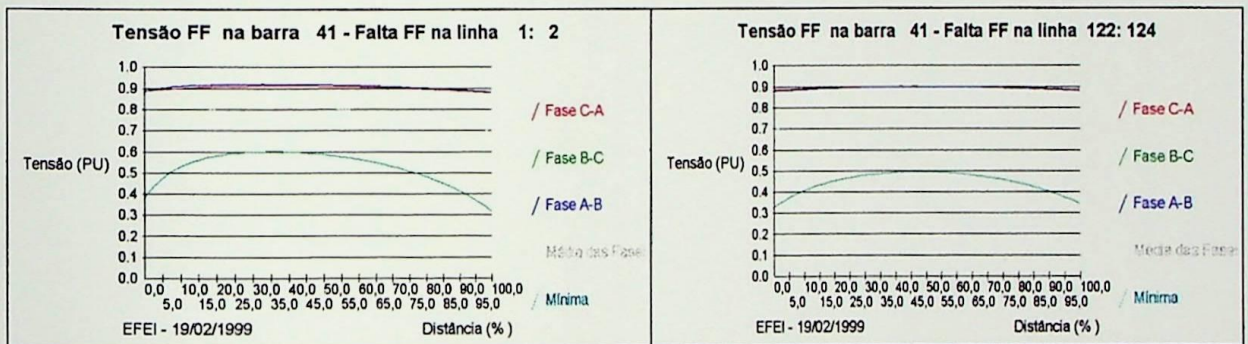


Figura 4-12 Evolução da tensão fase-fase no consumidor 41 para faltas fase-fase aplicadas ao longo das linhas 1-2 e 122-124

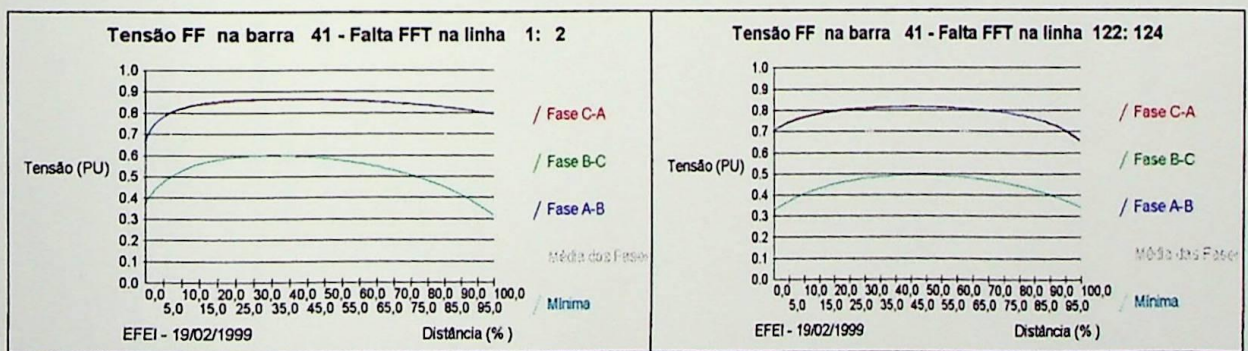


Figura 4-13 Evolução da tensão fase-fase no consumidor 41 para faltas fase-fase-terra aplicadas ao longo das linhas 1-2 e 122-124

A Figura 4-14 mostra através de cores no diagrama unifilar do sistema, as áreas de vulnerabilidade para o consumidor 41 devido à ocorrência de faltas trifásicas aplicadas nas linhas do sistema.

O diagrama unifilar foi construído em escala, para representar o comprimento real das linhas de transmissão do sistema, com o objetivo de mostrar que a distância física não se traduz diretamente em distância elétrica, quando se trata da gravidade das depressões de tensão, conforme comentado em 2.8.1.

Outra dificuldade encontrada, foi traçar regiões de vulnerabilidade, empregando áreas geométricas, como procedido nas Figuras 2-9 e 2-12. Observe por exemplo, que as duas pontas das linhas mostradas na Figura 4-10 possuem tensões na faixa entre 0,3 e 0,4 (p.u.). Caso as áreas fossem demarcadas, seriam encontradas regiões parecidas com curvas de nível, mas também seriam mostradas áreas correspondentes à mesma faixa em lugares diferentes, como se fossem ilhas num mapa.

Exemplos de Aplicação - Resultados e Discussões

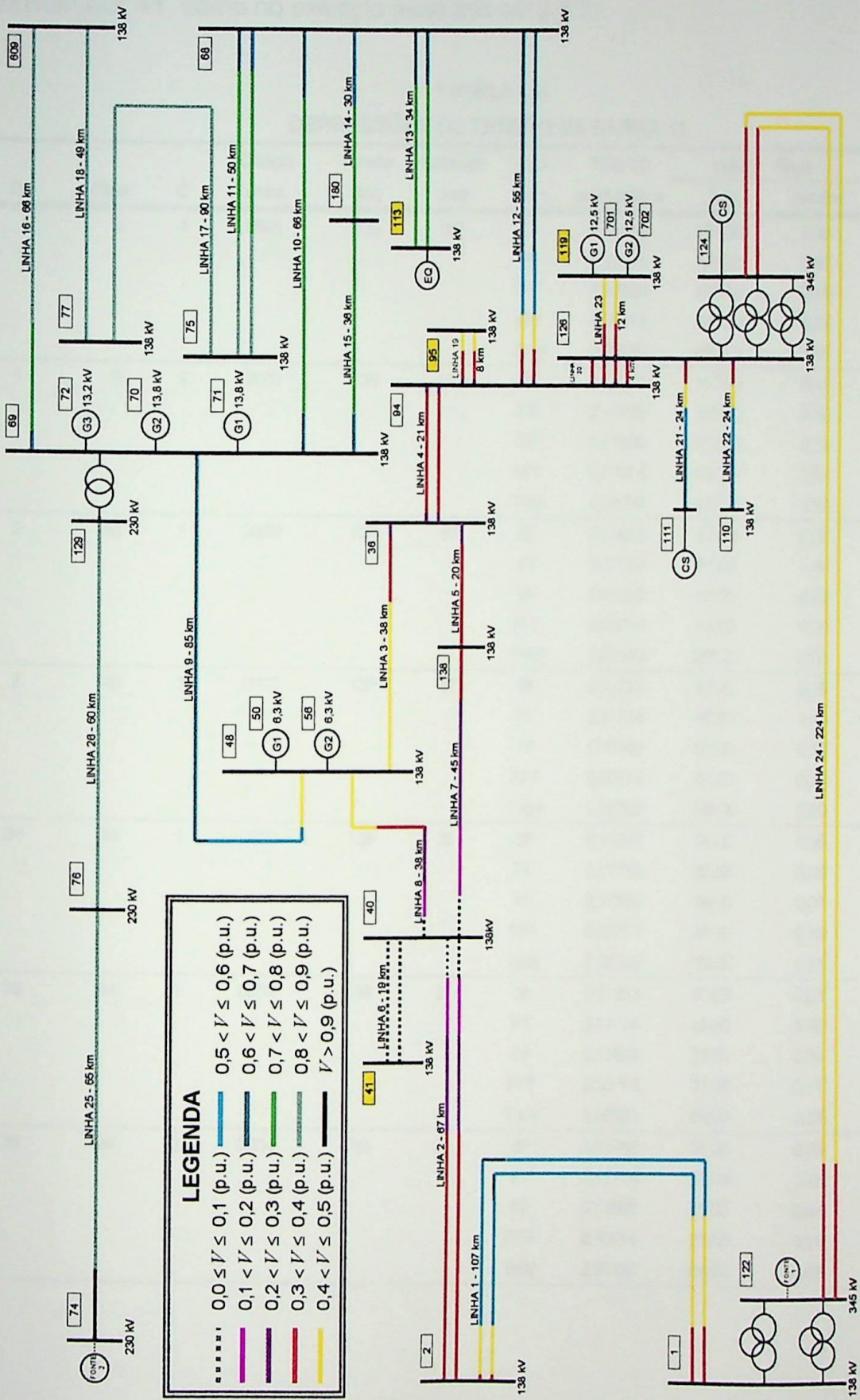


Figura 4-14 Área de Vulnerabilidade do Consumidor 41 para faltas trifásicas nas linhas do sistema

A Tabela 4-9 mostra os cálculos completos de depressões de tensão, para o consumidor 41, como no exemplo mostrado em 2.9.2.

TABELA 4-9
DEPRESSÕES DE TENSÃO NA BARRA 41

De	Para	C	Código Linha	Tensão (kV)	Extensão (km)	Tipo Falta	Taxa CC eventos/km.a	Voltage Sags	
								(km)	eventos
1	2	1	0001	138	107	3F	0,11933	107,00	0,13
						FT	2,17774	107,00	2,33
						FF	0,17899	107,00	0,19
						FFT	0,50714	107,00	0,54
						Total	2,98320	428,00	3,19
1	2	2	0001	138	107	3F	0,11933	107,00	0,13
						FT	2,17774	107,00	2,33
						FF	0,17899	107,00	0,19
						FFT	0,50714	107,00	0,54
						Total	2,98320	428,00	3,19
2	40	1	0002	138	67	3F	0,11933	67,00	0,08
						FT	2,17774	67,00	1,46
						FF	0,17899	67,00	0,12
						FFT	0,50714	67,00	0,34
						Total	2,98320	268,00	2,00
2	40	2	0002	138	67	3F	0,11933	67,00	0,08
						FT	2,17774	67,00	1,46
						FF	0,17899	67,00	0,12
						FFT	0,50714	67,00	0,34
						Total	2,98320	268,00	2,00
36	48	1	0003	138	38	3F	0,11933	38,00	0,05
						FT	2,17774	38,00	0,83
						FF	0,17899	38,00	0,07
						FFT	0,50714	38,00	0,19
						Total	2,98320	152,00	1,13
36	94	1	0004	138	21	3F	0,11933	21,00	0,03
						FT	2,17774	21,00	0,46
						FF	0,17899	21,00	0,04
						FFT	0,50714	21,00	0,11
						Total	2,98320	84,00	0,63
36	94	2	0004	138	21	3F	0,11933	21,00	0,03
						FT	2,17774	21,00	0,46
						FF	0,17899	21,00	0,04
						FFT	0,50714	21,00	0,11
						Total	2,98320	84,00	0,63

Exemplos de Aplicação - Resultados e Discussões

36	138	1	0005	138	20	3F	0,11933	20,00	0,02
						FT	2,17774	20,00	0,44
						FF	0,17899	20,00	0,04
						FFT	0,50714	20,00	0,10
						Total	2,98320	80,00	0,60
40	41	1	0006	138	19	3F	0,11933	19,00	0,02
						FT	2,17774	19,00	0,41
						FF	0,17899	19,00	0,03
						FFT	0,50714	19,00	0,10
						Total	2,98320	76,00	0,57
40	41	2	0006	138	19	3F	0,11933	19,00	0,02
						FT	2,17774	19,00	0,41
						FF	0,17899	19,00	0,03
						FFT	0,50714	19,00	0,10
						Total	2,98320	76,00	0,57
40	48	1	0008	138	38	3F	0,11933	38,00	0,05
						FT	2,17774	38,00	0,83
						FF	0,17899	38,00	0,07
						FFT	0,50714	38,00	0,19
						Total	2,98320	152,00	1,13
40	138	1	0007	138	45	3F	0,11933	45,00	0,05
						FT	2,17774	45,00	0,98
						FF	0,17899	45,00	0,08
						FFT	0,50714	45,00	0,23
						Total	2,98320	180,00	1,34
48	69	1	0009	138	85	3F	0,11933	85,00	0,10
						FT	2,17774	85,00	1,85
						FF	0,17899	85,00	0,15
						FFT	0,50714	85,00	0,43
						Total	2,98320	340,00	2,54
68	69	1	0010	138	66	3F	0,11933	66,00	0,08
						FT	2,17774	42,90	0,93
						FF	0,17899	66,00	0,12
						FFT	0,50714	66,00	0,33
						Total	2,98320	240,90	1,47
68	75	1	0011	138	50	3F	0,11933	50,00	0,06
						FT	2,17774	11,50	0,25
						FF	0,17899	50,00	0,09
						FFT	0,50714	50,00	0,25
						Total	2,98320	161,50	0,65
68	75	2	0011	138	50	3F	0,11933	50,00	0,06
						FT	2,17774	11,50	0,25
						FF	0,17899	50,00	0,09
						FFT	0,50714	50,00	0,25
						Total	2,98320	161,50	0,65

Exemplos de Aplicação - Resultados e Discussões

68	94	1	0012	138	55	3F	0,11933	55,00	0,07
						FT	2,17774	55,00	1,20
						FF	0,17899	55,00	0,10
						FFT	0,50714	55,00	0,28
						Total	2,98320	220,00	1,64
68	94	2	0012	138	55	3F	0,11933	55,00	0,07
						FT	2,17774	55,00	1,20
						FF	0,17899	55,00	0,10
						FFT	0,50714	55,00	0,28
						Total	2,98320	220,00	1,64
68	113	1	0013	138	34	3F	0,11933	34,00	0,04
						FT	2,17774	14,28	0,31
						FF	0,17899	34,00	0,06
						FFT	0,50714	34,00	0,17
						Total	2,98320	116,28	0,58
68	113	2	0013	138	34	3F	0,11933	34,00	0,04
						FT	2,17774	14,28	0,31
						FF	0,17899	34,00	0,06
						FFT	0,50714	34,00	0,17
						Total	2,98320	116,28	0,58
68	180	1	0014	138	30	3F	0,11933	30,00	0,04
						FT	2,17774	22,20	0,48
						FF	0,17899	30,00	0,05
						FFT	0,50714	30,00	0,15
						Total	2,98320	112,20	0,73
69	180	1	0015	138	36	3F	0,11933	36,00	0,04
						FT	2,17774	23,04	0,50
						FF	0,17899	36,00	0,06
						FFT	0,50714	36,00	0,18
						Total	2,98320	131,04	0,79
69	609	1	0016	138	66	3F	0,11933	66,00	0,08
						FT	2,17774	13,86	0,30
						FF	0,17899	66,00	0,12
						FFT	0,50714	66,00	0,33
						Total	2,98320	211,86	0,83
74	76	1	0025	230	65	3F	0,02517	54,60	0,01
						FT	1,34248	0,00	0,00
						FF	0,02517	53,95	0,01
						FFT	0,28528	53,30	0,15
						Total	1,67810	161,85	0,18
75	77	1	0017	138	90	3F	0,11933	90,00	0,11
						FT	2,17774	0,00	0,00
						FF	0,17899	90,00	0,16
						FFT	0,50714	90,00	0,46
						Total	2,98320	270,00	0,72

Exemplos de Aplicação - Resultados e Discussões

76	129	1	0026	230	60	3F	0,02517	60,00	0,02
						FT	1,34248	0,00	0,00
						FF	0,02517	60,00	0,02
						FFT	0,28528	60,00	0,17
						Total	1,67810	180,00	0,20
77	609	1	0018	138	49	3F	0,11933	49,00	0,06
						FT	2,17774	0,00	0,00
						FF	0,17899	49,00	0,09
						FFT	0,50714	49,00	0,25
						Total	2,98320	147,00	0,39
94	95	1	0019	138	8	3F	0,11933	8,00	0,01
						FT	2,17774	8,00	0,17
						FF	0,17899	8,00	0,01
						FFT	0,50714	8,00	0,04
						Total	2,98320	32,00	0,24
94	95	2	0019	138	8	3F	0,11933	8,00	0,01
						FT	2,17774	8,00	0,17
						FF	0,17899	8,00	0,01
						FFT	0,50714	8,00	0,04
						Total	2,98320	32,00	0,24
94	126	1	0020	138	4	3F	0,11933	4,00	0,00
						FT	2,17774	4,00	0,09
						FF	0,17899	4,00	0,01
						FFT	0,50714	4,00	0,02
						Total	2,98320	16,00	0,12
94	126	2	0020	138	4	3F	0,11933	4,00	0,00
						FT	2,17774	4,00	0,09
						FF	0,17899	4,00	0,01
						FFT	0,50714	4,00	0,02
						Total	2,98320	16,00	0,12
94	126	3	0020	138	4	3F	0,11933	4,00	0,00
						FT	2,17774	4,00	0,09
						FF	0,17899	4,00	0,01
						FFT	0,50714	4,00	0,02
						Total	2,98320	16,00	0,12
94	126	4	0020	138	4	3F	0,11933	4,00	0,00
						FT	2,17774	4,00	0,09
						FF	0,17899	4,00	0,01
						FFT	0,50714	4,00	0,02
						Total	2,98320	16,00	0,12
110	126	1	0022	138	24	3F	0,11933	24,00	0,03
						FT	2,17774	24,00	0,52
						FF	0,17899	24,00	0,04
						FFT	0,50714	24,00	0,12
						Total	2,98320	96,00	0,72



Exemplos de Aplicação - Resultados e Discussões

111	126	1	0021	138	24	3F	0,11933	24,00	0,03
						FT	2,17774	24,00	0,52
						FF	0,17899	24,00	0,04
						FFT	0,50714	24,00	0,12
						Total	2,98320	96,00	0,72
119	126	1	0023	138	12	3F	0,11933	12,00	0,01
						FT	2,17774	12,00	0,26
						FF	0,17899	12,00	0,02
						FFT	0,50714	12,00	0,06
						Total	2,98320	48,00	0,36
119	126	2	0023	138	12	3F	0,11933	12,00	0,01
						FT	2,17774	12,00	0,26
						FF	0,17899	12,00	0,02
						FFT	0,50714	12,00	0,06
						Total	2,98320	48,00	0,36
122	124	1	0024	345	224	3F	0,02306	224,00	0,05
						FT	2,09828	224,00	4,70
						FF	0,02306	224,00	0,05
						FFT	0,16141	224,00	0,36
						Total	2,30580	896,00	5,16
122	124	2	0024	345	224	3F	0,02306	224,00	0,05
						FT	2,09828	224,00	4,70
						FF	0,02306	224,00	0,05
						FFT	0,16141	224,00	0,36
						Total	2,30580	896,00	5,16
TOTAL	GERAL				1946	3F		1935,60	1,77
					1946	FT		1469,56	31,65
					1946	FF		1934,95	2,59
					1946	FFT		1934,30	8,01
		39	ramos	7784	Total			7274,41	44,02

A Figura 4-15 mostra gráficos das freqüências acumuladas e das freqüências para cada intervalo de tensão, conforme os valores da Tabela 4-10.

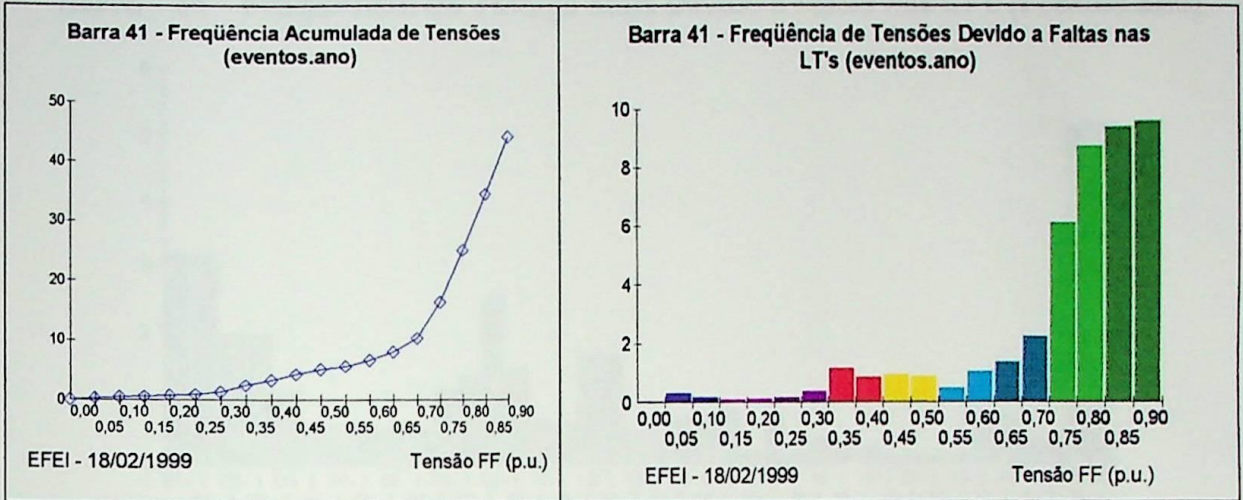


Figura 4-15 Freqüência de tensões fase-fase no consumidor 41 para faltas aplicadas ao longo das linhas do sistema

TABELA 4-10
FREQÜÊNCIA DE DEPRESSÕES DE TENSÃO NA BARRA 41

Intervalo de Tensão (p.u.)	Freqüência de Eventos por ano	
	No Intervalo	Acumulada
0,00 - 0,00	0,02	0,02
0,00 - 0,05	0,30	0,32
0,05 - 0,10	0,18	0,50
0,10 - 0,15	0,11	0,61
0,15 - 0,20	0,14	0,75
0,20 - 0,25	0,18	0,93
0,25 - 0,30	0,39	1,32
0,30 - 0,35	1,15	2,47
0,35 - 0,40	0,85	3,32
0,40 - 0,45	0,95	4,27
0,45 - 0,50	0,88	5,15
0,50 - 0,55	0,48	5,63
0,55 - 0,60	1,03	6,66
0,60 - 0,65	1,37	8,03
0,65 - 0,70	2,22	10,25
0,70 - 0,75	6,09	16,35
0,75 - 0,80	8,72	25,07
0,80 - 0,85	9,38	34,44
0,85 - 0,90	9,57	44,02

A Figura 4-16 mostra um gráfico com as freqüências de depressões de tensão para cada uma das linhas do sistema, de acordo com a Tabela 4-11.

Barra 41 - Freqüência de Voltage Sags Devido a Falhas nas LT's (eventos.ano)

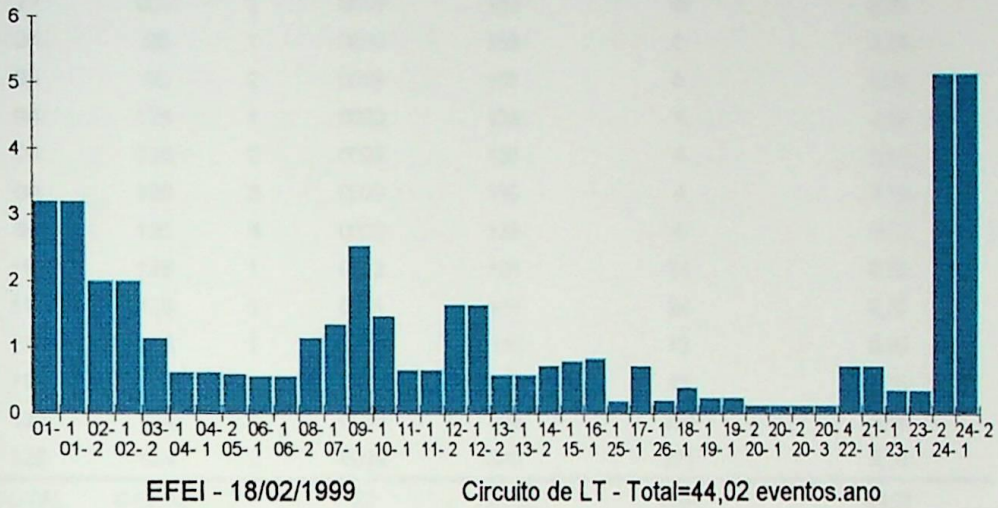


Figura 4-16 Freqüência de tensões fase-fase até 0,90 (p.u.) no consumidor 41 para faltas aplicadas ao longo das linhas do sistema

TABELA 4-11
**FREQÜÊNCIA DE DEPRESSÕES DE TENSÃO NA BARRA 41
 PARA CADA LINHA DO SISTEMA**

De	Para	C	Código Linha	Tensão (kV)	Extensão (km)	Freqüência Eventos.ano
1	2	1	0001	138	107	3,19
1	2	2	0001	138	107	3,19
2	40	1	0002	138	67	2,00
2	40	2	0002	138	67	2,00
36	48	1	0003	138	38	1,13
36	94	1	0004	138	21	0,63
36	94	2	0004	138	21	0,63
36	138	1	0005	138	20	0,60
40	41	1	0006	138	19	0,57
40	41	2	0006	138	19	0,57
40	48	1	0008	138	38	1,13
40	138	1	0007	138	45	1,34
48	69	1	0009	138	85	2,54
68	69	1	0010	138	66	1,47
68	75	1	0011	138	50	0,65
68	75	2	0011	138	50	0,65
68	94	1	0012	138	55	1,64
68	94	2	0012	138	55	1,64
68	113	1	0013	138	34	0,58
68	113	2	0013	138	34	0,58

Exemplos de Aplicação - Resultados e Discussões

68	180	1	0014	138	30	0,73
69	180	1	0015	138	36	0,79
69	609	1	0016	138	66	0,83
74	76	1	0025	230	65	0,18
75	77	1	0017	138	90	0,72
76	129	1	0026	230	60	0,20
77	609	1	0018	138	49	0,39
94	95	1	0019	138	8	0,24
94	95	2	0019	138	8	0,24
94	126	1	0020	138	4	0,12
94	126	2	0020	138	4	0,12
94	126	3	0020	138	4	0,12
94	126	4	0020	138	4	0,12
110	126	1	0022	138	24	0,72
111	126	1	0021	138	24	0,72
119	126	1	0023	138	12	0,36
119	126	2	0023	138	12	0,36
122	124	1	0024	345	224	5,16
122	124	2	0024	345	224	5,16
TOTAL GERAL			39	ramos	7784	44,02

A Figura 4-17 mostra gráficos das freqüências de depressões de tensão por tipo de falta aplicado nas linhas do sistema, de acordo com a Tabela 4-12.

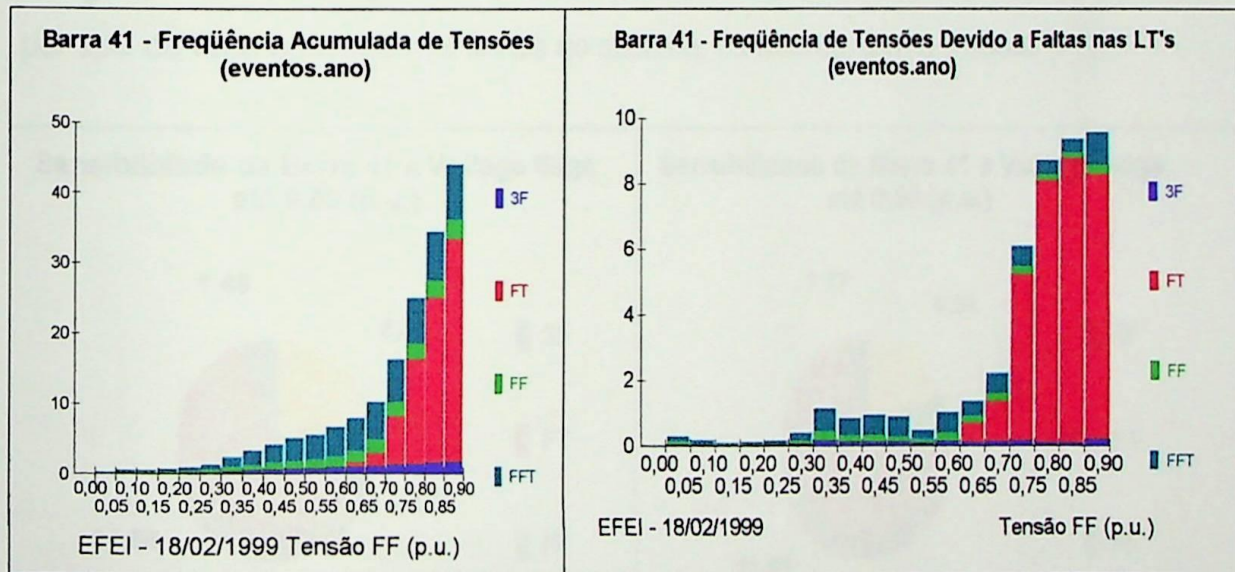


Figura 4-17 Freqüência de tensões fase-fase no consumidor 41 por tipo de falta aplicado nas linhas do sistema

TABELA 4-12

FREQUÊNCIA DE DEPRESSÕES DE TENSÃO NA BARRA 41 POR TIPO DE FALTA

Intervalo	3F	FT	FF	FFT	Total	3F	FT	FF	FFT	Acumulado
0,00 - 0,00	0,003	0,000	0,005	0,015	0,02	0,003	0,000	0,005	0,015	0,02
0,00 - 0,05	0,044	0,000	0,067	0,188	0,30	0,048	0,000	0,072	0,203	0,32
0,05 - 0,10	0,027	0,000	0,040	0,114	0,18	0,075	0,000	0,112	0,317	0,50
0,10 - 0,15	0,016	0,000	0,024	0,069	0,11	0,091	0,000	0,136	0,386	0,61
0,15 - 0,20	0,020	0,000	0,031	0,087	0,14	0,111	0,000	0,167	0,472	0,75
0,20 - 0,25	0,026	0,000	0,039	0,111	0,18	0,137	0,000	0,206	0,583	0,93
0,25 - 0,30	0,058	0,000	0,088	0,247	0,39	0,195	0,000	0,294	0,831	1,32
0,30 - 0,35	0,168	0,000	0,249	0,730	1,15	0,364	0,000	0,543	1,561	2,47
0,35 - 0,40	0,121	0,000	0,174	0,556	0,85	0,485	0,000	0,717	2,117	3,32
0,40 - 0,45	0,132	0,000	0,187	0,628	0,95	0,617	0,000	0,903	2,745	4,27
0,45 - 0,50	0,111	0,000	0,137	0,634	0,88	0,728	0,000	1,041	3,379	5,15
0,50 - 0,55	0,071	0,000	0,107	0,302	0,48	0,799	0,000	1,148	3,682	5,63
0,55 - 0,60	0,151	0,000	0,227	0,653	1,03	0,951	0,000	1,374	4,335	6,66
0,60 - 0,65	0,119	0,580	0,178	0,494	1,37	1,069	0,580	1,552	4,829	8,03
0,65 - 0,70	0,151	1,203	0,226	0,641	2,22	1,220	1,783	1,779	5,470	10,25
0,70 - 0,75	0,153	5,085	0,218	0,640	6,09	1,373	6,867	1,997	6,109	16,35
0,75 - 0,80	0,104	7,997	0,167	0,451	8,72	1,477	14,864	2,164	6,561	25,07
0,80 - 0,85	0,098	8,690	0,145	0,443	9,38	1,575	23,554	2,309	7,004	34,44
0,85 - 0,90	0,195	8,093	0,280	1,005	9,57	1,771	31,647	2,590	8,009	44,02

A Figura 4-18 mostra gráficos setoriais com as frequências de depressões de tensão por tipo de falta aplicado nas linhas do sistema, de acordo com a Tabela 4-12.

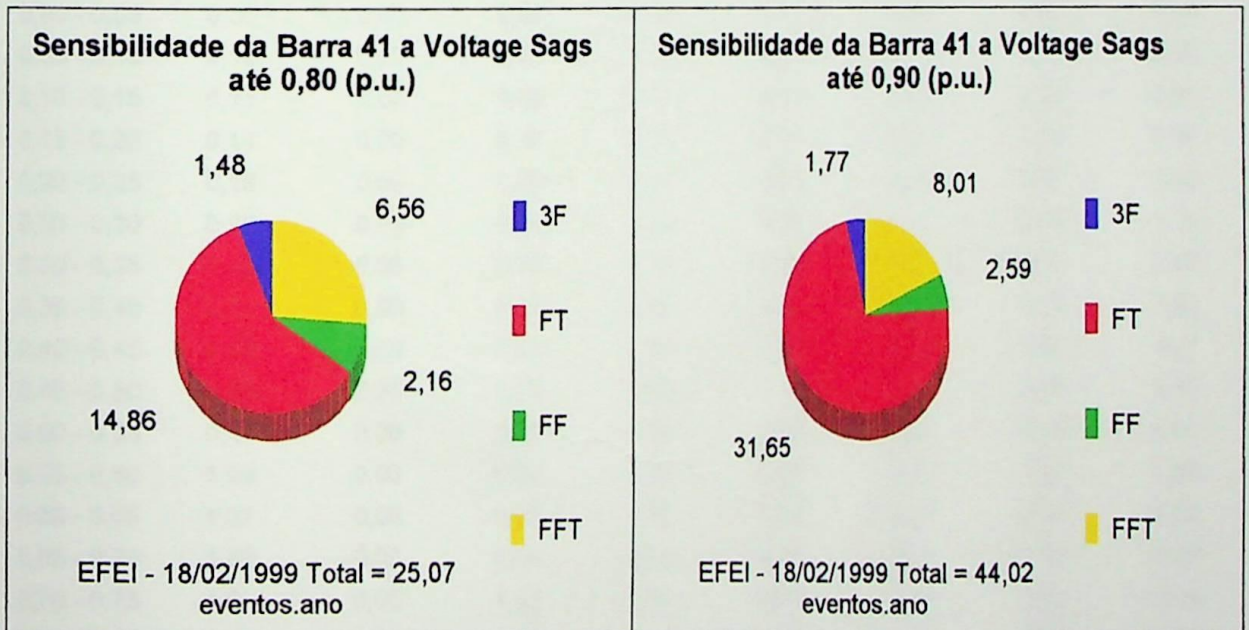


Figura 4-18 Frequência até um determinado limite de tensões fase-fase no consumidor 41 por tipo de falta aplicada no sistema

A Figura 4-19 mostra gráficos das freqüências de depressões de tensão por classe de tensão das linhas do sistema, de acordo com a Tabela 4-13.

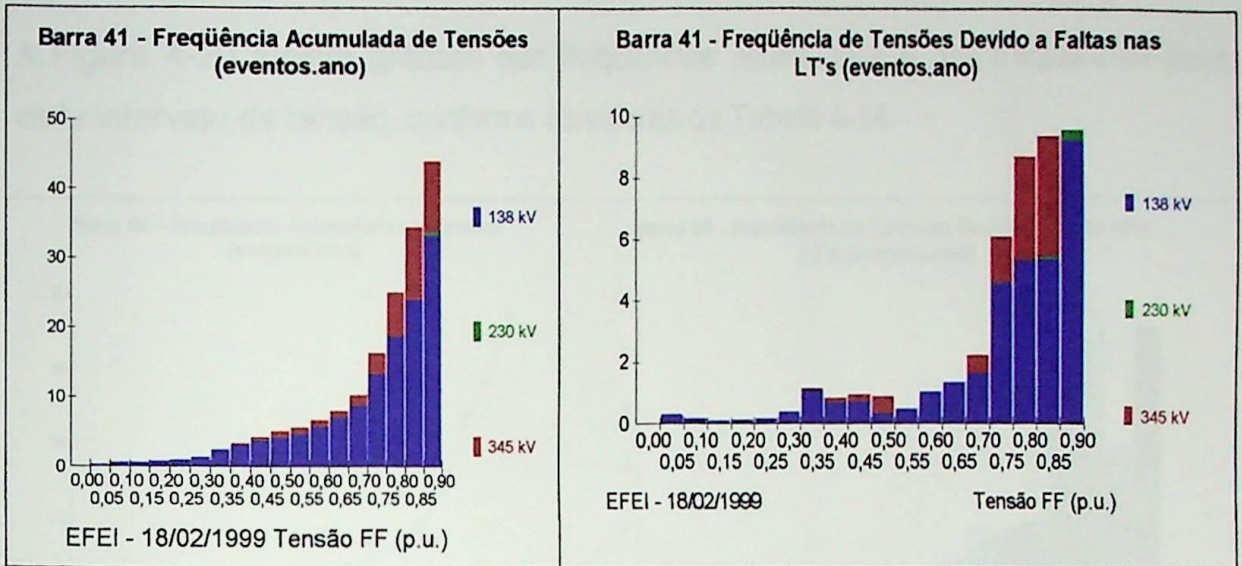


Figura 4-19 Freqüência de tensões fase-fase no consumidor 41 por classe de tensão das linhas do sistema

TABELA 4-13
**FREQÜÊNCIA DE DEPRESSÕES DE TENSÃO NA BARRA 41
 POR CLASSE DE TENSÃO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO**

Intervalo	138	230	345	Total	138	230	345	Acumulado
0,00 - 0,00	0,02	0,00	0,00	0,02	0,02	0,00	0,00	0,02
0,00 - 0,05	0,30	0,00	0,00	0,30	0,32	0,00	0,00	0,32
0,05 - 0,10	0,18	0,00	0,00	0,18	0,50	0,00	0,00	0,50
0,10 - 0,15	0,11	0,00	0,00	0,11	0,61	0,00	0,00	0,61
0,15 - 0,20	0,14	0,00	0,00	0,14	0,75	0,00	0,00	0,75
0,20 - 0,25	0,18	0,00	0,00	0,18	0,93	0,00	0,00	0,93
0,25 - 0,30	0,39	0,00	0,00	0,39	1,32	0,00	0,00	1,32
0,30 - 0,35	1,10	0,00	0,05	1,15	2,42	0,00	0,05	2,47
0,35 - 0,40	0,71	0,00	0,14	0,85	3,13	0,00	0,19	3,32
0,40 - 0,45	0,73	0,00	0,21	0,95	3,87	0,00	0,40	4,27
0,45 - 0,50	0,35	0,00	0,53	0,88	4,22	0,00	0,93	5,15
0,50 - 0,55	0,48	0,00	0,00	0,48	4,70	0,00	0,93	5,63
0,55 - 0,60	1,03	0,00	0,00	1,03	5,73	0,00	0,93	6,66
0,60 - 0,65	1,37	0,00	0,00	1,37	7,10	0,00	0,93	8,03
0,65 - 0,70	1,66	0,00	0,56	2,22	8,76	0,00	1,49	10,25
0,70 - 0,75	4,59	0,00	1,50	6,09	13,35	0,00	3,00	16,35
0,75 - 0,80	5,34	0,00	3,38	8,72	18,68	0,00	6,38	25,07
0,80 - 0,85	5,37	0,05	3,95	9,38	24,06	0,05	10,33	34,44
0,85 - 0,90	9,25	0,33	0,00	9,57	33,31	0,38	10,33	44,02

4.3.2 Análise de Depressões de Tensão na Barra 95

Critério: Tensão fase-fase - valor mínimo entre as 3 fases

A Figura 4-20 mostra gráficos das freqüências acumuladas e das freqüências para cada intervalo de tensão, conforme os valores da Tabela 4-14.

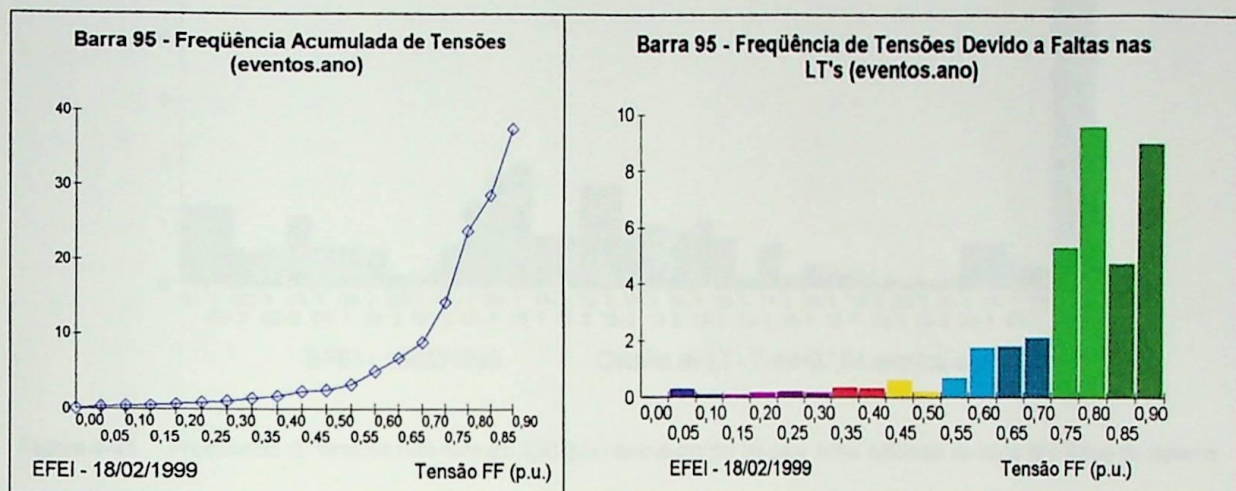


Figura 4-20 Freqüência de tensões fase-fase no consumidor 95 para faltas aplicadas ao longo das linhas do sistema

TABELA 4-14

FREQÜÊNCIA DE DEPRESSÕES DE TENSÃO NA BARRA 95

Intervalo de Tensão (p.u.)	Freqüência de Eventos por ano	
	No Intervalo	Acumulada
0,00 - 0,00	0,02	0,02
0,00 - 0,05	0,29	0,31
0,05 - 0,10	0,09	0,40
0,10 - 0,15	0,10	0,49
0,15 - 0,20	0,16	0,65
0,20 - 0,25	0,23	0,89
0,25 - 0,30	0,17	1,06
0,30 - 0,35	0,35	1,41
0,35 - 0,40	0,33	1,73
0,40 - 0,45	0,62	2,35
0,45 - 0,50	0,20	2,55
0,50 - 0,55	0,69	3,24
0,55 - 0,60	1,77	5,01
0,60 - 0,65	1,81	6,82
0,65 - 0,70	2,13	8,95
0,70 - 0,75	5,29	14,23
0,75 - 0,80	9,58	23,82
0,80 - 0,85	4,75	28,56
0,85 - 0,90	8,98	37,54

A Figura 4-21 mostra um gráfico com as freqüências de depressões de tensão para cada uma das linhas do sistema.

Barra 95 - Freqüência de Voltage Sags Devido a Faltas nas LT's (eventos.ano)

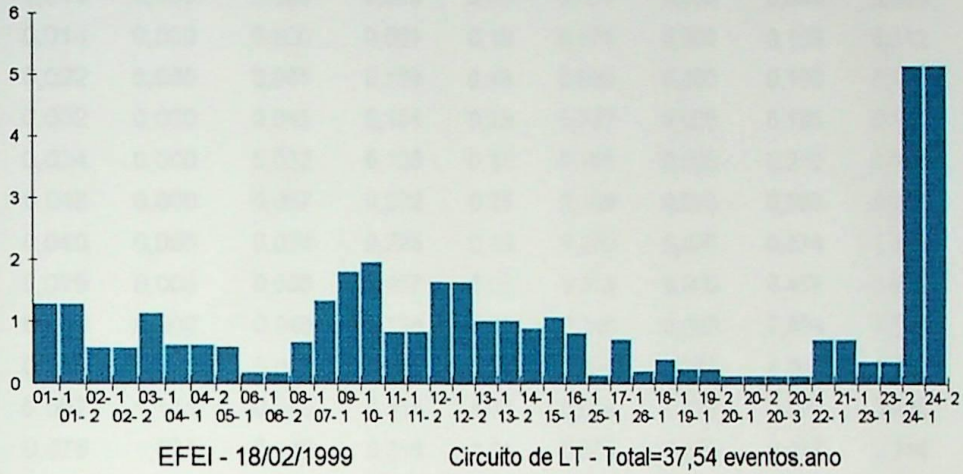


Figura 4-21 Freqüência de tensões fase-fase até 0,90 (p.u.) no consumidor 95 para faltas aplicadas ao longo das linhas do sistema

A Figura 4-22 mostra gráficos das freqüências de depressões de tensão por tipo de falta aplicado nas linhas do sistema, de acordo com a Tabela 4-15.

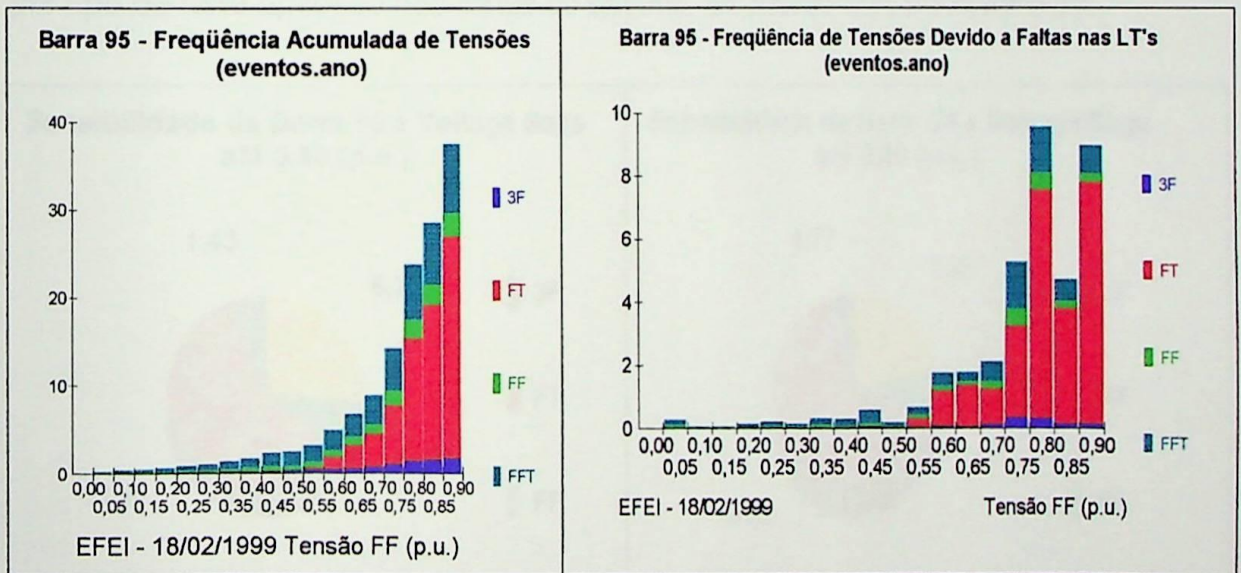


Figura 4-22 Freqüência de tensões fase-fase no consumidor 95 por tipo de falta aplicado nas linhas do sistema

TABELA 4-15

FREQUÊNCIA DE DEPRESSÕES DE TENSÃO NA BARRA 95 POR TIPO DE FALTA

Intervalo	3F	FT	FF	FFT	Total	3F	FT	FF	FFT	Acumulado
0,00 - 0,00	0,002	0,000	0,004	0,010	0,02	0,002	0,000	0,004	0,010	0,02
0,00 - 0,05	0,044	0,000	0,065	0,185	0,29	0,046	0,000	0,069	0,195	0,31
0,05 - 0,10	0,013	0,000	0,020	0,055	0,09	0,059	0,000	0,088	0,250	0,40
0,10 - 0,15	0,014	0,000	0,020	0,061	0,10	0,073	0,000	0,108	0,312	0,49
0,15 - 0,20	0,022	0,000	0,031	0,109	0,16	0,095	0,000	0,139	0,421	0,65
0,20 - 0,25	0,032	0,000	0,045	0,154	0,23	0,127	0,000	0,185	0,575	0,89
0,25 - 0,30	0,024	0,000	0,032	0,120	0,17	0,151	0,000	0,216	0,695	1,06
0,30 - 0,35	0,048	0,000	0,067	0,232	0,35	0,199	0,000	0,283	0,927	1,41
0,35 - 0,40	0,040	0,000	0,050	0,235	0,33	0,239	0,000	0,334	1,162	1,73
0,40 - 0,45	0,075	0,000	0,086	0,457	0,62	0,314	0,000	0,419	1,619	2,35
0,45 - 0,50	0,030	0,000	0,045	0,126	0,20	0,344	0,000	0,464	1,745	2,55
0,50 - 0,55	0,064	0,262	0,096	0,269	0,69	0,408	0,262	0,560	2,014	3,24
0,55 - 0,60	0,097	1,111	0,145	0,414	1,77	0,504	1,373	0,705	2,428	5,01
0,60 - 0,65	0,075	1,301	0,112	0,318	1,81	0,579	2,675	0,817	2,746	6,82
0,65 - 0,70	0,149	1,125	0,222	0,634	2,13	0,728	3,800	1,039	3,380	8,95
0,70 - 0,75	0,351	2,915	0,528	1,493	5,29	1,079	6,715	1,566	4,873	14,23
0,75 - 0,80	0,348	7,228	0,523	1,482	9,58	1,427	13,943	2,089	6,355	23,82
0,80 - 0,85	0,163	3,637	0,244	0,701	4,75	1,591	17,581	2,334	7,056	28,56
0,85 - 0,90	0,176	7,638	0,253	0,915	8,98	1,767	25,218	2,586	7,970	37,54

A Figura 4-23 mostra gráficos setoriais com as frequências de depressões de tensão por tipo de falta aplicado nas linhas do sistema, de acordo com a Tabela 4-15.

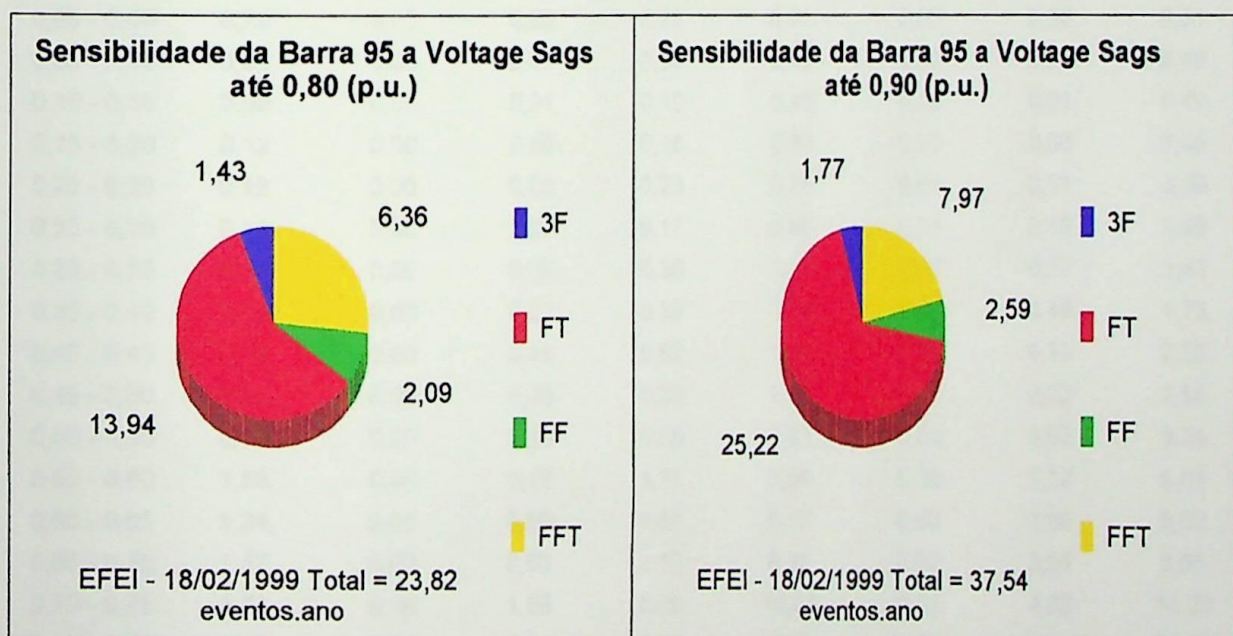


Figura 4-23 Frequência até um determinado limite de tensões fase-fase no consumidor 95 por tipo de falta aplicada no sistema



A Figura 4-24 mostra gráficos das frequências de depressões de tensão por classe de tensão das linhas do sistema, de acordo com a Tabela 4-16.

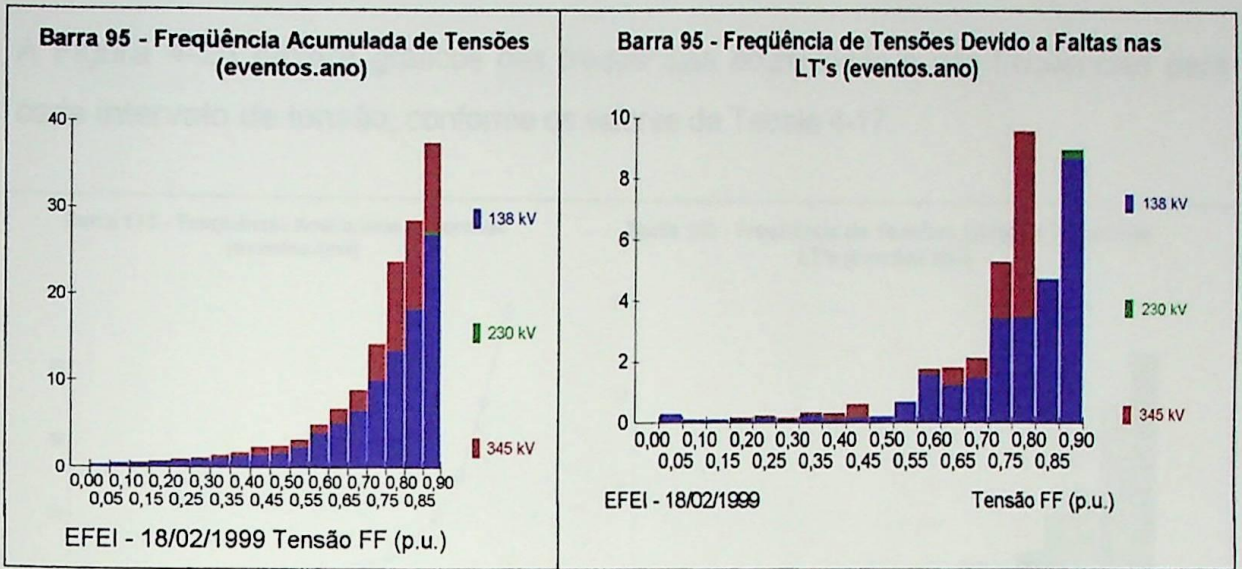


Figura 4-24 Frequência de tensões fase-fase no consumidor 95 por classe de tensão das linhas do sistema

TABELA 4-16
**FREQÜÊNCIA DE DEPRESSÕES DE TENSÃO NA BARRA 95
 POR CLASSE DE TENSÃO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO**

Intervalo	138	230	345	Total	138	230	345	Acumulado
0,00 - 0,00	0,02	0,00	0,00	0,02	0,02	0,00	0,00	0,02
0,00 - 0,05	0,29	0,00	0,00	0,29	0,31	0,00	0,00	0,31
0,05 - 0,10	0,09	0,00	0,00	0,09	0,40	0,00	0,00	0,40
0,10 - 0,15	0,09	0,00	0,01	0,10	0,48	0,00	0,01	0,49
0,15 - 0,20	0,12	0,00	0,05	0,16	0,60	0,00	0,06	0,65
0,20 - 0,25	0,18	0,00	0,06	0,23	0,78	0,00	0,11	0,89
0,25 - 0,30	0,11	0,00	0,07	0,17	0,89	0,00	0,18	1,06
0,30 - 0,35	0,25	0,00	0,09	0,35	1,14	0,00	0,27	1,41
0,35 - 0,40	0,12	0,00	0,21	0,33	1,26	0,00	0,48	1,73
0,40 - 0,45	0,16	0,00	0,45	0,62	1,42	0,00	0,93	2,35
0,45 - 0,50	0,20	0,00	0,00	0,20	1,62	0,00	0,93	2,55
0,50 - 0,55	0,69	0,00	0,00	0,69	2,31	0,00	0,93	3,24
0,55 - 0,60	1,58	0,00	0,19	1,77	3,89	0,00	1,12	5,01
0,60 - 0,65	1,24	0,00	0,56	1,81	5,13	0,00	1,68	6,82
0,65 - 0,70	1,47	0,00	0,66	2,13	6,61	0,00	2,34	8,95
0,70 - 0,75	3,41	0,00	1,88	5,29	10,01	0,00	4,22	14,23
0,75 - 0,80	3,47	0,00	6,11	9,58	13,49	0,00	10,33	23,82
0,80 - 0,85	4,72	0,02	0,00	4,75	18,21	0,02	10,33	28,56
0,85 - 0,90	8,67	0,31	0,00	8,98	26,88	0,33	10,33	37,54

4.3.3 Análise de Depressões de Tensão na Barra 113

Critério: Tensão fase-fase - valor mínimo entre as 3 fases

A Figura 4-25 mostra gráficos das freqüências acumuladas e das freqüências para cada intervalo de tensão, conforme os valores da Tabela 4-17.

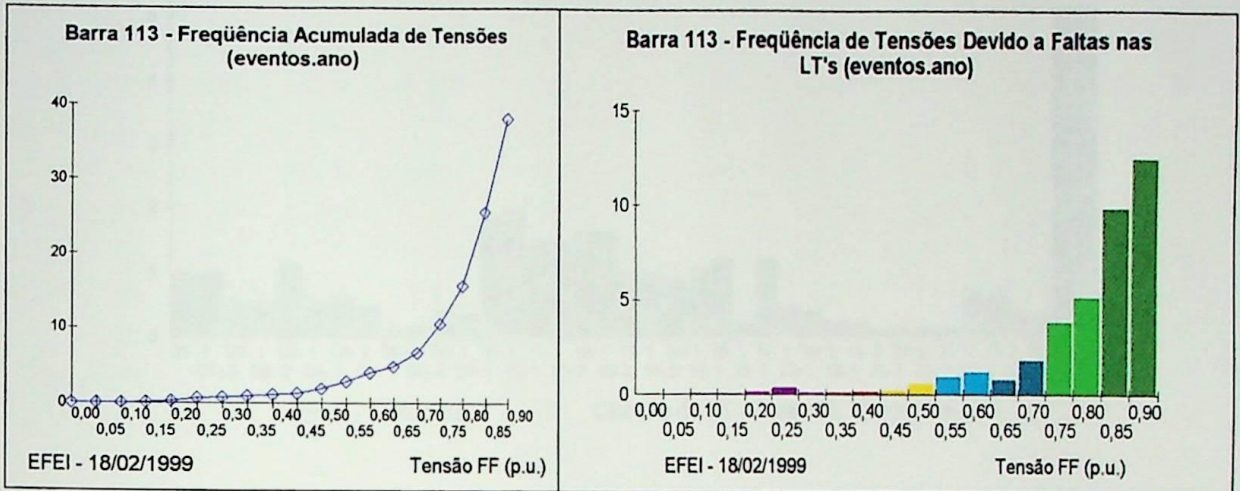


Figura 4-25 Freqüência de tensões fase-fase no consumidor 113 para faltas aplicadas ao longo das linhas do sistema

TABELA 4-17

FREQÜÊNCIA DE DEPRESSÕES DE TENSÃO NA BARRA 113

Intervalo de Tensão (p.u.)	Freqüência de Eventos por ano	
	No Intervalo	Acumulada
0,00 - 0,00	0,01	0,01
0,00 - 0,05	0,03	0,04
0,05 - 0,10	0,05	0,09
0,10 - 0,15	0,05	0,14
0,15 - 0,20	0,17	0,31
0,20 - 0,25	0,39	0,70
0,25 - 0,30	0,11	0,81
0,30 - 0,35	0,13	0,94
0,35 - 0,40	0,17	1,11
0,40 - 0,45	0,21	1,33
0,45 - 0,50	0,62	1,94
0,50 - 0,55	0,96	2,90
0,55 - 0,60	1,21	4,11
0,60 - 0,65	0,80	4,91
0,65 - 0,70	1,82	6,74
0,70 - 0,75	3,86	10,60
0,75 - 0,80	5,15	15,75
0,80 - 0,85	9,87	25,62
0,85 - 0,90	12,50	38,12

A Figura 4-26 mostra um gráfico com as freqüências de depressões de tensão para cada uma das linhas do sistema.

Barra 113 - Freqüência de Voltage Sags Devido a Faltas nas LT's (eventos.ano)

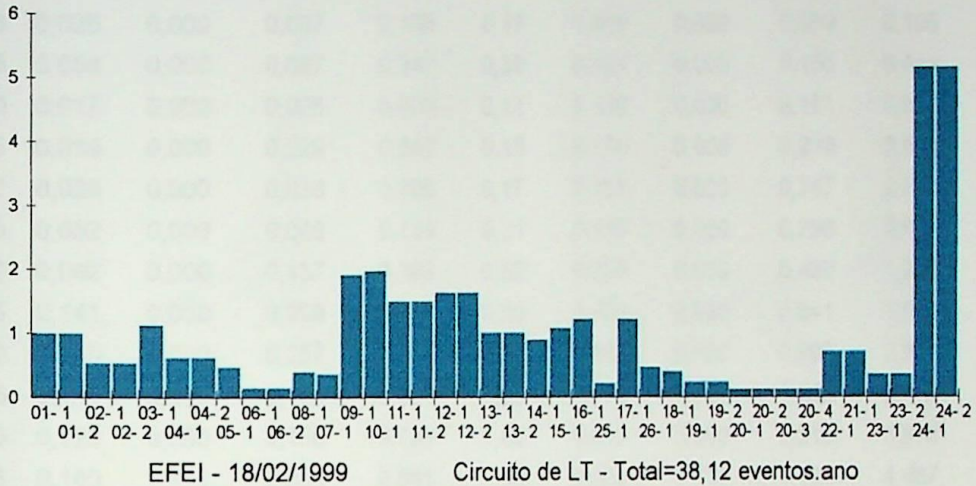


Figura 4-26 Freqüência de tensões fase-fase até 0,90 (p.u.) no consumidor 113 para faltas aplicadas ao longo das linhas do sistema

A Figura 4-27 mostra gráficos das freqüências de depressões de tensão por tipo de falta aplicado nas linhas do sistema, de acordo com a Tabela 4-18.

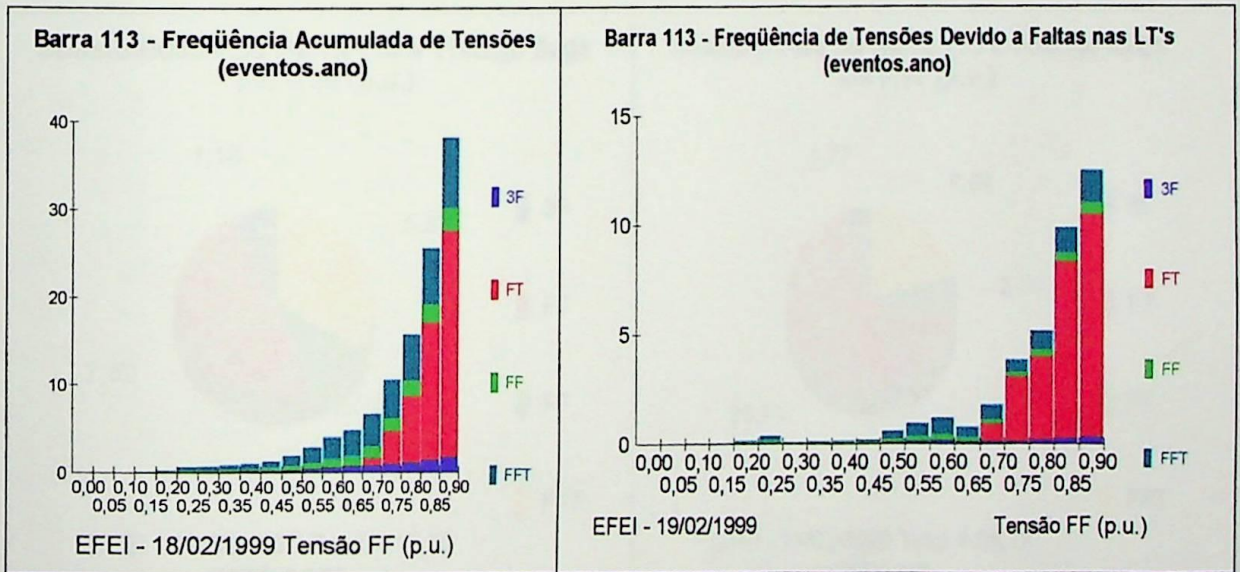


Figura 4-27 Freqüência de tensões fase-fase no consumidor 113 por tipo de falta aplicado nas linhas do sistema

TABELA 4-18

FREQUÊNCIA DE DEPRESSÕES DE TENSÃO NA BARRA 113 POR TIPO DE FALTA

Intervalo	3F	FT	FF	FFT	Total	3F	FT	FF	FFT	Acumulado
0,00 - 0,00	0,001	0,000	0,001	0,003	0,01	0,001	0,000	0,001	0,003	0,01
0,00 - 0,05	0,005	0,000	0,007	0,021	0,03	0,006	0,000	0,009	0,024	0,04
0,05 - 0,10	0,007	0,000	0,011	0,031	0,05	0,013	0,000	0,019	0,055	0,09
0,10 - 0,15	0,008	0,000	0,012	0,034	0,05	0,021	0,000	0,032	0,090	0,14
0,15 - 0,20	0,025	0,000	0,037	0,105	0,17	0,046	0,000	0,069	0,195	0,31
0,20 - 0,25	0,058	0,000	0,087	0,247	0,39	0,104	0,000	0,156	0,441	0,70
0,25 - 0,30	0,017	0,000	0,025	0,070	0,11	0,120	0,000	0,181	0,512	0,81
0,30 - 0,35	0,019	0,000	0,029	0,082	0,13	0,140	0,000	0,210	0,594	0,94
0,35 - 0,40	0,025	0,000	0,038	0,106	0,17	0,165	0,000	0,247	0,700	1,11
0,40 - 0,45	0,032	0,000	0,048	0,134	0,21	0,196	0,000	0,295	0,834	1,33
0,45 - 0,50	0,092	0,000	0,137	0,389	0,62	0,288	0,000	0,432	1,224	1,94
0,50 - 0,55	0,141	0,000	0,209	0,610	0,96	0,429	0,000	0,641	1,834	2,90
0,55 - 0,60	0,175	0,000	0,257	0,774	1,21	0,604	0,000	0,898	2,608	4,11
0,60 - 0,65	0,113	0,000	0,158	0,534	0,80	0,716	0,000	1,055	3,142	4,91
0,65 - 0,70	0,129	0,800	0,160	0,733	1,82	0,845	0,800	1,216	3,876	6,74
0,70 - 0,75	0,140	2,921	0,209	0,591	3,86	0,985	3,721	1,425	4,467	10,60
0,75 - 0,80	0,192	3,803	0,285	0,868	5,15	1,177	7,524	1,710	5,335	15,75
0,80 - 0,85	0,253	8,061	0,370	1,189	9,87	1,430	15,585	2,080	6,524	25,62
0,85 - 0,90	0,343	10,130	0,513	1,519	12,50	1,773	25,715	2,592	8,043	38,12

A Figura 4-28 mostra gráficos setoriais com as frequências de depressões de tensão por tipo de falta aplicado nas linhas do sistema, de acordo com a Tabela 4-18.

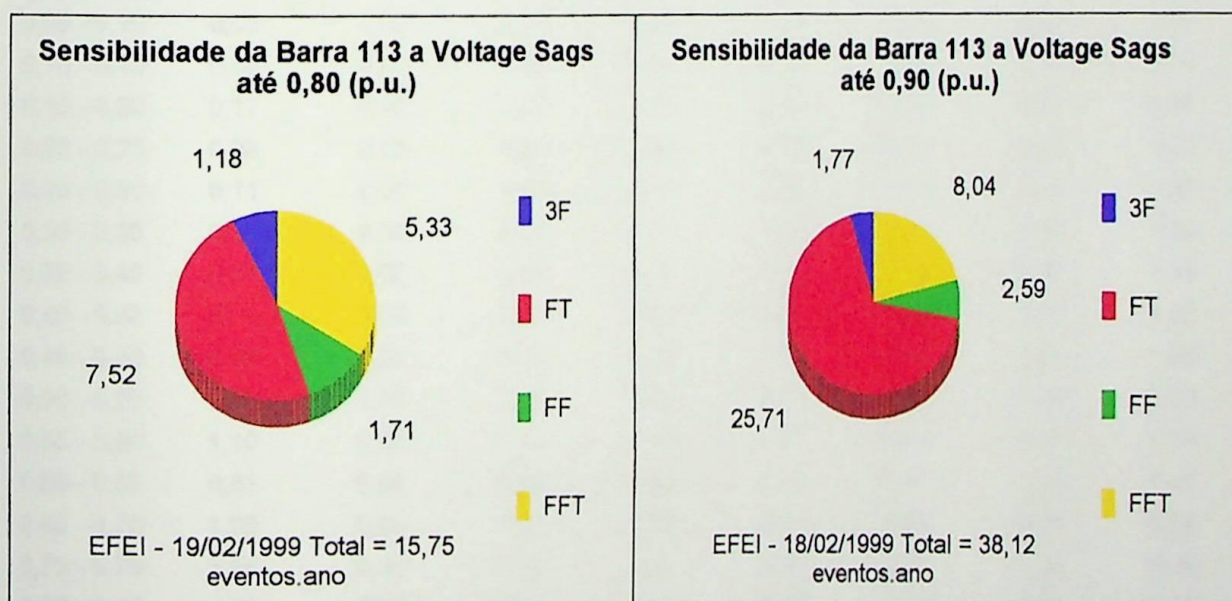


Figura 4-28 Frequência até um determinado limite de tensões fase-fase no consumidor 113 por tipo de falta aplicada no sistema

A Figura 4-29 mostra gráficos das freqüências de depressões de tensão por classe de tensão das linhas do sistema, de acordo com a Tabela 4-19.

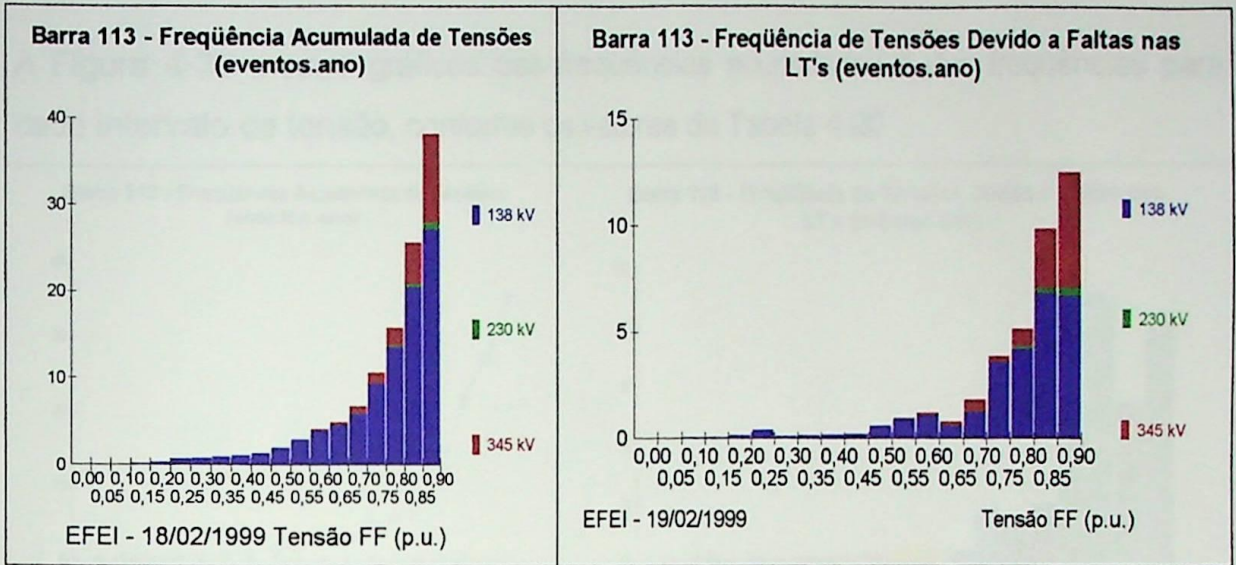


Figura 4-29 Freqüência de tensões fase-fase no consumidor 113 por classe de tensão das linhas do sistema

TABELA 4-19
**FREQÜÊNCIA DE DEPRESSÕES DE TENSÃO NA BARRA 113
 POR CLASSE DE TENSÃO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO**

Intervalo	138	230	345	Total	138	230	345	Acumulado
0,00 - 0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01
0,00 - 0,05	0,03	0,00	0,00	0,03	0,04	0,00	0,00	0,04
0,05 - 0,10	0,05	0,00	0,00	0,05	0,09	0,00	0,00	0,09
0,10 - 0,15	0,05	0,00	0,00	0,05	0,14	0,00	0,00	0,14
0,15 - 0,20	0,17	0,00	0,00	0,17	0,31	0,00	0,00	0,31
0,20 - 0,25	0,39	0,00	0,00	0,39	0,70	0,00	0,00	0,70
0,25 - 0,30	0,11	0,00	0,00	0,11	0,81	0,00	0,00	0,81
0,30 - 0,35	0,13	0,00	0,00	0,13	0,94	0,00	0,00	0,94
0,35 - 0,40	0,17	0,00	0,00	0,17	1,11	0,00	0,00	1,11
0,40 - 0,45	0,21	0,00	0,00	0,21	1,33	0,00	0,00	1,33
0,45 - 0,50	0,62	0,00	0,00	0,62	1,94	0,00	0,00	1,94
0,50 - 0,55	0,92	0,00	0,04	0,96	2,87	0,00	0,04	2,90
0,55 - 0,60	1,10	0,00	0,10	1,21	3,97	0,00	0,14	4,11
0,60 - 0,65	0,61	0,00	0,20	0,80	4,58	0,00	0,34	4,91
0,65 - 0,70	1,23	0,00	0,59	1,82	5,81	0,00	0,93	6,74
0,70 - 0,75	3,58	0,00	0,28	3,86	9,39	0,00	1,21	10,60
0,75 - 0,80	4,21	0,09	0,85	5,15	13,60	0,09	2,06	15,75
0,80 - 0,85	6,83	0,23	2,82	9,87	20,42	0,32	4,88	25,62
0,85 - 0,90	6,69	0,37	5,45	12,50	27,11	0,69	10,33	38,12

4.3.4 Análise de Depressões de Tensão na Barra 119

Critério: Tensão fase-fase - valor mínimo entre as 3 fases

A Figura 4-30 mostra gráficos das freqüências acumuladas e das freqüências para cada intervalo de tensão, conforme os valores da Tabela 4-20.

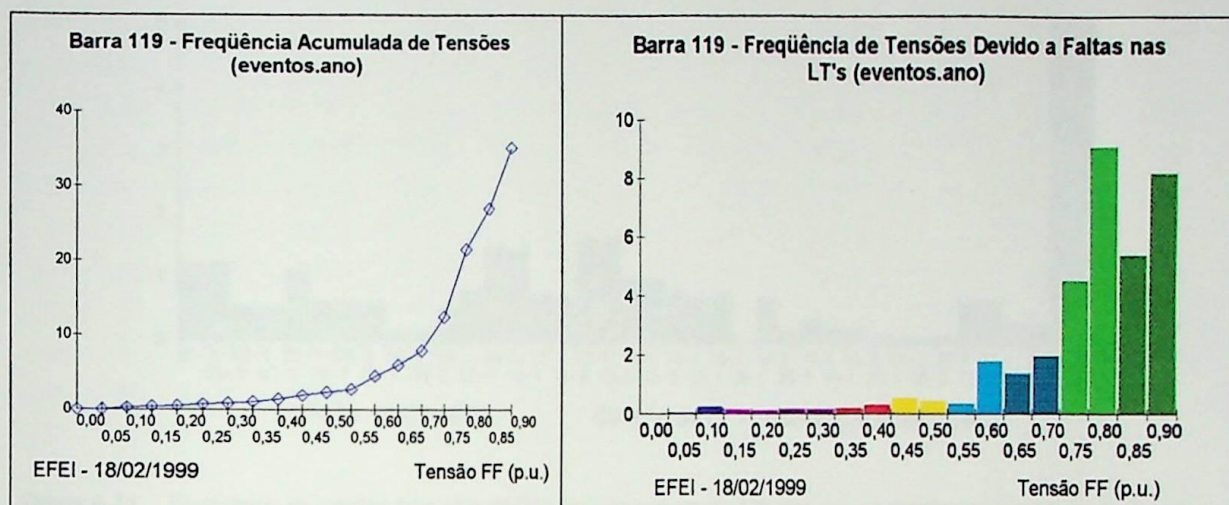


Figura 4-30 Freqüência de tensões fase-fase no consumidor 119 para faltas aplicadas ao longo das linhas do sistema

TABELA 4-20

FREQÜÊNCIA DE DEPRESSÕES DE TENSÃO NA BARRA 119

Intervalo de Tensão (p.u.)	Freqüência de Eventos por ano	
	No Intervalo	Acumulada
0,00 - 0,00	0,00	0,00
0,00 - 0,05	0,03	0,03
0,05 - 0,10	0,24	0,28
0,10 - 0,15	0,15	0,43
0,15 - 0,20	0,11	0,54
0,20 - 0,25	0,17	0,72
0,25 - 0,30	0,17	0,89
0,30 - 0,35	0,20	1,09
0,35 - 0,40	0,32	1,41
0,40 - 0,45	0,53	1,94
0,45 - 0,50	0,44	2,38
0,50 - 0,55	0,35	2,73
0,55 - 0,60	1,79	4,52
0,60 - 0,65	1,40	5,92
0,65 - 0,70	1,97	7,89
0,70 - 0,75	4,54	12,43
0,75 - 0,80	9,07	21,50
0,80 - 0,85	5,40	26,90
0,85 - 0,90	8,18	35,08

A Figura 4-31 mostra um gráfico com as freqüências de depressões de tensão para cada uma das linhas do sistema.

Barra 119 - Freqüência de Voltage Sags Devido a Faltas nas LT's (eventos.ano)

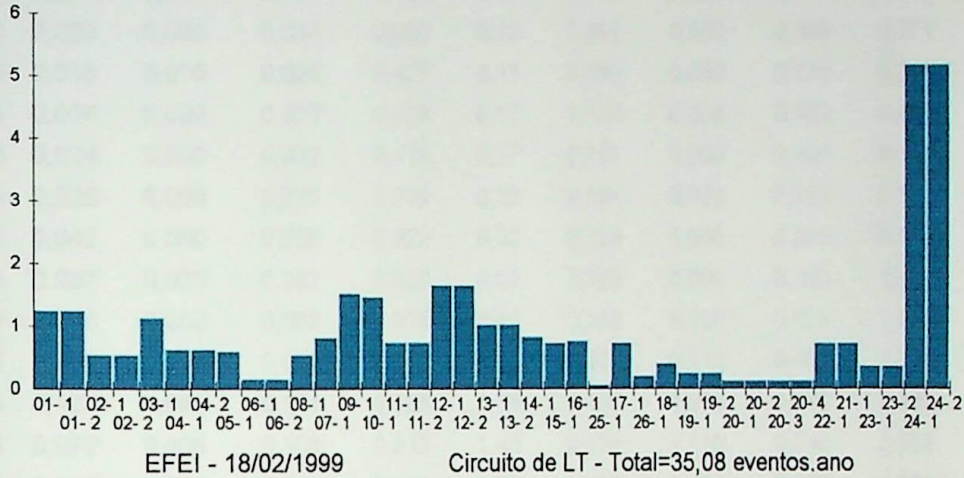


Figura 4-31 Freqüência de tensões fase-fase até 0,90 (p.u.) no consumidor 119 para faltas aplicadas ao longo das linhas do sistema

A Figura 4-32 mostra gráficos das freqüências de depressões de tensão por tipo de falta aplicado nas linhas do sistema, de acordo com a Tabela 4-21.

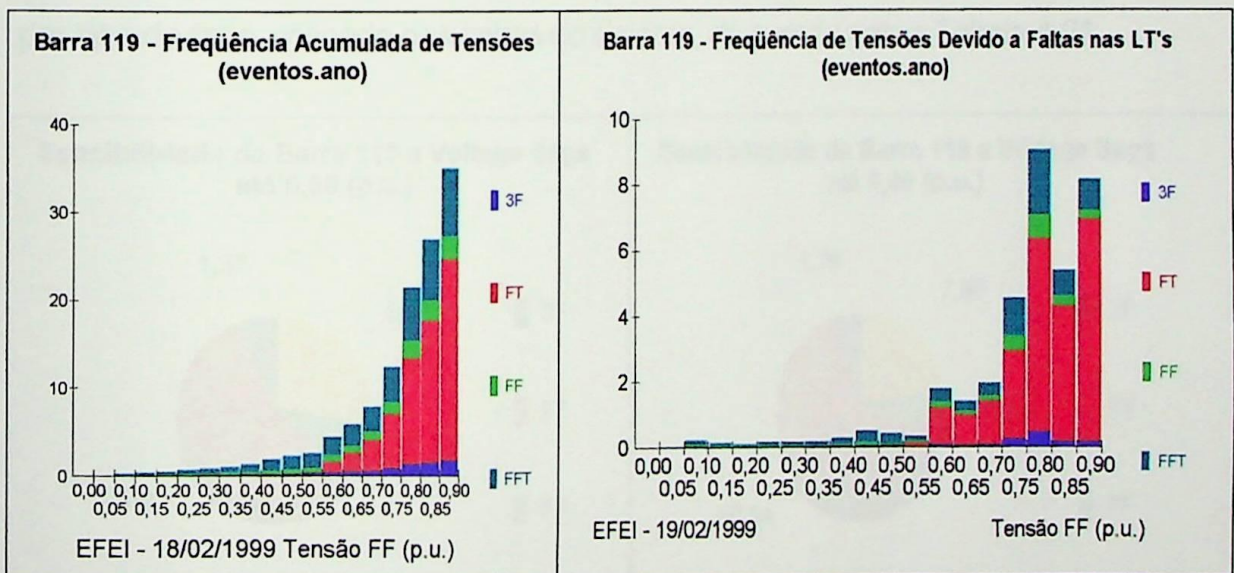


Figura 4-32 Freqüência de tensões fase-fase no consumidor 119 por tipo de falta aplicado nas linhas do sistema

TABELA 4-21
FREQÜÊNCIA DE DEPRESSÕES DE TENSÃO NA BARRA 119 POR TIPO DE FALTA

Intervalo	3F	FT	FF	FFT	Total	3F	FT	FF	FFT	Acumulado
0,00 - 0,00	0,000	0,000	0,000	0,001	0,00	0,000	0,000	0,000	0,001	0,00
0,00 - 0,05	0,005	0,000	0,007	0,021	0,03	0,005	0,000	0,008	0,022	0,03
0,05 - 0,10	0,036	0,000	0,053	0,153	0,24	0,041	0,000	0,061	0,175	0,28
0,10 - 0,15	0,023	0,000	0,034	0,096	0,15	0,064	0,000	0,095	0,271	0,43
0,15 - 0,20	0,016	0,000	0,024	0,075	0,11	0,080	0,000	0,119	0,346	0,54
0,20 - 0,25	0,024	0,000	0,033	0,118	0,17	0,104	0,000	0,152	0,464	0,72
0,25 - 0,30	0,024	0,000	0,032	0,118	0,17	0,127	0,000	0,184	0,581	0,89
0,30 - 0,35	0,026	0,000	0,035	0,135	0,20	0,154	0,000	0,219	0,717	1,09
0,35 - 0,40	0,042	0,000	0,056	0,222	0,32	0,196	0,000	0,275	0,939	1,41
0,40 - 0,45	0,067	0,000	0,082	0,380	0,53	0,263	0,000	0,358	1,319	1,94
0,45 - 0,50	0,056	0,000	0,068	0,318	0,44	0,318	0,000	0,426	1,637	2,38
0,50 - 0,55	0,035	0,112	0,053	0,149	0,35	0,353	0,112	0,478	1,786	2,73
0,55 - 0,60	0,103	1,098	0,154	0,436	1,79	0,456	1,210	0,632	2,222	4,52
0,60 - 0,65	0,072	0,906	0,108	0,310	1,40	0,528	2,116	0,740	2,532	5,92
0,65 - 0,70	0,098	1,316	0,147	0,412	1,97	0,626	3,432	0,887	2,944	7,89
0,70 - 0,75	0,277	2,673	0,413	1,176	4,54	0,903	6,105	1,300	4,120	12,43
0,75 - 0,80	0,469	5,899	0,706	1,995	9,07	1,372	12,004	2,006	6,115	21,50
0,80 - 0,85	0,194	4,096	0,292	0,823	5,40	1,566	16,099	2,298	6,938	26,90
0,85 - 0,90	0,194	6,741	0,282	0,964	8,18	1,761	22,840	2,580	7,902	35,08

A Figura 4-33 mostra gráficos setoriais com as freqüências de depressões de tensão por tipo de falta aplicado nas linhas do sistema, de acordo com a Tabela 4-21.

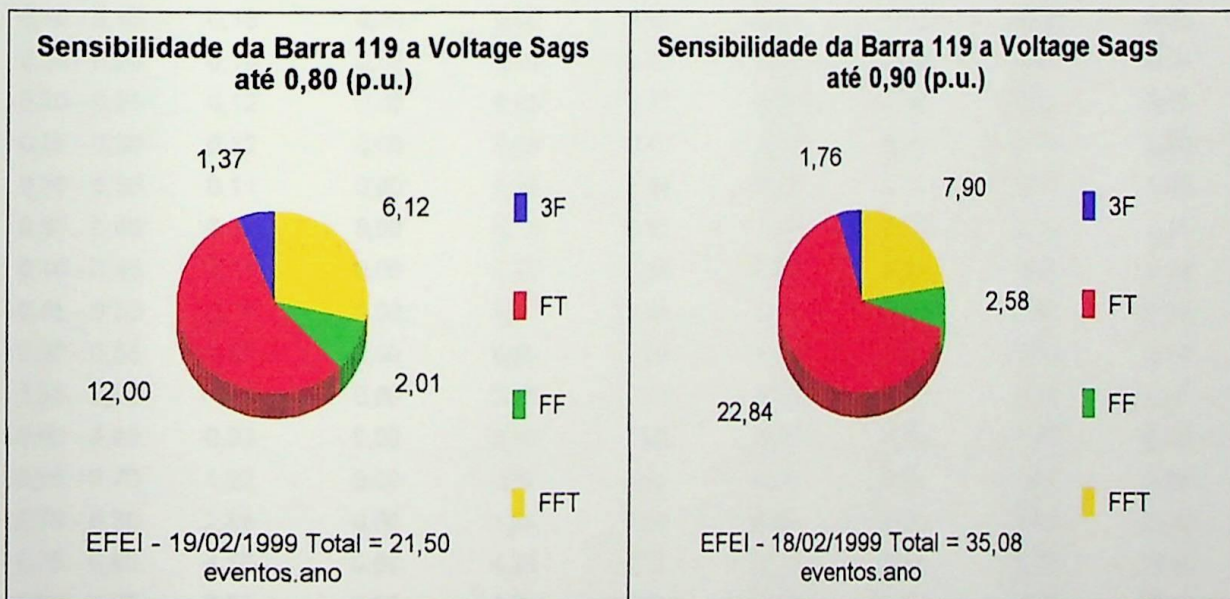


Figura 4-33 Freqüência até um determinado limite de tensões fase-fase no consumidor 119 por tipo de falta aplicada no sistema

A Figura 4-34 mostra um gráfico com as freqüências de depressões de tensão por classe de tensão das linhas do sistema, de acordo com a Tabela 4-22.

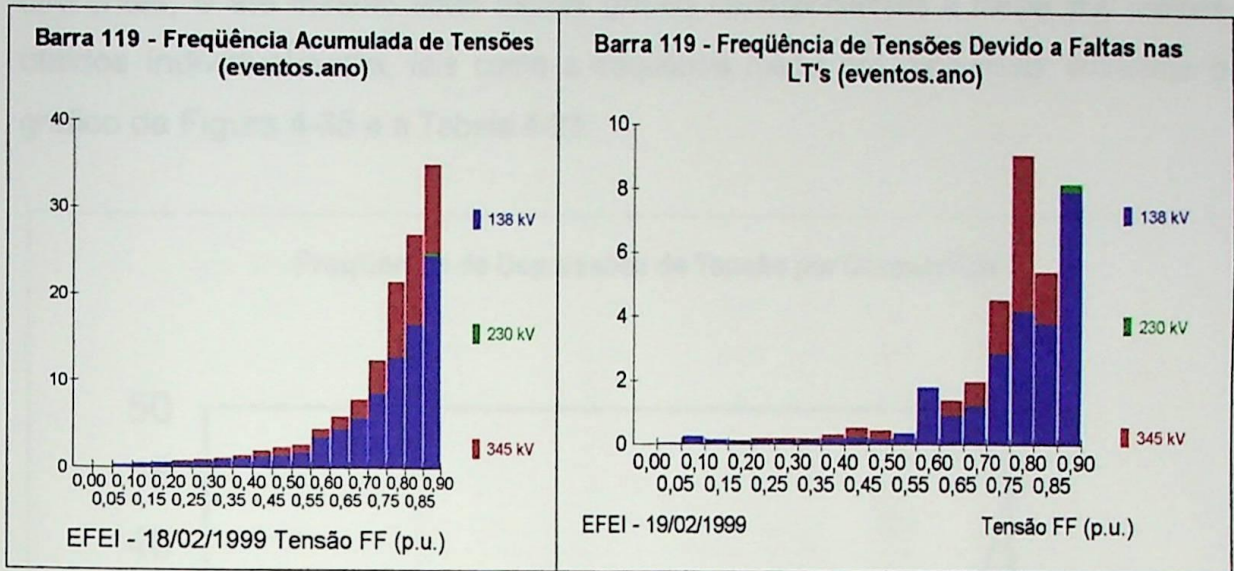


Figura 4-34 Freqüência de tensões fase-fase no consumidor 119 por classe de tensão das linhas do sistema

TABELA 4-22
FREQÜÊNCIA DE DEPRESSÕES DE TENSÃO NA BARRA 119
POR CLASSE DE TENSÃO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

Intervalo	138	230	345	Total	138	230	345	Acumulado
0,00 - 0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00 - 0,05	0,03	0,00	0,00	0,03	0,03	0,00	0,00	0,03
0,05 - 0,10	0,24	0,00	0,00	0,24	0,28	0,00	0,00	0,28
0,10 - 0,15	0,15	0,00	0,00	0,15	0,43	0,00	0,00	0,43
0,15 - 0,20	0,10	0,00	0,02	0,11	0,53	0,00	0,02	0,54
0,20 - 0,25	0,12	0,00	0,06	0,17	0,65	0,00	0,07	0,72
0,25 - 0,30	0,12	0,00	0,06	0,17	0,76	0,00	0,13	0,89
0,30 - 0,35	0,11	0,00	0,08	0,20	0,88	0,00	0,21	1,09
0,35 - 0,40	0,19	0,00	0,13	0,32	1,07	0,00	0,34	1,41
0,40 - 0,45	0,21	0,00	0,32	0,53	1,28	0,00	0,66	1,94
0,45 - 0,50	0,17	0,00	0,27	0,44	1,45	0,00	0,93	2,38
0,50 - 0,55	0,35	0,00	0,00	0,35	1,80	0,00	0,93	2,73
0,55 - 0,60	1,79	0,00	0,00	1,79	3,59	0,00	0,93	4,52
0,60 - 0,65	0,93	0,00	0,47	1,40	4,52	0,00	1,40	5,92
0,65 - 0,70	1,22	0,00	0,75	1,97	5,74	0,00	2,15	7,89
0,70 - 0,75	2,85	0,00	1,69	4,54	8,58	0,00	3,84	12,43
0,75 - 0,80	4,18	0,00	4,89	9,07	12,77	0,00	8,73	21,50
0,80 - 0,85	3,81	0,00	1,60	5,40	16,57	0,00	10,33	26,90
0,85 - 0,90	7,93	0,25	0,00	8,18	24,50	0,25	10,33	35,08

4.3.5 Análise Comparativa de Depressões de Tensão

Um outro tipo de estudo que pode ser feito é comparar índices de consumidores diferentes, e até mesmo obter índices globais correspondentes à média dos índices obtidos individualmente, tais como a frequência média por consumidor conforme o gráfico da Figura 4-35 e a Tabela 4-23.

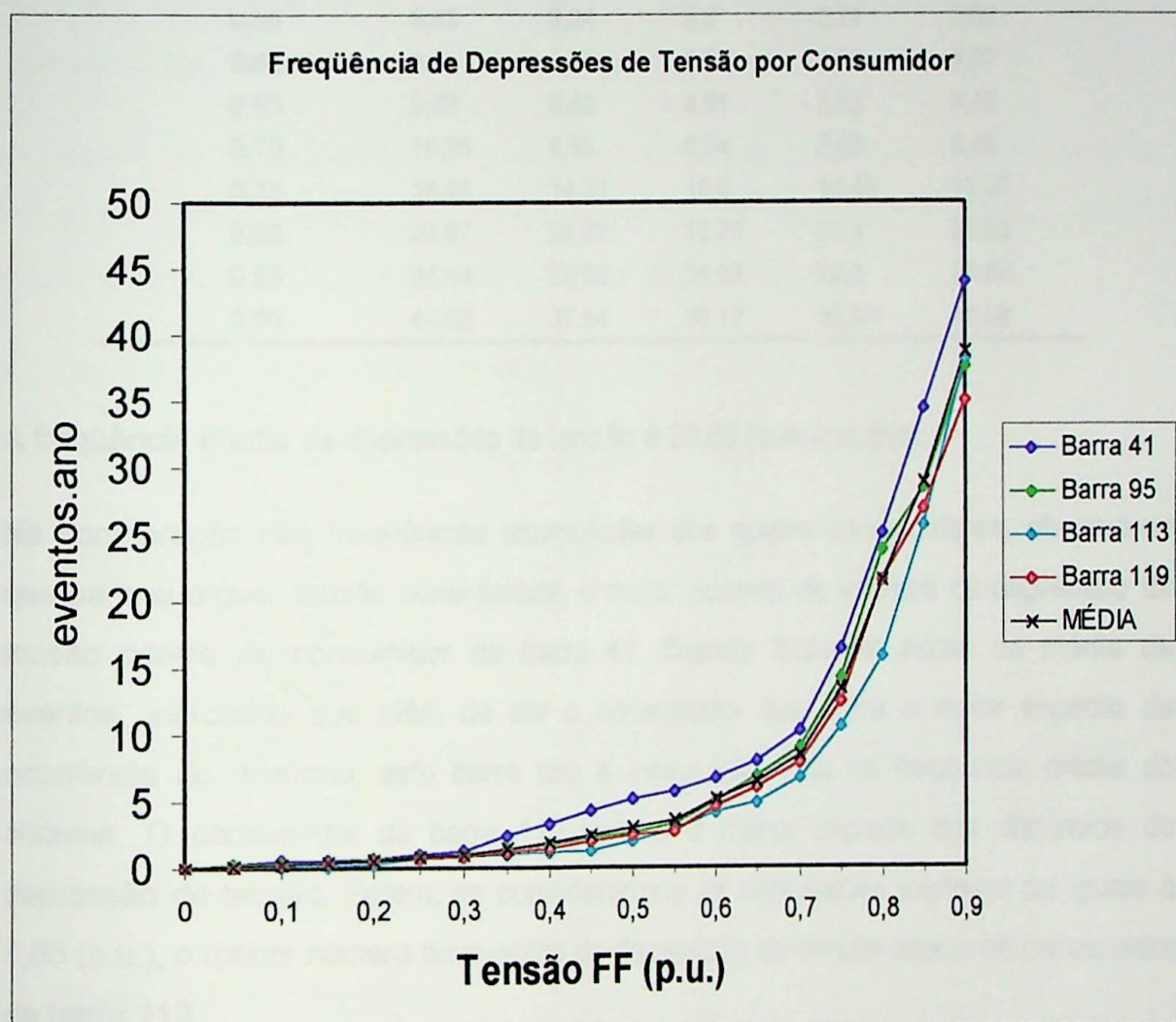


Figura 4-35 Frequência de tensões fase-fase por consumidor

TABELA 4-23

FREQÜÊNCIA DE DEPRESSÕES DE TENSÃO POR CONSUMIDOR

Depressão de Tensão (p.u.)	Consumidor				MÉDIA
	41	95	113	119	
0,00	0,02	0,02	0,01	0	0,01
0,05	0,32	0,31	0,04	0,03	0,18
0,10	0,5	0,4	0,09	0,28	0,32

Exemplos de Aplicação - Resultados e Discussões

0,15	0,61	0,49	0,14	0,43	0,42
0,20	0,75	0,65	0,31	0,54	0,56
0,25	0,93	0,89	0,7	0,72	0,81
0,30	1,32	1,06	0,81	0,89	1,02
0,35	2,47	1,41	0,94	1,09	1,47
0,40	3,32	1,73	1,11	1,41	1,89
0,45	4,27	2,35	1,33	1,94	2,47
0,50	5,15	2,55	1,94	2,38	3,00
0,55	5,63	3,24	2,9	2,73	3,62
0,60	6,66	5,01	4,11	4,52	5,07
0,65	8,03	6,82	4,91	5,92	6,42
0,70	10,25	8,95	6,74	7,89	8,45
0,75	16,35	14,23	10,6	12,43	13,40
0,80	25,07	23,82	15,75	21,5	21,53
0,85	34,44	28,56	25,62	26,9	28,88
0,90	44,02	37,54	38,12	35,08	38,69

A freqüência média de depressões de tensão é 38,69 (eventos.ano).

Na comparação das freqüências acumuladas dos quatro consumidores, observa-se que para qualquer tensão considerada, o maior número de eventos de depressão de tensão ocorre no consumidor da barra 41, ficando inclusive acima da média de eventos, indicando que além de ser o consumidor que sofre o maior impacto da ocorrência do distúrbio, esta barra tem a maior influência na freqüência média do sistema. O consumidor da barra 119 recebe o menor impacto dos distúrbios de depressão de tensão. Porém, se considerarmos as depressões menores ou iguais a 0,85 (p.u.), o menor número de eventos de depressão de tensão ocorre no consumidor da barra 113.

A análise global da curva de freqüências acumuladas é importante, porque certamente o investimento necessário para minimizar depressões de tensão até 0,90 (p.u.), será muito maior do que o valor necessário para minimizar depressões até 0,80 (p.u.), por exemplo. Além disso, a maioria dos equipamentos sensíveis tolera tensões acima de 0,80 (p.u.). A média de ocorrências até 0,80 (p.u.) (28,88 eventos.ano) corresponde a 75% da média de 38,69 (eventos.ano) referente às depressões até 0,90 (p.u.).

4.3.6 Análise de Sensibilidade de Cargas à Depressões de Tensão

A análise de sensibilidade de cargas permite a avaliação do impacto em cargas sensíveis de consumidores, dos distúrbios de depressão de tensão decorrentes de faltas ocorridas ao longo das linhas do sistema, fornecendo informações e possibilitando simulações visando contribuir para o desenvolvimento integrado de soluções que promovam a compatibilidade entre a qualidade da energia fornecida e as necessidades dos modernos processos industriais.

A análise da sensibilidade de uma carga específica conectada a um consumidor fornece a previsão da frequência anual de interrupções distribuída por linha do sistema e tipo de falta, e calcula os seguintes índices de desempenho:

- disponibilidade e indisponibilidade da carga ou processo industrial;
- frequência de ocorrências de interrupções por ano;
- custo anual de interrupção do processo do consumidor;
- demanda e energia não distribuída.

Os índices de desempenho podem ser obtidos para cada consumidor ou para o sistema como um todo considerando-se critérios para a sensibilidade da carga:

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

A sensibilidade de uma carga à depressões de tensão é definida pela magnitude da tensão mínima suportada e pela tolerância de tempo de exposição ao distúrbio.

No processo de previsão das características das depressões de tensão, para cada falta aplicada ao longo das linhas do sistema, a magnitude da depressão de tensão e a duração de cada evento são comparadas aos níveis de tolerância de magnitude e

tempo de exposição fornecidos para a carga sensível, sendo contabilizados apenas os eventos que provocarem o desligamento da carga sensível.

A duração de um evento de depressão de tensão corresponde ao tempo total despendido pelos dispositivos de proteção (relé+disjuntor) no processo de eliminação da falta ocorrida em uma das linhas do sistema. Os dados de proteção das linhas para o sistema de transmissão em estudo foram fornecidos na Tabela 4-8.

Considere uma carga sensível genérica, representada na Figura 4-36:

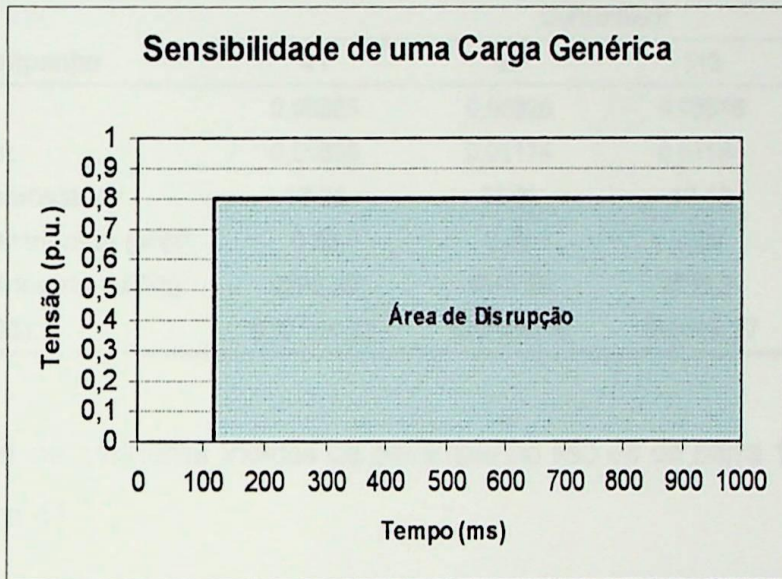


Figura 4-36 Sensibilidade de uma carga genérica à depressões de tensão

Os dados relativos ao processo industrial envolvido são:

Sensibilidade de Tensão = 0,80 p.u.

Sensibilidade de Duração = 120,00 (ms)

Demanda = 20,00 (MW)

Fator de Carga = 0,80

Tempo médio de Interrupção = 8,00 (h)

Custo médio da Interrupção = US\$ 50000,00

A Tabela 4-24 exibe os resultados da análise de todos os consumidores, considerando esta carga sensível.

Esta análise é de grande utilidade na identificação de locações com baixa incidência de depressões de tensão, ou seja, dos locais do sistema mais favoráveis para a conexão de uma determinada carga sensível ou para a instalação de novos consumidores.

TABELA 4-24
ESTUDO DE SENSIBILIDADE DE UMA CARGA GENÉRICA À DEPRESSÕES DE TENSÃO

Índices de Desempenho	Consumidor			
	41	95	113	119
Disponibilidade:	0,98365	0,98826	0,98816	0,98890
Indisponibilidade:	0,01635	0,01174	0,01184	0,01110
Freqüência (eventos/ano):	18,21	13,01	13,12	12,29
Demanda não Distribuída (MW):	0,33	0,23	0,24	0,22
Energia não Distribuída (MWh):	2292,29	1645,50	1659,21	1555,41
Custo Anual (US\$):	910.314,23	650409,79	655892,77	614399,59

Verifica-se que os melhores índices de desempenho são os da barra 119 e os piores são os da barra 41.

A Tabela 4-25 compara as freqüências de depressões de tensão calculadas para a carga sensível (0,80 p.u. e duração até 120 ms), com os valores de tensão até 0,80 (p.u.), obtidos da Tabela 4-23 sem considerar a duração dos eventos.

TABELA 4-25
FREQÜÊNCIA DE DEPRESSÕES DE TENSÃO NUMA CARGA SENSÍVEL GENÉRICA

Consumidor	Freqüência (eventos /ano)	
	Considerando a	Considerando somente
	Sensibilidade da Carga (0,80 p.u. e 120 ms)	o Limite de Tensão da Carga (0,80 p.u.)
41	18,21	25,07
95	13,01	23,82
113	13,12	15,75
119	12,29	21,50

Observa-se que quando se considera a influência da duração dos eventos de depressões de tensão, os valores obtidos são menores, enfatizando a necessidade do aperfeiçoamento dos algoritmos que tratam o processo de proteção das linhas do sistema durante a ocorrência de faltas.

As Figuras 4-37 a 4-40 demonstram que também ocorrem diferenças nas distribuições por tipo de falta aplicada.

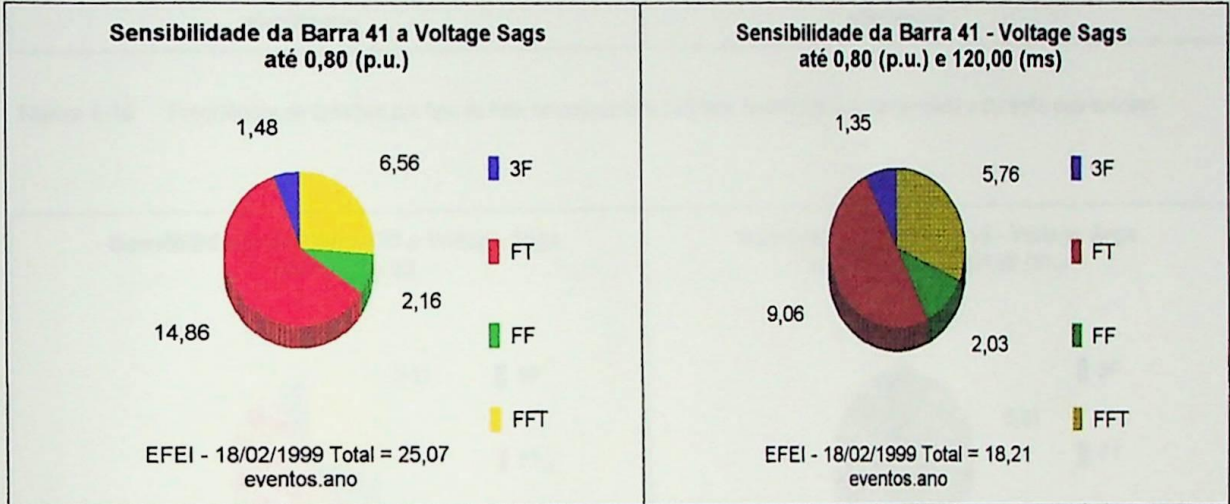


Figura 4-37 Freqüência de tensões por tipo de falta no consumidor 41 sem considerar e considerando a duração dos eventos

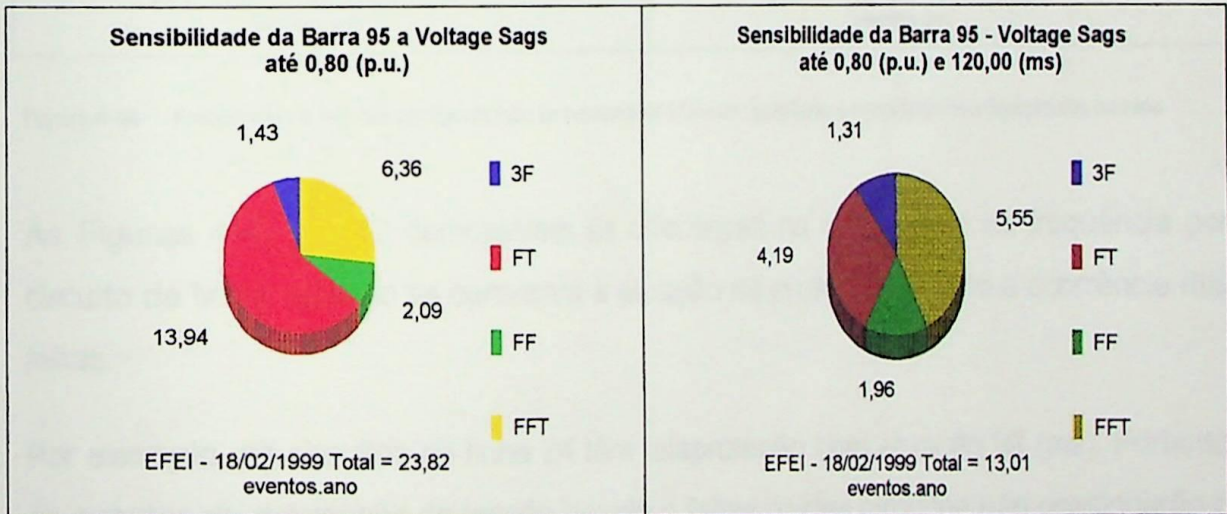


Figura 4-38 Freqüência de tensões por tipo de falta no consumidor 95 sem considerar e considerando a duração dos eventos

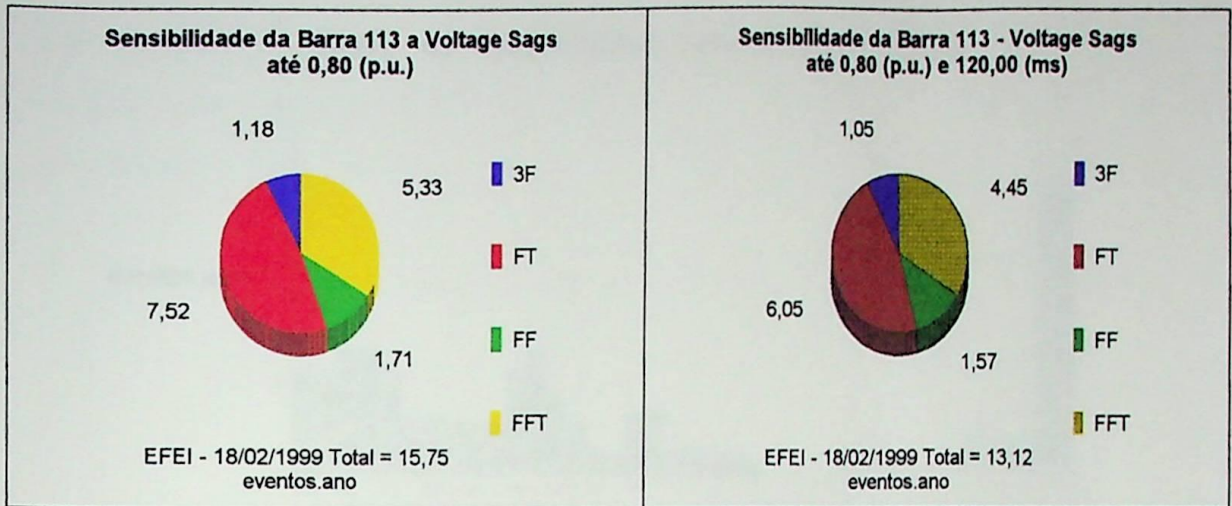


Figura 4-39 Freqüência de tensões por tipo de falta no consumidor 113 sem considerar e considerando a duração dos eventos

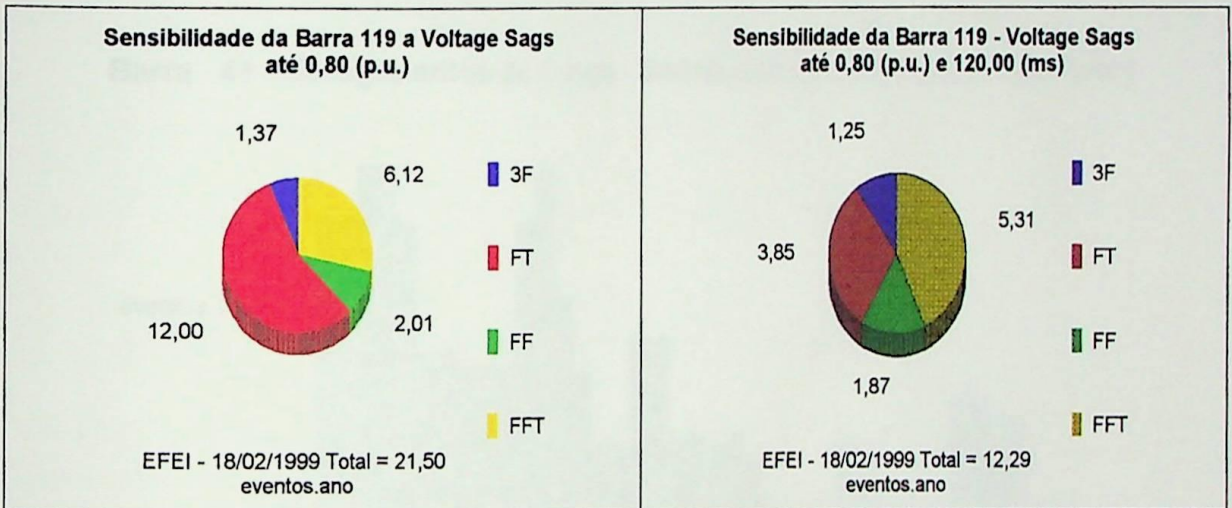


Figura 4-40 Freqüência de tensões por tipo de falta no consumidor 119 sem considerar e considerando a duração dos eventos

As Figuras 4-41 e 4-42 demonstram as diferenças na distribuição da freqüência por circuito de linha, quando se considera a atuação da proteção durante a ocorrência das faltas.

Por exemplo, os circuitos de linha 24 têm teleproteção com atuação 83 (ms). Portanto os eventos de depressão de tensão devido a faltas nestes circuitos não ocasionarão o desligamento da carga, cuja tolerância de duração é de 120 (ms).

Barra 41 - Frequência de Tensões até 0,80 (p.u.)

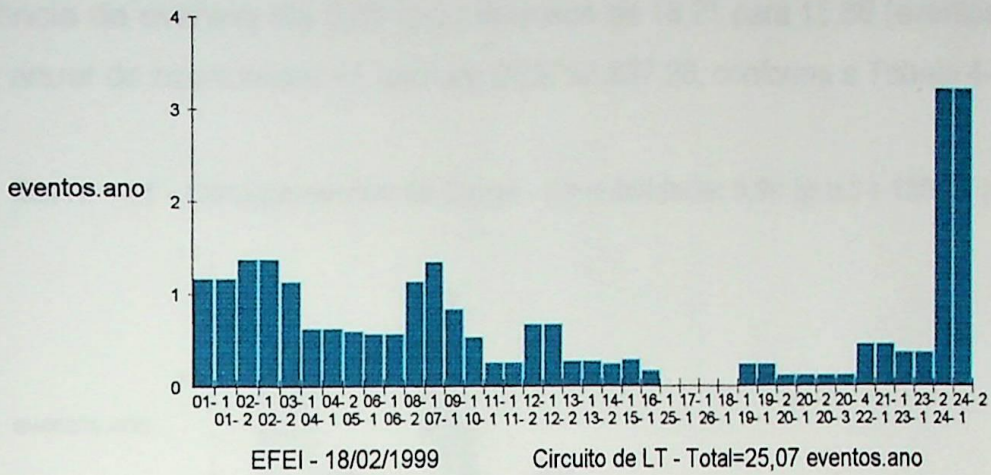


Figura 4-41 Frequência de tensões até 0,80 (p.u.) no consumidor 41 devido à faltas em cada circuito de linha

Barra 41 - Desligamentos da Carga - Sensibilidade: 0,80 (p.u.) e 120,00 (ms)

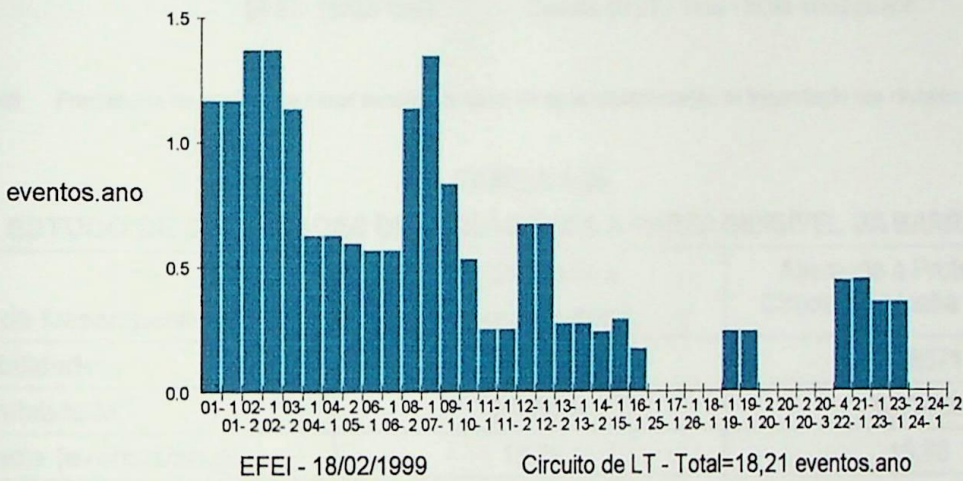


Figura 4-42 Frequência de tensões na barra 41 devido à faltas em cada circuito de linha, considerando a sensibilidade da carga

No consumidor 41 a frequência de tensões até 0,80 (p.u.) diminui de 25,07 (eventos.ano) para 73% do total, ou seja, 18,21 (eventos.ano) e o custo da interrupção cai de US\$1.253.273,04 para US\$910.314,23.

A Figura 4-43 mostra o que ocorre quando se altera a proteção de distância dos circuitos de linha 01-1 e 01-2, cujos ajustes originais são:

- Primeira Zona – Alcance 90% = 150 (ms)
- Segunda Zona = 550 (ms)

Alterando a proteção dos circuitos de linha para teleproteção com ajuste 83 (ms), a frequência de eventos até 0,80 (p.u.) decresce de 18,21 para 15,88 (eventos.ano) e o custo anual do consumidor 41 cai para US\$793.837,28, conforme a Tabela 4-26.

Barra 41 - Desligamentos da Carga - Sensibilidade: 0,80 (p.u.) e 120,00 (ms)

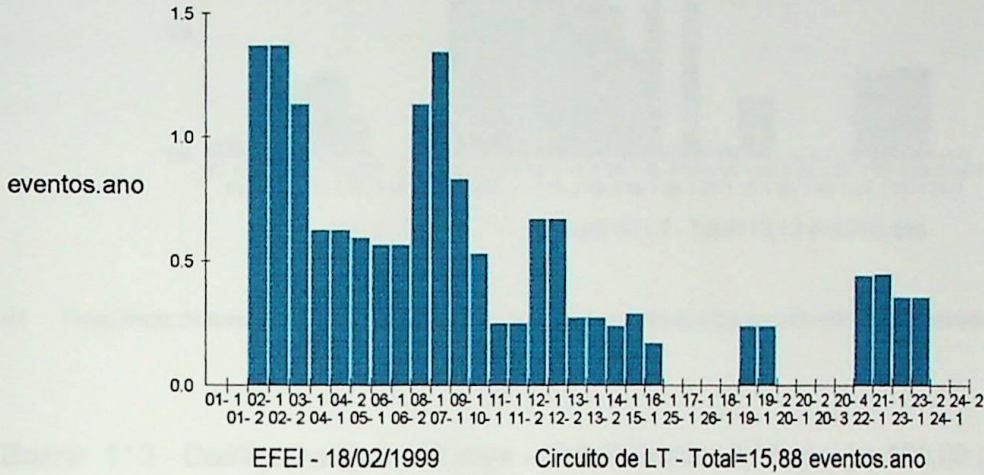


Figura 4-43 Freqüência de tensões na carga sensível da barra 41 após implementação de teleproteção nos circuitos 01-1 e 01-2.

TABELA 4-26

ESTUDO DE DEPRESSÕES DE TENSÃO PARA A CARGA SENSÍVEL DA BARRA 41

Índices de Desempenho	Considerando a Proteção Original	Alterando a Proteção dos Circuitos de Linha 1-1 e 01-2
Disponibilidade:	0,98365	0,98571
Indisponibilidade:	0,01635	0,01429
Freqüência (eventos/ano):	18,21	15,88
Demanda não Distribuída (MW):	0,33	0,29
Energia não Distribuída (MWh):	2292,29	2003,18
Custo Anual (US\$):	910.314,23	793.837,28

A alteração da proteção dos circuitos 01-1 e 01-2 beneficia o consumidor 41, mas tem pouca influência na barra do consumidor 113, como se observa ao comparar as Figuras 4-44 e 4-45, ressaltando a importância das simulações na análise de investimentos no sistema.

Barra 113 - Desligamentos da Carga - Sensibilidade: 0,80 (p.u.) e 120,00 (ms)

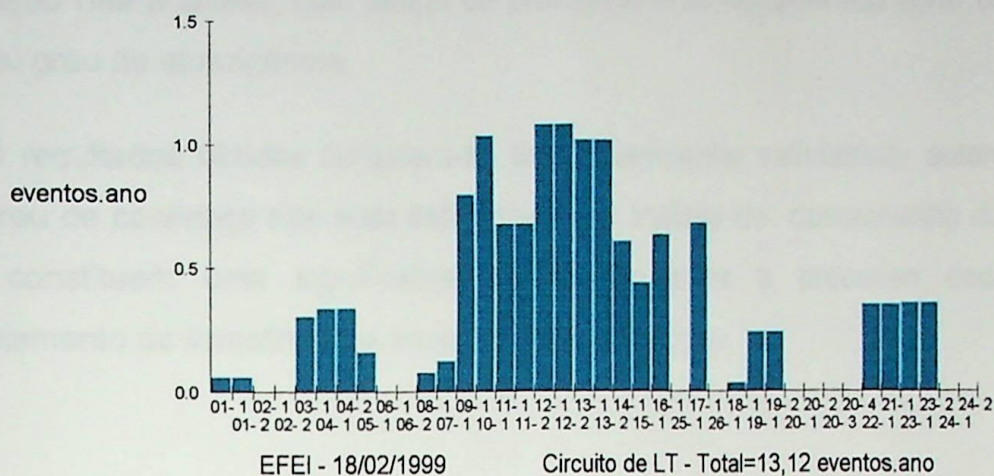


Figura 4-44 Freqüência de tensões na barra 113 devido à faltas em cada circuito de linha, considerando a sensibilidade da carga

Barra 113 - Desligamentos da Carga - Sensibilidade: 0,80 (p.u.) e 120,00 (ms)

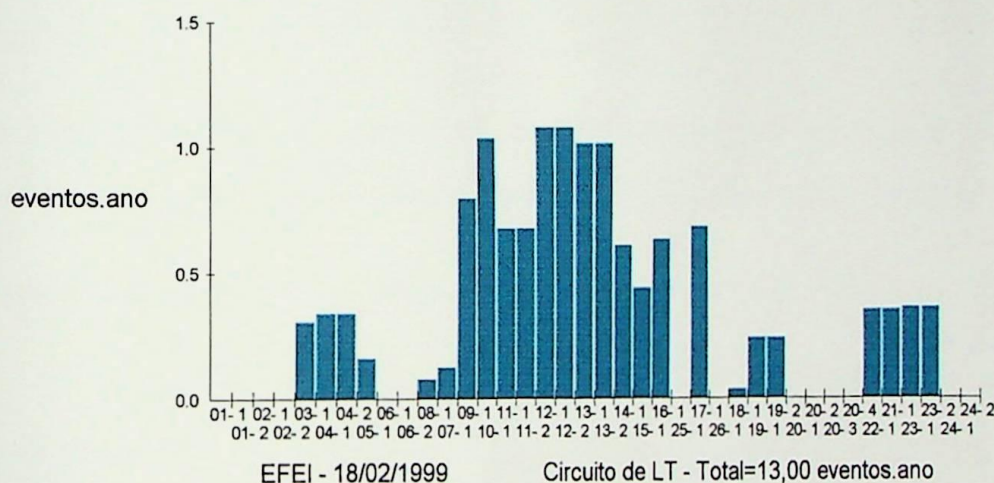


Figura 4-45 Freqüência de tensões na carga sensível da barra 113 após implementação de teleproteção nos circuitos 01-1 e 01-2.

4.4 Conclusões

O objetivo deste capítulo foi demonstrar a aplicação da ferramenta computacional desenvolvida neste trabalho nas análises de depressões de tensão, bem como a utilidade das informações produzidas visando o diagnóstico do desempenho do sistema.

A versatilidade do aplicativo permite considerar vários critérios e condições de operação nas análises, num tempo de processamento considerado curto em relação ao seu grau de abrangência.

Pelos resultados obtidos considera-se seu desempenho satisfatório, outorgando-lhe um grau de confiança nas suas estimativas dos índices de desempenho do sistema, que constituem uma significativa contribuição para o processo decisório do planejamento de investimentos em qualidade de energia.

Conclusões

A Qualidade de Energia Elétrica é uma área de inovação tecnológica de âmbito mundial, que analisa os diversos distúrbios que podem ocorrer no fornecimento de energia elétrica, em busca de soluções efetivas e integradas para estes complexos problemas.

Estes distúrbios podem originar-se e/ou manifestar-se nos diversos pontos do sistema elétrico de transmissão e distribuição ou nas instalações dos consumidores.

A interligação dos sistemas elétricos aumenta a severidade do impacto dos distúrbios.

Com a crescente utilização de equipamentos baseados em complexas *eletrotecnologias*, as variações na qualidade da energia estão se tornando alarmantemente problemáticas tanto para os consumidores quanto para as concessionárias.

Além da nova geração de equipamentos ser mais sensível à variações na qualidade da tensão, ela também é responsável pelo aumento da incidência de distúrbios de Qualidade da Energia Elétrica.

A parceria das Empresas de Energia Elétrica, consumidores e fabricantes de equipamentos é um fator crítico de sucesso dos processos de desenvolvimento e avaliação de soluções para problemas de Qualidade da Energia Elétrica, devido à sua

interdependência, pois que os problemas específicos podem ser oriundos de qualquer dessas partes.

No contexto do novo modelo do setor elétrico, a atuação do Estado como agente fiscalizador dos serviços e indutor do desenvolvimento se reveste de particular importância.

O emergente cenário de mercado competitivo de energia expandirá extremamente as opções para os seus consumidores, promovendo a abertura de novos serviços de fornecimento de energia e criando novas oportunidades e expectativas.

As concessionárias necessitam de soluções que as auxiliem a reduzir custos e a permanecer financeiramente viáveis, e ao mesmo tempo a conservar e satisfazer seus consumidores.

Os consumidores necessitam soluções que os possibilitem automatizar e melhorar tecnologicamente seus processos, renovar e/ou substituir equipamentos, e selecionar fornecedores de energia elétrica que satisfaçam suas necessidades de qualidade de energia com confiabilidade e economia.

Em resposta ao crescente interesse pela Qualidade da Energia Elétrica, as empresas de energia elétrica estão desenvolvendo programas, para ajudá-las a responder às preocupações de seus consumidores. A filosofia desses programas varia de reativa, onde a empresa de energia elétrica responde às reclamações de consumidores, à filosofia proativa, na qual a empresa de energia elétrica está envolvida na educação do consumidor e na promoção de serviços que podem auxiliar no desenvolvimento de soluções para problemas de Qualidade da Energia Elétrica.

Dentre os distúrbios associados à Qualidade da Energia Elétrica, as depressões de tensão (*Voltage Sags*) constituem um grande desafio a ser enfrentado pelas empresas de energia, consumidores e fornecedores de equipamentos, devido ao seu expressivo alcance e impacto econômico.

Modernos processos industriais controlados eletronicamente, constituem cargas sensíveis aos distúrbios de depressão de tensão, inevitáveis no sistema elétrico e cuja principal causa é a ocorrência de faltas nas instalações dos consumidores ou em qualquer linha do sistema de transmissão ou distribuição, mesmo as localizadas em pontos remotos.

Ocorrências de depressões de tensão, combinadas com a sensibilidade da nova geração de equipamentos, têm resultado em um número expressivo de interrupções de processos industriais. Como conseqüência, os índices de produtividade preconizados pelos projetos industriais freqüentemente não têm sido atingidos, seja quantitativa, seja qualitativamente, contabilizando perdas da ordem de milhões de dólares anuais para os consumidores.

Portanto, torna-se premente o estabelecimento de estratégias para a análise e a prevenção dos distúrbios de depressão de tensão, em busca de soluções efetivas e integradas para estes complexos problemas.

O desenvolvimento de soluções para mitigar ou minimizar o impacto das depressões de tensão nos consumidores implica na análise das causas perturbadoras e dos efeitos do distúrbio. Deste modo, deve-se atuar em dois sentidos, ou seja, analisar medidas para minimizar as características de magnitude, duração e freqüência de ocorrências das depressões de tensão e reduzir o nível de sensibilidade dos equipamentos que sofrem os efeitos do distúrbio.

Dentro deste contexto, foi desenvolvido o sistema de informações **VISAGE - Voltage Sag Estimation**, uma ferramenta computacional destinada à análise de depressões de tensão devido à ocorrência de faltas nas diversas linhas de transmissão e distribuição de sistemas elétricos com cargas sensíveis, cuja implementação foi objeto dessa dissertação.

Deve-se salientar aqui, que as metodologias empregadas no *software* desenvolvido já são conhecidas. A contribuição que existe no trabalho é a de tê-las reunido e organizado num algoritmo consistente, que foi implementado numa ferramenta

computacional de fácil manuseio, e de grande versatilidade, cujos principais produtos são descritos a seguir.

- A importação de informações de curto-circuito geradas por ferramentas convencionais de análise de faltas. Um programa de análise de faltas é utilizado no processo de aplicação de faltas em vários pontos ao longo das linhas do sistema, para a obtenção das magnitudes de tensão resultantes no ponto de acoplamento das instalações consumidoras com cargas sensíveis. Os resultados são importados por rotinas especificamente desenvolvidas e armazenados no banco de dados da aplicação. O *software* aplicativo desenvolvido foi projetado para ser utilizado com os programas ANAFAS do CEPEL ou CCINT da COPEL.
- A visualização gráfica e numérica do comportamento das tensões nos barramentos de carga monitorados durante a ocorrência de faltas trifásicas, fase-terra, fase-fase-terra e fase-fase ao longo das linhas de transmissão e distribuição do sistema, incluindo diagramas unifilares, gráficos de evolução da tensão com o local da falta e funções de densidade e distribuição de probabilidade das tensões no consumidor. Com relação à conexão da carga, as informações podem ser obtidas para tensões fase-fase ou fase-neutro e são fornecidos os valores por fase, a tensão média, e a mínima dentre as três fases.
- Através das informações da evolução da tensão com o local da falta, podem ser identificadas as áreas de vulnerabilidade do sistema à depressões de tensão. Para facilitar esta tarefa, as informações também podem ser classificadas por ordem de magnitude de tensão.
- A análise do desempenho do sistema em função da frequência de ocorrências de depressões de tensão num determinado consumidor, incluindo o fornecimento de gráficos de frequência acumulada de tensões por consumidor, para as linhas do sistema, por classe de tensão das linhas e por tipo de falta.
- A análise do desempenho do sistema para uma carga específica do consumidor, fornecendo a frequência global ou distribuída por linha do sistema e tipo de falta, e

calculando os seguintes índices de desempenho: disponibilidade e indisponibilidade da carga ou processo industrial, frequência de ocorrências de interrupções por ano, custo anual de interrupção do processo do consumidor, demanda e energia não distribuída. Esta análise considera dados de desempenho da proteção das linhas do sistema.

- Ambas as análises de desempenho citadas podem ser obtidas considerando-se tensões fase-fase ou fase-neutro e segundo os critérios de fase mínima ou média das três fases. Além dessas opções, os dados dos consumidores e das linhas podem ser alterados interativamente, proporcionando grande versatilidade de utilização.

Através da comparação dos índices de desempenho calculados, pode-se definir as alternativas que resultem na melhor relação custo-benefício para os investimentos, tanto sob o enfoque da concessionária como sob a ótica do consumidor.

O desenvolvimento dessa ferramenta computacional constitui uma contribuição técnica para a metodologia de análise e prevenção dos distúrbios de depressão de tensão, auxiliando planejadores de sistemas de concessionárias e instalações consumidoras na busca da compatibilidade entre a qualidade oferecida pelos sistemas de fornecimento de energia e as necessidades dos modernos processos industriais.

Entre as futuras implementações pretendidas, estão:

- Aperfeiçoar o tratamento da duração das depressões de tensão utilizando as práticas e filosofias de proteção de sobrecorrente da concessionária ou introduzindo os ajustes dos relés e fusíveis para cada linha de transmissão, subtransmissão, e distribuição.
- Implantar a técnica de coordenação de equipamentos sensíveis com as características das depressões de tensão do sistema, a qual propõe a elaboração de um único gráfico relacionando as características de magnitude e duração. Uma importante vantagem desse método, é que a curva de sensibilidade de um

equipamento a ser analisado também pode ser traçada neste mesmo gráfico, permitindo uma identificação direta do número de desligamentos indevidos do equipamento por ano.