

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - UFMG
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
PPGEE

ESTRATÉGIA PARA ANÁLISE DE AFUNDAMENTO
DE TENSÃO NO PLANEJAMENTO DO
SISTEMA ELÉTRICO

ALUNO: Tiago Vilela Menezes

ORIENTADORA: Maria Helena Murta Vale

C0-ORIENTADOR: Silvério Visacro Filho

Belo Horizonte, Outubro de 2007

Tiago Vilela Menezes

**“ESTRATÉGIA PARA ANÁLISE DE AFUNDAMENTO DE TENSÃO
NO PLANEJAMENTO DO SISTEMA ELÉTRICO”**

Dissertação de Mestrado submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

**Área de Concentração: Engenharia de Potência
Linha de Pesquisa: Sistemas de Energia Elétrica**

**Orientadora: Prof^a Maria Helena Murta Vale
Universidade Federal de Minas Gerais**

**Co-Orientador: Prof. Silvério Visacro Filho
Universidade Federal de Minas Gerais**

**Belo Horizonte
Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG
2007**

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Antônio José de Menezes e Maria Tereza Vilela Menezes, e ao meu irmão Gustavo Vilela de Menezes, pelo amor, apoio, incentivo e conselhos em todos os momentos de minha vida.

AGRADECIMENTOS

A meus pais Antônio e Maria Tereza, pelo amor, criação, educação e ensinamentos eternos;

Ao meu irmão Gustavo pelo amor, companhia, apoio e amizade sempre presentes;

À toda minha família, pelo apoio, compreensão, exemplos, e incentivo na luta pelas conquistas.

Aos professores Maria Helena Murta e Silvério Visacro pela orientação, incentivo, confiança e aprendizado.

Aos colegas do LRC - *Lightning Research Center* pelos momentos de trabalho e descontração.

Aos profissionais do PPGE – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e do LRC – *Lightning Research Center*, UFMG, que proporcionaram ambiente de pesquisa e trabalho adequados;

À Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG, pela oportunidade e apoio.

À todos os colegas da CEMIG, principalmente aqueles que compartilham comigo o trabalho diário na Superintendência de Planejamento do Sistema Elétrico.

Ao colega da CEMIG, Jorge Luiz Teixeira, que me orientou e transmitiu muito do seu conhecimento durante os primeiros estudos sobre este trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	5
LISTA DE TABELAS	6
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	7
1. INTRODUÇÃO.....	10
2. AFUNDAMENTOS DE TENSÃO – INTRODUÇÃO AO FENÔMENO	16
2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	16
2.2. DEFINIÇÕES	18
2.3. NORMALIZAÇÃO APLICÁVEL	19
2.4. PARÂMETROS DE ANÁLISE DO AFUNDAMENTO DE TENSÃO	24
2.5. ORIGEM DOS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO.....	26
2.6. VARIÁVEIS DE INFLUÊNCIA.....	27
2.6.1. <i>Tipo de Falta</i>	28
2.6.2. <i>Localização da Falta</i>	29
2.6.3. <i>Resistência de Falta</i>	30
2.6.4. <i>Tensão Pré-Falta</i>	30
2.6.5. <i>Conexão dos Transformadores</i>	31
2.6.6. <i>Sistema de Proteção</i>	32
2.6.7. <i>Sistemas de Religamento</i>	34
2.7. SENSIBILIDADE DE CARGAS E PROCESSOS INDUSTRIAIS	36
2.7.1. <i>Efeitos Diversos</i>	36
2.7.2. <i>Curvas CBEMA, ITIC e SEMI-F47</i>	37
2.8. IMPACTOS E RISCOS PARA O SISTEMA ELÉTRICO	42
2.9. CONSIDERAÇÕES FINAIS	44
3. PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO CONSIDERANDO ASPECTOS DE AFUNDAMENTO DE TENSÃO – CONCEITOS BÁSICOS E RECOMENDAÇÕES ..	45
3.1. INTRODUÇÃO	45
3.2. PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO E DA OPERAÇÃO	46
3.3. AFUNDAMENTOS DE TENSÃO NAS COMPETÊNCIAS DO PLANEJAMENTO - RECOMENDAÇÕES	49
3.4. ETAPAS ESPECÍFICAS DOS ESTUDOS DE PLANEJAMENTO	57
3.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
4. AFUNDAMENTOS DE TENSÃO–SENSIBILIDADE ÀS OBRAS DE EXPANSÃO	61
4.1. INTRODUÇÃO	61
4.2. SENSIBILIDADE DA DURAÇÃO E DA FREQUÊNCIA	62
4.2.1. <i>Sensibilidade da Duração do Afundamento de Tensão</i>	62
4.2.2. <i>Sensibilidade da Frequência de Ocorrência dos Afundamentos de Tensão</i>	63
4.3. SENSIBILIDADE DA AMPLITUDE DO AFUNDAMENTO DE TENSÃO	65
4.3.1. <i>Modelagem analítica para cálculo da amplitude</i>	66
4.3.2. <i>Análise Paramétrica</i>	79
4.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	97
5. ESTRATÉGIA PARA ANÁLISE DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO NO PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO	98
5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	98

5.2. PREMISSAS	100
5.3. AFUNDAMENTOS DE TENSÃO - ÍNDICES DE DESEMPENHO	105
5.3.1. <i>Considerações Iniciais</i>	105
5.3.2. <i>Considerações Básicas Adotadas na Concepção dos Índices</i>	105
5.3.3. <i>Índices de Desempenho</i>	106
5.4. AFUNDAMENTOS DE TENSÃO—PROPOSTA DE INCLUSÃO NAS ETAPAS DOS ESTUDOS DE PLANEJAMENTO	108
5.5. PROPOSTA DE TRATAMENTO DE CONSUMIDORES SENSÍVEIS A AFUNDAMENTOS DE TENSÃO	113
5.5.1. <i>Procedimento para Tomadas de Decisões</i>	113
5.5.2. <i>Situações Específicas – Configuração de Barras de SE</i>	116
5.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	123
6. ESTUDO DE CASO	124
6.1. CARACTERIZAÇÃO DO CASO	124
6.2. RESULTADOS	127
6.3. CONCLUSÕES.....	130
7. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	132
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	135
ANEXO A – CARACTERÍSTICAS DO PROGRAMA UTILIZADO NAS SIMULAÇÕES.....	142
A.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	142
A.2 MODELAGEM DA REDE	143
A.3 SUBROTINA VOLTAGE SAG	145
ANEXO B – ARQUIVO DE DADOS DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO.....	146

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Gráfico Tensão x Tempo - Afundamento de Tensão	19
Figura 2.2 - Curva de Tolerância <i>CBEMA</i> [ITI, 2000]	38
Figura 2.3 - Curva de Tolerância <i>ITIC</i> [ITI, 2000]	38
Figura 2.4 - Curva de Tolerância SEMI F-47 [SEMI, 2006]	39
Figura 2.5 - Sensibilidade dos AVV	40
Figura 2.6 – Curva de Sensibilidade de Contatores	41
Figura 3.1 – Diagrama Simplificado do SEP	46
Figura 3.2 – Sistema Interligado Nacional [ONS, 2007]	47
Figura 3.3 – Planejamento e Operação - Atividades Básicas	47
Figura 3.4 – Competências do Planejamento – Inclusão do Afundamento de Tensão	50
Figura 3.5 – Etapas Básicas de Estudo de Planejamento	57
Figura 4.1 – Obras de Expansão - Duração do Afundamento de Tensão	63
Figura 4.2 – Obras de Expansão - Frequência do Afundamento de Tensão	64
Figura 4.3 – Obras de Expansão - Frequência do Afundamento de Tensão	65
Figura 4.4 – Diagrama do Sistema Radial Uma Fonte – Pré-Falta	67
Figura 4.5 – Diagrama do Sistema Radial Uma Fonte – Falta	67
Figura 4.6 – Diagrama do Sistema Radial Duas Fontes – Pré-Falta	72
Figura 4.7 – Diagrama do Sistema Radial Duas Fontes – Falta	72
Figura 4.8 – Diagrama do Sistema Malhado	76
Figura 4.9 – Diagrama do Sistema Radial – Uma Fonte	80
Figura 4.10 – Gráfico Tensão x Obras a Montante - Sistema Radial Uma Fonte	81
Figura 4.11 – Gráfico Tensão x Obras a Jusante - Sistema Radial Uma Fonte	82
Figura 4.12 – Sistema Radial Uma Fonte - Elemento <i>Shunt</i>	83
Figura 4.13 – Gráfico Tensão x Impedância de Falta - Sistema Radial Uma Fonte	87
Figura 4.14 – Gráfico Tensão x Efeito das Cargas - Sistema Radial Uma Fonte	87
Figura 4.15 – Sistema Radial – Duas Fontes	88
Figura 4.16 – Gráfico Tensão Barra Referência x Z Série – Sistema Radial Duas Fontes	89
Figura 4.17 – Gráfico Tensão Barra de Falta x Z Série – Sistema Radial Duas Fontes	90
Figura 4.18 – Sistema Malhado – Alterações de Topologia do SEP	92
Figura 5.1 – Afundamentos de Tensão - Proposta de Linhas de Atuação no Planejamento	98
Figura 5.2 – Etapas de Estudo – Proposta de Inclusão de Análise de Afundamento	109
Figura 5.3 – Etapas de Estudo - Procedimentos de Análise de Afundamentos	111
Figura 5.4 – Consumidores Sensíveis – Proposta de Tratamento no Planejamento	114
Figura 5.5 – SE Com Barra Fechada	117
Figura 5.6 – Abertura de Barra	118
Figura 5.7 – Fechamento de Barra	119
Figura 5.8 – Abertura de Barra	119
Figura 5.9 – SE Com Barra Aberta	120
Figura 5.10 – Permanência de Barra Aberta	121
Figura 5.11 – Fechamento de Barra	121
Figura 5.12 – Fechamento da Barra	122
Figura 5.13 – Abertura de Barra	122
Figura 6.1 – Diagrama Unifilar do SEP	125
Figura 6.2 – Diagrama Unifilar do SEP Futuro	126
Figura 6.3 – Índice de Sensibilidade - I_{sen}	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Taxa de Falhas em LT (região dos EUA) [IEEE, 1997].....	29
Tabela 2.2 – Taxa de Falhas em LT (região do Brasil)	29
Tabela 2.3 – Tempos Típicos de Atuação da Proteção.....	34
Tabela 4.1 – Impedâncias e Potências Típicas de Capacitores 13,8 kV e 138 kV do SEP ...	85
Tabela 4.2 – Impedâncias Típicas de Cargas do SEP	85
Tabela 4.3 – Impedâncias Série Típicas de LT do SEP	86
Tabela 5.1–Tempo Típico Eliminação de Faltas [IEEE,1998b], [IEEE,1998c], [ONS, 2002c]	101
Tabela 5.2 – Taxa de Falhas em LT (região dos EUA) [IEEE, 1997].....	102
Tabela 5.3 – Taxa de Falhas em LT (região do Brasil)	102
Tabela 5.4 – Amplitude dos Afundamentos de Tensão – Patamares Propostos.....	106
Tabela 6.1 – Simulação do SEP Existente - Fator de Severidade - F_{ats}	127
Tabela 6.2 – Simulação do SEP Futuro - Fator de Severidade - F_{ats}	128
Tabela 6.3 – Índice de Severidade - I_{sev}	129

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
Aspen TM	<i>Advanced System for Power Engineering</i>
AVV	Acionamento de Velocidade Variável
VSD	<i>Variable Speed Driver</i>
BT	Baixa Tensão
CA	Corrente Alternada
CBEMA	<i>Computer and Business Equipment Manufactures Association</i>
CEIDS	<i>Consortium for Electric Infrastructure to Support a Digital Society</i>
CC	Corrente Contínua
CLP	Controlador Lógico Programável
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
DNAEE	Departamento Nacional de Energia Elétrica
DVR	<i>Dynamic Voltage Restorer</i>
ELECTROTEK	<i>Electrotek Concepts, Inc.</i>
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ITI	<i>The Information Technology Industry Council</i>
ITIC	<i>Information Technology Industry Curve</i>
LD	Linha de Distribuição
LLS	<i>Lightning Location Systems</i>
LRC	<i>Lightning Research Center</i>
LT	Linha de Transmissão
ms	milissegundos
MT	Média Tensão
NER	<i>National Electricity Regulator</i>
NRS	<i>National Rationalized Specification</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
p.u.	por unidade
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PPGEE	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
RMS	<i>Root Mean Square</i> (valor eficaz)
SE	Subestação
SEMI	<i>Semiconductor Equipment and Materials International</i>
SEP	Sistema Elétrico de Potência
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UNIPED	<i>Union of International Producers and Distributors of Electrical Energy</i>
UPS	<i>Uninterrupted Power Supply</i>
V	Volts
VTCD	Variação de Tensão de Curta Duração
W	Watts

RESUMO

Atualmente, o fenômeno Afundamento de Tensão é considerado uma das principais fontes de interrupções de processos industriais, implicando danos significativos para empresas de energia e consumidores.

Este trabalho propõe uma estratégia, no contexto das atividades de Planejamento da Expansão, para minimizar os efeitos do fenômeno nos Sistemas Elétricos de Potência.

A metodologia desenvolvida envolve três níveis de atuação: (i) Competências Vitais; (ii) Estudos de Planejamento e (iii) Tratamento de Consumidores Especiais (com cargas sensíveis).

Como aspecto inovador, a estratégia provê diretivas para as equipes de planejamento, na análise e avaliação de alternativas de expansão, que incluem questões relativas aos afundamentos de tensão. Como benefício, tem-se a expectativa de melhoria do desempenho do sistema.

ABSTRACT

Nowadays, Voltage Sags are considered one of the main sources of industrial process interruptions, causing significant damages to utilities and customers.

This work presents a strategy to minimize the effects of voltage sag in Power Systems, applied to Expansion Planning activities.

The proposed methodology involves three levels: (i) Fundamental Planning Knowledge; (ii) Planning Studies and (iii) Special Customers (with sensitive loads).

The innovative aspect of this strategy is that it provides directives to the planning staff, concerning the analyses and evaluations of expansion alternatives, taking into account voltage sags effects. This approach is expected to contribute to a significant improvement of system performance.

1. INTRODUÇÃO

Diversas são as atividades realizadas para que o *Sistema Elétrico de Potência* (SEP) garanta o suprimento de energia elétrica aos consumidores. Tradicionalmente, estas são caracterizadas como sendo atividades de Expansão e de Operação, considerando os aspectos elétrico e energético. Enquanto a Expansão trata da aquisição de novos recursos para o sistema, as decisões de Operação vão no sentido de gerenciar os recursos já disponíveis. Nesta dissertação, enfoque é dado à área de Planejamento da Expansão Elétrica.

Responsável por grande parte das decisões acerca dos investimentos das empresas de energia, esta área possui a missão de conceber e viabilizar as melhores soluções de expansão e de exploração do sistema elétrico que garantam o atendimento do crescimento do mercado de energia com segurança, qualidade e rentabilidade.

Um grande desafio dos planejadores do SEP é definir as configurações do sistema futuro, de forma a atender, ao mesmo tempo, requisitos técnicos e econômicos. Este desafio vem sendo ampliado, em decorrência de diversos fatores: necessidade de aumento da produtividade das empresas; questões ambientais que permeiam os novos empreendimentos; desregulamentação do setor elétrico, criando um ambiente de mercado cada vez mais competitivo; exigência crescente dos consumidores por uma maior qualidade da energia elétrica.

No âmbito da *Qualidade da Energia Elétrica*, o distúrbio denominado Afundamento de Tensão apresenta-se como um grande desafio a ser avaliado pelas empresas. *Tal fenômeno se caracteriza por uma redução de, no máximo um minuto, do valor eficaz da tensão, em consequência de perturbações no sistema elétrico, na maioria das vezes provocadas por curto-circuitos.*

Alguns dos principais motivos que colocam este fenômeno em destaque, dentre os distúrbios que afetam a qualidade da energia, são:

- É responsável por perdas de grandes blocos de cargas, com conseqüente perda de receita pela concessionária, sendo a causa principal de reclamações de consumidores, devido às suas implicações operacionais e econômicas nos processos industriais;
- É freqüente nos sistemas elétricos, devido à vasta extensão e à vulnerabilidade das Linhas de Transmissão - LT e Linhas de Distribuição – LD aéreas, onde ocorre a grande maioria das faltas que originam os afundamentos de tensão;
- A tendência mundial de os processos industriais sofrerem mais interrupções provocadas por afundamentos de tensão tendo em vista a intensa aplicação de equipamentos eletroeletrônicos sensíveis ao distúrbio nas indústrias;
- Boa parte das medidas de eficiência energética, adotadas atualmente pelas empresas, utiliza equipamentos que são sensíveis aos afundamentos de tensão, tais como acionamentos de velocidade variável (AVV), controlador lógico programável (CLP), lâmpadas fluorescentes, lâmpadas de descarga a vapor de mercúrio;
- Em hospitais, tem-se elevado o risco de ocorrência de mau funcionamento de sistemas vitais, devido ao emprego de novos equipamentos com grandes avanços tecnológicos, mas ao mesmo tempo mais sensíveis aos afundamentos de tensão;
- A iluminação pública, onde geralmente se utilizam lâmpadas de vapor de sódio ou vapor de mercúrio, pode sofrer desligamentos após a ocorrência de afundamentos de tensão, acarretando riscos para a segurança da população;
- Em shopping centers, é freqüente a utilização de equipamentos eletrônicos de refrigeração, iluminação e automatização do sistema de funcionamento e operação do estabelecimento, os quais podem sofrer desligamentos pela ocorrência de afundamentos de tensão;
- As concessionárias de energia podem ter perda de imagem empresarial e, inevitavelmente, passarão a ter maiores custos com prováveis ressarcimentos de prejuízos aos consumidores atingidos por afundamentos de tensão.

A qualidade da energia tem se transformado fator determinante para a competitividade entre as empresas concessionárias, principalmente após a criação do consumidor livre. Em um horizonte próximo, acredita-se que as concessionárias nacionais poderão oferecer contratos diferenciados, de acordo com os requisitos de qualidade exigidos pelos processos dos consumidores. No exterior estes contratos já existem.

Pode-se dizer que, no cenário atual, há uma tendência crescente de perdas financeiras no setor elétrico relativas aos afundamentos de tensão. Entretanto, apesar da relevância do tema, as ações relativas ao fenômeno têm sido tomadas, na prática, apenas ao nível da operação do SEP, em caráter corretivo.

As áreas de planejamento das empresas, em geral, ainda não têm aplicado técnicas efetivas para a abordagem do afundamento de tensão, de forma compatível com as suas necessidades. Acredita-se ser importante que o fenômeno seja tratado já na etapa dos estudos de expansão, de forma preventiva, no sentido de evitá-lo ou minimizá-lo.

O trabalho de pesquisa bibliográfica, realizado junto à literatura técnica, indica a carência de trabalhos que tratem do tema afundamento de tensão, no contexto da área de planejamento da expansão. A principal razão desta realidade reside na dificuldade da aplicação dos aspectos relacionados aos afundamentos de tensão nas análises da expansão do sistema. Por outro lado, conforme já comentado, observa-se que, dentre os trabalhos técnicos relativos à qualidade da energia elétrica, o fenômeno apresenta-se como o distúrbio de maior destaque, tendo em vista os prejuízos que este tem causado aos agentes, principalmente aos consumidores.

Diante deste contexto (impactos negativos do fenômeno no SEP, ocorrência freqüente e carência de análise efetuada na expansão), identificou-se a necessidade de se estabelecerem procedimentos que analisassem os afundamentos de tensão sob a ótica sistêmica, no planejamento, subsidiando e orientando as ações e tomadas de decisões para mitigação dos efeitos do problema.

Visando contribuir nesta direção, apresenta-se esta dissertação de mestrado, que tem por objetivo propor uma *estratégia para incluir análises de afundamentos de tensão nos estudos de planejamento da expansão do sistema elétrico de potência*. Sua meta é melhorar o desempenho do SEP, evitando ou minimizando os problemas operacionais e prejuízos econômicos provocados pelo fenômeno, resultando em melhor qualidade de energia aos clientes.

Dentro desta perspectiva, espera-se, como contribuição desta dissertação, que esta possa orientar as seguintes análises: (i) elaboração de diagnóstico do sistema existente e futuro, identificando-se pontos críticos em relação aos afundamentos de tensão; (ii) proposição de obras adicionais àquelas já planejadas ou de novas soluções; (iii) avaliação dos impactos de obras de expansão sobre os afundamentos de tensão, subsidiando soluções e decisões das áreas de operação, quanto às ações corretivas envolvendo consumidor com problemas de afundamentos; (iv) identificação do ponto com o melhor desempenho em relação aos afundamentos de tensão, dentre aqueles concorrentes à conexão de novos consumidores.

Como outra contribuição desta dissertação, espera-se que a mesma possa ser utilizada como um texto de referência para orientar as áreas de planejamento das concessionárias a analisarem os afundamentos de tensão nos estudos de expansão do sistema, de acordo com as suas necessidades.

A estratégia detalhada neste trabalho pretende, assim, auxiliar os planejadores na tarefa de conceber configurações futuras do sistema elétrico, incluindo uma avaliação crítica em relação aos afundamentos de tensão.

Para cumprir seu objetivo, esta dissertação é composta por sete capítulos e dois anexos, descritos sucintamente a seguir.

O presente capítulo mostra a importância dos afundamentos de tensão no contexto da qualidade da energia elétrica, justificando a necessidade da sua abordagem no planejamento da expansão do SEP.

No capítulo 2, estão reunidos os principais conceitos e definições relacionados ao tema afundamento de tensão. Aspectos da legislação pertinente estão também incluídos.

O capítulo 3 descreve o processo de decisão envolvido no planejamento da expansão elétrica, onde são identificadas as chamadas *Competências Vitais do Planejamento*. Para cada passo deste macro processo, é indicado o tratamento atualmente dado à questão dos afundamentos de tensão e são apresentadas recomendações para a inclusão de análises dedicadas aos mesmos. No capítulo, é salientada a importância de ser definida uma estratégia específica para uma dentre as competências, a dos *Estudos de Planejamento*, pois é nesta etapa que as obras são definidas.

O desenvolvimento da estratégia partiu da investigação realizada, por meio de análises de sensibilidades, acerca do impacto das obras de expansão nos afundamentos de tensão do SEP. No capítulo 4, é detalhado todo o estudo elaborado. Os resultados destas análises são muito relevantes, pois mostram, dentre outros aspectos, como alterações na configuração do sistema elétrico alteram os valores das intensidades dos afundamentos de tensão. Tais análises constituem significativa contribuição deste trabalho.

Com base nos desenvolvimentos apresentados nos capítulos anteriores, no capítulo 5 é detalhada a estratégia de inclusão de análises de afundamento de tensão nos Estudos de Planejamento. São indicadas as etapas onde os afundamentos devem ser avaliados, considerando os seus parâmetros de amplitude, duração e frequência. É apresentada, também, uma proposta para o Tratamento de Consumidores Sensíveis ao fenômeno, buscando soluções de forma integrada com obras de expansão, dentro de uma visão sistêmica. Compondo a estratégia, as pesquisas levaram à criação de Índices de Desempenho, que sinalizam o comportamento de pontos (barras) do SEP frente ao fenômeno. Estes estão, também, descritos no capítulo 5.

Visando ilustrar a potencialidade da aplicação dos índices de desempenho propostos, é apresentado no capítulo 6 um estudo de caso, em sistema elétrico real, mostrando resultados práticos.

No capítulo 7, encontram-se as principais conclusões do trabalho. Também são apresentadas sugestões para desenvolvimentos futuros.

Concluindo o texto, estão apresentadas as referências bibliográficas utilizadas na pesquisa e dois anexos. No anexo A, são descritas as principais características do *software* utilizado nas simulações. No anexo B, são apresentados relatórios de saída de simulação preparada com tal programa.

2. AFUNDAMENTOS DE TENSÃO – INTRODUÇÃO AO FENÔMENO

2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo aborda as definições do fenômeno Afundamento de Tensão apresentadas na literatura técnica, as normas aplicáveis, bem como os parâmetros de análise, as causas e as variáveis de influência dos afundamentos de tensão. Seu objetivo é organizar os temas envolvidos no trabalho, subsidiando os capítulos posteriores.

Antes de apresentar as definições pertinentes, é interessante traçar um breve histórico sobre o setor elétrico e suas reestruturações ao longo dos anos, focando o tema Qualidade da Energia Elétrica - QEE, e o tratamento do Afundamento de Tensão.

A preocupação do setor elétrico nacional com a QEE não é recente [Ribeiro, 1998]. Em 1978, as portarias 046 e 047, publicadas pelo Departamento Nacional de Energia Elétrica – DNAEE, tratavam da continuidade do serviço, estabelecendo os primeiros indicadores de qualidade: Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora - DEC e Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora – FEC [ANEEL, 2000b], [ANEEL, 2007a], [Volpe Filho, 2004].

Até a década de 90, os estudos relativos à qualidade da energia principalmente nas concessionárias, em geral se concentravam em problemas individuais ou distúrbios isolados que uma carga especial pudesse estar causando ao sistema ou pudesse vir a causar. Esta postura das concessionárias era adequada às características e legislações do sistema elétrico da época.

Em relação aos afundamentos de tensão, a partir da década de 90 começaram a surgir maiores preocupações [Carvalho Filho, 2000], [Ribeiro, 1998], verificando-se aumento da publicação de trabalhos relativos ao assunto, merecendo destaque aquele publicado por [Conrad, 1991], onde é apresentada uma conceituação geral sobre o tema.

Com os avanços da sociedade, evoluiu também o setor elétrico nacional, havendo, ao longo dos anos, várias reestruturações em seu modelo. Nas reestruturações, foi criada a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, cuja função é fiscalizar e regular o setor elétrico. A ANEEL está cada vez mais empenhada na definição de padrões de QEE do sistema.

Além da ANEEL, foi instituído o Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, órgão responsável por, dentre outras ações, fornecer informações sobre o desempenho e a QEE da Rede Básica do Sistema Interligado Nacional - SIN, bem como sobre a eficiência operacional das empresas de energia.

Neste ambiente de reestruturações, a criação da Lei 8.631/1993 [Volpe Filho, 2004], eliminou o regime tarifário pelo custo do serviço de energia elétrica, incentivando a competitividade do setor, obrigando as empresas a dedicarem maior atenção à qualidade da energia elétrica. Cresce em importância, assim, a preocupação com os afundamentos de tensão, devido à potencialidade de suas implicações operacionais e econômicas.

Atualmente, a atuação das concessionárias em relação aos afundamentos de tensão tem se dado, principalmente, na área de operação, na maioria das vezes, em caráter corretivo.

As soluções corretivas normalmente demandam tempo considerável e análise técnica minuciosa, envolvendo uma sistemática de medição ou monitoração do sistema existente. Estas ações podem demandar custos elevados e gerar discussões no que tange às responsabilidades das atividades e custos associados, às vezes criando um ambiente de desgaste entre consumidor e concessionária até a solução do problema.

No âmbito da Rede Básica do SIN, o ONS tem desenvolvido trabalhos para a medição de afundamentos de tensão e avaliações de desempenho do sistema, através de projeto piloto [ONS, 2007].

Conforme já citado, a pesquisa bibliográfica realizada nesta dissertação e a experiência adquirida na execução de atividades de planejamento mostram que, em geral, nesta área de engenharia das empresas, a análise do afundamento de tensão é pouco praticada pelas concessionárias de energia.

Uma das razões desta realidade é que a avaliação integrada de critérios de expansão do sistema com parâmetros que caracterizam o afundamento de tensão pode se tornar complexa para os planejadores. Adicionalmente, não existe uma legislação específica até o momento, que estabeleça padrões de desempenho do sistema em relação aos afundamentos de tensão. Não há, também, uma referência nacional de custos associados aos afundamentos de tensão a ser incluída nas análises econômicas dos estudos de planejamento.

Assim, verifica-se uma carência de procedimentos aplicáveis à área de planejamento da expansão abordando os afundamentos de tensão. Um dos motivadores dessa dissertação é dar suporte aos planejadores, no sentido de suprir esta carência.

2.2. DEFINIÇÕES

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

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

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

A Figura 2.1 mostra um gráfico de onda de tensão no tempo, indicado um afundamento de tensão durante um determinado instante de tempo.

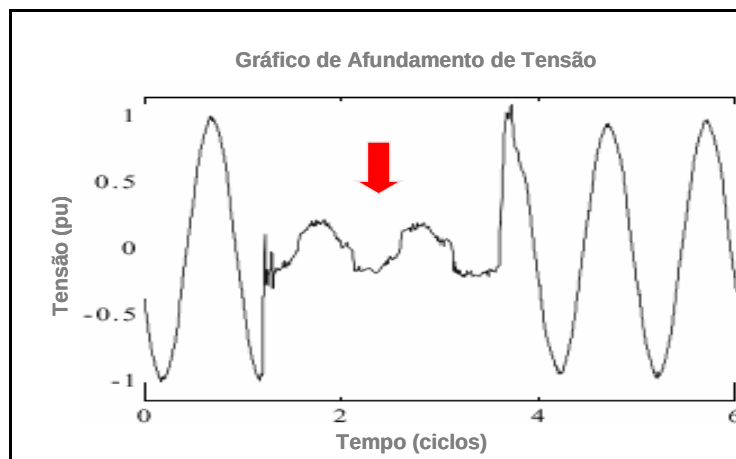


Figura 2.1 – Gráfico Tensão x Tempo - Afundamento de Tensão

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

Nesta dissertação, a definição para afundamento de tensão a ser adotada é a do IEEE 1159-1995. Esta é recomendada internacionalmente pelo IEEE *Standard* 493-1997 [IEEE, 1997]. Quanto à classificação, o enfoque é dado aos Afundamentos Instantâneos de Tensão e aos Afundamentos Momentâneos de Tensão, pois são os mais freqüentes e provocados, na sua maioria, por curto-circuitos no SEP.

2.3. NORMALIZAÇÃO APLICÁVEL

Neste item é apresentada uma síntese das principais normas e documentos que fazem referência aos afundamentos de tensão, incluindo a legislação

internacional e a legislação nacional.

Legislação Internacional

- IEEE Standard 1159 – 1995, “*IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*”: O objetivo desta norma é auxiliar na monitoração e na interpretação dos valores obtidos de medições de distúrbios eletromagnéticos que afetam a qualidade da energia elétrica. Esta norma define cada tipo de distúrbio elétrico em função de suas características, tais como: faixas de frequência, duração e intensidade da magnitude da tensão. [IEEE, 1995a]
- IEEE Standard 446 – 1995, “*IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications*”. Nesta norma, o conceito de afundamento de tensão é apresentado dando ênfase à sensibilidade de equipamentos e impactos de partida de motores nas características do fenômeno. [IEEE, 1995b]
- IEEE Standard 1250 – 1995, “*IEEE Guide for Service to Equipment Sensitive to Momentary Voltage Disturbances*”. Esta norma apresenta as principais causas, sensibilidade de equipamentos eletrônicos e métodos de mitigação de afundamentos de tensão. [IEEE, 1995c]
- IEEE Standard 493 – 1997, “*IEEE Recommended Practice for The Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems*”. Nesta norma, o afundamento de tensão é abordado propondo-se metodologias para calcular seus parâmetros e realizar estudos prospectivos do fenômeno. [IEEE, 1997]
- IEEE Standard 1346 – 1998, “*IEEE Recommended Practice for Evaluating Electric Power System Compatibility with Electronic Process Equipment*”. Esta norma apresenta uma proposta de metodologia para a realização de análise técnica e financeira relativa à compatibilidade entre os processos industriais e o sistema elétrico de potência. Um método

para se avaliar a compatibilidade dos afundamentos de tensão é apresentado, abordando aspectos técnicos e econômicos. [IEEE, 1998a]

- IEC 61000-2-1 (1990), *“Voltage Dips and Short Supply Interruption”*. Esta norma descreve o afundamento de tensão, considerando a sua amplitude e duração, além de apresentar uma análise de causas e efeitos do fenômeno sobre cargas sensíveis. [IEC, 1990a]
- IEC 61000-2-4 (1990), *“Environment – Compatibility Levels in Industrial Plants for Low Frequency Conducted Disturbance”*. Esta norma define três classes de ambientes eletromagnéticos, sendo propostos, para cada uma, valores de referência de afundamentos de tensão. [IEC, 1990b]
- IEC 61000-2-8 (2002), *“Voltage Dips and Short Interruption on Public Electric Power Supply Systems with Statistical Measurement Results”*. Esta norma descreve o afundamento de tensão em relação às suas causas e efeitos, cálculos de amplitude e métodos de medição e mitigação. [IEC, 2002]
- IEC 61000-4-34 (2005), *“Testing and Measuring Techniques – Voltage Dips, Short Interruptions and Voltage Variation Immunity Tests”*. Esta norma propõe técnicas de teste e medição quanto à imunidade dos equipamentos frente aos afundamentos de tensão, interrupções e variações de tensão. [IEC, 2005]
- SEMI F47-0706 – *“Specification for Semiconductor Processing Equipment Voltage Sag Immunity”*. Esta norma apresenta a curva SEMI-F47, que indica o nível de sensibilidade frente a afundamentos de tensão que devem possuir os processos industriais que fabricam semicondutores. [SEMI, 2006]
- ITI - *Information Technology Industry Council*. Este comitê internacional publicou nota técnica que apresentava a curva do CBEMA - *Computer and Business Equipment Manufacturers Association*, antigo ITI, proposta

para caracterizar a sensibilidade de computadores “*mainframe*”. A partir de 1994, a curva CBEMA evolui para a curva ITIC, do atual ITI, empregada atualmente para outros componentes eletro-eletrônicos microprocessados. [ITI, 2000]

Legislação Nacional

Em relação à legislação do setor elétrico nacional, a ANEEL possui as seguintes resoluções que abordam a qualidade da energia e, portanto, se relacionam direta ou indiretamente com os afundamentos de tensão:

- Resolução ANEEL 456/2000: Estabelece as condições gerais de fornecimento de energia elétrica a serem observadas tanto pelas concessionárias quanto pelos consumidores. [ANEEL, 2000a]

É importante destacar que a resolução não estabelece padrões de desempenho do sistema elétrico para os afundamentos de tensão, mas salienta que é de responsabilidade da concessionária a prestação de serviço adequado a todos os consumidores.

- Resolução ANEEL 281/1999: Estabelece as condições gerais de contratação do acesso ao sistema elétrico, definindo normas e padrões técnicos de caráter geral da concessionária que os acessantes devem observar para se conectarem no sistema elétrico. [ANEEL, 1999]

Verifica-se que o afundamento de tensão não é diretamente abordado nesta resolução. Entretanto, as concessionárias de energia devem estar atentas quanto à conexão de cargas que podem provocar afundamentos de tensão no sistema elétrico. A partir do momento em que a concessionária concede a conexão de uma carga que esteja provocando o distúrbio no sistema, ela se torna responsável pelos eventuais problemas causados pelo mesmo.

- Resolução ANEEL 061/2004: Estabelece as disposições relativas ao ressarcimento de danos elétricos em equipamentos elétricos instalados em unidades consumidoras, causados por perturbação ocorrida no sistema elétrico. [ANEEL, 2004]

Vale destacar que esta resolução não se aplica aos consumidores atendidos com tensão acima de 2,3 kV. O afundamento de tensão não é diretamente abordado na resolução. Entretanto, chama a atenção das concessionárias de energia a preocupação da ANEEL quanto ao cumprimento da prestação de serviço adequado das mesmas aos seus consumidores. Portanto, um sistema elétrico com ocorrências constantes de afundamentos de tensão, que esteja causando exclusivamente dano no equipamento do consumidor, representa para a concessionária um risco a mais de perdas de receitas.

Observa-se que as legislações nacionais citadas anteriormente abordam questões que remetem para a importância da QEE, de uma maneira geral. Os documentos da legislação que abordam diretamente os afundamentos de tensão são os Procedimentos de Rede, do ONS, e os Procedimentos de Distribuição – Prodist, da ANEEL, a seguir comentados.

- **ANEEL** - O afundamento de tensão está sendo descrito e regulamentado pela ANEEL, através do Módulo 8 do Prodist. Até a presente data, não estão definidos padrões e indicadores de desempenho do sistema elétrico de distribuição relativos aos afundamentos de tensão. [ANEEL, 2007b]
- **ONS** - No Submódulo 2.2 dos Procedimentos de Rede do ONS estão definidas as Variações de Tensão de Curta Duração – VTCD, sendo os afundamentos de tensão classificados como um tipo de VTCD. No Submódulo 2.2, onde estão descritos os indicadores e os padrões de desempenho do SIN, ainda não estão definidos padrões de desempenho

relacionados aos afundamentos de tensão, segundo recomenda a experiência internacional. [ONS, 2002a]

No Submódulo 2.8 dos Procedimentos de Rede do ONS, estão definidas as bases conceituais e os procedimentos para a gerência dos indicadores de desempenho da Rede Básica. Em relação aos afundamentos de tensão, está em implantação o acompanhamento do desempenho dos pontos de monitoração, buscando a identificação de pontos com desempenho atípico a tal fenômeno. [ONS, 2002b]

2.4. PARÂMETROS DE ANÁLISE DO AFUNDAMENTO DE TENSÃO

Quando se deseja realizar um estudo detalhado do impacto do afundamento de tensão sobre uma carga específica, é importante analisar a forma de onda do afundamento de tensão no tempo, mostrando seus eventuais desequilíbrios de módulo de fase e assimetrias angulares. [Bollen, 1997].

Para os propósitos de planejamento, admite-se nesta dissertação que o afundamento de tensão tenha uma forma de onda retangular, e que os parâmetros que o caracterizam são a **magnitude**, a **duração**, e a **frequência** de ocorrência. São desconsiderados os desequilíbrios dos módulos de fase, a assimetria angular das fases e o comportamento dinâmico do fenômeno. Este tipo de caracterização é internacionalmente adotado [Carvalho Filho, 2000], [IEEE, 1997], [ONS, 2001], e atende de forma satisfatória as necessidades de planejamento.

Observa-se no entanto que, quando há a necessidade de uma avaliação mais precisa dos impactos dos afundamentos de tensão em uma carga, este tipo de caracterização possui algumas limitações, pois a sensibilidade da carga não é plenamente caracterizada somente pela intensidade e duração [Conrad, 1997]. Em um estudo mais específico de um consumidor, pode ser necessário conhecer os eventuais desequilíbrios dos módulos de fase, assimetrias angulares e aspectos dinâmicos dos afundamentos. Este esforço, muitas vezes, requer detalhamentos cujos resultados geralmente ultrapassam as necessidades do planejamento.

Além da escolha dos tipos de parâmetro, devem ser definidos os valores a serem adotados para os mesmos, uma vez que, para afundamentos de tensão monofásicos ou bifásicos, cada fase poderá apresentar uma magnitude e uma duração diferente. Abordando essa questão, no âmbito internacional existem atualmente três metodologias clássicas de caracterização dos afundamentos de tensão, estabelecendo indicadores, todos eles obtidos a partir de dados de medição. A primeira metodologia é proposta pela UNIPED/DISDIP [Brooks, 1999], [ONS, 2001] a segunda desenvolvida pelo NER/NRS [NRS, 1996] e a terceira elaborada pela EPRI/ELECTROTEK [Brooks, 2000], [ONS, 2001], [Sabin, 2001].

As principais características das metodologias citadas estão a seguir descritas de forma resumida, fugindo do escopo deste trabalho o seu detalhamento:

- As três metodologias utilizam valores de medição de afundamentos de tensão, e não valores de simulação;
- As três metodologias utilizam os parâmetros amplitude e duração para a caracterização do afundamento de tensão que, somados à frequência de ocorrência, compõem indicadores de desempenho do sistema;
- Nas três metodologias, a amplitude do afundamento de tensão é obtida a partir da fase que atingiu o menor valor de tensão. Na metodologia da UNIPED/DISDIP, o valor da amplitude do afundamento de tensão é dado em valores percentuais tomados em relação à tensão nominal do sistema. Já a metodologia da NER/NRS-048 considera o valor da amplitude do afundamento de tensão em valores percentuais, mas tomados ou em relação à tensão nominal ou em relação à tensão operativa. Diferentemente, a EPRI/ELECTROTEK define a amplitude do afundamento de tensão como sendo o valor da tensão mínima remanescente.
- Em relação à duração do afundamento de tensão, existem algumas diferenças entre as metodologias. A UNIPED/DISDIP mede o tempo do afundamento de tensão como sendo o período decorrido a partir do instante em que a tensão de uma das fases é igual ou inferior ao limite

de 90% da tensão nominal, até o instante em que a tensão de nenhuma das fases seja inferior a este limite. Já a metodologia da NER/NRS-048 considera o tempo do afundamento de tensão como sendo a duração associada à pior fase afetada em cada evento medido. Por outro lado, a EPRI/ELECTROTECK define a duração do afundamento de tensão como sendo o período de tempo em que a tensão RMS viola um limite específico.

- Os indicadores das três metodologias apresentam limitações, pois adotam os parâmetros amplitude, duração e frequência, os quais não refletem plenamente os prováveis efeitos do afundamento de tensão sobre as cargas elétricas sensíveis;
- As três metodologias refletem o desempenho visto pelo lado do sistema elétrico e são internacionalmente aceitas e empregadas para este fim.

Para os propósitos de planejamento, conforme aborda este trabalho, a escolha de uma determinada metodologia não faria diferença nos valores obtidos de amplitude e tempo do afundamento de tensão. Isto se deve ao fato de que está sendo considerado o formato retangular do valor RMS da amplitude do afundamento de tensão. Além disto, são adotadas nas simulações as faltas trifásicas, que geram afundamentos de tensão idênticos nas três fases do ponto de vista de amplitude e tempo, e as faltas monofásicas, onde apenas a fase que apresenta a menor amplitude é analisada.

Este trabalho adota a metodologia EPRI/ELECTROTEK, adequada para a abordagem dos afundamentos de tensão nos estudos de planejamento.

2.5. ORIGEM DOS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

Os afundamentos de tensão no sistema elétrico são provocados na maioria das vezes por curto-circuitos [Ayello, 1999], [Conrad, 1991], [Ortmeyer, 1996], que por sua vez são causados, principalmente, pela ação das descargas atmosféricas [Visacro, 2005]. Partida de motores de grande porte e

energização de transformadores também causam afundamentos de tensão. [Bollen, 1994], [Dugan, 1996]

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

Conforme citado, as faltas em LT aéreas ocorrem, principalmente, devido à incidência de descargas atmosféricas. Portanto, pode-se deduzir que a ocorrência de afundamentos de tensão está fortemente correlacionada com a densidade de descargas atmosféricas da região onde as LT aéreas se encontram instaladas. No entanto, é válido lembrar que nem todas as descargas atmosféricas resultam em curto-circuitos no sistema e, conseqüentemente, em afundamentos de tensão. Outras causas de ocorrência de curto-circuitos são as queimadas em plantações, vendavais, contatos por animais e aves, contaminação de isoladores, falhas humanas, etc.

Quando da ocorrência do curto-circuito, o afundamento de tensão transcorre durante o tempo de permanência da falta, ou seja, desde o instante inicial do defeito até sua completa eliminação.

2.6. VARIÁVEIS DE INFLUÊNCIA

A análise dos afundamentos de tensão pode ser considerada complexa, pois envolve uma diversidade de fatores aleatórios, imprecisos, que afetam as suas características [Bollen 2000], [Carvalho Filho, 2000], [Fonseca, 1998], [Leborgne, 2003], [Noronha, 1999], [Oliveira, 2004], [Soares, 2004]. Dentre eles, citam-se:

- Tipo de falta;
- Localização da falta;
- Resistência de falta;

- Tensão pré-falta;
- Conexão dos transformadores entre o ponto de falta e a carga;
- Desempenho do sistema de proteção;
- Existência de sistemas de religamento;
- Taxas de falta de LT e LD.

As variáveis Tipo de Falta, Localização da Falta, Resistência de Falta, Tensão Pré-Falta, e Taxas de Falhas em LT, conferem uma natureza aleatória dos afundamentos de tensão.

Esta característica de aleatoriedade, incerteza e imprevisibilidade do valor destas variáveis adicionada à dificuldade de se estabelecer a sensibilidade do processo industrial aos afundamentos de tensão, demanda cautela quanto às análises e previsões de desempenho do SEP relativas ao fenômeno.

2.6.1. Tipo de Falta

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

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

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

A título de ilustração, as Tabelas 2.1 e 2.2 apresentam, respectivamente, as estimativas de taxas de falhas em LT utilizadas nos EUA [Conrad, 1991], [IEEE, 1997] e para uma determinada região do Brasil, [Visacro, 2006]. Neste caso admite-se que, ao longo da LT, as faltas são equiprováveis.

Tabela 2.1 – Taxa de Falhas em LT (região dos EUA) [IEEE, 1997]

Nível de Tensão (kV)	Faltas/100km/ano	Fase-Terra	Fase-Fase-Terra	Fase-Fase	Trifásico
345	2,29	91%	7%	1%	1%
230	1,62	81%	16%	1%	1%
138	2,98	73%	17%	6%	4%
69	6,15	65%	22%	7%	6%

Tabela 2.2 – Taxa de Falhas em LT (região do Brasil)

Nível de Tensão	Faltas/100km/ ano
69kV	5,8
161 kV – 138 kV	4,1
230 kV – 345 kV	2,1
500 kV	0,9

Trabalhos da literatura [Visacro, 2006], [Cemig, 1995] apresentam valores semelhantes aos da Tabela 2.2.

2.6.2. Localização da Falta

A localização do ponto de falta no sistema elétrico influencia, significativamente, a análise do impacto dos afundamentos de tensão sobre os consumidores.

Geralmente, as faltas no sistema de transmissão com tensões iguais ou superiores a 230 kV e subtransmissão com tensões inferiores a 230 kV e superiores a 13,8 kV afetam um número maior de consumidores do que as faltas das redes de distribuição urbanas e rurais (tipicamente com tensões $\leq 13,8$ kV). Este fato deve-se, principalmente, às características dos sistemas de transmissão (normalmente malhados) e subtransmissão, que suprem as redes de distribuição.

Os sistemas de distribuição possuem, geralmente, configuração radial, sendo que curto-circuitos nos ramais de 13,8 kV de uma subestação causam impacto com pouca influência sistêmica, afetando apenas os consumidores alimentados pelos ramais a ela adjacentes. Dificilmente provocarão afundamentos

de tensão significativos no sistema de transmissão, principalmente naqueles com elevadas potências de curto-circuito.

2.6.3. Resistência de Falta

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

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

Há poucas referências abordando o assunto. Contudo, valores de resistência de falta da ordem de 1 a 5 Ω são mencionados em [Ortmeyer, 1996] e em [Blackburn, 1987], observando, em casos elevados, valores de até 70 Ω . Existem casos extremos em que os valores da resistência de falta atingem centenas de ohms.

2.6.4. Tensão Pré-Falta

Geralmente, nos estudos de curto-circuito em sistemas elétricos adota-se a tensão pré-falta igual a 1,0 p.u. No entanto, em função das alterações freqüentes da carga do sistema, os valores de tensões nas SE variam constantemente. Sendo assim, esta premissa pode não ser adequada para estudos específicos envolvendo uma determinada carga, incorrendo-se em erros de estimativas de desligamentos.

Em [Milanovic, 2000], são apresentados resultados de simulações que mostram diferenças de até 26% no número esperado de afundamentos para uma carga, quando se utiliza tensão pré-falta diferente de 1p.u. Segundo os autores, a consideração das tensões pré-falta é particularmente importante na análise de sistemas de distribuição, onde os valores das tensões podem ser muito diferentes de 1,0 p.u.

Contudo, no contexto deste trabalho, a consideração do valor de tensão igual a 1 p.u. é adequada, tendo em vista que o objetivo é analisar o desempenho do sistema como um todo, e não prever comportamentos e desempenho de cargas sensíveis.

2.6.5. Conexão dos Transformadores

Na análise e no cálculo dos afundamentos de tensão, o tipo de conexão dos transformadores existentes entre o ponto de falta e o barramento do consumidor influencia, sobremaneira, as características do distúrbio percebido pela carga.

Isto é natural, tendo em vista os afundamentos estarem intimamente relacionados aos curto-circuitos que ocorrem no sistema. O tipo de conexão dos transformadores influencia a circulação da corrente de seqüência zero pela rede. Adicionalmente, algumas ligações introduzem defasamento angular fixo (30°) entre as tensões e correntes dos lados do transformador.

Embora este assunto seja amplamente tratado nos livros básicos de análise de SEP, para os estudos de afundamento de tensão é interessante considerar a forma como os transformadores são agrupados em três categorias em [Bollen, 1997]:

- Primeira: transformadores cujas tensões nas bobinas em um dos enrolamentos são função da diferença fasorial (tensão composta) entre duas tensões aplicadas nas bobinas do outro enrolamento. Esta classe de transformadores, os de conexão $Y-\Delta$, $\Delta-Y$, $Y_{\text{aterrado}}-\Delta$ e $\Delta-Y_{\text{aterrado}}$ ¹, além de filtrar a componente de seqüência zero da tensão de freqüência fundamental, introduz defasamento angular nas componentes de seqüência positiva e negativa;
- Segunda: transformadores que filtram as componentes de seqüência zero da tensão de freqüência fundamental e, geralmente, do ponto de vista construtivo, são fabricados de modo a não introduzir defasamento angular nas demais seqüências, ou seja, são aqueles com conexões $Y-Y$, $\Delta-\Delta$, $Y_{\text{aterrado}}-Y$ e $Y-Y_{\text{aterrado}}$;
- Terceira: transformadores que não filtram as componentes de seqüência

¹ Conexão dos enrolamentos do lado primário e do lado secundário dos transformadores do SEP

zero e, geralmente, devido às mesmas razões citadas anteriormente, não introduzem defasamento angular nas demais seqüências. Pertencem a esta categoria os transformadores com as conexões $Y_{\text{aterrado}}-Y_{\text{aterrado}}$, $Y_{\text{aterrado}}-\Delta-Y_{\text{aterrado}}$.

Verifica-se, assim, que os valores dos afundamentos de tensão, vistos pela carga, em decorrência de uma falta no sistema elétrico, dependem da forma de conexão do transformador.

2.6.6. Sistema de Proteção

A duração dos afundamentos de tensão depende diretamente do tempo de atuação do sistema de proteção, que é função do tempo de sensibilização e de atuação dos relés, somado ao tempo de abertura e extinção de arco dos disjuntores. O tempo de atuação dos relés é função da localização da falta no sistema elétrico, das características de resposta dos relés (sobrecorrente, distância, tempo definido) e dos ajustes implantados para se obter a seletividade desejada [IEEE, 1998b], [IEEE, 1998c]. Por sua vez, o tempo de abertura e de extinção da corrente de curto-circuito dos disjuntores é função das características construtivas destes equipamentos.

- **Sistemas de Transmissão**

Nos sistemas de transmissão (230 kV, 345 kV, 440 kV, 500 kV, 750 kV), as LT são tipicamente protegidas por meio de relés de distância, associados ou não às lógicas de teleproteção [Ayello, 1999] e [ONS, 2002c]. Quando a teleproteção não é aplicada, utilizam-se proteções de distância com duas ou três zonas.

A primeira zona é, normalmente, ajustada para atuar instantaneamente em defeitos localizados em até 85% do comprimento da LT. A segunda zona é ajustada com temporização intencional, para proteger o trecho restante da própria LT e também para oferecer proteção de retaguarda para a LT subsequente.

Como desvantagem, ressalta-se que a aplicação da segunda zona de proteção introduz um retardo no tempo de atuação da proteção para defeitos

próximos às extremidades da LT, não cobertos pela proteção de primeira zona. Outra particularidade é que, para estes pontos de defeito, os terminais da LT são abertos em instantes diferentes.

Conforme apresentado nos procedimentos de rede do ONS, submódulo 2.5 [ONS, 2002c], o tempo de atuação das proteções das LT de 750 kV, 500 kV, 440 kV e 345 kV, incluindo o tempo de abertura do disjuntor, não deve exceder a 100 milissegundos. Para as LT de 230 kV, este tempo não deve exceder a 150 milissegundos [ONS, 2002c].

- **Sistemas de Subtransmissão**

Nestes sistemas elétricos, onde normalmente se utiliza o sistema de proteção convencional (sem teleproteção), os tempos de atuação da proteção para faltas ao longo da LT podem variar de 150 milissegundos até 900 milissegundos. Tradicionalmente, são utilizados os seguintes esquemas:

- Sobrecorrente de fase e de neutro (50/51 + 50/51N), para LT radiais que alimentam SE de distribuição, SE industriais e, também, no lado da fonte em circuitos paralelos;
- Direcional de fase e de neutro (67 e 67N) no lado da carga, quando os circuitos são paralelos e, também, em circuitos operando com configuração em anel;
- Distância de fase e de neutro (21/21N) em circuitos paralelos e em anel de LT de 138 kV. Em LT de 69 e 88 kV, estes esquemas são raramente utilizados.

- **Sistemas de Distribuição**

Nestes sistemas, as concessionárias adotam, geralmente, relés de sobrecorrente de fase e de neutro. Nos alimentadores primários, normalmente circuitos trifásicos de 13,8 kV, são utilizados religadores e, nos ramais de distribuição, em geral são utilizadas chaves seccionadoras - fusíveis.

Dependendo do tipo de equipamento utilizado (fusível, religador, disjuntor),

os tempos de eliminação de faltas do sistema de distribuição de 13,8 kV podem variar entre 1 ciclo de 60 Hz a 1 segundo [IEEE, 1998b], [IEEE, 1998c].

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

De uma maneira geral, especialistas do setor elétrico preferem considerar que os tempos de atuação das proteções dependem muito da filosofia de cada empresa de energia e, também, do esquema de proteção adotado.

A título de exemplificação, a Tabela 2.3 apresenta tempos típicos de atuação das proteções dos sistemas elétricos de potência, dependendo do tipo de proteção utilizada.

Tabela 2.3 – Tempos Típicos de Atuação da Proteção

Tipo de Proteção	Tempo de Atuação (ms)
Teleproteção	85 ou 110
Fio Piloto	110
Sobrecorrente	300
Distância (alcance de 90%)	1ª Zona: 150 2ª Zona: 550

Os valores da Tabela 2.3 são citados nas referências [Carvalho Filho, 2000], [Fonseca, 1998], [Leborgne, 2003], [Noronha, 1999], [Oliveira, 2004], [Soares, 2004], [IEEE, 1998b], [IEEE, 1998c].

2.6.7. Sistemas de Religamento

A frequência de ocorrência de afundamentos de tensão está intimamente relacionada com a existência de sistema de religamento no sistema de proteção e com a origem dos curto-circuitos no sistema elétrico.

Do ponto de vista de quantificação, há duas metodologias para contabilizar os afundamentos de tensão quando ocorrem religamentos [IEEE, 1997].

Uma das metodologias considera todos os afundamentos de tensão registrados, incluindo o primeiro, do próprio curto-circuito, e os subseqüentes, dos religamentos antes da falta ser eliminada, resultando em um número sobreestimado de afundamentos de tensão.

Outra metodologia consiste em utilizar o procedimento conhecido por agregação temporal [IEEE, 1997]. A agregação temporal consiste em definir uma janela de tempo pré-definida, ou seja, a partir da ocorrência do primeiro evento, todos os que o sucederem dentro daquele intervalo de tempo pré-estabelecido são considerados como um mesmo evento. Embora o intervalo de tempo possa ser escolhido arbitrariamente, a norma IEEE 1159-1995 [IEEE, 1995] recomenda o intervalo de um minuto.

O uso da metodologia de agregação temporal é útil na maioria dos casos onde os equipamentos e processos industriais são desligados durante a ocorrência do primeiro evento registrado. Uma vez que o processo parou, os eventos subseqüentes não causam nenhum efeito sobre a carga. Conseqüentemente, a contabilização de todos os eventos leva a um erro estatístico na avaliação do desempenho do suprimento da concessionária, sobreestimando o número de ocorrências de afundamentos de tensão.

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

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

2.7. SENSIBILIDADE DE CARGAS E PROCESSOS INDUSTRIAIS

2.7.1. Efeitos Diversos

O impacto dos afundamentos de tensão sobre os consumidores industriais ocorre de forma diferenciada em função da sensibilidade dos equipamentos eletro-eletrônicos instalados, das particularidades inerentes a cada processo industrial (indústrias têxteis, alumínio, plástico, cimento, papel, metalúrgica, siderúrgica, química, etc.) e também dos sistemas de controle de processo envolvidos. Logo, pode-se afirmar que a sensibilidade da carga do consumidor é uma combinação da sensibilidade dos equipamentos eletro-eletrônicos instalados com a sensibilidade do processo industrial [EPRI, 2001].

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

Por outro lado, o efeito dos afundamentos de tensão em consumidores industriais, dá-se sob a forma de interrupção parcial ou total de processos produtivos, com os conseqüentes prejuízos associados à parada de produção, perda de produtividade, perda de insumos, reparo e reposição de equipamentos danificados [EPRI, 2001], [Heine, 2005], [Moreira, 2004]. Os efeitos dos afundamentos de tensão sobre os principais equipamentos eletro-eletrônicos utilizados nas indústrias manifestam-se sob a forma de:

- Desligamento de acionamentos de velocidade variável (AVV) devido à atuação de dispositivos de proteção associados que promovem o bloqueio do disparo de tiristores ou até mesmo o desligamento imediato da fonte de alimentação;
- Variações de velocidade e/ou torque dos motores de Indução, comprometendo a qualidade do produto ou ocasionando paradas de produção;
- Desatracamento das bobinas de contadores e relés auxiliares, causando parada de processos industriais;

- Perda de programação de Controlador Lógico Programável - CLP, com conseqüente descontrole do processo industrial;
- Desligamento de lâmpadas de descarga, como as de vapor de mercúrio, que levam cerca de alguns minutos para reacenderem;
- Falhas de comutação em pontes controladas, afetando os disparos dos gatilhos de tiristores, provocando mau funcionamento de cargas;
- Queima de fusíveis e outros componentes, principalmente nos acionamentos Corrente Contínua - CC operando no modo regenerativo;

2.7.2. Curvas CBEMA, ITIC e SEMI-F47

Com relação à sensibilidade dos equipamentos, três curvas se apresentam: CBEMA (*Computer and Business Equipment Manufactures Association*), ITIC (*Information Technology Industry Curve*) e SEMI-F47 (*Semiconductor Equipment and Materials International*). Nestas curvas, o eixo das ordenadas representa a amplitude da tensão em RMS e o eixo das abscissas indica o tempo de duração do afundamento de tensão.

A curva CBEMA [ITI, 2000], apesar de ter sido originalmente proposta para caracterizar a sensibilidade de computadores *mainframe*, atualmente também tem sido utilizada para outros componentes eletro-eletrônicos como microcomputadores, equipamentos microprocessados, etc. A Figura 2.1 ilustra tal curva, mostrando três regiões distintas de operação, que representam:

- Região A - região de imunidade, sem possibilidade de falhas ou danos em equipamentos elétricos;
- Região B - região de susceptibilidade, com possibilidade de ruptura da isolamento dos equipamentos (perda de *hardware*), devido à ocorrência de sobretensões transitórias e elevações de tensão;
- Região C - região de susceptibilidade, com possibilidade de parada de operação dos equipamentos, em virtude da ocorrência de afundamentos de tensão, juntamente com as interrupções momentâneas.

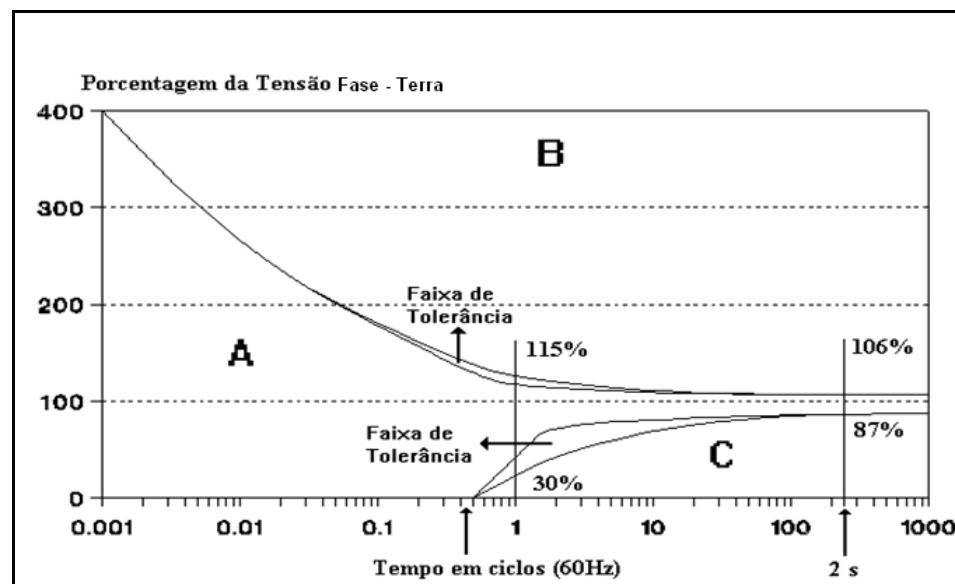


Figura 2.2 - Curva de Tolerância CBEMA [ITI, 2000]

Em 1994, a curva CBEMA foi modificada para melhor caracterizar a sensibilidade dos computadores e demais equipamentos a fim de acomodar, mais adequadamente, a diversidade dos modernos dispositivos eletrônicos. Esta curva é a ITIC [ITI, 2000], apresentada na Figura 2.3, onde as regiões A, B e C representam as mesmas situações da curva CBEMA, mostrada na Figura 2.1.

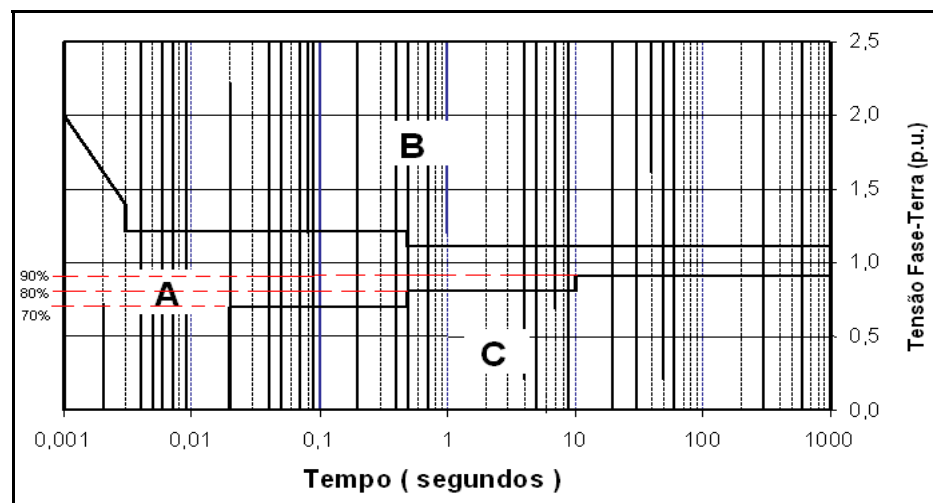


Figura 2.3 - Curva de Tolerância ITIC [ITI, 2000]

Uma outra curva de sensibilidade de equipamentos é apresentada pela *Semiconductor Equipment and Materials International* - SEMI [SEMI, 2006]. A SEMI é uma associação mundial de indústrias produtoras de semicondutores, que

propõe a utilização do documento *Standard SEMI F47 - 0706*. Neste documento, são definidos padrões de tolerância frente a afundamentos de tensão para processos industriais onde são fabricados equipamentos semicondutores. A curva de sensibilidade proposta pela *SEMI F47* é mostrada na Figura 2.3.

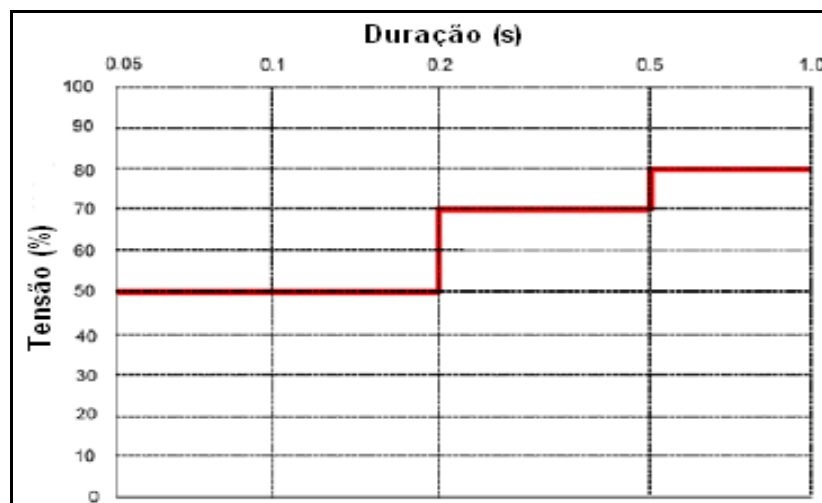


Figura 2.4 - Curva de Tolerância SEMI F-47 [SEMI, 2006]

Assim como nas curvas CBEMA e ITIC, os afundamentos de tensão localizados na região abaixo da curva SEMI-F47 provocam mau funcionamento de equipamentos. A região acima da curva é a área de imunidade, onde os afundamentos de tensão não provocam falhas de operação de equipamentos.

Observa-se, nas curvas SEMI-F47, CBEMA e ITIC que, à medida que a duração do afundamento de tensão aumenta, menor é a amplitude necessária para não provocar desligamentos de equipamentos.

Em função de sua alta sensibilidade em relação aos afundamentos de tensão e freqüente aplicação atual nas indústrias em importantes processos de produção, merecem destaques os AVV, contadores e motores de indução.

AVV – Acionamentos de Velocidade Variável

Geralmente, a sensibilidade dos equipamentos é representada por dois parâmetros (magnitude e duração) no plano cartesiano. Assim, a sensibilidade dos AVV, como de todos os demais equipamentos eletro-eletrônicos, pode ser

caracterizada por uma região dentro do plano tensão versus tempo, conforme mostra a Figura 2.5, apresentada também em [Carvalho Filho, 2000], [Noronha, 1999].

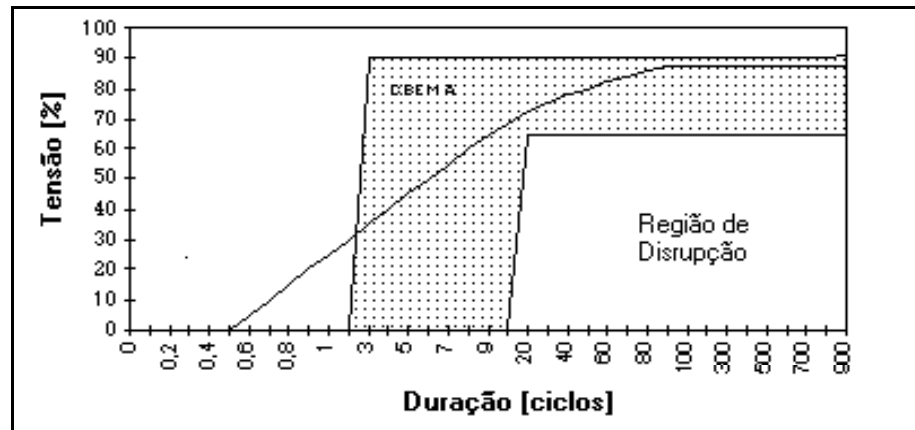


Figura 2.5 - Sensibilidade dos AVV

A região denominada de ruptura é onde o AVV provavelmente deverá falhar, independentemente do modelo ou fabricante; a área sombreada representa a região de incerteza, em que o AVV poderá falhar ou não, e a região à esquerda acima da área sombreada é considerada região normal de operação, ou região de imunidade. Nesta região, o AVV não apresenta sensibilidade aos afundamentos de tensão.

Um fato a ser observado nos AVV é que, geralmente, os acionamentos de corrente contínua - CC são mais sensíveis a afundamentos de tensão que os acionamentos de corrente alternada – CA [Bollen, 1997]. Isto ocorre devido aos seguintes fatores:

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

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

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

Contatores

Em uma pesquisa relatada em [Pohjanheimo, 2002] foram testados contatores de diversas marcas e modelos. A Figura 2.6 mostra as curvas máxima, mínima e média de sensibilidade dos contatores ensaiados para afundamentos com ângulo de início de 0° e 90°, respectivamente.

No gráfico da Figura 2.5, apresentada também em [Pohjanheimo, 2002], estão representadas: a curva do contator mais sensível (a), curva à esquerda; do contator menos sensível (c), curva à direita; e de um contator de sensibilidade média (b).

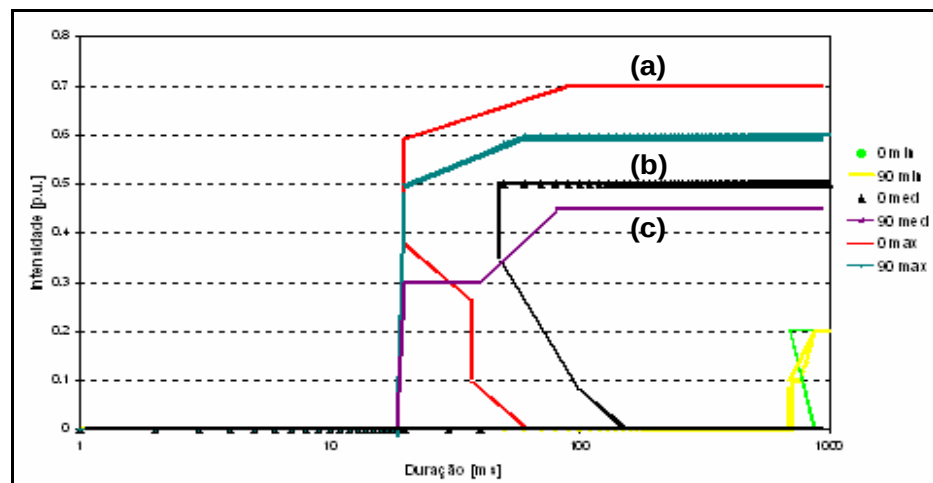


Figura 2.6 – Curva de Sensibilidade de Contatores

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

Motores de Indução

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

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

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

Quando da ocorrência de um curto-circuito no sistema, o motor contribuirá para a corrente de falta com um valor bastante elevado, sofre um torque negativo, podendo produzir um desgaste equivalente a uma partida direta.

As análises registradas em [Das, 1990] mostram que a perda de estabilidade dos motores ocorre para afundamentos severos com duração maior que 500 ms e intensidade da ordem de 0,10 p.u. Para afundamentos menos severos (menor amplitude e duração) os motores podem se manter estáveis, inclusive para eventos cuja duração supera 500 ms.

2.8. IMPACTOS E RISCOS PARA O SISTEMA ELÉTRICO

No item anterior são abordados os impactos dos afundamentos de tensão sobre os consumidores industriais. Neste item, estão tratados alguns impactos dos afundamentos de tensão sobre a segurança do sistema elétrico e riscos associados.

A segurança de um SEP é definida como sendo a habilidade do mesmo, em operação normal, em enfrentar perturbações, sem passar para o estado de emergência [Kundur, 1994], [Vale, 1986].

Segundo a literatura técnica [Vale, 1986], um sistema elétrico encontra-se em estado de emergência quando a totalidade de sua carga é atendida, porém é verificada a presença de violações dos limites técnicos de operação. Tais violações

podem estar relacionadas a limites de tensões nos barramentos, de fluxos de potência nos ramos, de geração de potência ativa e reativa, de estabilidade eletromecânica e de tensão, dentre outros.

O estado de emergência deve ser evitado, pois, nesta situação, muitas vezes é necessário se efetuar ações de corte de carga, implicando, possivelmente, impactos econômicos para a concessionária e para o consumidor.

Os afundamentos de tensão podem se constituir fonte de grande perturbação para a rede, reduzindo a segurança do SEP, ou mesmo levando o sistema para condição de emergência, seguida de perda de grandes blocos de carga.

A relação entre a perda de estabilidade do sistema elétrico e os afundamentos de tensão não é direta, merecendo alguns comentários:

- **Impactos na Estabilidade Angular - Sincronismo:** A estabilidade angular está relacionada à capacidade das máquinas girantes das usinas geradoras manterem o sincronismo sem sair de operação, após a ocorrência de perturbação no sistema elétrico [Kundur, 1994]. Se o afundamento de tensão pode provocar a perda de grandes blocos de carga (perturbação), ele pode ser considerado como um risco a mais para a estabilidade angular das máquinas, comprometendo a segurança do sistema.
- **Impactos na Estabilidade de Tensão:** A estabilidade de tensão está relacionada à capacidade do sistema em manter níveis de tensão adequados após perturbações no sistema [Kundur, 1994]. A perda de grandes blocos de carga (perturbação) causados por afundamentos de tensão, quando resulta em grandes alterações nos fluxos de potência e quedas de tensão das LT, pode impactar na estabilidade de tensão do sistema. Portanto, o afundamento de tensão pode ser visto como um risco a mais para a perda de estabilidade de tensão, e um distúrbio a ser considerado quando se analisa a segurança do sistema.

2.9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os conceitos básicos sobre os afundamentos de tensão apresentados neste capítulo dão suporte aos capítulos subseqüentes.

Do exposto, conclui-se que os principais parâmetros que caracterizam os afundamentos de tensão são a sua intensidade, duração e frequência de ocorrência. Fatores como o tipo de falta, localização de falta, resistência de falha, tensão pré-falta, tipo de conexão dos transformadores, sistema de proteção, configuração do sistema elétrico e sensibilidade da carga, exercem influência sobre estes parâmetros.

As principais metodologias convencionais de análise e tratamento de medições de afundamentos de tensão caracterizam os distúrbios através de dois parâmetros: intensidade (tensão remanescente) e duração. Os métodos tradicionais mais difundidos possuem diferenças significativas quanto às formas de caracterização, de agregação e de contabilização dos eventos, não havendo ainda uma padronização de procedimentos.

A análise dos impactos dos afundamentos de tensão nos processos industriais é complexa, e estudos detalhados, para cada equipamento, devem considerar particularidades dos efeitos sofridos por este diante do fenômeno.

Sob a ótica do sistema elétrico das concessionárias, os afundamentos de tensão, quando causam paradas de processos industriais, implicando perda de grandes blocos de cargas, comprometem a segurança do sistema.

Após a exposição de diversas questões envolvidas com o fenômeno, pode-se perceber a complexidade do seu estudo. Verifica-se que, apesar do afundamento de tensão estar recebendo maior atenção por parte dos agentes do setor elétrico nacional, para que o seu tratamento seja realizado na prática do planejamento, é necessária a elaboração de estratégias específicas a serem incluídas na preparação dos planos. Esta constatação constituiu motivação para a proposta apresentada nesta dissertação.

3. PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO CONSIDERANDO ASPECTOS DE AFUNDAMENTO DE TENSÃO – CONCEITOS BÁSICOS E RECOMENDAÇÕES

3.1. INTRODUÇÃO

Esta dissertação, conforme já salientado, apresenta propostas direcionadas à etapa de Planejamento da Expansão dos sistemas elétricos. Tal etapa se insere em um conjunto de atividades relacionadas aos SEP e, para que não haja dúvidas sobre a aplicação dos procedimentos desenvolvidos neste trabalho, é importante caracterizá-la no contexto do setor elétrico.

Este capítulo introduz o assunto mostrando as diferenças básicas entre as atividades de Expansão e de Operação. Posteriormente, já no contexto do Planejamento da Expansão, são identificadas as chamadas Competências Vitais. Dentre essas competências, destacam-se os Estudos de Planejamento. Nestes estudos, mostram-se essenciais as decisões acerca do Tratamento a Consumidores Sensíveis aos afundamentos.

Esta visão sistêmica de planejamento permitiu a identificação de pontos do processo de decisão nos quais os estudos de afundamento de tensão podem ser incluídos. Tal percepção indicou a abordagem do tema em três esferas:

- Competências Vitais;
- Etapas dos Estudos de Planejamento;
- Tratamento de Consumidores Sensíveis.

Neste trabalho, estas esferas são tratadas de forma diferenciada. Enquanto a inclusão dos estudos de afundamentos de tensão nas Competências Vitais é vista por meio de uma abordagem geral, as demais são tratadas de forma detalhada, direcionadas às equipes de planejamento das empresas de energia.

No nível das Competências Vitais, já neste capítulo, são propostas Recomendações Técnicas para a inclusão de estudos de afundamento de tensão. Com relação às esferas de Estudos de Planejamento e Tratamento de Consumidores Sensíveis, é dedicado o capítulo 5, que apresenta Procedimentos Específicos, para o processo de decisão por parte das equipes de planejamento.

3.2. PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO E DA OPERAÇÃO

Em sua representação simplificada, o SEP pode ser dividido em meios de produção, de transporte e de consumo da energia elétrica, como ilustrado na Figura 3.1.

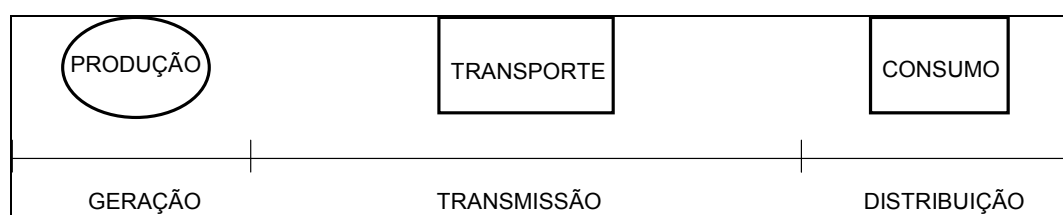


Figura 3.1 – Diagrama Simplificado do SEP

A Produção da Energia Elétrica é constituída em sua grande parte por usinas hidrelétricas, no caso do sistema elétrico brasileiro. O Transporte da Energia Elétrica é formado principalmente pelas LT e SE do sistema de transmissão, conhecido como Rede Básica, [ONS, 2007] e subtransmissão [ANEEL, 2007b]. O Consumo da Energia Elétrica está aqui representado pelo sistema de distribuição de Média Tensão -MT (tipicamente ≤ 1 kV e < 69 kV) e Baixa Tensão - BT (tipicamente ≤ 1 kV) [ANEEL, 2007c].

O Sistema Interligado Nacional - SIN é formado pela Rede Básica e pelos sistemas elétricos regionais, tipicamente com tensão entre 138 kV e 34,5 kV [ONS, 2007]. A Figura 3.2 ilustra o SIN.

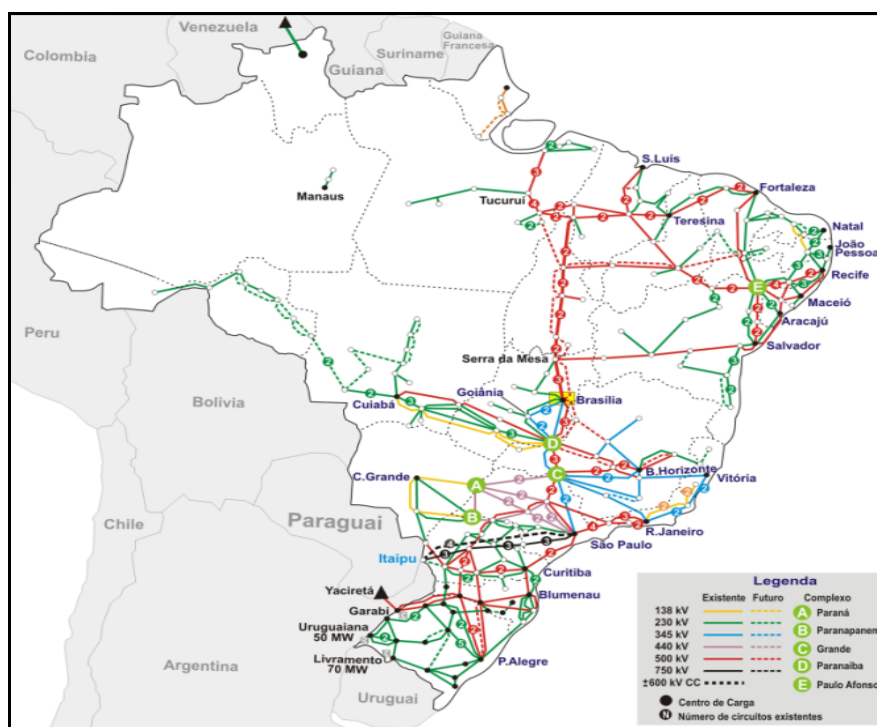


Figura 3.2 – Sistema Interligado Nacional [ONS, 2007]

Para atender o mercado de energia, segundo critérios de qualidade, confiabilidade e economia, o sistema elétrico precisa ser planejado, projetado, construído e operado de forma adequada.

Tradicionalmente, as atividades relacionadas ao SEP são caracterizadas como sendo de Expansão e de Operação. Enquanto a Expansão está relacionada à inclusão de novas instalações no sistema, a Operação é responsável pelo gerenciamento dos recursos já disponíveis. Ambas compreendem etapas de planejamento e de execução dos planos elaborados, conforme ilustra a Figura 3.3.

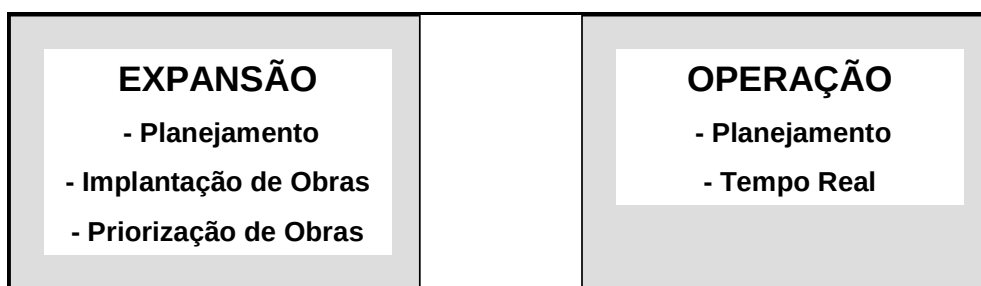


Figura 3.3 – Planejamento e Operação - Atividades Básicas

De forma sucinta, a seguir é apresentada a caracterização das atividades de Expansão e de Operação:

EXPANSÃO

- **Planejamento:** refere-se aos planos de obras e investimentos a serem feitos no SEP, necessários para ampliar o sistema, tornando-o apto a atender o mercado futuro de energia. As atividades envolvem basicamente estudos para definir as obras de expansão do sistema e para a conexão de novas usinas e consumidores, montagem e priorização do programa de obras de expansão.
- **Implantação de Obras:** refere-se à participação nas etapas de implantação das obras planejadas, acompanhamento e suporte aos estudos de viabilidade técnica das obras, além do desenvolvimento de estudos de engenharia e apoio nas especificações de instalações e equipamentos do SEP.
- **Priorização de Obras:** refere-se à realização de ajuste e priorização do programa de expansão, reforços e reformas no SEP, além do acompanhamento da execução do programa de obras para os sistemas de transmissão e subtransmissão.

OPERAÇÃO

- **Planejamento:** etapa onde são estabelecidos os planos de gerenciamento dos recursos de geração e transmissão da energia, além de serem feitas análises de desempenho do sistema existente.
- **Tempo Real:** fundamentalmente, a operação em tempo real compreende as atividades realizadas no instante de operação do sistema elétrico, como medição, controle, supervisão e coordenação das ações de operação.

Do ponto de vista empresarial, a atividade de planejamento da expansão caracteriza-se como uma atividade estratégica, uma vez que as decisões nesta etapa desencadeiam uma série de outras ações que, de uma forma geral, resultam

em necessidades de desembolsos financeiros e, portanto, impactando diretamente no fluxo de caixa e na rentabilidade dos projetos das empresas.

Desta forma, as análises e as decisões de planejamento, relativas ao desempenho do SEP referente aos afundamentos de tensão, requerem cautela por parte dos planejadores, pois as ações no sentido de mitigá-lo, para atender as necessidades dos consumidores, devem proporcionar ao mesmo tempo agregação de valor e melhoria de resultados para a empresa.

Atualmente, os problemas relativos aos afundamentos de tensão têm sido tratados com mais frequência pela área de operação das concessionárias, naturalmente pelo fato de os problemas somente serem identificados e reconhecidos após a reclamação por parte do consumidor, já conectado no sistema em operação. Neste aspecto, as ações das concessionárias, na maioria das vezes, envolvem a coleta de registros de perturbações no sistema, compatibilização destes dados com as informações do consumidor, medições, simulações, e visitas técnicas nas instalações do sistema elétrico.

3.3. AFUNDAMENTOS DE TENSÃO NAS COMPETÊNCIAS DO PLANEJAMENTO - RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se iniciar, de forma sistemática, análises qualitativas de afundamentos de tensão na fase de planejamento do sistema elétrico. O objetivo é se antecipar, prevendo o desempenho do sistema futuro quanto aos afundamentos de tensão.

A Figura 3.4 mostra as competências vitais da área de planejamento, destacando (sombreado) aquelas onde este trabalho recomenda a abordagem do afundamento de tensão.

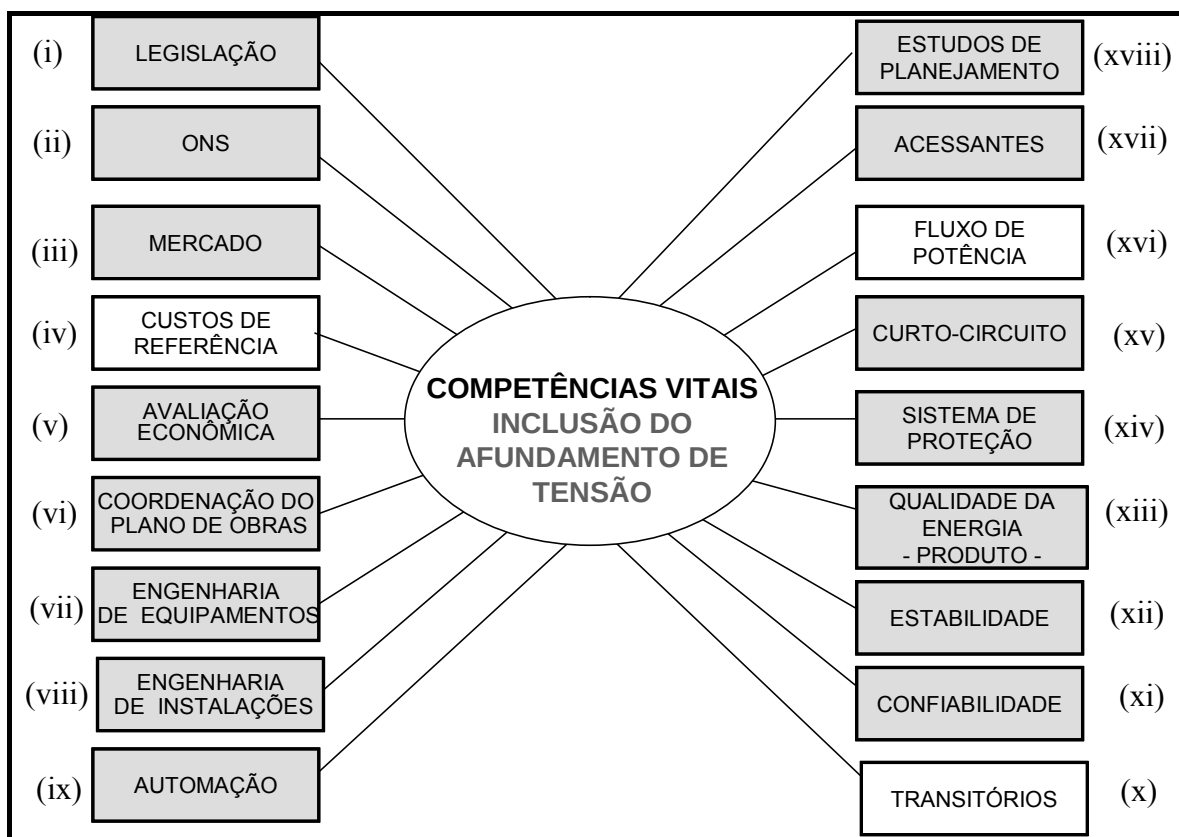


Figura 3.4 – Competências do Planejamento – Inclusão do Afundamento de Tensão

Abaixo, estão definidas as competências vitais referentes às atividades de planejamento e, para cada uma delas, são apresentados comentários relativos aos afundamentos de tensão, propostas e recomendações para o tratamento do fenômeno:

- i) **Legislação Nacional:** o afundamento de tensão está sendo discutido e analisado pela ANEEL, através do Submódulo 8.8 do Prodist. Até a presente data, no Prodist não estão definidos padrões e indicadores relativos aos afundamentos de tensão.

Recomenda-se atenção ao Prodist, tendo em vista que destaque vem sendo dado ao fenômeno. Verifica-se uma tendência quanto ao estabelecimento de padrões de desempenho do sistema de distribuição, sendo as empresas

de energia as responsáveis pelo seu cumprimento, além da possibilidade de existirem, em futuro próximo, negociações bilaterais entre fornecedores e consumidores de energia contemplando o afundamento de tensão.

- ii) **ONS:** Atualmente, o ONS está monitorando e gerenciando pontos do SIN em relação aos afundamentos de tensão, conforme os Submódulos 2.8 e 2.2 dos Procedimentos de Rede. Ainda não estão atribuídos padrões de desempenho dos indicadores de afundamentos de tensão.

Recomenda-se iniciar, de forma sistemática, análises qualitativas de afundamentos de tensão procurando focar os pontos monitorados pelo ONS. O objetivo é facilitar o atendimento de futuras exigências nacionais no âmbito do SIN em relação aos afundamentos de tensão.

- iii) **Mercado:** Consumidores e concessionárias não têm discutido efetivamente sobre a sensibilidade de cargas futuras e sua compatibilidade frente o desempenho do sistema futuro quanto aos afundamentos de tensão.

Recomenda-se iniciar uma discussão mais efetiva entre concessionárias e consumidores quanto à sensibilidade das cargas futuras, principalmente no mercado dos grandes clientes industriais.

O objetivo é identificar, entre os novos clientes, aqueles cujos processos industriais são mais sensíveis aos afundamentos de tensão, orientando medidas na fase de planejamento para evitar ou reduzir problemas futuros com afundamentos de tensão.

Recomenda-se priorizar as discussões a partir dos seguintes tipos de indústrias: siderurgia, metalurgia, petróleo, papel, bioquímica, plástico, borracha, vidro, têxtil e laticínios. Em geral, estes grupos industriais têm

como características comuns o processo de produção contínuo e com material sob altas temperaturas. No estudo do EPRI [EPRI, 2001] a maioria desses setores industriais se destacou pela elevada sensibilidade e significativas paradas de produção devido a distúrbios (interrupções e afundamentos de tensão) no sistema elétrico.

- iv) **Custo de Referência:** Nos custos de referência das obras de expansão não se aplicam avaliações de afundamentos de tensão.
- v) **Avaliação Econômica:** Nas avaliações econômicas dos estudos de planejamento, em geral, os benefícios ou perdas do ponto de vista da concessionária, associados à diminuição ou aumento de perdas de cargas por afundamentos de tensão, não têm sido considerados.

Recomenda-se iniciar, na avaliação econômica, uma análise de sensibilidade dos resultados econômicos para cenários de aumento ou redução de perda de carga provocada por afundamentos de tensão. O objetivo é identificar entre as alternativas de expansão do sistema, aquelas que mais podem evitar perdas de faturamentos provocados por paradas de produção de consumidores devido aos afundamentos de tensão.

- vi) **Coordenação do Plano de Obras:** Entre as atividades da coordenação do plano de obras, estão os ajustes e a priorização de obras, conforme um conjunto de critérios técnicos, de segurança, ambientais, dentre outros. Os afundamentos de tensão não são normalmente considerados para a priorização de obras e investimentos.

Recomenda-se incluir, nos critérios técnicos, os afundamentos de tensão, o que representará mais uma variável de análise para subsidiar a priorização de obras de expansão.

- vii) Engenharia de Equipamentos:** A área de planejamento normalmente não define desempenho de equipamentos a serem instalados no sistema que possam melhorar o desempenho do mesmo em relação aos afundamentos de tensão.

Recomenda-se conhecer e/ou definir padrões de desempenho de taxas de falhas, principalmente das LT que irão compor um conjunto de obras de expansão. Se o desempenho do sistema em relação aos afundamentos de tensão estiver estimado qualitativamente, desde o estudo de planejamento, podem ser sinalizados, às áreas de projetos e construção, requisitos mínimos de taxa de falhas de equipamentos, para que tal desempenho adequado seja garantido.

- viii) Engenharia de Instalações:** Durante a definição do arranjo físico básico das SE e características básicas das LT, os afundamentos de tensão normalmente não tem sido considerados pela área de planejamento.

Recomenda-se, na definição de arranjos físicos das SE, em casos de necessidade, propor arranjos que possibilitem a redução dos tempos de atuação das proteções, o que permite uma redução dos tempos de duração dos eventuais afundamentos de tensão.

Recomenda-se sinalizar às áreas de projeto, as necessidades de desempenho de novas LT quanto às suas taxas de falhas, objetivando mitigar problemas futuros associados à elevada frequência de ocorrência de afundamentos de tensão.

- ix) Automação:** A implantação ou o aumento do nível de automação das SE do sistema elétrico visa, dentre seus objetivos, melhorar a eficiência dos sistemas de proteção, controle e supervisão. Não é comum na área de planejamento considerar os afundamentos de tensão nas avaliações para a

automação do sistema elétrico.

Recomenda-se sinalizar medidas de automação em SE, para melhorar o desempenho do sistema em relação aos afundamentos de tensão, principalmente em relação aos seus parâmetros: duração e frequência de ocorrência.

- x) **Transitórios:** O afundamento de tensão não é considerado um fenômeno transitório [IEEE, 1995]. Neste sentido, não é razoável analisar afundamentos de tensão nos estudos de transitórios do sistema elétrico.

- xi) **Confiabilidade:** A concepção de um sistema elétrico com a garantia de um fornecimento de energia com confiabilidade adequada, ou seja, com um número de interrupções dentro de um limite satisfatório, está atualmente aquém de atender a necessidade atual das cargas de consumidores sensíveis aos afundamentos de tensão [Bollen, 2000], [Moreira, 2004].

Recomenda-se iniciar avaliações qualitativas de afundamentos de tensão, além das análises de confiabilidade (voltada para desligamentos), objetivando mitigar problemas futuros associados à ocorrência de afundamentos de tensão, mesmo em sistema com confiabilidade adequada.

- xii) **Estabilidade:** Conforme já comentado, os afundamentos de tensão, ao serem causas de perdas de grandes blocos de carga, caracterizam uma grande perturbação que pode provocar elevadas alterações dos fluxos de potência no SEP, elevando o risco de perda de estabilidade do sistema.

Recomenda-se considerar esses riscos de perdas de estabilidade do SEP refletindo cortes de carga, a partir de uma análise qualitativa de desempenho da rede em relação aos afundamentos de tensão.

- xiii) **Qualidade da Energia - Produto:** O afundamento de tensão é, atualmente, um dos distúrbios que mais afetam a Qualidade da Energia – Produto, quando se considera a sua frequência de ocorrência e seus impactos econômicos e operacionais.

Recomenda-se realizar análises qualitativas do desempenho do sistema em relação aos afundamentos de tensão, visando melhorias na Qualidade da Energia – Produto.

- xiv) **Sistemas de Proteção:** as filosofias e os sistemas de proteção interferem na duração dos afundamentos de tensão. Nos casos de religamento, podem interferir também na sua amplitude, dependendo da estratégia de religamento adotada. No planejamento, normalmente o afundamento de tensão não é considerado para a definição da filosofia de proteção e para a definição das estratégias de religamento.

Recomenda-se a definição de sistemas de proteção mais rápidos e/ou a instalação de disjuntores no sistema, para que as faltas sejam eliminadas mais rapidamente.

Recomenda-se verificar, a partir de quais terminais das LT, o religamento deve ser feito, para que se tenham menores amplitudes dos afundamentos de tensão provocados por religamentos.

- xv) **Curto-Circuito:** Em análises preliminares sobre afundamentos de tensão, há a tendência de se considerar que será melhor o desempenho do sistema, sempre que a potência de curto-circuito aumenta. No entanto, para uma avaliação adequada, a análise dos outros parâmetros que caracterizam o fenômeno, duração e a frequência de ocorrência, é necessária. Há casos onde o aumento da potência de curto-circuito provoca elevação da amplitude do afundamento de tensão em uma determinada barra do sistema, devido às alterações na configuração da rede existente.

Recomenda-se não fazer estimativas de desempenho do SEP frente aos afundamentos de tensão apenas com a informação da potência de curto-circuito de barras das SE do sistema. As estimativas das amplitudes dos afundamentos de tensão em uma barra de referência estão associadas à topologia da rede e aos pontos de falta simulados, e não somente ao valor da potência de curto-circuito da barra de referência.

- xvi) Fluxo de Potência:** Nos estudos de fluxo de potência não se aplica a abordagem dos afundamentos de tensão.
- xvii) Acessantes:** Segundo a ANEEL [ANEEL, 1998], [ANEEL, 2000a], a partir do momento em que a concessionária toma conhecimento e concede a ligação de acessantes com cargas de caráter perturbador, ela se torna responsável pelos eventuais problemas causados por essas cargas em seu sistema. As alterações do desempenho do sistema quanto aos afundamentos de tensão, geralmente, não são analisadas nos estudos de conexão de novos acessantes no sistema elétrico pelas áreas de planejamento.

Recomenda-se, no caso de existirem alternativas de conexão de acessantes no sistema, técnica e economicamente equivalentes, direcionar a conexão para o ponto do sistema elétrico com o melhor desempenho em relação aos afundamentos de tensão.

Recomenda-se verificar se as novas cargas elétricas, em função das características e da potência, são sensíveis aos afundamentos de tensão, ou até mesmo potenciais causadoras do fenômeno.

Recomenda-se uma análise dos impactos da entrada de novas usinas nos afundamentos de tensão do sistema elétrico, pois podem ser significativos.

xviii) Estudos de Planejamento: A análise de afundamentos de tensão normalmente não é realizada sistematicamente nos estudos de planejamento.

Recomenda-se a inclusão de análises relativas aos afundamentos de tensão nas seguintes etapas dos estudos de planejamento: Projeção de Mercado, Diagnóstico do Sistema Elétrico, Proposta de Alternativas de Expansão e Avaliação Técnica e Econômica das Alternativas de Expansão.

Conforme já mencionado, as estratégias propostas no Capítulo 5 referem-se, principalmente, aos Estudos de Planejamento. Sendo assim, torna-se importante caracterizá-los com clareza, objetivo do próximo item.

3.4. ETAPAS ESPECÍFICAS DOS ESTUDOS DE PLANEJAMENTO

O diagrama da Figura 3.5 apresenta as etapas principais que compõem um Estudo de Planejamento.

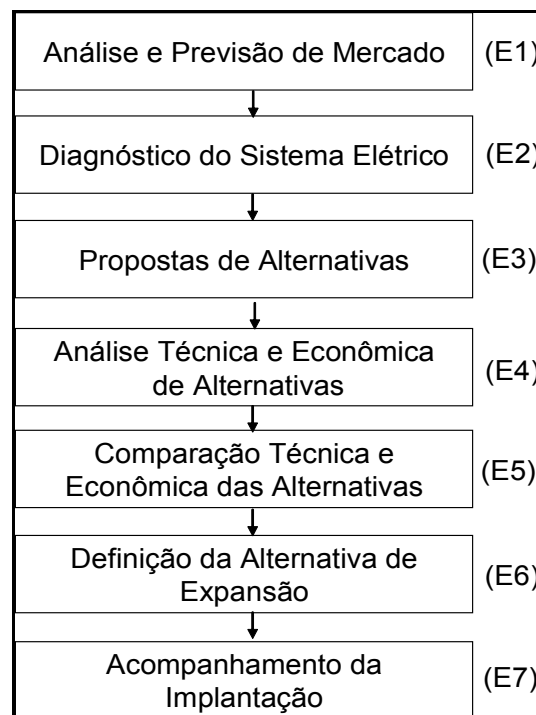


Figura 3.5 – Etapas Básicas de Estudo de Planejamento

(E1) Análise e Previsão de Mercado: Nesta etapa é definido um mercado futuro de energia, normalmente considerando um período de 10 anos, a partir do qual são planejadas e definidas as obras de expansão para viabilizar o seu atendimento.

Consumidores e concessionárias não têm discutido efetivamente, nos estudos de mercado, aspectos de sensibilidade de cargas futuras e desempenho do sistema futuro quanto aos fundamentos de tensão.

(E2) Diagnóstico do Sistema Elétrico: Nesta etapa são identificados os problemas futuros do sistema elétrico, normalmente considerando um período de 10 anos. Tradicionalmente, utilizam-se os seguintes critérios técnicos: níveis de tensão e de carregamento das transformações nas SE, nível de curto-circuito nas SE, nível de carregamento e queda de tensão das LT, perdas ôhmicas no sistema, comportamento de energia reativa. Os estudos realizados nesta etapa compreendem principalmente estudos de fluxo de potência, curto-circuito, confiabilidade, transitórios e estabilidade angular e de tensão.

Identificação de pontos críticos do sistema relacionados aos fundamentos de tensão não são analisados atualmente de forma sistemática pelas áreas de planejamento das empresas.

(E3) Propostas de Alternativas: Nesta etapa são criadas as várias alternativas para a expansão do sistema elétrico. As alternativas de expansão envolvem um conjunto de obras de reforços no sistema para garantir o atendimento do mercado futuro. As principais obras definidas são: novas LT, recapacitação de LT existentes, construção ou ampliação de SE, definição de novas fontes de suprimento, através de novas usinas ou através de interligações de sistemas, instalação de compensação reativa série ou *shunt* e, também, alterações da configuração existente.

Normalmente, como no diagnóstico não são identificados pontos críticos do sistema em relação aos fundamentos de tensão, para a criação das alternativas

de expansão, os afundamentos de tensão não são considerados.

(E4) Análise Técnica e Econômica das Alternativas: Nesta etapa as alternativas de expansão são analisadas técnica e economicamente. Para a avaliação técnica são utilizados os mesmos critérios técnicos e realizados os mesmos estudos da etapa do diagnóstico. O objetivo é apresentar o desempenho técnico das alternativas de expansão. Para a avaliação econômica, geralmente é utilizada a metodologia de fluxo de caixa. As principais variáveis de entrada, representadas como benefícios, são o ganho de mercado de energia, postergação de obras de reforço e a redução de perdas ôhmicas no sistema elétrico. As principais variáveis de entrada, representadas como custos, são os próprios custos da obras de expansão e, em alguns casos, a antecipação de obras de reforços e, também, o aumento das perdas ôhmicas no sistema elétrico.

Um possível aumento ou uma redução de perdas de cargas, associadas à ocorrência de afundamentos de tensão, não é normalmente analisado na avaliação econômica das alternativas de expansão pelas áreas de planejamento.

(E5) Comparação Técnica e Econômica das Alternativas: Nesta etapa as alternativas de expansão são comparadas técnica e economicamente.

Os afundamentos de tensão não têm sido considerados na avaliação técnica e econômica das alternativas e, naturalmente, também não o são nesta etapa de comparação das alternativas.

(E6) Definição da Alternativa de Expansão: A melhor alternativa de expansão é definida nesta etapa. São detalhadas as obras da alternativa, os benefícios técnicos para o sistema e os respectivos benefícios econômicos.

Naturalmente, como normalmente os afundamentos de tensão não são analisados nas etapas anteriores, não existem resultados de desempenho do sistema quanto aos afundamentos de tensão a serem apresentados.

3.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As tarefas de planejamento são elaboradas por diversas equipes que atuam nos vários agentes do setor elétrico, de forma integrada. A identificação das chamadas *Competências Vitais* permite perceber a complexidade deste processo.

No início do desenvolvimento desta dissertação, pretendia-se tratar da análise do afundamento de tensão apenas na competência dos *Estudos de Planejamento*, por ser esta a etapa que primeiro indicou a carência de procedimentos para seu processo de decisão.

Entretanto, o estudo do amplo espectro das atividades envolvidas permitiu detectar outros pontos (competências) onde poderiam ser inseridas análises de afundamento de tensão, buscando um melhor desempenho do SEP. A cada competência vital cabem estudos específicos, elaborados por seus especialistas, quanto à maneira mais adequada para tratar o fenômeno.

Como esta visão sistêmica do problema não se encontra apresentada na literatura, optou-se por registrá-la neste capítulo, sob a forma de *recomendações*. Estas, apesar de possuírem caráter geral, não detalhado, localizam o tema no cenário do planejamento da expansão, favorecendo a implementação de procedimentos aplicáveis.

Com relação às estratégias específicas aos *Estudos de Planejamento*, foco principal deste trabalho, é dedicado o capítulo 5, onde seus procedimentos são detalhados. Estes se baseiam em *análises de sensibilidade* do fenômeno com relação às obras de expansão, tema que se torna, assim, importante para a compreensão da estratégia, constituindo assunto do capítulo 4.

4. AFUNDAMENTOS DE TENSÃO–SENSIBILIDADE ÀS OBRAS DE EXPANSÃO

4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentada uma análise da sensibilidade dos afundamentos de tensão em relação às obras de expansão. Esta análise visa mostrar, de forma qualitativa, o efeito das obras de expansão nos três parâmetros utilizados para avaliação dos afundamentos de tensão: amplitude, duração e frequência de ocorrência.

É importante salientar que, para analisar o impacto de uma obra de expansão nos afundamentos de tensão é necessário definir, primeiramente, o ponto do sistema elétrico que será analisado. Isto porque uma obra pode melhorar o desempenho de um ponto do sistema e piorar o de outros pontos, em relação aos afundamentos.

A avaliação do impacto das obras deve ser feita analisando o sistema como um todo. Não é aconselhável a análise pontual, considerando cada uma das obras de expansão individualmente, mas sim o novo arranjo do sistema elétrico.

As obras típicas geralmente definidas para o reforço e expansão do sistema elétrico, consideradas neste trabalho, são:

- Nova LT;
- Recapacitação de LT;
- Introdução de um novo nível de tensão;
- Nova SE;
- Ampliação de SE;
- Nova Usina;
- Compensação *Shunt*;
- Compensação Série;
- Instalação de Disjuntores.

Neste capítulo, são tratadas as Sensibilidades dos Parâmetros amplitude, frequência e tempo de duração dos afundamentos, com respeito às obras de expansão. Entretanto, merece destaque a sensibilidade da amplitude, cuja investigação inclui uma modelagem analítica para cálculo deste parâmetro e uma análise paramétrica associada.

4.2. SENSIBILIDADE DA DURAÇÃO E DA FREQUÊNCIA

4.2.1. Sensibilidade da Duração do Afundamento de Tensão

As alterações do sistema de proteção, quando reduzem o tempo de eliminação da falta, podem contribuir para a melhoria de desempenho do sistema elétrico em relação aos afundamentos de tensão.

Duas alternativas de estudos desenvolvidos na fase de planejamento possibilitam a redução dos tempos de atuação da proteção:

- **Instalação de Teleproteção:** a teleproteção é utilizada para garantir seletividade, sem a necessidade de retardo proposital quando se empregam as chamadas zonas de proteção dos relés; esta é aplicada com mais frequência nos sistemas de transmissão.
- **Instalação de Disjuntores:** a instalação de disjuntores nas saídas de LT e nas SE geralmente implica a eliminação mais rápida das faltas no sistema elétrico.

A Figura 4.1 ilustra um circuito elétrico, composto por duas usinas G1 e G2, além de três barras de SE, uma barra de SE de consumidor, e seis LT que interligam estes elementos. Está mostrado, também, o disjuntor existente na barra da SE da usina G1 e o disjuntor a ser instalado em um dos terminais da LT1.

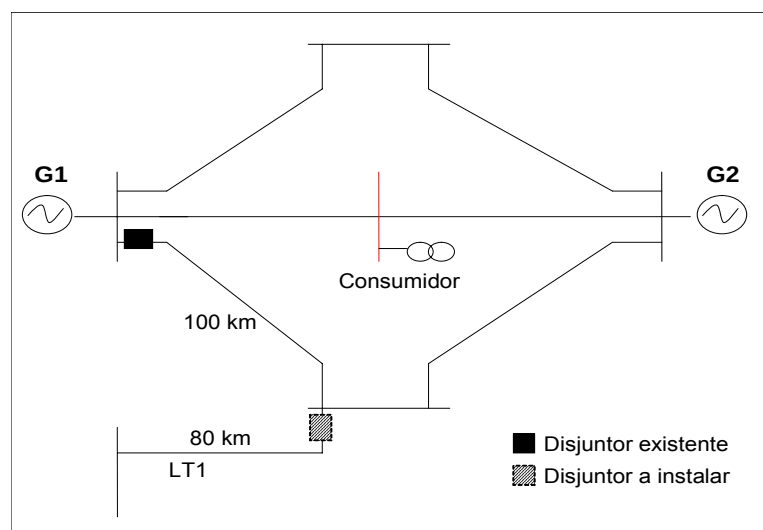


Figura 4.1 – Obras de Expansão - Duração do Afundamento de Tensão

A instalação do disjuntor na LT1 reduz o tempo de eliminação de falhas nesta linha e, conseqüentemente, a duração dos afundamentos de tensão no consumidor, causados por estas falhas. Ressalta-se que a presença do disjuntor, embora possa melhorar a seletividade da proteção e reduzir as interrupções de carga por desligamentos de LT, não altera a frequência e nem a amplitude dos afundamentos de tensão.

Este exemplo ilustra a importância da visão sistêmica para uma análise adequada do impacto das obras de expansão nos afundamentos de tensão do sistema.

4.2.2. Sensibilidade da Frequência de Ocorrência dos Afundamentos de Tensão

As alterações no sistema elétrico, quando reduzem o número de ocorrência de faltas no sistema, contribuem para a melhoria de seu desempenho em relação aos afundamentos de tensão.

É natural considerar que acréscimos de LT ou SE no sistema elétrico elevam a probabilidade de ocorrências de faltas e, conseqüentemente, de afundamentos de tensão. No entanto, é importante fazer algumas considerações quando se analisa a obra de expansão, como um todo, pois esta mesma obra pode

alterar também as amplitudes dos afundamentos de tensão. A seguir são mostradas duas situações que ilustram este fato.

- **Instalação de SE ou LT para Atendimento a Novas Cargas:** Tal análise pode ser feita utilizando o sistema elétrico mostrado na Figura 4.2, que possui os mesmos elementos do sistema da Figura 4.1, acrescidos das obras de expansão (novas LT e SE), destacadas em pontilhado. Conforme já comentado, a presença de disjuntor não altera a frequência e nem a amplitude dos afundamentos de tensão.

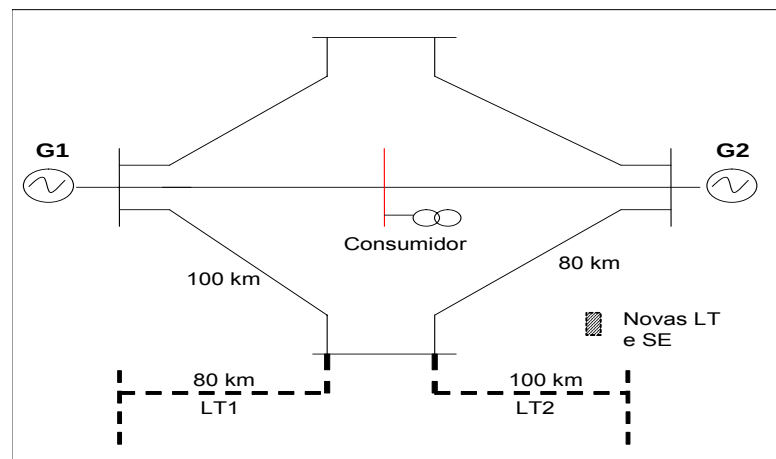


Figura 4.2 – Obras de Expansão - Frequência do Afundamento de Tensão

- **Instalação de SE ou LT para Novas Injeções de Potência:** Considera-se para esta análise o mesmo sistema elétrico mostrado na Figura 4.1, acrescido das obras de expansão (uma usina, duas LT, e uma SE), destacadas em pontilhado, conforme mostrado na Figura 4.3.

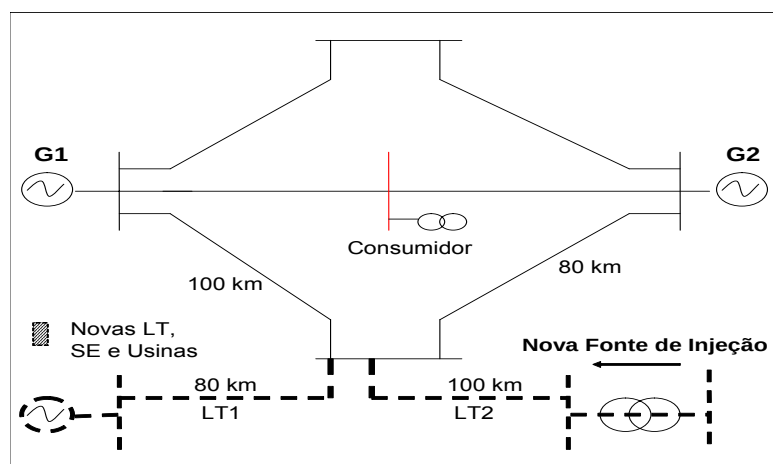


Figura 4.3 – Obras de Expansão - Frequência do Afundamento de Tensão

Nos dois exemplos, as obras de expansão estendem a área de exposição de falta do sistema e, conseqüentemente, aumentam a probabilidade de ocorrências (frequência) dos afundamentos de tensão. No segundo exemplo, a inclusão da fonte implica, também, a variação da amplitude.

Portanto, para se avaliar o desempenho do sistema futuro, com relação ao seu desempenho quanto aos afundamentos, deve ser feito estudo específico, levando-se em consideração os novos valores de amplitude e frequência de ocorrência do fenômeno.

Ressalta-se que, em regiões com densidades de descargas atmosféricas mais elevadas, o impacto das obras de expansão na frequência de ocorrência dos afundamentos de tensão pode ser mais acentuado.

4.3. SENSIBILIDADE DA AMPLITUDE DO AFUNDAMENTO DE TENSÃO

Propõe-se a realização da avaliação da sensibilidade da amplitude dos afundamentos de tensão diante das obras de expansão, para três topologias distintas da rede, considerando faltas trifásicas: sistema radial com uma fonte de injeção; sistema radial com duas fontes de injeção; sistema malhado. Para as faltas assimétricas, esta análise de sensibilidade pode ser utilizada para comparação de resultados.

Em cada ponto do sistema elétrico, a amplitude do afundamento de tensão está diretamente relacionada ao tipo e local do curto-circuito e à topologia do sistema em análise.

A análise de sensibilidade se baseia nas variações das impedâncias da rede impostas pela obra em cada topologia, observando seus efeitos na amplitude dos afundamentos de tensão de uma barra denominada barra de referência.

Tal análise não é trivial e merece ser detalhada, para melhor compreensão dos procedimentos propostos neste trabalho. De fato, a visão do impacto das obras de expansão na alteração da impedância equivalente da rede e, conseqüentemente, no cálculo de curto-circuito e da amplitude do afundamento, é uma das mais significativas contribuições deste trabalho.

Para subsidiar os estudos de sensibilidade da amplitude, este item aborda o tema mostrando os resultados de duas investigações realizadas durante a pesquisa:

- (i) Modelagem analítica para cálculo da amplitude em sistemas radiais, com uma ou mais fontes, e em sistemas malhados;
- (ii) Análise paramétrica da amplitude.

4.3.1. Modelagem analítica para cálculo da amplitude

As equações desenvolvidas neste item se destinam ao cálculo dos afundamentos de tensão, sob a condição de curto-circuitos trifásicos em regime permanente, por meio de equações algébricas lineares. As expressões, da forma como são apresentadas, visam auxiliar nas decisões de planejamento, uma vez que relacionam a amplitude do afundamento com a tensão pré-falta e com as impedâncias da rede.

4.3.1.1. Sistemas Radiais Com Uma Fonte de Injeção

A modelagem desenvolvida mostra-se adequada para aplicações em sistemas de transmissão e distribuição radiais.

Os diagramas das Figuras 4.4 e 4.5 representam um sistema elétrico antes da falta e durante a falta na barra E, a qual provoca o afundamento de tensão na barra D. O valor final da amplitude do afundamento é a superposição dos valores da tensão do ponto de interesse antes e durante a falta.

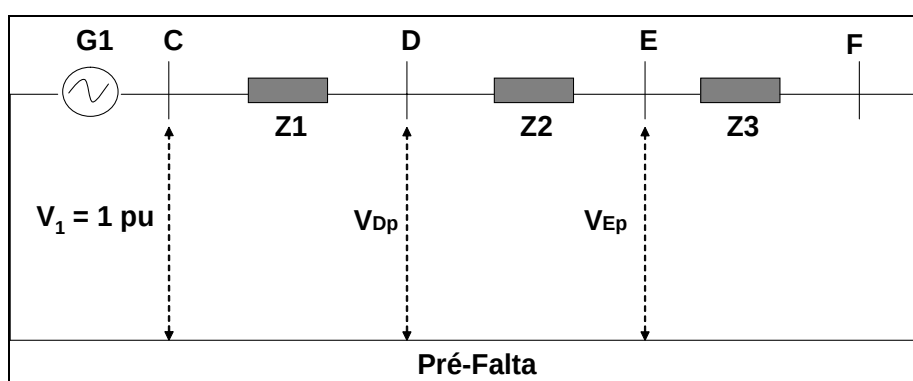


Figura 4.4 – Diagrama do Sistema Radial Uma Fonte – Pré-Falta

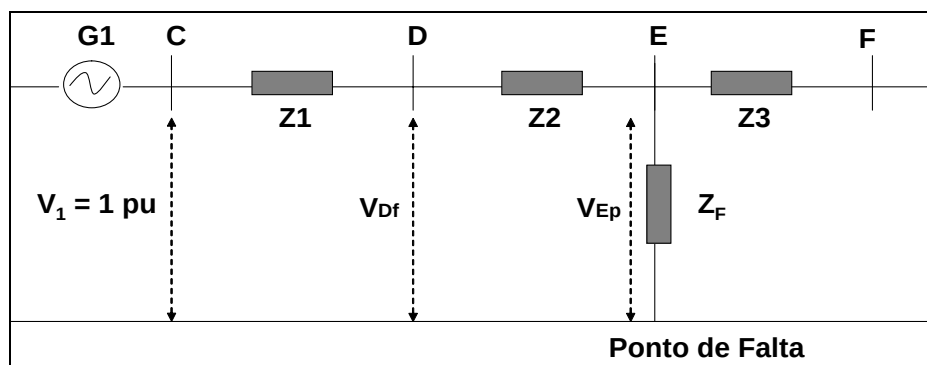


Figura 4.5 – Diagrama do Sistema Radial Uma Fonte – Falta

Para o cálculo da amplitude dos afundamentos de tensão envolvendo a terra, devem ser considerados também os circuitos de seqüência negativa e zero, cujo detalhamento não se aplica aos curtos trifásicos (apenas seqüência positiva).

O cálculo do afundamento de tensão na barra D é realizado a partir da seguinte expressão:

$$V_D = V_{Dp} + V_{Df} \quad (4.1)$$

onde:

- V_D - afundamento de tensão na barra D [p.u.];
- V_{Dp} - tensão pré-falta na barra D [p.u.];
- V_{Df} - tensão de falta na barra D [p.u.].

A tensão pré-falta na barra D, V_{Dp} , é obtida da expressão (4.2) :

$$V_{Dp} = V_1 \cdot \left(1 - \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \right) \quad (4.2)$$

onde:

- V_{Dp} - tensão pré-falta na barra D [p.u.];
- V_1 - tensão na barra fonte do gerador G1 [p.u.];
- Z_1, Z_2, Z_3 - impedâncias de seqüência positiva do circuito [p.u.].

A tensão de falta na barra D, V_{Df} , é obtida da equação (4.3) :

$$V_{Df} = -Z_1 \cdot I_{F1} \quad (4.3)$$

onde:

- V_{Df} - tensão de falta na barra D [p.u.];

- V_1 - tensão na barra fonte do gerador G1 [p.u.];
- Z_1 - impedância de seqüência positiva do circuito [p.u.];
- I_{F1} - corrente de falta na impedância Z_1 [p.u.].

A corrente de falta que flui a partir do gerador G1 e atravessa a impedância Z_1 é obtida através das expressões (4.4) e (4.5) :

$$I_{F1} = \frac{V_1}{Z_1 + Z_2 + \left(\frac{Z_F \cdot Z_3}{Z_F + Z_3} \right)} \quad (4.4)$$

$$I_{F1} = V_1 \cdot \frac{(Z_3 + Z_F)}{(Z_1 + Z_2) \cdot (Z_3 + Z_F) \cdot (Z_F \cdot Z_3)} \quad (4.5)$$

onde:

- I_{F1} - corrente de falta na impedância Z_1 [p.u.];
- V_1 - tensão na barra fonte [p.u.];
- Z_1, Z_2, Z_3 - impedâncias de seqüência positiva do circuito [p.u.];
- Z_F - impedância de falta [p.u.].

Substituindo a expressão (4.5) em (4.3), é obtida a equação (4.6), onde a tensão de falta na barra D, V_{Df} , fica definida somente em termos das impedâncias do sistema e da tensão da fonte V_1 .

$$V_{Df} = V_1 \cdot \left[- \frac{Z_1 \cdot (Z_3 + Z_F)}{Z_F \cdot (Z_1 + Z_2 + Z_3) + Z_3 \cdot (Z_1 + Z_2)} \right] \quad (4.6)$$

onde:

- V_{Df} - tensão de falta na barra D [p.u.];
- V_1 - tensão na barra fonte do gerador G1 [p.u.];
- Z_1, Z_2, Z_3 - impedâncias de seqüência positiva do circuito [p.u.];
- Z_F - impedância de falta na barra E [p.u.].

Finalmente, fazendo a adição da equação (4.2) à (4.6), conforme definido em (4.1), é obtida a expressão (4.7). Esta é utilizada para o cálculo da amplitude do afundamento de tensão na barra D devido à falta na barra E, em sistemas radiais com uma única fonte de injeção.

$$V_D = V_1 \cdot \left[1 - \frac{Z_1}{(Z_1 + Z_2 + Z_3)} - \frac{Z_1 \cdot (Z_3 + Z_F)}{Z_F \cdot (Z_1 + Z_2 + Z_3) + Z_3 \cdot (Z_1 + Z_2)} \right] \quad (4.7)$$

onde:

- V_D - afundamento de tensão na barra D [p.u.];
- V_1 - tensão na barra fonte do gerador G1 [p.u.];
- Z_1, Z_2, Z_3 - impedâncias de seqüência positiva do circuito [p.u.];
- Z_F - impedância de falta na barra E [p.u.].

A apresentação da equação (4.7) é muito interessante para os planejadores, pois possibilita identificar a relação entre a amplitude do afundamento de tensão e as impedâncias da rede. Esta informação permite uma atuação no SEP de forma mais consistente, com relação aos impactos das obras de expansão nos afundamentos.

Esta equação possibilita, também, verificar que não é trivial prever os efeitos das alterações das impedâncias do SEP no valor da amplitude do afundamento de tensão. Tal complexidade se verifica devido ao fato dos termos das impedâncias aparecerem tanto no denominador, quanto no numerador da expressão. Diante

disto, para dar suporte aos estudos de planejamento, uma análise paramétrica desta expressão é apresentada no próximo item, considerando valores reais de impedâncias dos sistemas.

Fazendo a simplificação de considerar todas as tensões pré-falta iguais a 1,0 p.u., obtém-se a expressão (4.8), a partir de (4.1) e (4.6).

$$V_D = \left[1 - \frac{Z_1 \cdot (Z_3 + Z_F)}{Z_F \cdot (Z_1 + Z_2 + Z_3) + Z_3 \cdot (Z_1 + Z_2)} \right] \quad (4.8)$$

onde:

- V_D - afundamento de tensão na barra D [p.u.];
- Z_1, Z_2, Z_3 - impedâncias de seqüência positiva do circuito [p.u.];
- Z_F - impedância de falta na barra E [p.u.].

Observando as expressões (4.7) e (4.8), verifica-se que elas se diferenciam pelo termo relacionado à tensão pré-falta, anteriormente definido pela equação (4.2). Isto permite verificar a influência do valor desta tensão no cálculo da amplitude do afundamento.

4.3.1.2. Sistemas Radiais Duas Fontes de Injeção

Quando se tem mais de uma fonte de energia, um dos métodos utilizados para o cálculo da amplitude do afundamento de tensão é o método da superposição. A partir das definições da superposição, revistas aqui a partir das pesquisas bibliográficas [Anderson, 1973], [Edminister, 1965], [Westinghouse, 1965], o afundamento de tensão em uma barra, considerando todas as usinas, é equivalente à soma algébrica dos afundamentos de tensão causados por cada usina individualmente.

Nas Figuras 4.6 (pré-falta) e 4.7 (na falta), o sistema radial do exemplo anterior está modelado com duas fontes de injeção. Este modelo é adequado para representar situações reais de expansão do sistema elétrico, onde se define uma

segunda fonte de injeção em um sistema radial originalmente atendido a partir de uma única fonte.

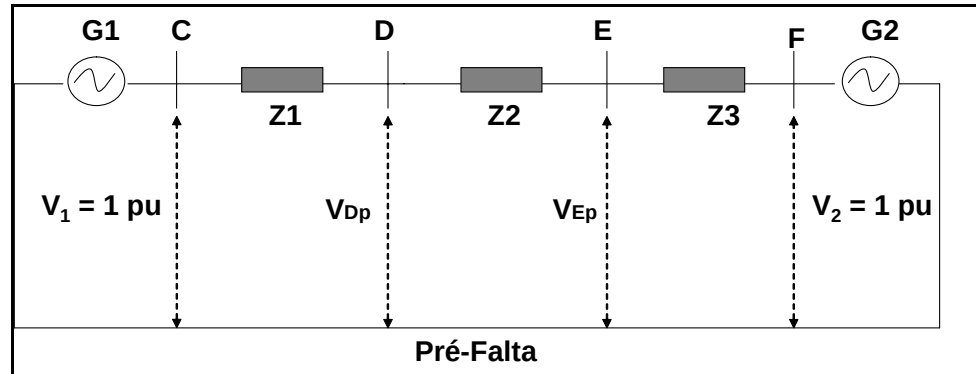


Figura 4.6 – Diagrama do Sistema Radial Duas Fontes – Pré-Falta

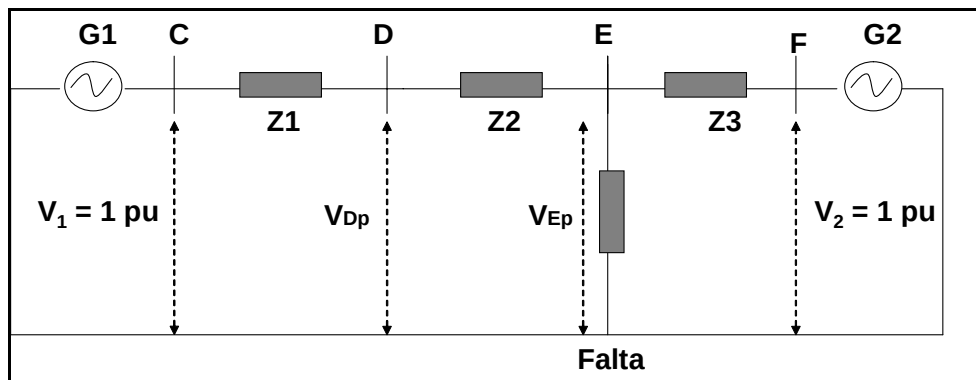


Figura 4.7 – Diagrama do Sistema Radial Duas Fontes – Falta

Adotando-se o princípio da superposição, a amplitude do afundamento de tensão na barra D devido ao curto-circuito na barra E, considerando as duas fontes de injeção G1 e G2, é igual à adição da expressão (4.7) com a expressão (4.9).

$$V_D = V_2 \cdot \left[1 - \frac{Z_2 + Z_3}{(Z_1 + Z_2 + Z_3)} - \frac{Z_1 \cdot Z_F}{Z_3 \cdot (Z_1 + Z_2 + Z_F) + Z_F \cdot (Z_1 + Z_2)} \right] \quad (4.9)$$

onde:

- V_D - afundamento de tensão na barra D [p.u.];

- V_2 - tensão na barra fonte do gerador G2 [p.u.];
- Z_1, Z_2, Z_3 - impedâncias de seqüência positiva do circuito [p.u.];
- Z_F - impedância de falta na barra E [p.u.].

Observa-se que a expressão (4.9) é obtida adotando-se os mesmos procedimentos para o cálculo da expressão (4.7), porém considerando apenas o gerador G2 no circuito da Figura 4.7, ou seja, considerando V_2 .

Fazendo todas as tensões pré-faltas iguais a 1,0 p.u., obtém-se a expressão (4.10), utilizada para calcular a amplitude do afundamento de tensão na barra D, para uma falta na barra E.

$$V_D = \left[1 - \frac{Z_1 \cdot Z_F}{Z_3 \cdot (Z_1 + Z_2 + Z_F) + Z_F \cdot (Z_1 + Z_2)} \right] \quad (4.10)$$

onde:

- V_D - afundamento de tensão na barra D [p.u.];
- Z_1, Z_2, Z_3 - impedâncias de seqüência positiva do circuito [p.u.];
- Z_F - impedância de falta na barra E [p.u.].

Como no caso anterior, comparando as expressões (4.9) e (4.10), verifica-se a influência da tensão pré-falta, representada como função das impedâncias da rede, e da tensão V_2 da barra de geração, nos cálculos da amplitude.

Finalmente, fazendo-se a adição da equação (4.7) com a (4.9), obtém-se a expressão (4.11). Esta permite calcular a amplitude do afundamento na barra D, devido à falta na barra E, para um sistema com duas fontes G1 e G2, considerando as tensões pré-falta como função das impedâncias da rede e da tensão V_1 e V_2 .

$$\begin{aligned}
V_D = & V_1 \cdot \left[1 - \frac{Z_1}{(Z_1 + Z_2 + Z_3)} - \frac{Z_1 \cdot (Z_3 + Z_F)}{Z_F \cdot (Z_1 + Z_2 + Z_3) + Z_3 \cdot (Z_1 + Z_2)} \right] + \\
& + V_2 \cdot \left[1 - \frac{Z_2 + Z_3}{(Z_1 + Z_2 + Z_3)} - \frac{Z_1 \cdot Z_F}{Z_3 \cdot (Z_1 + Z_2 + Z_F) + Z_F \cdot (Z_1 + Z_2)} \right] \quad (4.11)
\end{aligned}$$

onde:

- V_D - afundamento de tensão na barra D [p.u.];
- V_1 - tensão na barra fonte do gerador G1 [p.u.];
- V_2 - tensão na barra fonte do gerador G2 [p.u.];
- Z_1, Z_2, Z_3 - impedâncias de seqüência positiva do circuito [p.u.];
- Z_F - impedância de falta na barra E [p.u.].

Assim como observado no estudo dos sistemas radiais com uma fonte, a equação (4.11), na forma como apresenta a relação entre a amplitude do afundamento e as impedâncias da rede, traz uma importante contribuição desta dissertação.

No próximo item, é apresentada uma análise paramétrica desta equação, cujos resultados visam subsidiar as equipes de planejamento, na sua aplicação.

4.3.1.3. Sistemas Malhados – Modelo Matricial de Redes

Na medida em que os sistemas elétricos se tornam mais complexos, o emprego dos modelos matriciais de redes utilizando-se as propriedades da Matriz Zbarra, torna-se a representação adequada para o cálculo da amplitude dos afundamentos de tensão nos sistema de potência de grande porte. Estudos acerca dos modelos de rede foram realizados para os desenvolvimentos desta dissertação nas referências [Stagg, 1971], [Anderson, 1973].

Tais modelos, a partir dos quais é formada a matriz Z_{barra} , são utilizados no método para o cálculo da amplitude dos afundamentos de tensão, conhecido como *Método das Posições de Falta* ou Curto-circuito Deslizante. Conforme citado, este método é utilizado por programas de curto-circuito. Seu princípio está baseado na sistemática de simular faltas em pontos diferentes do SEP, observando o comportamento da tensão na barra de referência. Desta maneira, pode-se avaliar a influência da posição da falta na amplitude do afundamento.

Neste item é mostrada a relação tensão-corrente do modelo matricial de redes, a partir da qual é desenvolvida a formulação que possibilita analisar a correlação entre as impedâncias da rede e a amplitude do afundamento de tensão, em sistemas de grande porte.

O cálculo dos afundamentos de tensão em uma barra k pelo modelo matricial de redes é feito a partir da expressão (4.12).

$$V_k = V_k^p + V_k^f \quad (4.12)$$

onde:

- V_k - afundamento de tensão na barra k [p.u.];
- V_k^p - tensão pré-falta na barra k [p.u.];
- V_k^f - tensão de falta na barra k [p.u.].

Um sistema elétrico com N barras e com uma falta trifásica na barra n está representado na Figura 4.8.

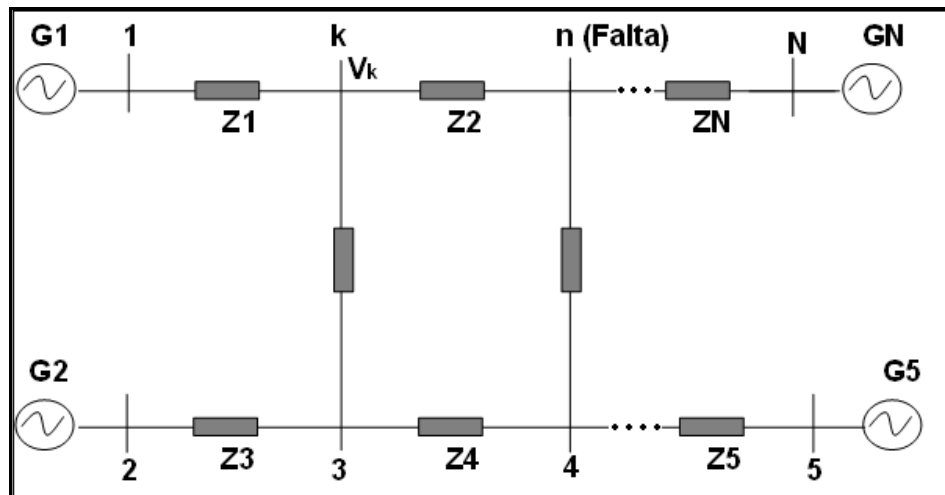


Figura 4.8 – Diagrama do Sistema Malhado

O modelo matricial da expressão (4.13) representa o sistema genérico da Figura 4.8. A partir deste, obtém-se a equação para o cálculo da amplitude do afundamento, por meio dos elementos da matriz Zbarra. Salienta-se que as obras de expansão (novas LT, SE, cargas, etc.) podem alterar tanto a dimensão quanto os valores dos elementos de Zbarra.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1n} & \dots & Z_{1N} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2n} & \dots & Z_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \dots & Z_{nn} & \dots & Z_{nN} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{N1} & Z_{N2} & \dots & Z_{Nn} & \dots & Z_{NN} \end{bmatrix}}_{\text{Matriz } Z_{\text{Barra}}} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ -I_n^f \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1^f \\ V_2^f \\ \vdots \\ -V_n^f \\ \vdots \\ V_N^f \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

onde:

- V_n^f - tensão de falta na barra n (barra do curto-circuito) [p.u.];
- I_n^f - corrente de falta na barra n (barra do curto-circuito) [p.u.];

- V_1^f, V_2^f, V_N^f - tensão de falta nas demais N barras [p.u.];
- Z_{11}, Z_{NN} - impedâncias próprias da barras [p.u.];
- $Z_{12}, Z_{21}, \dots$ - impedâncias de transferências entre as barras [p.u.].

Observa-se na expressão (4.13) que, no vetor de injeção de corrente, somente o elemento da barra de falta n é diferente de zero. O valor deste elemento de corrente, que é a corrente de falta, é calculado pela expressão (4.14).

$$I_n^f = \frac{V_n^f}{Z_{nn}} \quad (4.14)$$

onde:

- I_n^f - corrente de falta na barra n (barra do curto-circuito) [p.u.];
- V_n^f - tensão de falta na barra n (barra do curto-circuito) [p.u.];
- Z_{nn} - impedância própria da barra n [p.u.].

O valor da tensão em qualquer barra k do sistema, devido à corrente de falta na barra n , pode ser calculado através da expressão (4.15), obtida a partir do modelo da expressão (4.13).

$$V_k^f = Z_{kn} \cdot (-I_n^f) = - \left(\frac{Z_{kn}}{Z_{nn}} \right) \cdot V_n^f \quad (4.15)$$

Substituindo (4.15) em (4.12), é obtida a expressão (4.16), utilizada para o cálculo do afundamento de tensão na barra k devido a uma falta na barra n .

$$V_k = V_k^p - \left(\frac{Z_{kn}}{Z_{nn}} \right) \cdot V_n^f \quad (4.16)$$

Considerando iguais entre si as tensões V_k^p e V_n^f na expressão (4.16), que representa uma condição típica de operação do SEP, obtém-se a expressão (4.17).

$$V_k = V_k^p \left(1 - \frac{Z_{kn}}{Z_{nn}} \right) \quad (4.17)$$

Incluindo a impedância de falta, tem-se a equação (4.18). Esta expressão é aquela que mostra a correlação entre as impedâncias da rede e a amplitude do afundamento de tensão, em sistemas de grande porte.

$$V_k = V_k^p \left(1 - \frac{Z_{kn}}{Z_{nn} + Z_F} \right) \quad (4.18)$$

onde:

- V_k - afundamento de tensão na barra k [p.u.];
- V_k^p - tensão pré-falta na barra k [p.u.];
- Z_{nn} - impedância própria da barra n (barra do curto-circuito) [p.u.];
- Z_{kn} - impedância de transferência entre a barra k e a barra n [p.u.];
- Z_F - impedância de falta [p.u.].

Para faltas fase-terra, pode ser utilizada a expressão (4.19) obtida a partir da aplicação das componentes simétricas.

$$\begin{bmatrix} V_k^0 \\ V_k^+ \\ V_k^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_k^p \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \left(1 - \frac{1}{Z_{nn}^+ + Z_{nn}^- + Z_{nn}^0 + 3Z_F} \right) \cdot \begin{bmatrix} Z_{kn}^0 \\ Z_{kn}^+ \\ Z_{kn}^- \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

onde:

- V_k^0, V_k^+, V_k^- - afundamento de tensão de seqüência zero, positiva e negativa na barra k [p.u.];
- $Z_{nn}^0, Z_{nn}^+, Z_{nn}^-$ - impedância própria de seqüência zero, positiva e negativa na barra k [p.u.];
- $Z_{kn}^0, Z_{kn}^+, Z_{kn}^-$ - impedância de transferência de seqüência zero, positiva e negativa entre a barra k e a barra n [p.u.];
- Z_F - impedância de falta [p.u.].

Para o cálculo dos afundamentos de tensão devido a faltas assimétricas (fase-fase e fase-fase-terra), são utilizadas equações das componentes simétricas, equivalentes à expressão (4.19). O detalhamento das mesmas foge ao escopo deste trabalho, e pode ser encontrado nas referências [Anderson, 1973], [Stagg, 1971], [Stevenson, 1982].

4.3.2. Análise Paramétrica

4.3.2.1. Sistema Radial com Uma Fonte de Injeção

Nesta situação, é utilizada a definição de obras de expansão a montante ou a jusante da barra de referência dos afundamentos de tensão. Tendo como ponto de partida a fonte de injeção, é considerada uma obra a montante aquela que está antes da barra de referência. Adotando o mesmo princípio, a obra a jusante é considerada aquela que está após a barra de referência.

Essa conceituação é importante, pois o impacto da obra planejada na amplitude do afundamento de tensão da barra de referência pode variar caso a obra esteja a montante ou a jusante da mesma.

A Figura 4.9 ilustra o sistema elétrico radial com uma fonte de injeção a ser simulado. A barra de referência onde os afundamentos de tensão estão sendo observados é a barra D, e a barra de falta é a barra E.

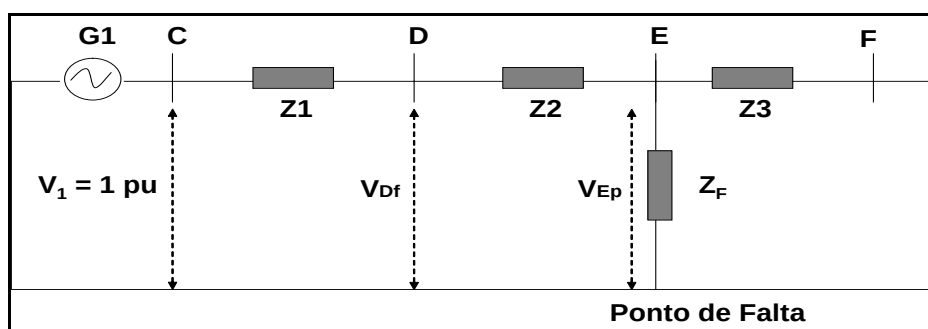


Figura 4.9 – Diagrama do Sistema Radial – Uma Fonte

Nas análises, é utilizada a equação (4.7) para determinar a amplitude do afundamento de tensão na barra de referência.

São utilizadas impedâncias reais de um sistema de 138 kV e, para simular as situações de obras de expansão implantadas a montante e a jusante da barra de referência, são variadas as impedâncias Z_1 e Z_2 .

O gráfico da Figura 4.10 mostra o efeito das obras de expansão a montante da barra de referência, variando-se a impedância Z_1 do circuito da Figura 5.9, onde o afundamento de tensão está representado pela tensão da barra de referência, barra D.

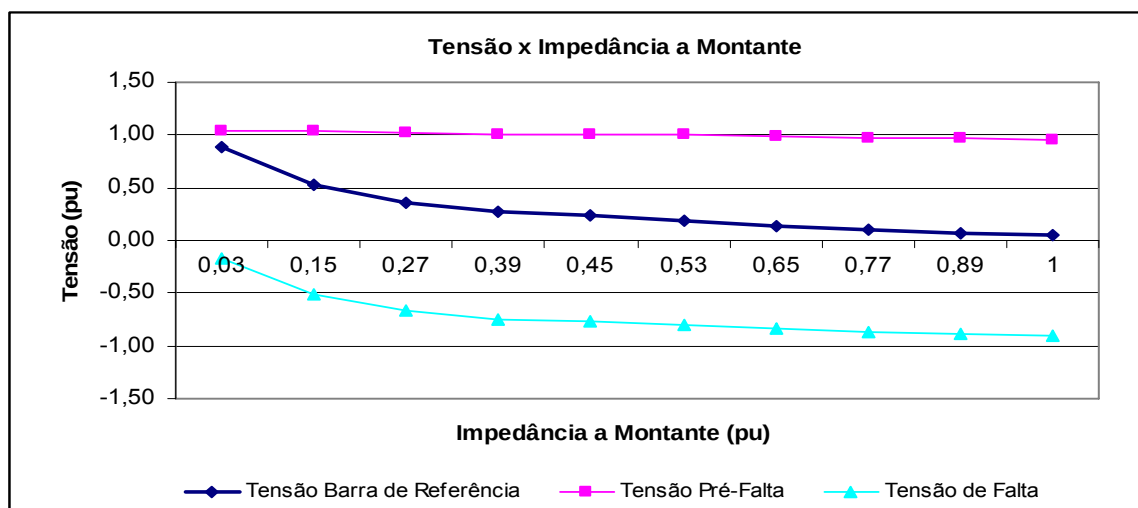


Figura 4.10 – Gráfico Tensão x Obras a Montante - Sistema Radial Uma Fonte

As impedâncias entre 0,02 p.u. e 0,05 p.u. são típicas de sistemas de transmissão e as impedâncias de 0,20 p.u. até 1,0 p.u. são típicas de sistemas de subtransmissão. A inclinação da curva na região das impedâncias do sistema de transmissão é mais acentuada, indicando, neste caso, uma maior sensibilidade da amplitude do afundamento de tensão às obras na transmissão.

Algumas tendências de comportamento do sistema radial sob análise, com uma fonte de injeção e com obras de expansão a montante da barra de referência, podem ser destacadas em função das curvas do gráfico da Figura 4.10.

- As obras de expansão, quando reduzem as impedâncias a montante da barra de referência, reduzem as amplitudes dos afundamentos de tensão na mesma.
- As obras de expansão, quando aumentam as impedâncias a montante da barra de referência, elevam as amplitudes dos afundamentos de tensão na mesma.
- Observa-se o impacto acentuado nos afundamentos de tensão entre as impedâncias 0,03 p.u. e 0,27 p.u. Na realidade, este comportamento poderia ser interpretado como uma ampliação da fonte de injeção existente, podendo ser, por exemplo, uma ampliação da SE de injeção, uma nova SE de transmissão, uma duplicação de LT ou uma nova geração.

O gráfico da Figura 4.11 mostra o efeito das obras de expansão a jusante da barra de referência, variando-se a impedância Z_2 do mesmo circuito da Figura 4.9, onde o afundamento de tensão está representado pela tensão da barra de referência, a barra D, calculado pela expressão (4.7).

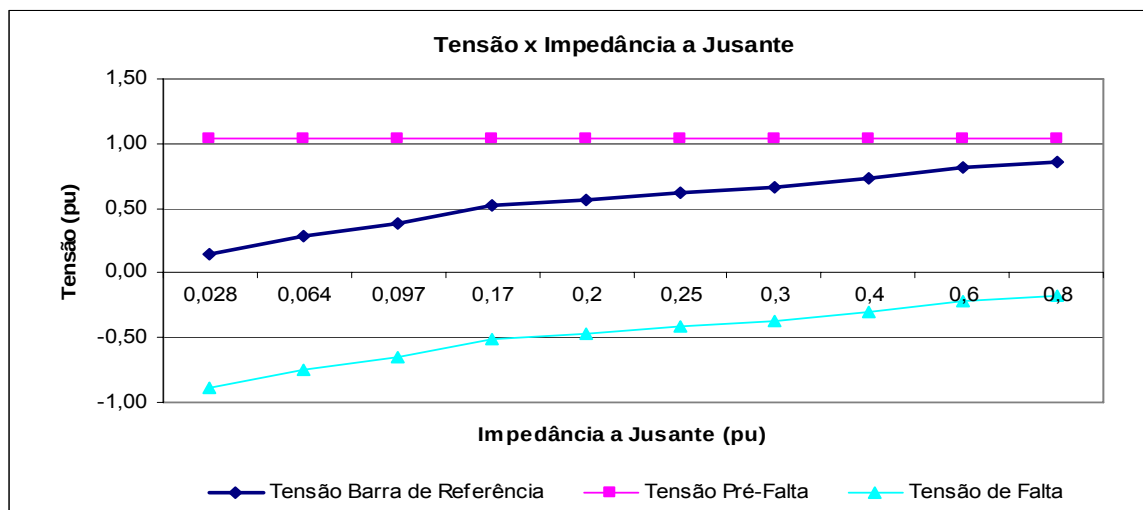


Figura 4.11 – Gráfico Tensão x Obras a Jusante - Sistema Radial Uma Fonte

As obras de expansão neste caso, quando reduzem as impedâncias a jusante da barra de referência, elevam as amplitudes dos afundamentos de tensão na mesma. Por outro lado, o aumento das impedâncias reduz as amplitudes.

Os resultados dos sistemas exemplos chamam a atenção sobre o impacto das obras, enfatizado a recomendação do desenvolvimento de uma análise para cada caso.

Como exemplos de obras de expansão, que reduzem as impedâncias a jusante da barra de referência, podem ser citados as ampliações de SE, fechamentos de barras de 13,8 kV de SE, novas LT ou introdução de um novo nível de tensão no sistema.

O aumento da potência de curto-circuito em uma barra de referência, que acontece com a redução das impedâncias séries pode provocar tanto o aumento quanto a redução da amplitude dos afundamentos de tensão nesta barra. Isto acontece porque a amplitude do afundamento de tensão varia para cada ponto de falta do SEP.

Efeitos de Parâmetros *Shunt*

Neste item está apresentado como o efeito dos parâmetros *shunt* do sistema impactam a amplitude dos afundamentos de tensão. Tais parâmetros geralmente estão associados às cargas elétricas, admitâncias paralelas das LT, capacitores e reatores *shunt*. A Figura 4.12 mostra um modelo representativo de um circuito elétrico com a presença do elemento *shunt* Z_S .

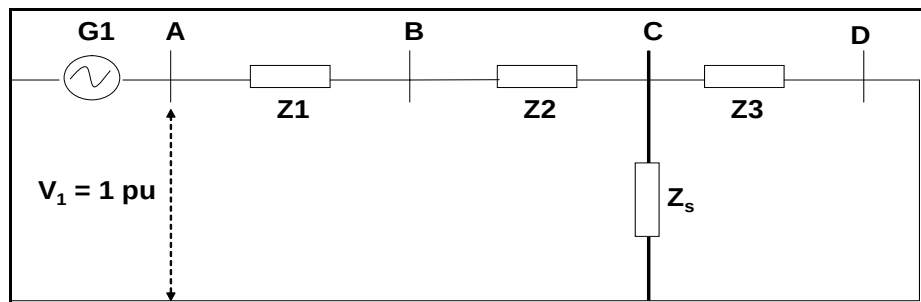


Figura 4.12 – Sistema Radial Uma Fonte - Elemento *Shunt*

A expressão (4.20) se refere à impedância equivalente da associação paralela entre a impedância Z_3 e a impedância *shunt* Z_S :

$$Z_E = \frac{Z_3 \cdot Z_S}{Z_S + Z_3} \quad (4.20)$$

onde:

- Z_E - impedância equivalente no ponto C [p.u.];
- Z_S - impedância de elemento *shunt* [p.u.];
- Z_3 - impedância série entre barra C e D [p.u.].

Observa-se pelas expressões (4.21) e (4.22) que, se Z_S for muito maior que as demais impedâncias séries do circuito, o valor de Z_E tende para o valor de Z_3 . Esse comportamento é típico nos sistemas elétricos de potência.

$$Z_E = \frac{Z_3}{1 + \frac{Z_3}{Z_S}} \quad (4.21)$$

$$\lim_{Z_S \rightarrow \infty} Z_E = Z_3 \quad (4.22)$$

Os valores dos elementos *shunt*, em impedâncias, podem ser obtidos a partir dos valores de potência, por meio das equações (4.23) e (4.24).

$$R + jX = \frac{V_1^2 \cdot P_1}{S_1^2} + j \frac{V_1^2 \cdot Q_1}{S_1^2} \quad (4.23)$$

$$R + jX = \frac{V_3^2 \cdot P_3}{S_3^2} + j \frac{V_3^2 \cdot Q_3}{S_3^2} \quad (4.24)$$

onde:

- R - resistência por fase [Ω];
- X - reatância por fase [Ω];
- V_1 - tensão fase-terra [V];
- V_3 - tensão fase-fase [V];
- S_1, P_1, Q_1 - potência aparente [VA], potência ativa [W], potência reativa [Var], monofásicas;
- S_3, P_3, Q_3 - potência aparente [VA], potência ativa [W], potência reativa [Var], trifásicas.

Por meio das expressões (4.23) e (4.24) podem ser deduzidas as expressões (4.25) e (4.26), para o cálculo das impedâncias *shunt* em p.u.

$$R + jX = \frac{S_{Base1} \cdot P_1}{S_1^2} + j \frac{S_{Base1} \cdot Q_1}{S_1^2} \quad (4.25)$$

$$R + jX = \frac{S_{Base3} \cdot P_3}{S_3^2} + j \frac{S_{Base3} \cdot Q_3}{S_3^2} \quad (4.26)$$

onde:

- S_{Base1}, S_{Base3} - potências base monofásica e trifásica [MVA];
- S_1, P_1, Q_1 - potências monofásicas aparentes [VA], ativa [W], reativa [Var], do elemento;
- S_3, P_3, Q_3 - potências trifásicas aparentes [VA], ativa [W], reativa [Var], do elemento.

As Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 mostram valores típicos de impedâncias dos elementos do sistema elétrico trifásico, obtidos utilizando-se a expressão (4.26).

Tabela 4.1 – Impedâncias e Potências Típicas de Capacitores 13,8 kV e 138 kV do SEP

Q Trifásico (Mvar)	Impedância em p.u. (base 100 MVA)
1,2	-83,3
2,4	-41,7
3,6	-27,8
16,4	-6,09

Tabela 4.2 – Impedâncias Típicas de Cargas do SEP

P Trifásico (MW)	Impedância em p.u. (base 100 MVA)
5	20
10	10
25	4
50	2
100	1

Tabela 4.3 – Impedâncias Série Típicas de LT do SEP

	Impedância Série em p.u./ km (base 100 MVA)
Tensão kV	$R + jX$
34,5	$0,016 + j 0,3363$
69	$0,004 + j 0,01036$
138	$0,001 + j 0,00259$
230	$0,00019 + j 0,00097$
345	$0,00003 + j 0,00032$
500	$0,00001 + j 0,00014$

Comparando os valores da Tabela 4.3 com os valores das Tabelas 4.1 e 4.2, observa-se que as impedâncias dos elementos *shunt* são bem maiores que as impedâncias dos elementos série. Assim, considerando impedâncias típicas, observa-se que o comportamento dos elementos *shunt* do SEP pode ser expresso pela equação (4.22), o que demonstra a sua pouca influência nas amplitudes dos afundamentos de tensão. Isto vai ao encontro da simplificação adotada nos estudos de curto-circuito, onde geralmente desprezam-se os elementos *shunt* do circuito.

No entanto, vale comentar que, em sistemas elétricos radiais com grandes extensões, a influência dos elementos *shunt* nas impedâncias série é mais acentuada do que em sistemas malhados.

Efeito da Impedância de Falta

O efeito da impedância de falta na amplitude do afundamento de tensão pode ser analisado por meio da expressão (4.7).

Neste item é apresentado o efeito da variação de Z_F no circuito exemplo da Figura 4.9. As impedâncias consideradas são típicas de sistemas elétricos reais. O gráfico da Figura 4.13 mostra tal variação.

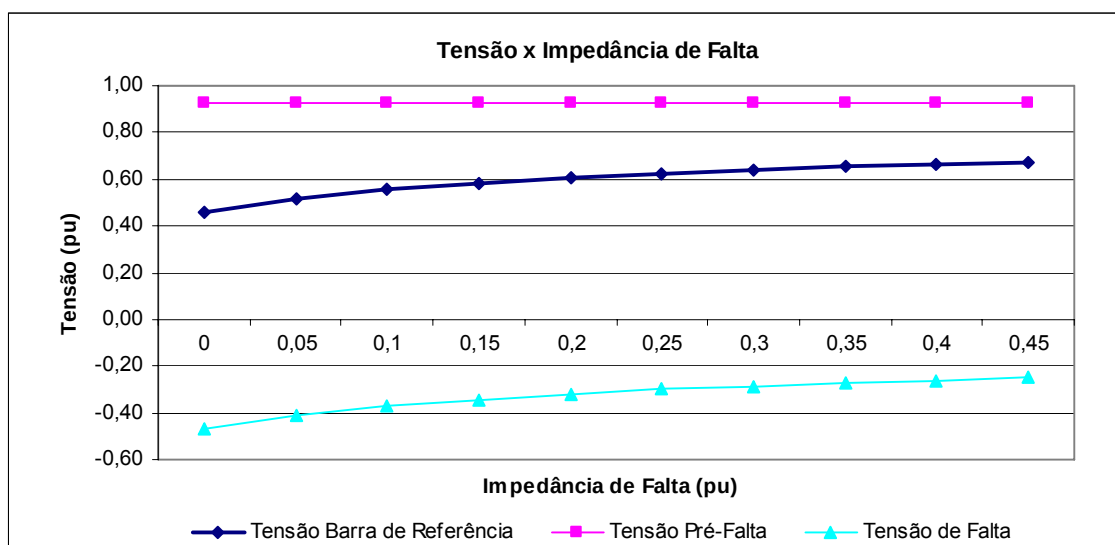


Figura 4.13 – Gráfico Tensão x Impedância de Falta - Sistema Radial Uma Fonte

Pode-se perceber que, para o caso analisado, como era esperado, o aumento da impedância de falta reduz as amplitudes dos afundamentos de tensão.

Efeito da Carga

O gráfico da Figura 4.14 mostra o efeito das alterações das cargas, variando-se a impedância Z_3 do circuito da Figura 4.9. O afundamento de tensão está representado pela tensão da barra de referência calculada partindo-se da expressão (4.7).

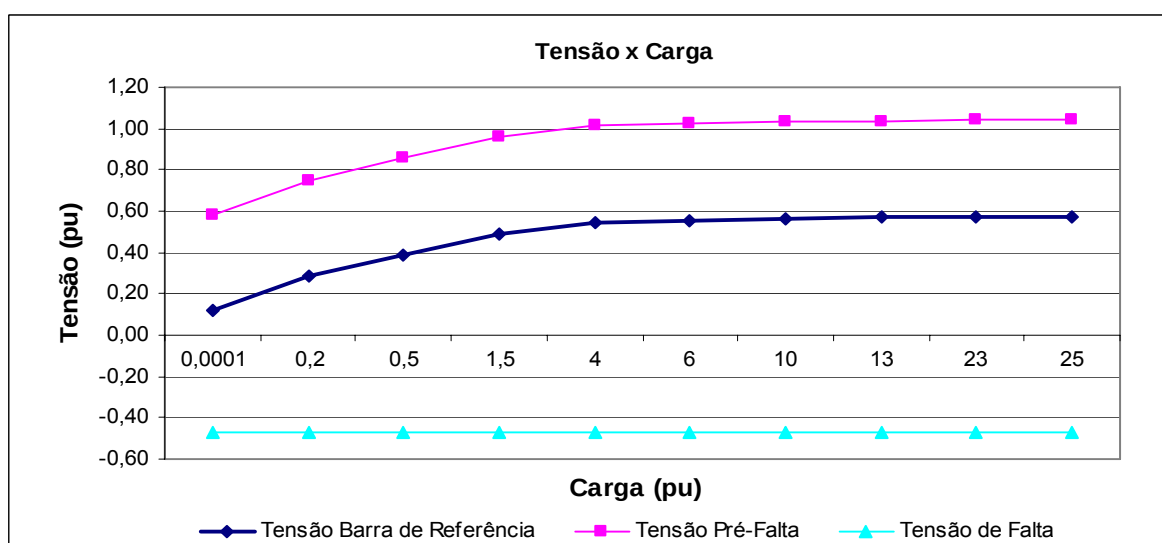


Figura 4.14 – Gráfico Tensão x Efeito das Cargas - Sistema Radial Uma Fonte

Para o exemplo considerado, pode-se perceber que as variações de carga do sistema pouco afetam a amplitude dos afundamentos de tensão no momento da falta. Este comportamento pode ser percebido pela curva da tensão de falta do gráfico da Figura 4.14, cujos valores praticamente não variam.

Para os valores de carga entre 0,0001 p.u. e 4,0 p.u., percebe-se o efeito acentuado da tensão pré-falta na amplitude dos afundamentos de tensão da barra de referência. O menor valor da tensão é no ponto 0,0001 p.u. do eixo X, que reflete uma situação típica de carga pesada do SEP.

4.3.2.2. Sistema Radial com Duas Fontes de Injeção

Tendo em vista a existência de mais de uma fonte de injeção, não é possível aplicar as definições de obras a jusante ou a montante da barra de referência.

Nas análises, é utilizada a equação (4.11) para determinar a amplitude do afundamento de tensão na barra de referência.

A Figura 4.15 ilustra o sistema elétrico radial com duas fontes de injeção a ser simulado. A barra de referência onde os afundamentos de tensão estão sendo observados é a barra D, e a barra de falta é a barra E.

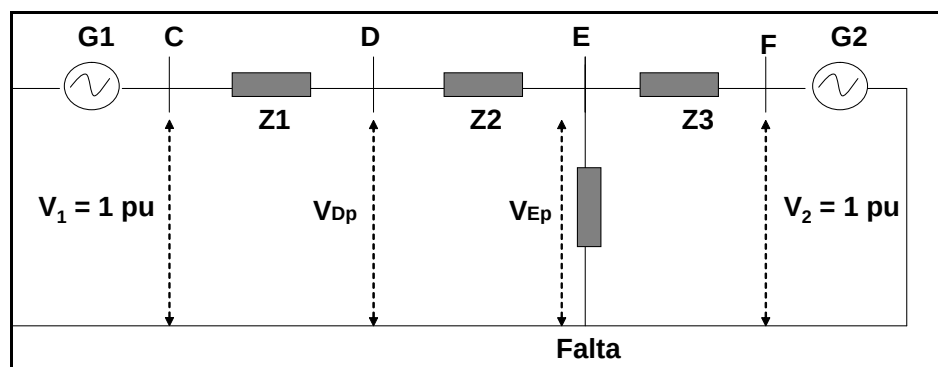


Figura 4.15 – Sistema Radial – Duas Fontes

Foram utilizadas impedâncias reais de um sistema de 138 kV. Para simular as obras de expansão foram variadas as impedâncias Z_1 , Z_2 e Z_3 . Os resultados desta análise de sensibilidade estão apresentados através do gráfico da Figura 4.16. O afundamento de tensão está representado pela tensão da barra de referência.

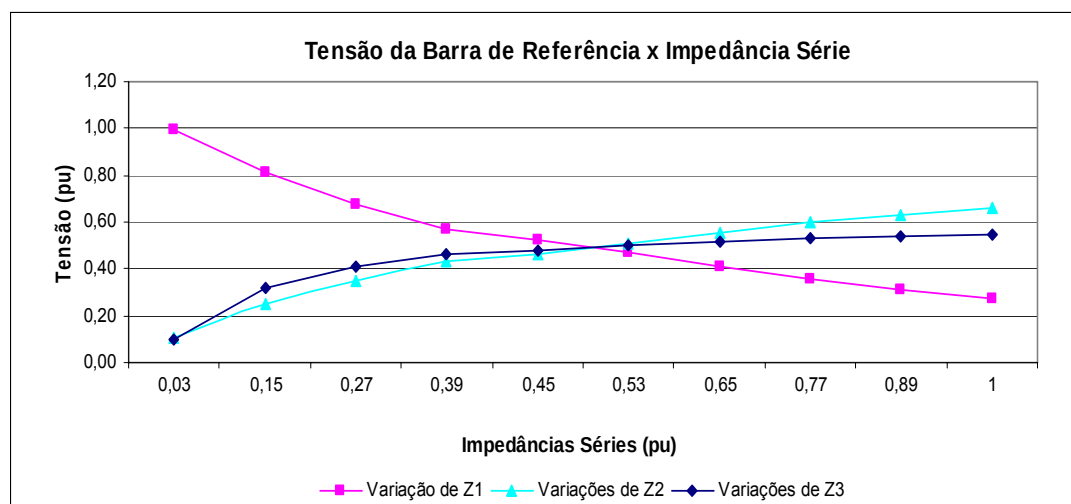


Figura 4.16 – Gráfico Tensão Barra Referência x Z Série – Sistema Radial Duas Fontes

As principais observações, em relação ao comportamento do sistema radial sob análise, são:

- Não há uma tendência única de comportamento, quando se alteram as impedâncias do sistema. As curvas de variações de Z_1 , Z_2 e Z_3 mostram que a amplitude do afundamento de tensão depende do ponto de curto-circuito e do local da barra de referência;
- Para uma determinada barra de referência, uma obra de expansão, dependendo do seu local de implantação no SEP, poderá reduzir ou aumentar o afundamento de tensão. Em outras palavras, uma determinada obra de expansão poderá elevar ou reduzir o afundamento de tensão, dependendo da barra de referência analisada.

Uma grandeza de especial interesse para a área de planejamento é a potência de curto-circuito. Como o valor desta potência depende das impedâncias da rede, a sua relação com os afundamentos de tensão deve ser analisada com cautela.

No gráfico da Figura 4.17, observa-se que a redução das impedâncias pode provocar tanto uma redução do afundamento de tensão (variação de Z_1), quanto a elevação do afundamento de tensão (variações de Z_3).

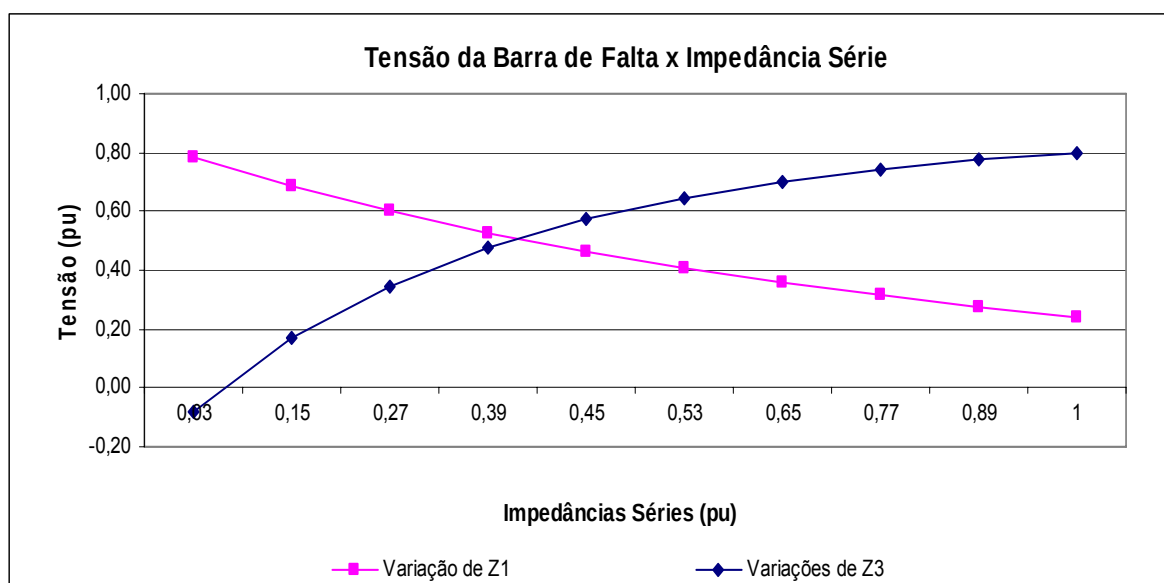


Figura 4.17 – Gráfico Tensão Barra de Falta x Z Série – Sistema Radial Duas Fontes

Assim, alterações da potência de curto-circuito em uma barra do sistema, provocadas por variações nas impedâncias, podem provocar tanto o aumento quanto a redução das amplitudes dos afundamentos de tensão em uma barra de referência (Figura 4.16), ou na mesma barra de curto-circuito (Figura 4.17).

Verifica-se, portanto, que a avaliação dos impactos das obras de expansão nas amplitudes dos afundamentos de tensão deve considerar que cada caso tem a sua particularidade.

4.3.2.3. Sistema Malhado

Em sistemas malhados, a análise da sensibilidade das amplitudes dos afundamentos de tensão, em relação às obras de expansão pode ser realizada a partir das alterações que estas provocam nas impedâncias da expressão (4.18). Tal expressão é formada pelos elementos da matriz Zbarra.

A partir da análise desta equação, fazem-se os seguintes comentários:

- A presença da impedância própria na equação indica a relação entre a amplitude dos afundamentos de tensão e a potência de curto-circuito do sistema.

- A presença das impedâncias de transferência na equação indica a relação entre a amplitude dos afundamentos de tensão e as interligações entre as barras que estão sendo simuladas.

Portanto, o impacto de uma obra de expansão na amplitude do afundamento de tensão de uma barra vai depender da variação da potência de curto-circuito (impedância própria) conjuntamente da nova configuração da rede (impedância de transferência).

As alterações da matriz Z_{barra} , decorrentes de alterações na rede, encontram-se detalhadas na literatura pertinente a análise de SEP [Glover, 1994], [Stagg, 1971], não sendo objetivo deste trabalho as suas demonstrações.

Neste texto, as análises das sensibilidades em sistemas malhados consideram três tipos de alterações na topologia do sistema:

- a. Tipo A: Inclusão de Ramo Radial;
- b. Tipo B: Inclusão de Elemento *Shunt*;
- c. Tipo C: Inclusão de Interligação entre Barras.

A Figura 4.18 apresenta o diagrama de impedâncias de um sistema elétrico malhado, mostrando os três tipos (A, B, C) de alterações na topologia da rede considerada.

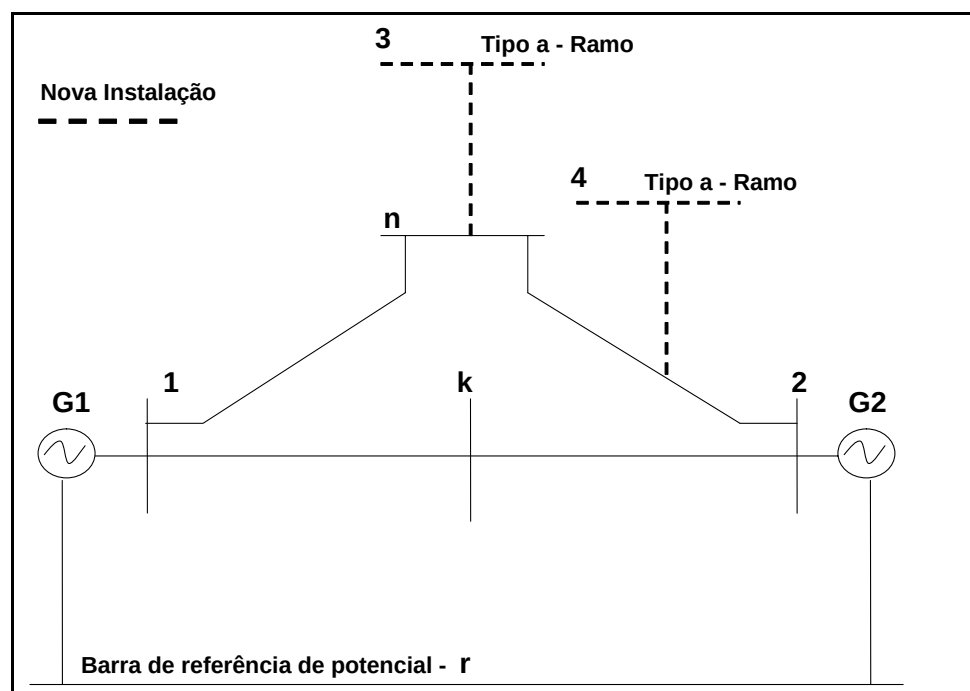


Figura 4.18 – Sistema Malhado – Alterações de Topologia do SEP

Observa-se que a barra de referência de potencial (terra ou neutro), normalmente não representada nos diagramas unifilares, está mostrada para indicar que apenas os geradores estão a ela conectados. Não estão considerados os parâmetros *shunt* do sistema (cargas, capacitores, reatores, etc.) como usualmente é feito nos estudos de curto-circuito, haja vista seus valores muito maiores que as impedâncias séries (LT, transformadores, etc.)

Para análises básicas de sensibilidade de cada tipo de alteração de topologia da rede, tem-se.

- A. **Inclusão de Ramo Radial:** Um exemplo de obra no SEP é a construção de um eixo radial para atendimentos de novas cargas. Este tipo de obra está ilustrado na Figura 4.18, onde o novo ramo conecta a nova barra *d* à barra *c* existente, através da impedância Z_x .

A expressão (4.27) mostra como este tipo de obra altera a matriz $Z_{barra\ original}$.

$$\begin{bmatrix} Z_{Barra\ original} & \begin{bmatrix} Z_{1c} \\ Z_{2c} \\ \vdots \\ Z_{mc} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} Z_{1c} & Z_{2c} & \dots & Z_{mc} \end{bmatrix} & Z_{cc} + Z_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_m \\ Id \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_m \\ Vd \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

onde:

- Z_x - impedância série do novo elemento do sistema [p.u.];
- Z_{cc} - impedância própria da barra C [p.u.];
- Z_{mc} - impedâncias de transferência da barra C [p.u.].

Em relação às alterações que as obras do Tipo A provocam na matriz $Z_{barra\ original}$, observa-se que:

- Há alteração da dimensão da matriz $Z_{barra\ original}$ (nova barra acrescentada à rede).
- Permanecem inalterados os valores dos elementos da matriz $Z_{barra\ original}$.
- Os elementos da nova linha e da nova coluna na nova matriz Z_{barra} são elementos da matriz $Z_{barra\ original}$.

Em relação aos impactos que as obras do Tipo A podem provocar nas amplitudes dos afundamentos, pode-se concluir que estas não alteram as amplitudes dos afundamentos de tensão do sistema, uma vez que os elementos da matriz $Z_{barra\ original}$ não são alterados.

B. Inclusão de Elemento *Shunt*: Um exemplo de obra no SEP é a interligação de uma nova usina, de uma nova carga, de capacitores e reatores. Este tipo de obra está ilustrado na Figura 5.18 anterior, onde o novo elemento *shunt* está conectado entre a barra existente ***b*** e a barra de referência de potencial ***r*** (terra ou neutro), através da impedância ***Z_x***.

A expressão (4.28) indica como este tipo de obra altera a matriz $Z_{barra\ original}$.

$$Z_{Barra\ Novo} = Z_{Barra\ Original} - \frac{1}{(Z_{bb} + Z_x)} \begin{bmatrix} Z_{1b} \\ Z_{2b} \\ \vdots \\ Z_{mb} \end{bmatrix} \cdot [Z_{1b} \ Z_{2b} \ \cdots \ Z_{mb}] \quad (4.28)$$

onde:

- Z_x - impedância série do novo elemento do sistema [p.u.];
- Z_{bb} - impedância própria da barra ***b*** [p.u.];
- Z_{mb} - impedâncias de transferência da barra ***b*** [p.u.].

Em relação às alterações que as obras do Tipo B provocam na matriz $Z_{barra\ original}$, observa-se que:

- Não há alteração da dimensão da matriz $Z_{barra\ original}$. É como se nenhuma barra fosse acrescentada à rede.
- Há alteração dos valores de todos os elementos da matriz $Z_{barra\ original}$.

Com respeito aos impactos que as obras do Tipo B podem provocar nas amplitudes dos afundamentos, conclui-se que:

- Alteram de forma sistêmica as amplitudes dos afundamentos de tensão

do sistema, uma vez que todos os elementos da matriz $Z_{barra\ original}$ são alterados.

- A interligação de capacitores, cargas, ou reatores *shunt* alteram muito pouco as amplitudes dos afundamentos de tensão. As suas impedâncias (Z_x) são elevadas o suficiente para praticamente anular o segundo termo da expressão (4.28), que modifica a $Z_{barra\ original}$.
- A alteração das amplitudes dos afundamentos de tensão deve ser maior nos sistemas elétricos mais extensos e com os menores níveis de tensão, pois estes possuem as maiores impedâncias de transferência, presentes no segundo termo da expressão (4.28).
- É diferente o impacto da conexão de uma usina nos afundamentos de tensão do sistema se as barras de conexão possuem potências de curto-circuitos diferentes, pois observa-se a presença da impedância própria (Z_{bb}) no segundo termo da expressão (4.28).
- É previsto que, quanto menor a impedância de interligação de uma usina, maior será a alteração das amplitudes dos afundamentos, visto que esta impedância de interligação (Z_x) está presente no segundo termo da expressão (4.28).
- As alterações nas amplitudes dos afundamentos de tensão do sistema são dependentes das impedâncias do novo elemento *shunt* e da topologia do sistema original, conforme mostra a expressão (4.28).

C. Inclusão de Interligação entre Barras: Um exemplo de obra no SEP é a construção de uma nova LT entre duas barras existentes, ou a interligação de sistemas. Este tipo de obra está ilustrado na Figura 4.18 onde a nova interligação é feita entre as barras existentes **a** e **b**, através da impedância Z_x .

A expressão (4.29) apresenta como este tipo de obra altera a matriz $Z_{barra\ original}$.

$$Z_{Barra\ Novo} = Z_{Barra\ Original} - \frac{1}{(Z_X + Z_{aa} + Z_{bb} - 2Z_{ab})} \cdot \begin{bmatrix} Z_{1a} - Z_{1b} \\ Z_{2a} - Z_{2b} \\ \vdots \\ Z_{ma} - Z_{mb} \end{bmatrix} \cdot [(Z_{1a} - Z_{1b}) \cdots (Z_{ma} - Z_{mb})] \quad (4.29)$$

onde:

- Z_X - impedância série do novo elemento do sistema [p.u.];
- Z_{aa} - impedância própria da barra **a** [p.u.];
- Z_{bb} - impedância própria da barra **b** [p.u.];
- Z_{ma} - impedâncias de transferência da barra **a** [p.u.];
- Z_{mb} - impedâncias de transferência da barra **b** [p.u.].

Com respeito às alterações que as obras do Tipo C provocam na matriz $Z_{barra\ original}$, observa-se que:

- Não há alteração da dimensão da matriz $Z_{barra\ original}$.
- Há alterações dos valores de todos os elementos da matriz $Z_{barra\ original}$.

Em relação aos impactos que as obras do Tipo C podem provocar nas amplitudes dos afundamentos, pode-se concluir que:

- Alteram de forma sistêmica as amplitudes dos afundamentos de tensão, uma vez que todos os elementos da matriz $Z_{barra\ original}$ são modificados.
- É previsto que a alteração das amplitudes dos afundamentos de tensão seja maior nos sistemas elétricos mais extensos e com os menores níveis de tensão, visto que estes possuem as maiores impedâncias de transferência, presentes no segundo termo da expressão (4.29).

- Percebe-se que, quanto menor a impedância da nova LT ou da interligação, maior será a alteração das amplitudes dos afundamentos de tensão, visto que esta impedância de interligação (Z_x) está presente no segundo termo da expressão (4.29).
- As alterações nas amplitudes dos afundamentos de tensão do sistema são dependentes das impedâncias do novo sistema de interligação entre as duas barras, e da topologia do sistema original, conforme mostra a expressão (4.29).

Da forma como apresentadas as análises das expressões (4.27), (4.28) e (4.29), envolvendo os termos da matriz Z_{barra} do SEP, acredita-se que esta poderá auxiliar as análises de impactos das obras de expansão na amplitude dos afundamentos de tensão.

4.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, mostrou-se como as obras de expansão podem impactar significativamente o desempenho do sistema elétrico em relação aos afundamentos de tensão, no que diz respeito aos principais parâmetros que o caracterizam: amplitude, duração e frequência de ocorrência.

A análise de sensibilidade apresentada enfatiza a importância de se definir, primeiramente, o ponto do sistema elétrico a ser estudado, para se investigar o impacto de uma obra nos afundamentos de tensão no SEP. Neste sentido, recomenda-se cautela ao planejador nas análises, pois uma obra pode melhorar o desempenho de um ponto e piorar o desempenho de um outro ponto do sistema, em relação ao fenômeno.

Concluiu-se, portanto, que a análise da influência de cada tipo de obra (nova LT, SE, usina, carga, compensação *shunt*, etc.) nos afundamentos deve considerar as particularidades de cada sistema.

5. ESTRATÉGIA PARA ANÁLISE DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO NO PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO

5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo apresenta uma proposta inovadora de estratégia para se analisar os afundamentos de tensão no âmbito dos Estudos de Planejamento. Inclui, também, de forma específica, procedimentos para Tratamento de Consumidores Sensíveis. O fluxograma da Figura 6.1 apresenta as duas linhas de atuação.

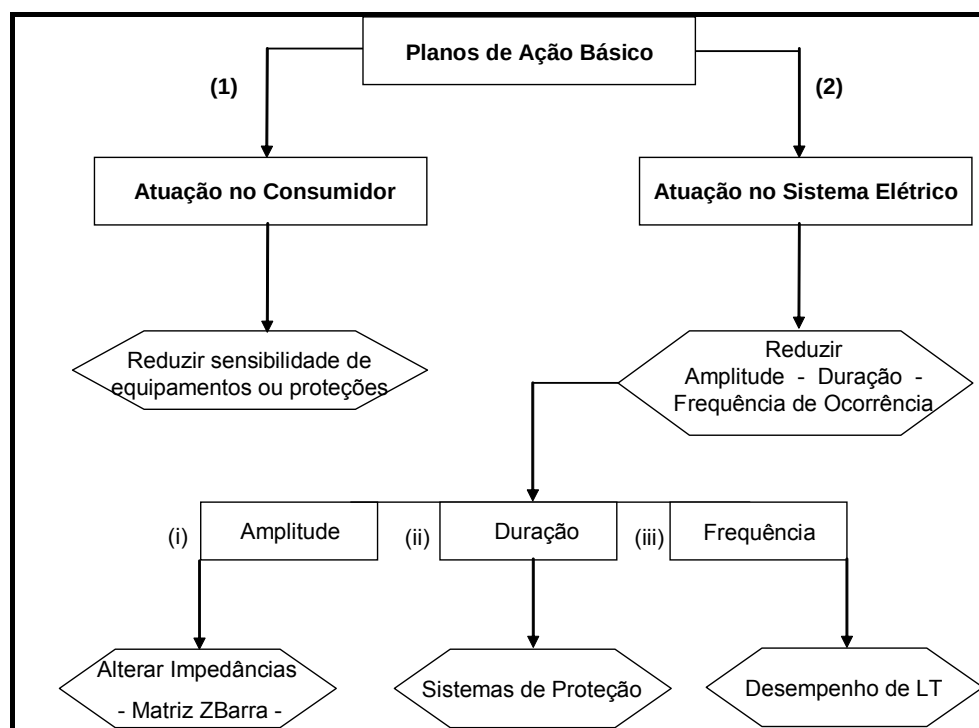


Figura 5.1 – Afundamentos de Tensão - Proposta de Linhas de Atuação no Planejamento

As duas linhas propostas têm a seguinte descrição:

1. **Atuação no Consumidor:** Em análises conjuntas com a área de operação, sugere-se a redução na sensibilidade dos equipamentos e/ou de suas proteções em relação aos afundamentos de tensão. Esta é uma das primeiras ações para se tentar mitigar problemas com consumidores, em função, principalmente, do baixo custo.
2. **Atuação no Sistema Elétrico:** Reduzir a amplitude e/ou a duração e/ou a frequência de ocorrência dos afundamentos de tensão a partir de alterações no sistema elétrico, da seguinte forma:
 - i) **Redução da Amplitude:** alterar as impedâncias do sistema elétrico, a partir de obras no sistema ou mudanças na topologia da rede;
 - ii) **Redução da Duração:** definir sistema de proteção (relés e equipamentos de abertura de circuitos) com o menor tempo de atuação, para permitir a eliminação mais rápida das faltas;
 - iii) **Redução da Frequência:** definir LT e/ou sistema de suprimento com melhores desempenhos, em especial frente às descargas atmosféricas.

Para compor a estratégia, o capítulo parte das definições de Premissas, nas quais se fundamenta a proposta.

A análise de sensibilidades realizada no capítulo anterior apontou para a concepção de Índices de Desempenho, que sinalizassem qualitativamente o comportamento de pontos (barras) do SEP frente ao fenômeno. Este capítulo apresenta dois índices de desempenho propostos para aplicação nos Estudos de Planejamento, nas etapas de Diagnóstico e Avaliação Técnica de Alternativas de Expansão.

Finalizando o capítulo, é apresentada a Estratégia para Análise de

Afundamento de Tensão aplicada ao planejamento da expansão.

5.2. PREMISSAS

Nas premissas estão definidos a origem dos afundamentos de tensão considerada na estratégia, bem como os parâmetros do afundamento e a forma de aquisição dos mesmos, com vistas à obtenção de resultados aplicáveis para as necessidades de planejamento. Também são apresentadas as variáveis de influência consideradas.

Destaca-se que as premissas aqui estabelecidas têm como objetivo permitir avaliar qualitativamente o desempenho de barras do sistema elétrico em relação aos afundamentos de tensão, sob a ótica de planejamento.

A partir desta avaliação qualitativa e orientando-se por meio dos procedimentos propostos, o planejador poderá tomar decisões mais seguras quanto às ações relativas aos afundamentos de tensão.

As premissas da estratégia proposta são:

- **Origem dos Afundamentos de Tensão:** faltas nas LT do sistema elétrico associadas às descargas atmosféricas. Esta premissa justifica-se, pois históricos de desligamentos no sistema elétrico concluem que, dentre seus principais elementos (transformadores, barramentos, disjuntores, chaves, geradores e LT), a maioria das faltas ocorre nas LT e são provocadas pela ação das descargas atmosféricas.
- **Parâmetros do Afundamento de Tensão:** amplitude, duração e frequência de ocorrência. Estes parâmetros são mundialmente adotados para a avaliação do desempenho de sistema elétrico relativo aos afundamentos de tensão, conforme se verifica nas metodologias citadas no capítulo 2.

Amplitude do Afundamento de Tensão: é o menor valor RMS da tensão remanescente dentre as três fases, seja para eventos monofásicos ou eventos trifásicos.

Esta definição é adotada pela metodologia EPRI/ELETROCTEK, e é também recomendada em [IEEE, 1997]. A amplitude do afundamento de tensão é calculada a partir do Método das Posições de Falta ou Curto-Circuito Deslizante. A ferramenta computacional utilizada neste trabalho, para o cálculo da amplitude do afundamento, é o *software AspenTM*. O *AspenTM* é internacionalmente utilizado nas empresas de energia para cálculo de curto-circuito [Aspen, 2002]. Este aplicativo computacional possui uma subrotina interna para o cálculo automático de afundamentos de tensão. Os apêndices A e B apresentam características básicas do *software* e dados de saída da subrotina, respectivamente.

Duração do Afundamento de Tensão: são considerados os tempos típicos de proteção de acordo com as filosofias de proteção utilizadas. A Tabela 5.1 mostra, por nível de tensão, os tempos típicos de atuações das proteções utilizados como premissa deste trabalho.

Tabela 5.1–Tempo Típico Eliminação de Faltas [IEEE,1998b], [IEEE,1998c], [ONS, 2002c]

Tempo de Duração do Afundamento de Tensão	
Tensão Nominal V (kV)	Tempo de atuação da proteção [ms]
$V > 230 \text{ kV}$	100
$V \geq 230 \text{ kV}$	150
$13,8 \text{ kV} < V < 230 \text{ kV}$	300
$V \leq 13,8 \text{ kV}$	500

É considerada neste trabalho a atuação instantânea das proteções, na primeira zona de atuação dos relés. Os valores de tempo de proteção da Tabela 5.1 são utilizados para a composição dos índices de afundamentos de tensão propostos neste capítulo.

Frequência de Ocorrência do Afundamento de Tensão: é calculada mediante aplicação da equação (5.1).

$$f = \Delta L \cdot \beta \quad (5.1)$$

onde:

f – frequência de ocorrência de afundamentos de tensão associada ao segmento de LT [eventos/ano];

ΔL – segmento de LT representando um ponto de curto-circuito [km];

β - número de desligamentos na LT/km/ano.

Freqüentemente, o valor de β é obtido a partir das Tabelas 5.2 e 5.3, já apresentadas no capítulo 2, aqui reescritas para facilitar a compreensão da estratégia.

Tabela 5.2 – Taxa de Falhas em LT (região dos EUA) [IEEE, 1997]

Nível de Tensão (kV)	Faltas/100km/ano	Fase-Terra	Fase-Fase-Terra	Fase-Fase	Trifásico
345	2,29	91%	7%	1%	1%
230	1,62	81%	16%	1%	1%
138	2,98	73%	17%	6%	4%
69	6,15	65%	22%	7%	6%

Tabela 5.3 – Taxa de Falhas em LT (região do Brasil)

Nível de Tensão	Faltas/100km/ ano
69kV	5,8
161 kV – 138 kV	4,1
230 kV – 345 kV	2,1
500 kV	0,9

Com relação às taxas de falhas em LT, apresentam-se algumas considerações relevantes:

- Nos valores apresentados nas Tabelas 5.2 e 5.3, admite-se que, ao longo da LT, as falhas são equiprováveis, o que de fato não é a situação real, mas uma aproximação muitas vezes razoável para estudos de planejamento.
- Recomenda-se a sua utilização para efeito de comparação qualitativa do desempenho de barras do sistema em relação aos afundamentos de tensão. Não é aconselhável a sua aplicação para estimar o número de afundamentos de tensão em um consumidor;
- Estatísticas de diversos países apontam as descargas atmosféricas como a principal causa de curto-circuitos em LT [Cemig, 1995], [Dias, 2002], [Visacro, 2005]. Sendo assim, a informação sobre a incidência de descargas em uma região se torna relevante no que diz respeito à frequência da ocorrência dos afundamentos. Estudos sobre este tema vêm sendo realizados no LRC² [Dias, 2002], [Menezes, 2006], [Visacro, 2006³], mais especificamente quanto ao uso dos dados do LLS (*Lightning Location System*).

Os LLS se constituem numa poderosa ferramenta para aquisição de dados de descargas atmosféricas. Apresentam uma ampla gama de aplicações em estudos de proteção e operação de sistemas elétricos, sobretudo a caracterização da densidade de descargas em uma região e do nível de exposição dos componentes do sistema elétrico. Permite, ainda, o desenvolvimento de análises objetivas quanto aos aspectos geográficos e cronológicos referentes à incidência do fenômeno.

Estes sistemas, além de indicarem a localização do ponto de incidência (latitude e longitude), disponibilizam informações quanto à qualidade da estimativa desta localização (precisão da localização). Fornece também outros dados de interesse sobre cada evento de descarga registrado, tais quais o instante de

² LRC - *Lightning Research Center* - Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas – Convênio UFMG / CEMIG.

³ O autor desta dissertação participou da elaboração do trabalho.

ocorrência, a polaridade, a estimativa da intensidade de corrente e a multiplicidade [Cummins, 1998].

- **Variáveis de Influência do Afundamento de Tensão:**

Tensão Pré-Falta: é considerada a tensão pré-falta de 1,0 p.u. em todas as barras do sistema elétrico, proposto em [IEEE, 1997];

Resistência de Falta: é considerada uma resistência de falta de 0 (zero) ohms, proposto em [IEEE, 1997]. A resistência de falta igual a 0 ohms provoca os maiores afundamentos de tensão.

Conexão dos Transformadores: o tipo de conexão dos transformadores é aquele considerado nas simulações de afundamentos de tensão, por meio da representação do SEP nos aplicativos computacionais para cálculo de curto-circuito.

Tipo de Falta: são consideradas as faltas trifásicas e monofásicas. Para os propósitos de planejamento e deste trabalho, é razoável focar nestes dois tipos de falta. As faltas trifásicas normalmente provocam as maiores amplitudes de afundamentos de tensão enquanto as faltas monofásicas são as mais freqüentes.

Sistema de Proteção: o sistema de proteção influencia a duração do afundamento de tensão. Conforme já citado, neste trabalho é considerada a atuação instantânea das proteções na primeira zona de atuação, com os valores mostrados na Tabela 5.1.

Sistema de Religamento: neste trabalho, este não é considerado, embora salienta-se que a concepção do sistema de religamento impacta na amplitude dos afundamentos de tensão provocados por religamentos automáticos de LT não satisfatórios.

5.3. AFUNDAMENTOS DE TENSÃO - ÍNDICES DE DESEMPENHO

5.3.1. Considerações Iniciais

A pesquisa bibliográfica realizada mostra que índices de desempenho para afundamentos de tensão estão sendo estudados por diferentes entidades. Dentre elas, destaca-se o IEEE, por meio da Força Tarefa IEEE P1564 [IEEE, 2001]. Os desenvolvimentos desta força tarefa baseiam-se nas informações apresentadas em [IEEE 1995a], [IEEE, 1995c], [IEEE, 1997], [IEEE, 1998a]. Tais estudos apontam diretrizes para avaliação do fenômeno, porém não apresentam índices de desempenho de forma direta.

Apesar de a literatura apresentar alguns índices de desempenho, este tema ainda constitui campo aberto a investigações. A maior parte dos trabalhos utiliza índices específicos baseados no monitoramento do sistema existente, a partir de medições e registro de eventos. Com respeito a aplicações no planejamento, verifica-se uma carência de desenvolvimentos.

Os índices propostos nesta dissertação são calculados a partir de bases de dados disponíveis na área de planejamento e geram estimativas de desempenho do SEP com o objetivo de avaliar o fenômeno de forma integrada com os critérios técnicos tradicionais de expansão.

5.3.2. Considerações Básicas Adotadas na Concepção dos Índices

Na modelagem dos índices, algumas considerações foram feitas. Quanto à amplitude, foram estabelecidos 4 (quatro) patamares de afundamentos de tensão. O motivo desta consideração decorre do fato das curvas de suportabilidade dos equipamentos apresentarem patamares (limites mínimos) de tensão de operação, abaixo dos quais os equipamentos sensíveis falharão. Estes limites estão próximos de 0,5 p.u., 0,65 p.u., 0,75 p.u. e 0,9 p.u.

Para ilustrar tal consideração, vale o seguinte exemplo: se ocorrerem dois afundamentos de tensão em um ponto do SEP, com a mesma duração, sendo um com a amplitude de 0,5 p.u. e outro com a amplitude de 0,2 p.u., com o mesmo corte de carga, é razoável considerar uma única amplitude de 0,5 p.u. para as duas

situações. Seguindo este raciocínio, estão apresentadas na Tabela 5.4 as amplitudes dos afundamentos tensão a serem considerados conforme a faixa de amplitude.

Tabela 5.4 – Amplitude dos Afundamentos de Tensão – Patamares Propostos

Amplitude do Afundamento de Tensão	
Amplitude V Considerada (pu)	Faixas de Amplitude V (pu)
V = 0,50	V ≤ 0,50
V = 0,65	0,50 < V ≤ 0,65
V = 0,75	0,65 < V ≤ 0,75
V = 0,90	0,75 < V ≤ 0,90

Os índices propostos reúnem os valores dos afundamentos de tensão na barra de referência, originados a partir dos curto-circuitos em outros pontos do SEP. O valor da duração e freqüência de ocorrência de cada afundamento de tensão da barra de referência é igual à freqüência de ocorrência e duração do curto-circuito aplicado em cada ponto da rede.

5.3.3. Índices de Desempenho

Para a formulação dos índices, é proposto o denominado Fator de Severidade – **Fats**, associado aos pontos onde ocorrem os curto-circuitos simulados [Menezes, 2003]⁴.

O **Fats** indica o quanto um curto-circuito, em um ponto do sistema, influencia o afundamento de tensão na barra de referência.

A expressão matemática para esse fator está mostrada na equação (5.2).

$$Fats = \frac{f \cdot t}{v} \quad (5.2)$$

onde:

v - tensão remanescente na barra de referência [p.u.];

f - freqüência de ocorrência de curto-circuito [eventos/ano];

t - parâmetro relacionado ao tempo de duração dos afundamentos de

⁴ Nesta referência, o autor desta dissertação apresenta as investigações iniciais sobre os índices.

tensão.

O parâmetro t assume os seguintes valores, os quais representam a influência do tempo de atuação das proteções (Tabela 5.1). Os valores foram definidos em função das proporções do tempo de atuação das proteções, entre os diferentes níveis de tensão.

$t = 1$, para faltas em pontos do sistema com tensão $\geq 230\text{kV}$;

$t = 2$, para faltas em pontos do sistema com tensão $< 230\text{kV}$ e $> 13,8\text{ kV}$;

$t = 5$, para faltas nas barras de $13,8\text{ kV}$ das SE.

O Índice de Severidade - **Isev** e o Índice de Sensibilidade – **Ise**n, propostos nesta dissertação, são descritos a seguir.

Isev – Índice de Severidade

O Índice de Severidade é definido como o somatório dos Fatores de Severidade. Este índice assume um valor adimensional e indica o quanto a barra de referência está suscetível aos afundamentos de tensão. A equação (5.3) mostra a expressão matemática utilizada para o cálculo do Isev.

$$Isev = \sum Fats \quad (5.3)$$

onde:

$Isev$ – Índice de Severidade;

$Fats$ – Fator de Severidade.

Comparando as barras do sistema, quanto ao desempenho qualitativo em relação aos afundamentos de tensão, o menor Isev indica a barra com o melhor desempenho.

Índice de Sensibilidade (Isen)

O Índice de Sensibilidade é um índice percentual definido pelo somatório dos Fatores de Severidade em cada nível de tensão dividido pelo Isev. Para cada nível de tensão existe um Isen. O Isen indica o quanto um nível de tensão influencia o desempenho da Barra de Referência em relação aos afundamentos de tensão. A equação (5.4) mostra a expressão matemática utilizada para o cálculo do Isen.

$$Isen = \frac{\sum Fats \text{ de cada nível de tensão}}{Isev} \quad (5.4)$$

onde:

Isen – Índice de Sensibilidade;

Fats – Fator de Severidade;

Isev – Índice de Severidade.

Quanto menor o valor do Isen de um nível de tensão, menor é a participação deste nível nos afundamentos de tensão da barra de referência.

A utilização destes índices no processo de decisão dos Estudos de Planejamento é indicada no próximo item, basicamente nas etapas de Diagnóstico e de Análise Técnica de Alternativas de Expansão.

5.4. AFUNDAMENTOS DE TENSÃO–PROPOSTA DE INCLUSÃO NAS ETAPAS DOS ESTUDOS DE PLANEJAMENTO

No capítulo 3, as etapas básicas dos estudos de planejamento estão descritas. Neste item, é apresentada uma proposta para inclusão de análises de afundamentos de tensão. A Figura 5.2 indica as etapas onde tal inclusão é sugerida.

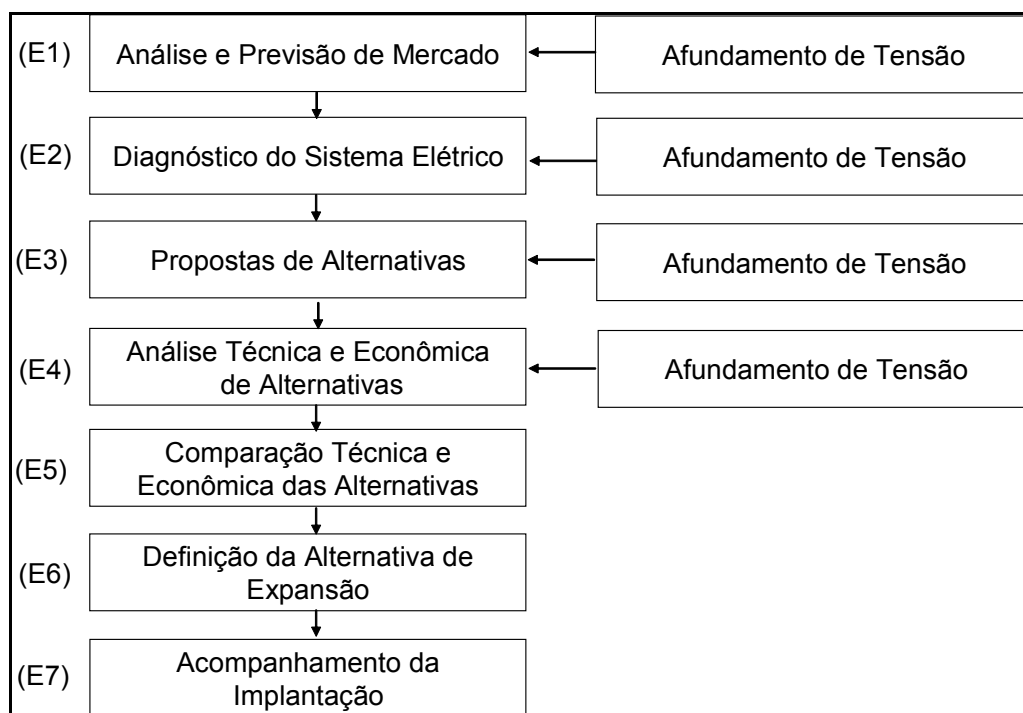


Figura 5.2 – Etapas de Estudo – Proposta de Inclusão de Análise de Afundamento

O objetivo da proposta é direcionar as equipes de planejamento nas tarefas realizadas nas etapas (E1), (E2), (E3) e (E4), da seguinte maneira:

E1) Análise e Previsão de Mercado: Incluir nesta etapa a investigação de cargas potencialmente sensíveis aos afundamentos de tensão, considerando os novos consumidores ou as solicitações de aumento de carga. Recomenda-se priorizar as análises em pontos do sistema elétrico com desempenhos mais críticos em relação aos afundamentos de tensão. Para auxiliar as ações neste sentido, destacam-se os seguintes setores industriais, em função da sensibilidade quanto aos afundamentos de tensão e das implicações operacionais e econômicas [EPRI, 2001]: Semicondutores, Siderurgia, Metalurgia, Petróleo, Química, Papel, Vidro, Têxtil, Laticínios.

E2) Diagnóstico do Sistema Elétrico: Identificar os pontos críticos do sistema existente e futuro em relação aos afundamentos de tensão,

comparando os índices de desempenho de barras. No caso do sistema existente, sugere-se utilizar informações adicionais de registros históricos sobre a frequência de faltas e problemas associados aos afundamentos de tensão.

E3) Proposta de Alternativas: Para a criação das alternativas de expansão do sistema, sugere-se avaliar, também, pontos críticos em relação aos afundamentos de tensão, além daqueles relacionados aos problemas de tensão, carregamento, perdas, quedas de tensão, níveis de curto-circuito, entre outros. Nestes pontos críticos, geralmente são definidas obras de expansão, podendo ser adicionadas aquelas para melhoria de desempenho do sistema em relação aos afundamentos de tensão.

E4) Análise Técnica e Econômica das Alternativas: Analisar o desempenho técnico das alternativas em relação aos afundamentos de tensão a partir dos índices de desempenho de barras, apresentados no item 5.3.3. Nas análises econômicas das alternativas, sugere-se um estudo de sensibilidade quanto às perdas de carga por afundamentos de tensão, possibilitando identificar as alternativas mais robustas neste aspecto.

Apresentada a estratégia proposta, o fluxograma da Figura 5.3 mostra, de uma forma mais detalhada, os passos do procedimento a ser seguido. Tal procedimento indica, separadamente, os parâmetros frequência de ocorrência, amplitude e duração dos afundamentos de tensão e como eles podem se integrar nas etapas dos estudos de planejamento.

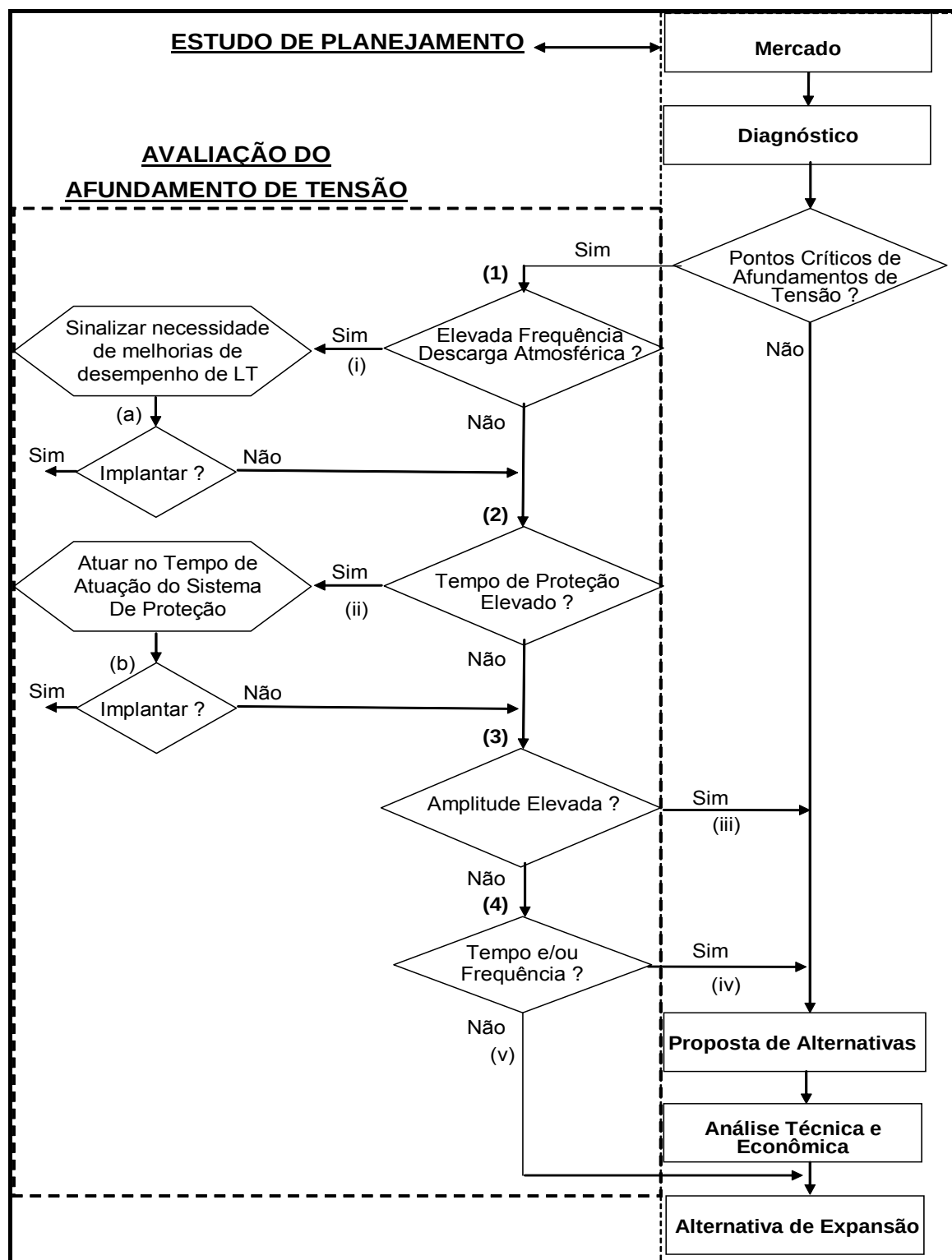


Figura 5.3 – Etapas de Estudo - Procedimentos de Análise de Afundamentos

Os passos dos procedimentos propostos são a seguir descritos.

Identificado o Mercado Futuro, procede-se à etapa de Diagnóstico. Nesta etapa, são possíveis as seguintes situações:

- **Se Pontos Críticos Não São Identificados:** prossegue-se o estudo de planejamento para a etapa Proposta de Alternativas e, seqüencialmente, para a Análise Técnica e Econômica e, finalmente, para a definição da Alternativa de Expansão Recomendada.
- **Se Pontos Críticos São Identificados:** prossegue-se o estudo de planejamento para a etapa de identificação dos parâmetros críticos dos afundamentos de tensão, da seguinte forma:

(1) Frequência de Ocorrência: Verificar se o ponto é crítico devido à frequência de faltas associadas à descargas atmosféricas (1); caso positivo (i), sinalizar a necessidade de melhorias de desempenho de LT; verificar viabilidade de implantá-las, independente da obra de expansão em estudo (a); caso negativo, considerar este problema na Proposta de Alternativas (iv);

(2) Tempo de Proteção Elevado: Verificar se o ponto é crítico devido ao tempo de atuação do sistema de proteção (2); caso positivo (ii), sinalizar a necessidade de obras/ajustes para redução do tempo de atuação do sistema de proteção; verificar viabilidade de implantá-los, independente da obra de expansão em estudo (b); caso negativo, considerar este problema na Proposta de Alternativas (iv);

(3) Amplitude Elevada dos Afundamentos de Tensão: Verificar se o ponto é crítico devido à amplitude do afundamento de tensão; caso positivo (iii), considerar a necessidade de redução da amplitude dos afundamentos de tensão na Proposta de Alternativas (iii).

5.5. PROPOSTA DE TRATAMENTO DE CONSUMIDORES SENSÍVEIS A AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

5.5.1. Procedimento para Tomadas de Decisões

Neste item é apresentada uma proposta de procedimentos para orientar ações de planejamento, frente a reclamações de consumidores relativas a afundamentos de tensão. Esta se caracteriza por considerar, nas análises para as soluções dos problemas, as obras de expansão planejadas.

O objetivo desta proposta é dar suporte às equipes de planejamento nas análises conjuntas com a área de operação, na busca de soluções integradas para os problemas de consumidores sensíveis.

Decisões quanto às ações corretivas para problemas de afundamentos de tensão podem ser subsidiadas a partir de estimativas de desempenho do sistema futuro relativo ao fenômeno, integrando propostas de mitigação com obras de expansão planejadas.

A Figura 5.4 apresenta o fluxograma que indica os passos do procedimento proposto, onde são indicadas as ações para resolver problemas de consumidores impactados por afundamentos de tensão.

Os passos (i), (ii), (a), (b), (c), (c1) e (1) até (14) auxiliam a descrição da seqüência de decisões ao longo do processo. Tem-se, assim, um registro das análises que foram realizadas para a tomada da decisão.

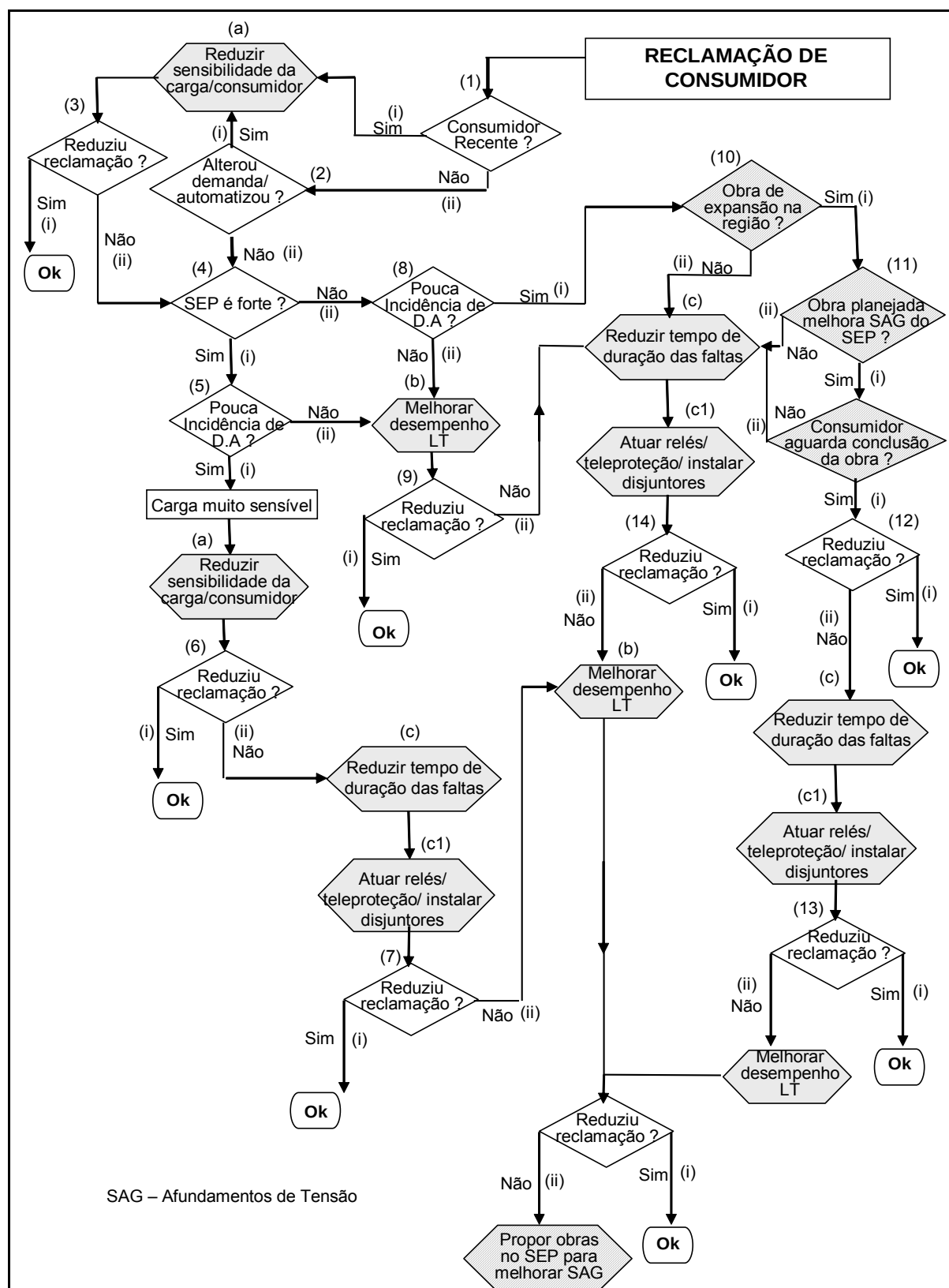


Figura 5.4 – Consumidores Sensíveis – Proposta de Tratamento no Planejamento

A filosofia adotada na concepção dos passos do procedimento proposto se baseia na seguinte seqüência de ações:

- Atuar no Consumidor, no sentido de reduzir a sensibilidade de suas cargas;
- Atuar no desempenho do SEP Existente, nos parâmetros duração, frequência de ocorrência e amplitude do fenômeno;
- Avaliar o impacto das Obras Planejadas, no desempenho do SEP, quanto aos afundamentos de tensão.

Os blocos relacionados às ações no *Consumidor* e no *SEP existente* estão sombreados em destaque na Figura 5.4. Os blocos hachurados se referem às ações relativas às *Obras de Expansão Planejadas*.

Atuando na *frequência*, é indicada a melhoria de desempenho das LT. Com respeito à *duração* do afundamento, é recomendada a atuação no sistema de proteção do SEP. Neste sentido, a instalação de disjuntores é sugerida, permitindo que faltas sejam eliminadas mais rapidamente. Entretanto, salienta-se, mais uma vez, que a instalação de disjuntores no sistema elétrico não altera o número de ocorrência e a amplitude dos afundamentos de tensão. Com relação à avaliação do impacto das *obras planejadas*, estas podem alterar todos os três parâmetros.

Entre as sugestões de mitigação do problema atuando na planta do *consumidor*, além da redução da sensibilidade dos equipamentos existentes e suas proteções, apresentam-se outras alternativas.

- 1. Partida de Motores:** procedimentos internos na planta do consumidor para proporcionar uma redução da corrente de partida dos motores;
- 2. Ocorrência de Faltas:** procedimentos internos na planta do consumidor para proporcionar uma redução dos curto-circuitos;
- 3. Sistema de Aterramento:** procedimentos internos na planta do consumidor para alterar a resistência do sistema de aterramento,

objetivando proporcionar uma redução da amplitude dos afundamentos de tensão;

4. **Conexão dos Transformadores:** alterações no tipo de conexão dos transformadores internos da planta do consumidor. Esta ação altera a amplitude do afundamento de tensão entre as fases e, dependendo da alteração, pode-se reduzir a intensidade do afundamento de tensão da fase onde está conectada a carga sensível;
5. **Alteração da Seqüência de Fase:** alterar a seqüência de conexão das fases primárias do transformador que supre as cargas sensíveis. Dependendo do tipo de conexão dos transformadores internos da planta, a amplitude do afundamento de tensão é diferente para cada fase. Neste caso, é possível verificar entre as fases, aquela cuja amplitude do afundamento de tensão é menor, e atender a carga sensível a partir desta.
6. **Instalação de Equipamentos Condicionadores de Energia:** instalar na planta do consumidor equipamentos condicionadores de energia, tais como: *Uninterrupted Power Supply* – UPS, *Dynamic Voltage Regulation* DVR [Bollen, 2000], [Dugan, 1998].

5.5.2. Situações Específicas – Configuração de Barras de SE

Enquanto o item anterior apresenta uma estratégia de planejamento de caráter geral, a contribuição deste item se dá no sentido da aplicação das análises até aqui realizadas, na solução de questões específicas.

São abordados problemas comuns na prática dos estudos elétricos, onde são analisados diferentes arranjos físicos de SE e propostas ações no sentido de minimizar os impactos dos afundamentos.

Existem situações em que consumidores atendidos pelo sistema de 13,8 kV reclamam paradas industriais, devido a possíveis afundamentos de tensão. Diante deste problema, apresentam-se duas configurações típicas de operação de barras

de 13,8 kV de SE, que podem mitigar tais problemas relativos aos afundamentos de tensão.

- **Barra de 13,8 kV da SE originalmente fechada:** nesta situação, os transformadores da SE que suprem o sistema de 13,8 kV estão operando em paralelo, conforme o desenho esquemático da Figura 5.5.

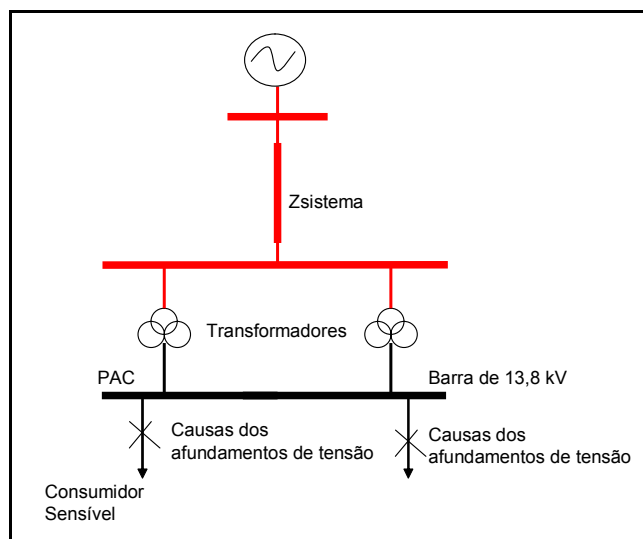


Figura 5.5 – SE Com Barra Fechada

Nesta situação, o ponto de acoplamento comum - PAC entre o consumidor e o local da causa do afundamento é a barra de 13,8 kV da SE. Neste caso, existem duas opções para mitigar o problema, dependendo das situações seguintes:

- Consumidor e Falta em Alimentadores Distintos: a opção é abrir a barra de 13,8 kV da SE, de forma que a barra que supre o consumidor fique isolada da barra do alimentador no qual esteja ocorrendo a causa dos afundamentos de tensão. Esta configuração proposta está ilustrada na Figura 5.6.

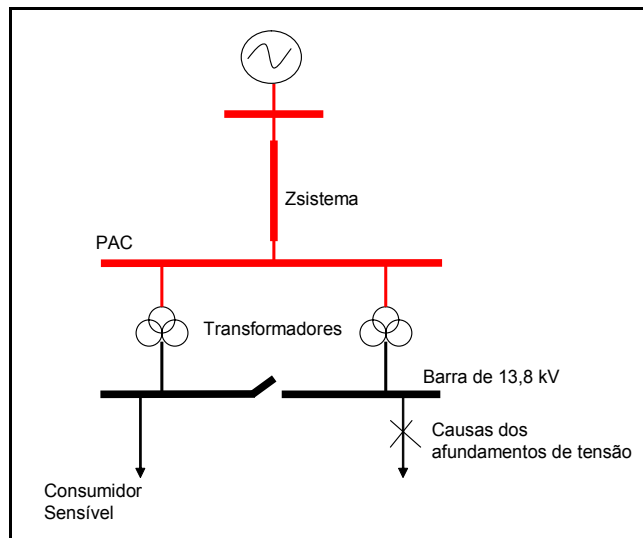


Figura 5.6 – Abertura de Barra

Esta ação altera o ponto de PAC da barra de 13,8 kV para a barra de alta tensão da SE, reduzindo as amplitudes dos afundamentos de tensão na barra de 13,8 kV que supre o consumidor.

Reportando às análises de sensibilidade do Capítulo 4, esta condição é análoga à situação de aumento da impedância a jusante da barra de referência, podendo ser interpretada através do gráfico da Figura 4.11.

- Consumidor e Falta no Mesmo Alimentador: a opção manter fechada a barra de 13,8 kV da SE. Esta configuração proposta está ilustrada na Figura 5.7.

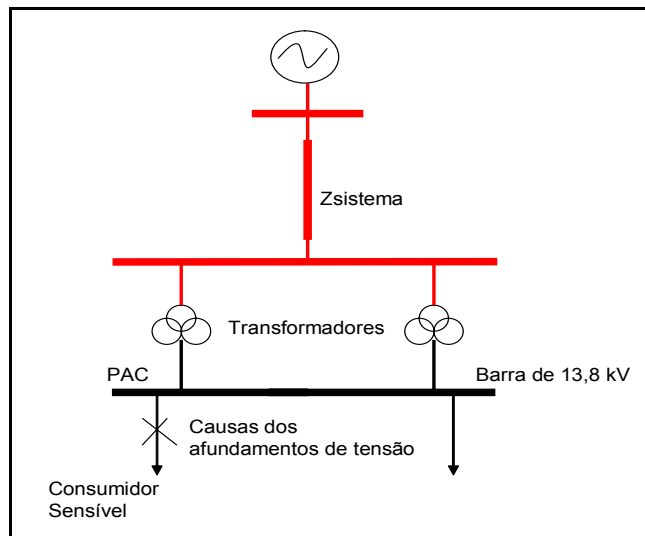


Figura 5.7 – Fechamento de Barra

Nesta condição, a ação de abrir a barra de 13,8 kV, conforme mostrado na seguinte Figura 5.8, não altera o PAC entre o consumidor e o local da falta, e aumenta as amplitudes dos afundamentos de tensão na barra de 13,8 kV que supre o consumidor.

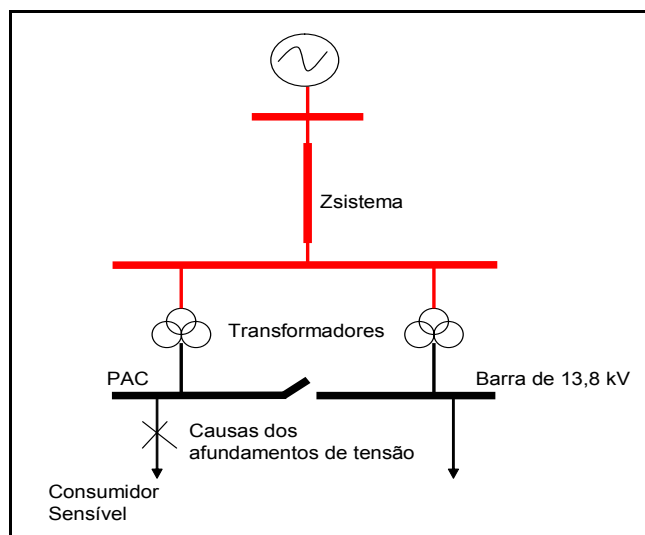


Figura 5.8 – Abertura de Barra

Reportando às análises de sensibilidade do Capítulo 4, esta condição é análoga à situação de aumento da impedância a montante da barra de referência, podendo ser interpretada através do gráfico da Figura 4.10.

- **Barra de 13,8 kV da SE originalmente aberta:** nesta situação, os transformadores da SE que suprem o sistema de 13,8 kV não estão operando em paralelo, conforme o desenho esquemático da Figura 5.9.

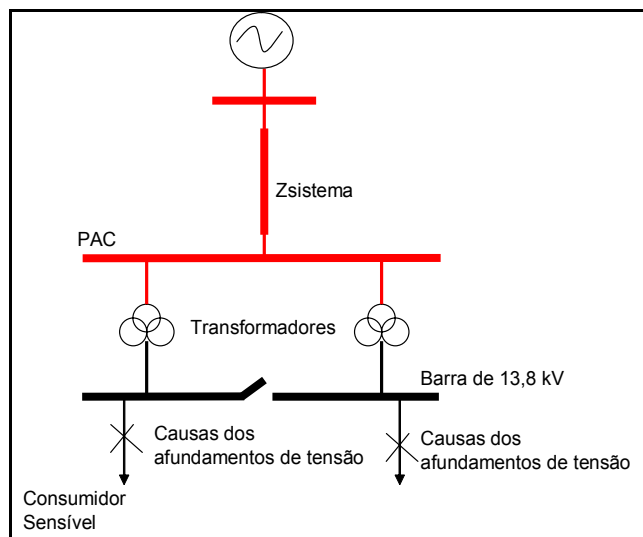


Figura 5.9 – SE Com Barra Aberta

Nesta situação, o PAC entre o consumidor e o local da causa do afundamento pode ser a barra de alta tensão da SE ou a barra de 13,8 kV da SE. Neste caso, existem duas opções para mitigar o problema, dependendo das situações seguintes:

- Consumidor e Falta em Alimentadores Distintos: a opção é manter aberta a barra de 13,8 kV da SE. Esta configuração proposta pode ser ilustrada pela Figura 5.10. O desempenho do sistema não é alterado.

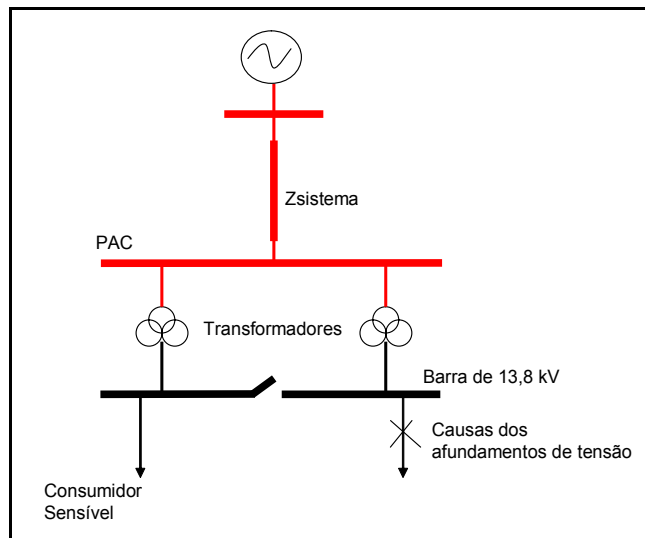


Figura 5.10 – Permanência de Barra Aberta

Nesta condição, a ação de fechar a barra de 13,8 kV, conforme mostrado na Figura 5.11, altera o ponto de PAC da barra de alta tensão para barra de 13,8 kV da SE, aumentando as amplitudes dos afundamentos de tensão na barra de 13,8 kV que supre o consumidor.

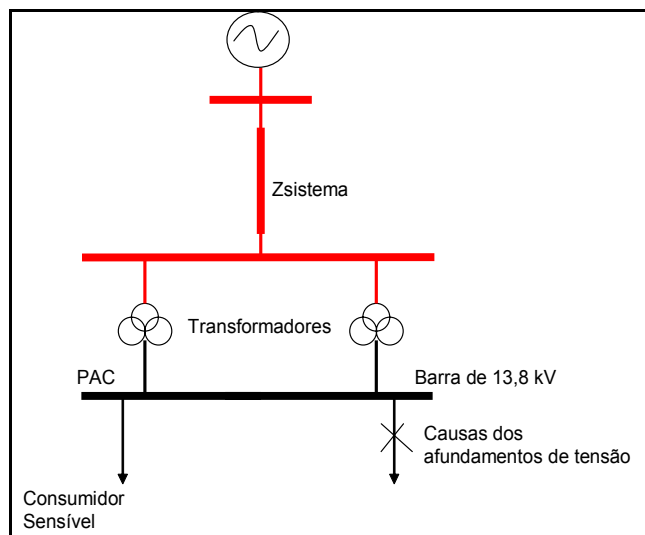


Figura 5.11 – Fechamento de Barra

Reportando às análises de sensibilidade do Capítulo 4, esta condição é análoga à situação de redução da impedância a jusante da barra de referência, podendo ser interpretada através do gráfico da Figura 4.11.

- Consumidor e Falta no Mesmo Alimentador: a opção é fechar a barra de 13,8 kV da SE, o que reduz as amplitudes dos afundamentos de tensão na barra de 13,8 kV que supre o consumidor. Esta configuração proposta está ilustrada na Figura 5.12.

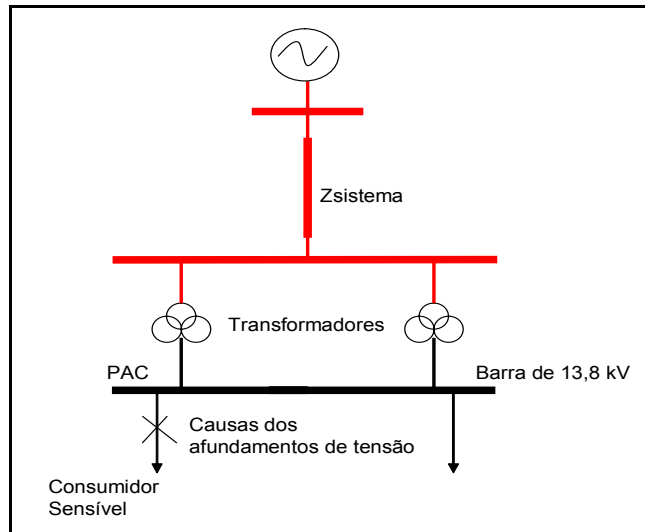


Figura 5.12 – Fechamento da Barra

Nesta condição, a ação de manter aberta a barra de 13,8 kV, conforme mostrado na Figura 5.13, não altera o desempenho do sistema em relação aos afundamentos de tensão.

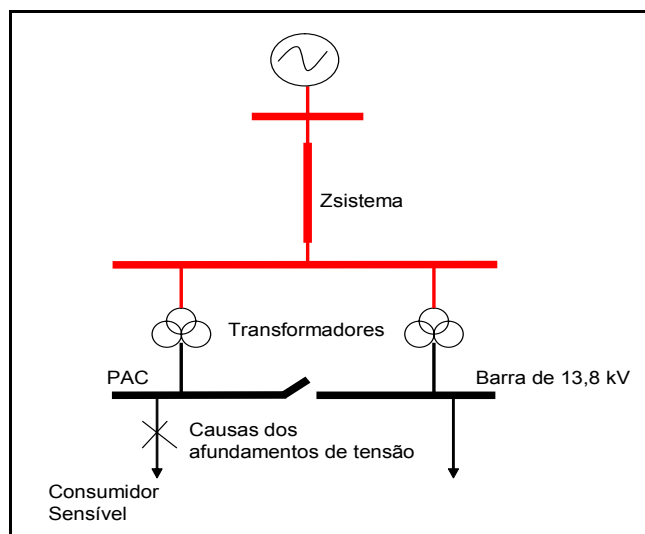


Figura 5.13 – Abertura de Barra

Reportando às análises de sensibilidade do Capítulo 4, esta condição é análoga à situação de elevação da impedância a montante da barra de referência, podendo ser interpretada através do gráfico da Figura 4.11.

5.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A estratégia apresentada neste capítulo, para os *Estudos de Planejamento*, vem ao encontro dos anseios dos planejadores, no que diz respeito à tarefa de elaboração de alternativas de expansão.

Vários aspectos foram considerados, para que os procedimentos pudessem ser incorporados na prática das empresas. Um dos mais relevantes é a inclusão de etapas bem definidas, específicas ao afundamento de tensão, dentro do processo de decisão já utilizado tradicionalmente pelas equipes.

O *Tratamento de Consumidores Sensíveis* é uma das questões presentes nas atividades de operação e planejamento. O procedimento proposto se enquadra na análise de soluções que consideram os impactos previstos das obras de expansão.

Um outro ponto interessante a ser destacado é a utilização de *Índices de Desempenho* relacionados ao afundamento. Estes traduzem o comportamento do sistema, facilitando a análise de inúmeras e diferentes situações que se apresentam na elaboração de planos. Para exemplificar seu potencial de aplicação, no capítulo seguinte é apresentado um estudo de caso.

6. ESTUDO DE CASO

6.1. CARACTERIZAÇÃO DO CASO

Este capítulo é dedicado à apresentação da aplicação dos índices de desempenho I_{sev} e I_{sen} nas análises de afundamento de tensão no planejamento.

O sistema elétrico estudado compreende parte da rede CEMIG interligada ao SIN. O caso exemplo mostra a aplicação dos índices em um estudo para avaliar o impacto de uma obra de expansão nos afundamentos de tensão de um subsistema da empresa.

Para a realização deste caso, são adotadas as seguintes considerações:

- Tensão pré-falta igual a 1,0 p.u.;
- Faltas monofásicas fase-terra;
- Afundamentos de tensão entre 0,1 e 0,8 p.u. na barra de referência;
- As amplitudes dos afundamentos são calculadas por meio do programa de curto-circuito *AspenTM*;
- Para estimar a duração dos afundamentos de tensão, considerou-se o tempo típico de atuação das proteções;
- A estimativa da frequência de falta em cada barra de SE é calculada pela soma das estimativas de faltas em cada metade das LT que derivam da barra. Para simplificação, somente são simuladas faltas nas SE, embora a maioria das faltas aconteça ao longo das LT. É utilizada a taxa de falhas de LT.

A Figura 6.1 mostra o SEP sob análise, que envolve parte do sistema elétrico da região noroeste de Minas Gerais. A obra de expansão a ser avaliada neste caso corresponde à interligação deste sistema ao SIN. Encontra-se destacada a barra de referência **E**, cujos afundamentos de tensão são analisados. A escolha desta barra se deve à presença de um consumidor sensível aos afundamentos de tensão conectado à mesma.

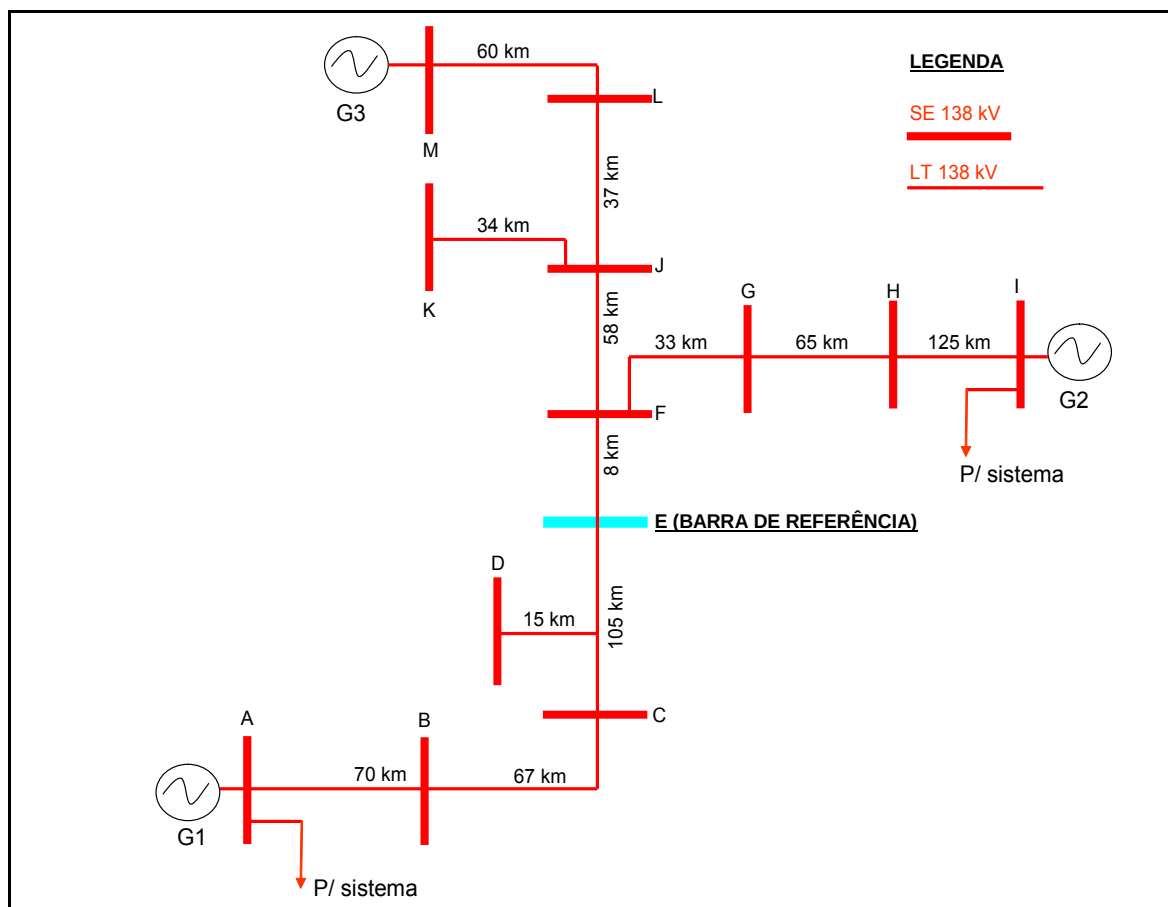


Figura 6.1 – Diagrama Unifilar do SEP

Este sistema elétrico é constituído, basicamente, de doze LT de 138 kV, com comprimentos que variam entre 50 km e 100 km, totalizando cerca de 680 km de LT. Possui quinze SE com transformações 138-13,8 kV que alimentam o sistema de média tensão, e três fontes principais de injeção de potência em 138 kV, representados na Figura 6.1 pelos geradores **G1**, **G2** e **G3**.

A Figura 6.2 mostra a configuração do sistema elétrico futuro, com a presença da nova SE de transmissão interligando-se no sistema de subtransmissão existente.

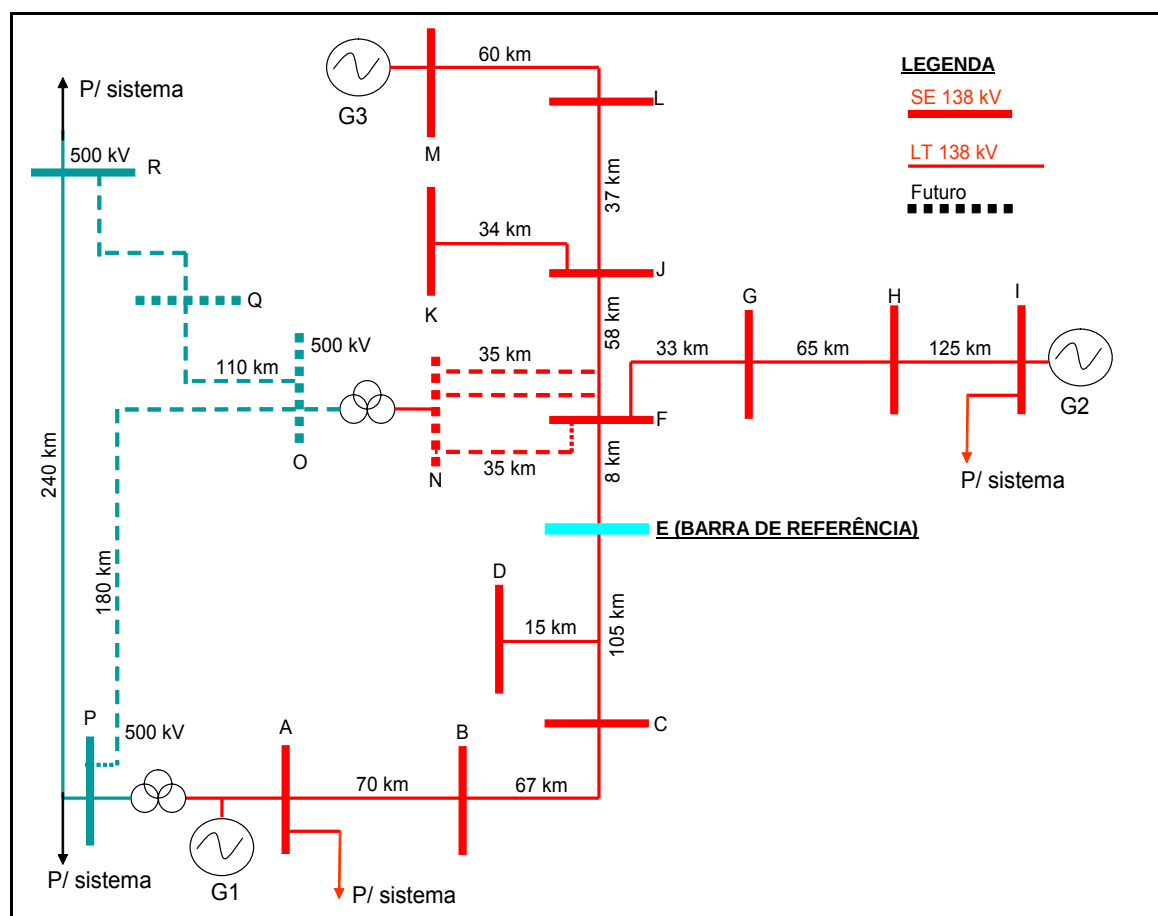


Figura 6.2 – Diagrama Unifilar do SEP Futuro

A nova SE de transmissão, representada pelas barras **N** e **O**, se conecta na rede de transmissão através de duas LT 500 kV, com cerca de 110 km a 180 km de extensão, e se interliga no sistema de subtransmissão por meio de três LT de 138 kV, com cerca de 35 km de extensão.

Esta SE representa uma nova fonte de injeção para o sistema de subtransmissão regional. Pelo que está apresentado no item 4.3.2.3, esta obra pode ser considerada como uma *Obra do Tipo C – Inclusão de Interligação entre Barras*.

A seguir estão apresentados os resultados das simulações, mostrando o desempenho do sistema antes e depois da obra de expansão, por meio dos índices propostos I_{sev} e I_{sen} .

6.2. RESULTADOS

Com base nos valores apresentados nas Tabelas 6.1 e 6.2, são realizadas análises de desempenho a partir do F_{ATS} , Fator de Severidade.

A Tabela 6.1 mostra os resultados das simulações de afundamentos de tensão na SE *E*, barra de referência, provocados por curto-circuitos fase-terra ao longo do sistema, com as suas estimativas de ocorrências e respectivos fatores de severidade, F_{ATS} , antes da implantação da obra de expansão.

Baseados em estudos encontrados na literatura [Cemig, 1995], [IEEE, 1997], do total de falhas, considerou-se que cerca de 75% serão faltas fase-terra e 25% faltas trifásicas.

Tabela 6.1 – Simulação do SEP Existente - Fator de Severidade - F_{ats} ⁵

BARRA DE REFERÊNCIA = SE "E"							
Barra de Referência		Curto-Circuito na Barra da SE		Nº falhas estimadas/ano			Fator de Severidade (FATS)
V (pu) - Valor Considerado	V (pu) - Valor Simulado						
F-T	F-T	SE	Tensão kV	Total	Fase-Terra	Trifásica	Fase-Terra
0,5	0,00	E	138	5	4	1	7,3
0,5	0,00	F	138	16	12	4	23,4
0,5	0,07	G	138	6	5	2	9,2
0,5	0,25	J	138	10	7	3	13,9
0,5	0,37	D	138	8	6	2	11,8
0,5	0,40	C	138	9	7	3	13,6
0,5	0,42	L	138	6	4	2	8,3
0,5	0,47	H	138	13	9	4	19,0
0,5	0,49	K	138	2	2	1	3,6
0,5	0,50	B	138	12	9	3	17,5
0,5	0,52	M	138	4	3	1	5,1
0,65	0,56	I	138	25	18	7	28,1
0,65	0,65	A	138	13	9	4	14,6
				Máximo FATS			28,1

Em relação à tabela anterior, destacam-se os seguintes comentários:

- O eixo 138 kV *I – H – G – F*, injeção do gerador **G2**, exerce a maior influência nos afundamento de tensão da barra de referência *E*, pois apresenta os maiores F_{ATS} .
- O eixo de 138 kV *M – L – J*, injeção do gerador **G3**, exerce a menor influência sobre os afundamentos de tensão da SE *E*, pois apresentam os menores

⁵ Fats – Fator que indica o quanto o curto-circuito em um ponto do SEP influencia o afundamento de tensão

F_{ATS} .

- A barra **I** possui o maior F_{ATS} , principalmente porque nesta estima-se o maior número de falhas (25 falhas/ano), em função do elevado número de LT conectadas à mesma.
- Estima-se que a área de vulnerabilidade atual da SE **E** compreende todo o sistema de 138 kV entre as SE **A**, **I**, **M**, o equivalente à cerca de 680 km de LT 138 kV.

A Tabela 6.2 mostra os resultados das simulações de afundamentos de tensão na SE **E** provocados por curto-circuitos fase-terra ao longo do sistema, com as suas estimativas de ocorrências e respectivos fatores de severidade, F_{ATS} , após a implantação da obra de expansão.

Tabela 6.2 – Simulação do SEP Futuro - Fator de Severidade - F_{ats}

BARRA DE REFERÊNCIA = SE "E"							
Barra de Referência		Curto-Circuito na Barra da SE		Nº falhas estimadas/ano			Fator de Severidade (FATS)
V (pu) - Valor Considerado	V (pu) - Valor Simulado						
F-T	F-T	SE	Tensão kV	Total	Fase-Terra	Trifásica	Fase-Terra
0,5	0,00	E	138	5	4	1	7,3
0,5	0,08	N	138	10	7	3	13,9
0,5	0,14	F	138	16	12	4	23,4
0,5	0,36	O	500	0	0	0	0,1
0,65	0,58	A	500	1	0	0	0,2
0,65	0,63	G	138	6	5	2	7,1
0,65	0,66	Q	500	0	0	0	0,0
0,75	0,68	R	500	1	0	0	0,1
				Máximo FATS			23,4

Em relação à tabela anterior, destacam-se os seguintes comentários, comparando os resultados antes e depois da obra de expansão:

- O eixo 138 kV **I – H – G – F** reduziu significativamente a sua influência nos afundamento de tensão da SE **E**, como se observa pelos novos valores dos F_{ATS} .
- O eixo de 138 kV **M – L – J** e o eixo **A – B – C**, injeção do gerador G1, também reduziram consideravelmente suas influências nos afundamentos de

tensão da SE **E**, como se observa pelos novos valores dos F_{ATS} .

- A barra **I** deixou de exercer a maior influência nos afundamentos de tensão da SE **E**, passando a ser a barra de 138 kV da SE **F** a influência mais forte, com o maior F_{ATS} .
- Estima-se que a área de vulnerabilidade da SE **E** fique menor, delimitando-se às barras de 138 kV da futura SE **N** e das SE **E**, **D**, **F**, **G**, o equivalente a cerca de 200 km de LT. Isto implica uma previsão de redução considerável na frequência de ocorrência de afundamentos de tensão na faixa entre 0,1 e 0,7 p.u.

Com base nos valores da Tabela 6.3, são apresentadas análises de desempenho a partir do Índice de Severidade.

Tabela 6.3 – Índice de Severidade - I_{sev}

	Isev da Barra de Referência E
SEP Existente	218
SEP Futuro	59

Em relação aos valores da Tabela 6.3, destaca-se que:

- O I_{sev} da barra de referência diminuiu de 218 para 59, sinalizando tendência de melhora de seu desempenho em relação aos afundamentos de tensão, após a implantação da obra de expansão.

A partir da Tabela 6.3, são apresentadas análises de desempenho a partir do I_{sen} , Índice de Sensibilidade. Nos dois gráficos da Figura 6.3 estão mostrados os valores de I_{sen} da barra da SE **E** do sistema existente e do sistema futuro.

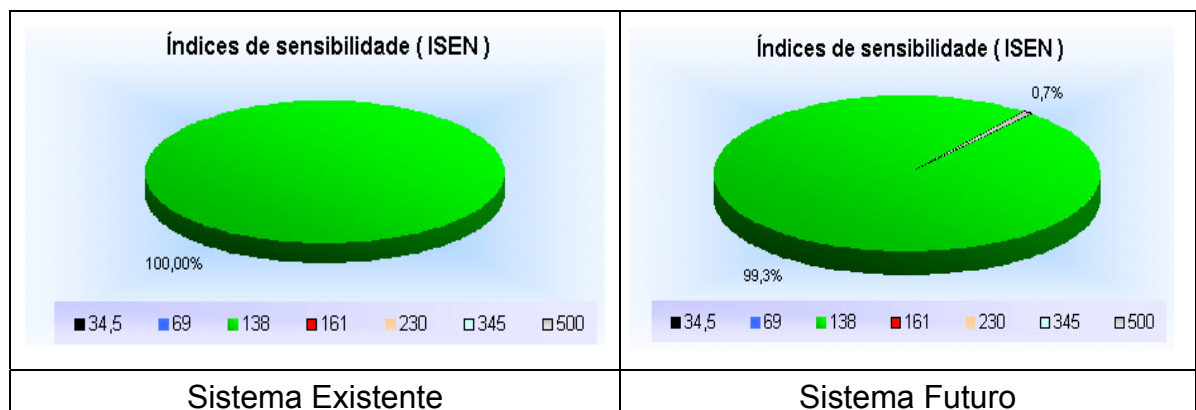


Figura 6.3 – Índice de Sensibilidade - I_{sen}

Em relação à Figura 6.3, destacam-se os seguintes comentários:

- Observando o gráfico que representa o sistema existente, estima-se que 100% dos afundamentos de tensão entre 0,1 p.u. e 0,7 p.u da barra de referência sejam provocados por faltas no sistema de 138 kV.
- Observando o gráfico que representa o sistema futuro, estima-se que o sistema de transmissão (≥ 230 kV) deverá pouco interferir nos afundamentos de tensão da barra de referência. Isto é verificado pelo baixo valor de 0,7% do I_{sen} da tensão de 500 kV.

6.3. CONCLUSÕES

As análises apresentadas no capítulo permitem extrair importantes conclusões sobre o uso dos índices propostos na determinação do impacto das obras de expansão nos afundamentos de tensão, sob o ponto de vista de planejamento:

- O fator F_{ATS} permite prever, de forma qualitativa, a interferência de obras de expansão no desempenho de barras de referências, por meio de informações sobre a influência de cada barra no afundamento;
- O índice I_{sev} permite estimar de uma forma global em que situações haverá melhoria de desempenho da barra de referência, em relação aos afundamentos de tensão;
- O índice I_{sen} possibilita prever qualitativamente o grau de interferência

dos níveis de tensão nos afundamentos de tensão na barra de referência.

No caso estudado, houve alteração de natureza sistêmica em relação aos afundamentos de tensão. Isto enfatiza a importância de se analisar o desempenho do SEP futuro, quando se estão definindo soluções de caráter corretivo para melhorar o desempenho do sistema existente em relação aos afundamentos de tensão, pois há possibilidades de grandes alterações após a obra de expansão. Esta análise do sistema futuro pode otimizar investimentos para a solução de problemas relativos ao fenômeno.

Conclui-se que a proposição e aplicação dos índices apresentam resultados práticos que orientam decisões a serem tomadas pelas equipes de planejamento.

Dois aspectos, neste sentido, podem ser salientados: *primeiro* - são calculados a partir de base de dados disponível à área de planejamento; *segundo* – fornecem informações do sistema, quanto aos afundamentos de tensão, de tal forma que permite avaliar o fenômeno de forma integrada com os critérios técnicos tradicionais de expansão.

7. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

A estratégia proposta neste trabalho para inclusão de análises de afundamentos de tensão nas etapas de planejamento da expansão de SEP, tem por objetivo subsidiar decisões relativas ao tratamento do fenômeno.

Dentre os desenvolvimentos realizados na dissertação, além dos procedimentos da estratégia em si, destacam-se a análise de sensibilidade dos afundamentos de tensão frente às obras de expansão (considerando impactos na matriz Zbarra) e a criação de índices de desempenho de barras do SEP (baseados nos parâmetros amplitude, frequência e tempo de duração do fenômeno).

Espera-se que a aplicação dos procedimentos aqui propostos possa contribuir para o setor elétrico, principalmente nas seguintes análises:

- Na etapa de diagnóstico e prognóstico do SEP, para identificar barras com desempenho crítico em relação aos afundamentos de tensão;
- Na etapa de análise e comparação técnica de alternativas de expansão, para avaliar as diversas topologias, incluindo os afundamentos de tensão no conjunto de critérios técnicos tradicionais de planejamento;
- Nos estudos de conexão de usinas, identificar o melhor ponto de interligação, objetivando a melhoria de desempenho do sistema em relação aos afundamentos de tensão;
- Nos estudos de conexão de novos consumidores, identificar o melhor ponto de interligação, visando o atendimento com o melhor desempenho em relação aos afundamentos de tensão;
- Na avaliação dos impactos de obras planejadas nos afundamentos de tensão do sistema existente, permitindo subsidiar os estudos de caráter corretivo e integrado com a área de operação e sinalizar alterações de desempenho de barras do sistema onde estão conectados consumidores com cargas sensíveis.

A pesquisa desenvolvida neste trabalho revelou que as obras de expansão do SEP podem alterar todos os parâmetros do afundamento de tensão: amplitude, tempo e frequência de ocorrência.

Os trabalhos publicados decorrentes deste trabalho foram apresentados no Seminário Brasileiro de Qualidade de Energia Elétrica – SBQEE`2003, [Menezes, 2003], no *International Conference on Grounding and Earthing* – Ground`2006 [Menezes, 2006] e no *International Lighting Detection Conference* – ILDC`2006 [Visacro, 2006].

Esta dissertação constitui base técnica e científica para o desenvolvimento de Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento - P&D, em uma parceria entre Cemig e UFMG, aprovado pela Aneel. Tal projeto se intitula "Desenvolvimento de Ferramenta Computacional para Análise de Afundamento de Tensão Aplicada ao Planejamento da Expansão", onde serão aprofundados os estudos realizados, e desenvolvido aplicativo para auxiliar e automatizar as análises de afundamentos de tensão nos estudos de planejamento.

Como futuros trabalhos, são apresentadas as seguintes sugestões:

- Aplicar a estratégia em situações reais, no dia a dia das atividades de planejamento, registrando os resultados e ganhos obtidos;
- Desenvolver estudos relativos aos custos associados aos afundamentos de tensão e propor formas de incorporá-los nas avaliações de planejamento;
- Estudar a sensibilidade dos afundamentos de tensão em relação às obras de expansão considerando as faltas monofásicas e bifásicas;
- Avançar na avaliação dos afundamentos no que tange à sensibilidade das cargas, ao desequilíbrio e assimetria dos afundamentos e ao tempo de atuação dos relés;
- Avançar nos estudos relativos à aplicação dos dados do LLS na composição da estratégia. Isto poderia se dar por meio de:
 - o Desenvolvimento de banco de dados sobre as probabilidades de faltas ao longo das LT, a partir de dados do LLS, visando melhorar a avaliação da frequência de ocorrência e os locais de faltas associadas às descargas atmosféricas;
 - o Estabelecimento de valores médios para os índices propostos, ou por

níveis de tensão, ou por regiões com diferentes densidades de descargas atmosféricas, ou por tipo de configuração do sistema (radial ou malhado), para identificar barras com desempenho atípico;

- o Aprimoramento do cálculo dos índices propostos, onde se poderia adotar uma previsão de falhas em LT diferente da distribuição uniforme, tradicionalmente empregada pelo setor.

- Implementar rotina computacional para facilitar análise paramétrica mais detalhada acerca da sensibilidade da amplitude do afundamento de tensão em relação às obras de expansão. Nesta direção, destaca-se projeto de pesquisa em fase inicial de desenvolvimento, numa parceria entre o LRC/UFMG e a CEMIG.

Concluindo, espera-se que, com a aplicação da estratégia aqui proposta, o afundamento de tensão torne-se mais uma variável técnica no processo de planejamento, atuando na orientação e priorização de investimentos, tendo em vista uma melhor qualidade de energia fornecida aos consumidores e uma maior rentabilidade dos negócios das empresas concessionárias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [Anderson, 1973] ANDERSON, P. M, "Analysis of Faulted Power System", Ames, Iowa State University, 1973, 515p.
- [ANEEL, 1999] Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, Resolução 281, de 01 de novembro de 1999.
- [ANEEL, 2000a] Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, Resolução 456, de 29 de novembro de 2000.
- [ANEEL, 2000b] Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, Resolução 024, de 27 de Janeiro de 2000.
- [ANEEL, 2004] Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, Resolução 061, de 29 de abril de 2004.
- [ANEEL, 2007a] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, www.aneel.gov.br.
- [ANEEL, 2007b] Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, "Prodist - Procedimentos de Distribuição, Modulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica", versão de 02/07/2007.
- [ANEEL, 2007c] Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, "Prodist – Procedimentos de Distribuição, versão de 02/07/2007.
- [AspenTM, 2002] Advanced System for Power Engineering, Inc - ASPENTM, "Supporting Documents", Version 9, 2002. www.aspeninc.com.
- [Ayello, 1999] AYELLO, F.P., CARVALHO FILHO, J.M., et al., "Influência do Sistema de Proteção na Qualidade da Energia", III CONLADIS - Congresso Latino Americano de Distribuição de Energia Elétrica – USP - SP, 1999.
- [Blackburn, 1987] J. L. BLACKBURN, "Protective Relaying", New York, Marcel Dekker, 1987, (Electrical Engineering and Electronics, No. 37).
- [Bollen, 1994] M. H. J. BOLLEN, "The Influence of Motor Reacceleration on Voltage sags", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, No. 3, May/Jun 1994, pp. 805-821.

-
- [Bollen, 1997] BOLLEN, M. H. J., "Characterization of Voltage Sags Experienced by Three-Phase Adjustable-Speed Drive", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 12, No. 4, October 1997, pp. 1667-1671.
- [Bollen, 2000] BOLLEN, M.H.J, "Understanding Power Quality Problems – Voltage Sag and Interruption", New York, IEEE Pres 2000, 541p.
- [Brooks, 1999] D. L. BROOKS, R. C. DUNGAN, A. SUNDARAM, "Recommendation For Tabulating RMS Variation Disturbances with Specific Reference To Utility Power Contracts", 1999.
- [Brooks, 2000] D. L. BROOKS, R. C. DUNGAN, M. WACLAWIAK, A. SUNDARAM, "Indices for Assessing Utility Distribution System RMS Variation Performance, IEEE PES Distribution Sub-Committee Meeting, Las Vegas", 2000.
- [Carvalho, 2003] CARVALHO, P.L, "Uma Contribuição ao Estudo da Depressão de Tensão", Dissertação de Mestrado, Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (CPG-E), Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Maio de 2003.
- [Carvalho Filho, 2000] CARVALHO FILHO, J.M, "Uma Contribuição à Avaliação do Atendimento a Consumidores com Cargas Sensíveis – Proposta de Novos Indicadores", Tese de Doutorado, Coordenação da Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (CPG-E), Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Dezembro de 2000.
- [Cemig, 1995] Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG, "Relatório de Acompanhamento do Desempenho das LT do Sistema Cemig Sob a Ação de Descargas Atmosféricas – Período 1970 a 1993", Belo Horizonte, 30.000-ST/DN3-011, 1995.
- [Conrad, 1991] CONRAD, L., LITTLE, K., GRIGG, C., "Predicting and Preventing Problems Associated with Remote Fault - Clearing Voltage Dips", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 27, No. 1, p.167-172, Jan/Feb 1991.
- [Conrad, 1997] CONRAD, L. E., BOLLEN, M. H. J., "Voltage Sag Coordination for Reliable Plant Operation", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 3 No. 6, Nov/Dec 1997.
- [Cummins, 1998] CUMMINS, K.L; MURPHY, M.J; BARDO, E.A.; HISCOX, W.L.; PYLE, R.B.; PIFER, A.E.: "A Combined To A/MDF Technology Upgrade of the U.S. National Lightning Detection Network", Journal of Geophysical Research, Vol. 103, N° D8, pages 9035-9044, April 27, 1998.

-
- [Das, 1990] J. C. DAS, "Effect of Momentary Voltage Dips on the Operation of Induction and Synchronous Motors", IEEE Transaction in Industry Applications. Vol. 26 No. 4, July/August 1990.
- [Dias, 2002] DIAS, R.N. "Aplicações do SLT em Proteção Elétrica: Constituição de Base de Dados para Análise de Incidência de Descargas Atmosféricas em Linhas de Transmissão", Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Julho de 2002.
- [Dugan, 1996] DUGAN, R.C. et al. "Electrical Power System Quality", New York, Mc GrawHill, 1996, 265p.
- [Edminister, 1965] EDMINISTER, J.A. "Theory and Problems of Electric Circuits", New York, McGraw-Hill, 1965, 300p.
- [EPRI, 2001] EPRI, CEIDS "The Cost of Power Disturbances to Industrial & Digital Economy Companies", California, EPRI, 2001, 230p.
- [Fonseca, 1998] FONSECA, V. R. C., "Cálculo Estocástico do Afundamento de Tensão", Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC), Agosto de 1998.
- [Glover, 1994] GLOVER, J.C., SARMA, M. "Power System Analysis and Design", Boston PWS Publish Company, 1994, 590p.
- [Heine, 2005] HEINE, P. "Voltage Sag In Power Distribution Networks", Doctor Dissertation, Helsinki University of Technology, Department of Electric and Communications Engineering, Finland, November 2005.
- [IEC, 1996] International Electrotechnical Commission - IEC, "Electromagnetic Compatibility", IEC Standard 61000, 1996. www.iec.org.
- [IEC, 1990a] International Electrotechnical Commission – IEC, "Voltage Dips and Short Supply Interruption"., IEC 61000-2-1, 1990.
- [IEC, 1990b] International Electrotechnical Commission – IEC, "Environment – Compatibility Levels in Industrial Plants for Low Frequency Conducted Disturbance", IEC 61000-2-4, 1990.
- [IEC, 1996] International Electrotechnical Commission - IEC, "Electromagnetic Compatibility", IEC Standard 61000, 1996.

-
- [IEC, 2000] International Electrotechnical Commission - IEC, "Low Voltage Switchgear and Controlgear – Part 4-1: Contactors and motors starters", IEC Standard 60947-4-1, November 2000.
- [IEC, 2002] International Electrotechnical Commission – IEC, "Voltage Dips and Short Interruption on Public Electric Power Supply Systems with Statistical Measurement Results". IEC 61000-2-8, 2002.
- [IEC, 2005] International Electrotechnical Commission – IEC, "Voltage Dips, Short Interruptions and Voltage Variation Immunity Tests". IEC 61000-4-34 2005.
- [IEEE, 1995a] Institute of Electric and Electronics Engineers - IEEE, "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality", Standard 1159 – 1995, 1995. www.ieee.org.
- [IEEE, 1995b] Institute of Electric and Electronics Engineers - IEEE, "IEEE Recommended Practice For Emergency And Standby Power Systems For Industrial And Commercial Applications", IEEE Standard 446 – 1995 (IEEE Orange Book), 1995.
- [IEEE, 1995c] Institute of Electric and Electronics Engineers – IEEE, "IEEE Guide For Service To Equipment Sensitive To Momentary Voltage Disturbances", IEEE Standard 1250 – 1995, 1995.
- [IEEE, 1997] Institute of Electric and Electronics Engineers - IEEE, "IEEE Recommended Practice For The Design Of Reliable Industrial And Commercial Power Systems" (IEEE Gold Book), IEEE Standard 493 – 1997, 1997.
- [IEEE, 1998a] Institute of Electric and Electronics Engineers - IEEE, "IEEE Recommended Practice For Evaluating Electric Power System Compatibility With Electronic Process Equipment", IEEE Standard 1346 – 1998, 1998.
- [IEEE, 1998b] Institute of Electric and Electronics Engineers – IEEE - IEEE Power System Relaying Committee Report. Distribution Line Protection Practices – Industry Survey Results. IEEE Transaction Power Delivery, v. PD-3, april. 1998. p.514-524;
- [IEEE, 1998c] Institute of Electric and Electronics Engineers – IEEE - IEEE Power System Relaying Committee Report. Line Protection Design Trends in the USA and Canada. IEEE Transaction Power Delivery, v. 3, oct. 1998. p.1530-1535;
- [IEEE, 2001] [37] IEEE P1564, "Voltage Sag Indices", Draft 2, 2001, http://grouper.ieee.org/groups/sag/IEEEP1564_02_01.doc.

-
- [ITI, 2000] Information Technology Industry Council – ITI, www.itic.org/www.itic.org/archives/iticurv.pdf, 2000.
- [Kundur, 1994] KUNDUR, P. S, “Power System Stability and Control”, New York, McGraw-Hill, 1994, 1176p.
- [Leborgne, 2003] LEBORGNE, R.C, “Uma Contribuição à Caracterização da Sensibilidade de Processos Industriais Frente a Afundamentos de Tensão”, Dissertação de Mestrado, Coordenação da Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (CPG-E), Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Maio de 2003.
- [McGranaghan, 1993] M. F. MCGRANAGHAN, D. R. MUELLER, M. J. SAMOTYJ, “Voltage Sags in industrial Systems”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 29, No. 2, March/April 1993.
- [Menezes, 2003] MENEZES, T.V, “Critérios e Procedimentos Para Identificação E Avaliação de Barras Suscetíveis a Afundamentos de Tensão”, Seminário Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica – SBQEE, 2003
- [Menezes, 2006] MENEZES, T.V, VALE, M.H.M, CAMPINI, P.F., DIAS, R.N., VISACRO, S.F, “Using LLS Data To Support a New Methodology for Evaluation of Power System Performance To Voltage Sags”, International Conference on Grounding and Earthing – Ground 2006.
- [Milanovic, 2000] MILANOVIC, J. V., GNATIV, R.; CHOW, K.W.M, “The influence of loading conditions and network topology on voltage sags”, Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power, Proceedings, Volume 2 pages 757 - 762 vol. 2, 1-4 Oct. 2000.
- [Moreira, 2004] MOREIRA, R. P. A. “Abordagem de Custos Relativos aos Efeitos de Afundamentos de Tensão”, Monografia de Especialista em Sistemas de Energia Elétrica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Agosto de 2004.
- [Noronha, 1999] NORONHA, J.C.C, “Análise Computacional de Voltage Sag em Consumidores com Cargas Sensíveis”, Dissertação de Mestrado, Instituto de Engenharia Elétrica da EFEI, Escola Federal de Itajubá (EFEI), Abril de 1999.
- [NRS, 1996] National Rationalized Specification - NRS – 048: Electricity Supply – Quality of Supply, part 1”, Minimum Standards, for Application by the National Electricity Regulator, 1996.

-
- [Oliveira, 2004] OLIVEIRA, T.C, “Desenvolvimento e Aplicação de Um Sistema de Software Para Estudos de Afundamentos de Tensão”, Dissertação de Mestrado, Coordenação da Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (CPG-E), Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Agosto de 2004.
- [ONS, 2001] Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS “Estado da Arte de Indicadores de Desempenho de Afundamento de Tensão,” ONS-2.1-022/2001, 2001.
- [ONS, 2002a] Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, “Submodulo 2.2 - Padrões de Desempenho da Rede Básica”, 2002.
- [ONS, 2002b] Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, “Submodulo 2.8 - Gerência dos Padrões de Desempenho da Rede Básica”, 2002.
- [ONS, 2002c] Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, “Submodulo 2.5 – Requisitos Mínimos dos Sistemas de Proteção, Supervisão/Controlo”, e de Telecomunicações”, 2002.
- [ONS, 2007] Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, www.ons.com.br.
- [Ortmeyer, 1996] T. H. ORTMEYER, T. HIYAMA, H. SALEHFAR, “Power Quality Effects of Distribution System Faults”, *Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 18, No. 5, 1996, pp. 323-329.
- [Pedra, 2002] J. PEDRA, F. CÓRCOLES, L. SAINZ, “Study of AC Contactors During Voltage Sags”, *IEEE – PES – 10th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Brasil, 2002.
- [Pohjanheimo, 2002] P. POHJANHEIMO, M. LEHTONEN, “Equipment Sensitivity to Voltage Sags Test Results for Contactors, PCs and Gas Discharge Lamps”, *IEEE – PES – 10th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Brazil, 2002.
- [Ribeiro, 1998] RIBEIRO, T.N, “Uma Discussão dos Critérios e Normas Relativos Qualidade da Energia Elétrica”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC), Agosto de 1998.
- [Sabin, 2001] D. SABIN, T. E. GREBE, A. SUNDARAM, “RMS Voltage Variation Statistical Analysis for a Survey of Distribution System Power Quality Performance”, www.pqnet.electrotek.com, May 2001.

-
- [SEMI, 2006] Semiconductor Equipment and Materials International - SEMI, “Specification for Semiconductor Processing Equipment Voltage Sag Immunity”, SEMI F47-0706, 2006. www.semi.org.
- [Soares, 2004] SOARES, S.S “Uma Contribuição aos Estudos das Variações de Tensão de Curta Duração Focando os Afundamentos de Tensão”, Monografia de Especialista em Sistemas de Energia Elétrica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Agosto de 2004.
- [Stagg, 1971] STAGG, G.W, EL-ABIAD, A.H., “Computer Methods in Power system Analysis”, New York, McGraw-Hill, 1971, 448p.
- [Stevenson,1982] STEVENSON, W. D, “Elements of Power System Analysis”, New York, McGraw-Hill, 1982, 796p.
- [Vale, 1986] VALE, M.H.M. “Centros Modernos de Supervisão e Controle de Sistemas de Energia Elétrica”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, (UFRJ), Dezembro de 1986.
- [Visacro, 2005] VISACRO, S.F. “Descargas Atmosféricas –Uma Abordagem de Engenharia”, São Paulo, ArtLiber, 2005, 272p.
- [Visacro, 2006] DIAS, R.N., MENEZES, T.V, VALE, M.H.M., VISACRO, S.F, “Power System Expansion Planning: Applying LLS Data to Evaluate Lighting-Related Voltage Sags”, International Lightning Detection Conference – ILDC, 2006.
- [Volpe Filho, 2004] FILHO, C.A.V., ALVARENGA, M.A.F.P, “Setor Elétrico”, Curitiba, Juruá, 2004, 240p.
- [Westinghouse, 1965] WESTINGHOUSE, E.C. “Electrical Transmission and Distribution Reference Book”, East Pittsburgh, 1965, 826p.

ANEXO A – CARACTERÍSTICAS DO PROGRAMA UTILIZADO NAS SIMULAÇÕES

A.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O programa para cálculo de curto-circuito utilizado no desenvolvimento desta dissertação foi o *Aspen One Liner™*, desenvolvido pela Aspen – *Advanced System for Power Engineering, Inc* [Aspen™, 2002].

Este anexo tem por objetivo, além de apresentar as características da ferramenta utilizada, servir de orientação às equipes da empresa que a utilizam em suas tarefas de planejamento, quanto às especificidades relativas aos cálculos do aprofundamento.

O Aspen™ é uma ferramenta iterativa para análise de faltas em sistemas elétricos de grande porte, tendo como principais características funcionais:

- Elevada capacidade, permitindo solução direta de curto-circuito em sistemas elétricos, de forma rápida, com eficiência computacional, independente do porte do sistema;
- Possibilita a modelagem de curto-circuito simultâneo, aplicado sobre barras e/ou pontos intermediários de LT, com ou sem impedância de falta, para diversos tipos de falta;
- Permite a modelagem do sistema, com a representação de equipamentos *shunt*, impedâncias e admitâncias de LT e transformadores, com a possibilidade de representação do carregamento pré-falta, utilizando-se o programa Aspen Power Flow.

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

A.2 MODELAGEM DA REDE

Neste item, são abordadas as características básicas da modelagem de um sistema elétrico através do AspenTM. As características detalhadas podem ser consultadas no manual do programa [AspenTM, 2002].

O sistema elétrico é representado no AspenTM através das componentes de sequência positiva, negativa e zero. Os objetos que compõem o sistema elétrico representado no programa são:

- Barras (nós);
- Linhas de transmissão (modeladas como circuitos π);
- Acoplamento mútuo de LT;
- Capacitor série;
- Transformadores de 2 enrolamentos;
- Transformadores de 3 enrolamentos;
- Transformadores defasadores;
- Geradores, cargas e *shunts* (reatores e capacitores) e transformadores de aterramento.

O programa possibilita a modelagem dos defasamentos gerados pelos transformadores estrela-delta, sendo a defasagem angular dependente do tipo de conexão.

Na representação das LT e de transformadores, os dados de entrada são os valores da impedância série, das componentes de sequência, compostos pela resistência e reatância indutiva, e os valores de admitância *shunt*, compostas pelos valores de condutância e susceptância. Normalmente, nos estudos de curto-circuito e afundamentos de tensão, os parâmetros *shunt* dos elementos são desprezados.

A representação dos transformadores pode ser feita em cinco configurações básicas:

- Estrela aterrada – delta 30° avançado;
- Estrela aterrada – delta 30° adiantado;

- Delta – delta;
- Estrela – estrela aterrada;
- Auto-estrela.

Para os estudos de análise comparativa do desempenho de barras do sistema elétrico, estas representações são importantes, pois alteram a propagação dos afundamentos de tensão ao longo do sistema elétrico.

O gerador é modelado por um equivalente de *Thevenin* em cada rede de seqüência. A seqüência positiva é modelada por uma fonte de tensão em série com uma impedância e as seqüências positiva e negativa por uma impedância somente.

As cargas são modeladas como admitâncias *shunt*, Y (mhos), podendo ser usadas componentes de impedância constante, potência constante e corrente constante. A solução de curto-circuito assume impedância constante para todas as cargas.

Tendo em vista que as tensões pré-falta podem alterar os resultados finais de curto-circuito e, portanto, dos afundamentos de tensão, destacam-se as três opções de tensão de partida que podem ser especificadas no AspenTM:

- Partida *Flat Bus* – tensão pré-falta fixa nas barras. Esta é ajustada artificialmente, podendo gerar resultados incorretos em análises de afundamentos de tensão, não sendo recomendado nesta análise;
- Partida *Flat Generator* – tensão pré-falta fixa nos geradores, computada antes de qualquer simulação por um fluxo linearizado. É recomendado para análises de afundamentos de tensão;
- Partida *Power Flow* – tensão pré-falta obtida a partir do fluxo de potência. É a representação mais fiel.

A.3 SUBROTINA *VOLTAGE SAG*

A Subrotina *Voltage Sag* do AspenTM é um recurso que pode auxiliar bastante as análises de afundamento de tensão.

Basicamente, este comando simula automaticamente faltas nas barras e faltas intermediárias nas LT do sistema elétrico e tabula, em um arquivo de saída, a tensão na barra monitorada.

As faltas são primeiramente aplicadas à barra monitorada. Posteriormente, são aplicadas às LT e barras distantes de uma barra, duas barras e, assim, sucessivamente, até que os valores de tensão na barra monitorada estejam todos acima do limite estabelecido, para faltas a um determinado número de barras distantes.

Entre as vantagens oferecidas por este recurso, pode-se destacar:

- Economia de tempo para estudos de afundamentos de tensão;
- Monitoramento das tensões de fase em uma barra definida pelo usuário, enquanto se aplicam automaticamente faltas nas barras e LT vizinhas;
- Parada automática, quando a tensão na barra de interesse fica acima do limite de um valor pré-fixado;

Nesta subrotina, *Voltage Sag*, deve ser utilizada como suposição da tensão de partida a opção *Flat Generator*.

As principais informações de entrada para o uso desta subrotina são:

- o nome da barra a ser monitorada;
- os tipos de falta a serem simuladas;
- o incremento, em percentual, para as faltas intermediárias aplicadas ao longo das LT;
- a tensão limite da barra monitorada, acima da qual é finalizada a simulação.

Concluindo, o manual do AspenTM possui capítulo específico, denominado *Batch Short Circuit*, que aborda a rotina *Voltage Sag* [AspenTM,2002].

ANEXO B – ARQUIVO DE DADOS DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

Neste apêndice, são apresentados os resultados de saída das simulações de afundamentos de tensão realizadas no trabalho, executadas por meio do *software AspenTM*.

Os valores apresentados mostram o resultado das simulações do caso exemplo deste trabalho, para a condição do sistema elétrico antes e após a obra de expansão, considerando curto-circuitos monofásicos e trifásicos.

Resultados Antes das Obras de Expansão – Curto Circuitos Monofásicos

ASPEN OneLiner Version 10.9 Voltage Sag Analysis

Date and time: Tue Jun 12 17:00:12 2007

OLR File Name: C:\CURTOS\2005\Casos_de_Curto-circuito.

Monitored Bus: 1039 AXAU 138.kV

Barra Monitorada Escolhida

Voltage Threshold = 0.8 p.u.

Valor Máximo de Tensão da Barra Monitorada Estabelecido

Pontos de Curto-Circuito Simulados

Valores dos Afundamentos de Tensão na Barra Monitorada

TIER	FAULT	PHASE-A (PU)	PHASE-B (PU)	PHASE-C (PU)	<THRES
0	1LG BUS AXAU 138. kV	0.000@	0.0 1.184@-131.1	1.151@ 132.3	YES
1	1LG BUS IBYD 138. kV	0.559@	-1.3 1.037@-120.2	0.990@ 121.7	YES
1	1LG BUS PTC 138. kV	0.701@	-2.6 1.054@-123.2	1.030@ 124.0	YES
1	1LG BUS AXAD 138. kV	0.219@	-3.4 1.140@-128.6	1.107@ 129.8	YES
1	1LG BUS KAR 138. kV	0.060@	-1.5 1.173@-130.6	1.141@ 131.7	YES
1	1LG BUS UHJG 138. kV	0.269@	-0.5 1.007@-117.0	0.962@ 118.2	YES
2	1LG BUS IBYD BC 138. kV	0.559@	-1.3 1.037@-120.2	0.990@ 121.7	YES
2	1LG BUS IBYD 69. kV	0.716@	1.5 1.001@-117.9	0.972@ 118.7	YES
2	1LG BUS KCM 138. kV	0.340@	-3.2 1.118@-127.3	1.087@ 128.5	YES
2	1LG BUS KFST 138. kV	0.506@	-2.0 1.087@-125.6	1.062@ 126.5	YES

2 1LG BUS	UHJG-FIC-T7	138. kV	0.618@	2.6	0.994@-117.1	0.966@	117.8	YES
2 1LG BUS	UHJG-FIC-T8	138. kV	0.618@	2.6	0.992@-116.9	0.964@	117.5	YES
2 1LG BUS	SQNU LT2	138. kV	0.728@	-2.4	0.996@-118.5	0.985@	118.8	YES
2 1LG BUS	SQNU LT1	138. kV	0.745@	-1.9	0.997@-118.6	0.984@	119.0	YES
3 1LG BUS	UHJG	345. kV	0.571@	3.2	0.979@-116.0	0.960@	116.4	YES
4 1LG BUS	L.C.BAR.345	345. kV	0.753@	0.7	0.968@-115.1	0.952@	115.4	YES
4 1LG BUS	UHJG	500. kV	0.717@	1.4	0.987@-118.2	0.984@	118.2	YES
5 1LG BUS	Estreito	345. kV	0.772@	0.3	0.970@-115.8	0.961@	115.9	YES
6 1LG BUS	T#PC 500345A	100. kV	0.674@	-17.8	0.840@-112.8	1.022@	108.7	YES

522 faults successfully simulated

=====

Resultados Após as Obras de Expansão – Curto Circuitos Monofásicos

ASPEN OneLiner Version 10.9 Voltage Sag Analysis

Date and time: Tue Jun 12 17:02:12 2007

OLR File Name: C:\CURTOS\2005\Casos_de_Curto-circuito.

Monitored Bus: 1039 AXAU 138.kV

Voltage Threshold = 0.8 p.u.

TIER	FAULT	PHASE-A (PU)	PHASE-B (PU)	PHASE-C (PU)	<THRES
0 1LG BUS	AXAU 138. kV	0.000@	0.0	1.188@-131.2	1.152@ 132.5 YES
1 1LG BUS	IBYD 138. kV	0.563@	-1.2	1.038@-120.3	0.991@ 121.8 YES
1 1LG BUS	PTC 138. kV	0.702@	-2.6	1.057@-123.4	1.032@ 124.3 YES
1 1LG BUS	AXAD 138. kV	0.223@	-3.2	1.141@-128.7	1.108@ 129.9 YES
1 1LG BUS	KAR 138. kV	0.060@	-1.3	1.176@-130.6	1.142@ 131.9 YES
1 1LG BUS	UHJG 138. kV	0.279@	0.0	1.009@-117.2	0.962@ 118.4 YES
2 1LG BUS	IBYD BC 138. kV	0.563@	-1.2	1.038@-120.3	0.991@ 121.8 YES
2 1LG BUS	IBYD 69. kV	0.720@	1.6	1.002@-118.0	0.972@ 118.8 YES
2 1LG BUS	KCM 138. kV	0.344@	-3.0	1.119@-127.4	1.087@ 128.6 YES
2 1LG BUS	KFST 138. kV	0.511@	-1.9	1.088@-125.6	1.062@ 126.6 YES
2 1LG BUS	UHJG-FIC-T7 138. kV	0.625@	2.7	0.995@-117.2	0.966@ 117.9 YES
2 1LG BUS	UHJG-FIC-T8 138. kV	0.624@	2.7	0.993@-117.0	0.964@ 117.7 YES
2 1LG BUS	SQNU LT2 138. kV	0.733@	-2.2	0.997@-118.6	0.985@ 118.9 YES
2 1LG BUS	SQNU LT1 138. kV	0.750@	-1.8	0.998@-118.6	0.984@ 119.0 YES
3 1LG BUS	UHJG 345. kV	0.572@	3.2	0.979@-116.0	0.960@ 116.4 YES
4 1LG BUS	L.C.BAR.345 345. kV	0.753@	0.7	0.968@-115.0	0.952@ 115.4 YES
4 1LG BUS	UHJG 500. kV	0.713@	1.3	0.985@-118.1	0.984@ 118.1 YES
5 1LG BUS	Estreito 345. kV	0.771@	0.3	0.969@-115.7	0.961@ 115.9 YES
6 1LG BUS	T#PC 500345A 100. kV	0.671@	-18.1	0.838@-112.7	1.022@ 108.6 YES

528 faults successfully simulated

=====

Resultados Antes das Obras de Expansão – Curto Circuitos Trifásicos

ASPEN OneLiner Version 10.9 Voltage Sag Analysis

Date and time: Tue Jun 12 17:07:06 2007

OLR File Name: C:\CURTOS\2005\Casos_de_Curto-circuito.

Monitored Bus: 1039 AXAU 138.kV

Voltage Threshold = 0.8 p.u.

TIER	FAULT	PHASE-A(PU)	PHASE-B(PU)	PHASE-C(PU)	<THRES
0	3LG BUS AXAU 138. kV	0.000@	0.0 0.000@	0.0 0.000@	0.0 YES
1	3LG BUS IBYD 138. kV	0.546@	-2.7 0.546@-122.7	0.546@ 117.3	YES
1	3LG BUS PTC 138. kV	0.654@	-4.1 0.654@-124.1	0.654@ 115.9	YES
1	3LG BUS AXAD 138. kV	0.179@	-5.2 0.179@-125.2	0.179@ 114.8	YES
1	3LG BUS KAR 138. kV	0.049@	-3.7 0.049@-123.7	0.049@ 116.3	YES
1	3LG BUS UHJG 138. kV	0.203@	-0.9 0.203@-120.9	0.203@ 119.1	YES
2	3LG BUS IBYD BC 138. kV	0.546@	-2.7 0.546@-122.7	0.546@ 117.3	YES
2	3LG BUS IBYD 69. kV	0.738@	1.7 0.738@-118.3	0.738@ 121.7	YES
2	3LG BUS IDM 138. kV	0.766@	-2.6 0.766@-122.6	0.766@ 117.4	YES
2	3LG BUS KCM 138. kV	0.281@	-5.6 0.281@-125.6	0.281@ 114.4	YES
2	3LG BUS KFST 138. kV	0.454@	-3.0 0.454@-123.0	0.454@ 117.0	YES
2	3LG BUS UHJG-FIC-T7 138. kV	0.608@	3.3 0.608@-116.7	0.608@ 123.3	YES
2	3LG BUS UHJG-FIC-T8 138. kV	0.609@	3.3 0.609@-116.7	0.609@ 123.3	YES
2	3LG BUS SQNU LT2 138. kV	0.611@	-1.9 0.611@-121.9	0.611@ 118.1	YES
2	3LG BUS SQNU LT1 138. kV	0.627@	-2.2 0.627@-122.2	0.627@ 117.8	YES
3	3LG BUS KFST T1T2 13.8 kV	0.781@	-6.9 0.781@-126.9	0.781@ 113.1	YES
3	3LG BUS UHJG 345. kV	0.513@	5.0 0.513@-115.0	0.513@ 125.0	YES
3	3LG BUS URAS 138. kV	0.765@	-2.0 0.765@-122.0	0.765@ 118.0	YES
3	3LG BUS URAU FIC1 138. kV	0.738@	-3.3 0.738@-123.3	0.738@ 116.7	YES
4	3LG BUS L.C.BAR.345 345. kV	0.672@	1.6 0.672@-118.4	0.672@ 121.6	YES
4	3LG BUS UHJG 500. kV	0.638@	2.7 0.638@-117.3	0.638@ 122.7	YES
4	3LG BUS URAS Fic 138. kV	0.778@	-2.4 0.778@-122.4	0.778@ 117.6	YES
4	3LG BUS Uberaba 2 138. kV	0.768@	-2.9 0.768@-122.9	0.768@ 117.1	YES
4	3LG BUS URAU 138. kV	0.739@	-3.3 0.739@-123.3	0.739@ 116.7	YES
4	3LG BUS URAU FIC 138. kV	0.739@	-3.3 0.739@-123.3	0.739@ 116.7	YES
5	3LG BUS UHEM 500. kV	0.763@	-0.9 0.763@-120.9	0.763@ 119.1	YES
5	3LG BUS Estreito 345. kV	0.695@	1.1 0.695@-118.9	0.695@ 121.1	YES
5	3LG BUS Estreito 500. kV	0.715@	1.3 0.715@-118.7	0.715@ 121.3	YES
5	3LG BUS UHNP 500. kV	0.767@	0.1 0.767@-119.9	0.767@ 120.1	YES
5	3LG BUS M.MORAES345 345. kV	0.745@	0.6 0.745@-119.4	0.745@ 120.6	YES

312 faults successfully simulated

=====

Resultados Depois das Obras de Expansão – Curto Circuitos Trifásicos

ASPEN OneLiner Version 10.9 Voltage Sag Analysis

Date and time: Tue Jun 12 17:13:26 2007

OLR File Name: C:\CURTOS\2005\Casos_de_Curto-circuito.

Monitored Bus: 1039 AXAU 138.kV

Voltage Threshold = 0.8 p.u.

TIER	FAULT	PHASE-A(PU)	PHASE-B(PU)	PHASE-C(PU)	<THRES
0 3LG BUS	AXAU 138. kV	0.000@ 0.0	0.000@ 0.0	0.000@ 0.0	YES
1 3LG BUS	IBYD 138. kV	0.551@ -2.5	0.551@-122.5	0.551@ 117.5	YES
1 3LG BUS	PTC 138. kV	0.654@ -4.1	0.654@-124.1	0.654@ 115.9	YES
1 3LG BUS	AXAD 138. kV	0.183@ -4.8	0.183@-124.8	0.183@ 115.2	YES
1 3LG BUS	KAR 138. kV	0.050@ -3.3	0.050@-123.3	0.050@ 116.7	YES
1 3LG BUS	UHJG 138. kV	0.215@ -0.0	0.215@-120.0	0.215@ 120.0	YES
2 3LG BUS	IBYD BC 138. kV	0.551@ -2.5	0.551@-122.5	0.551@ 117.5	YES
2 3LG BUS	IBYD 69. kV	0.742@ 1.7	0.742@-118.3	0.742@ 121.7	YES
2 3LG BUS	IDM 138. kV	0.789@ -2.2	0.789@-122.2	0.789@ 117.8	YES
2 3LG BUS	KCM 138. kV	0.286@ -5.2	0.286@-125.2	0.286@ 114.8	YES
2 3LG BUS	KFST 138. kV	0.460@ -2.7	0.460@-122.7	0.460@ 117.3	YES
2 3LG BUS	UHJG-FIC-T7 138. kV	0.615@ 3.4	0.615@-116.6	0.615@ 123.4	YES
2 3LG BUS	UHJG-FIC-T8 138. kV	0.617@ 3.4	0.617@-116.6	0.617@ 123.4	YES
2 3LG BUS	SQNU LT2 138. kV	0.618@ -1.6	0.618@-121.6	0.618@ 118.4	YES
2 3LG BUS	SQNU LT1 138. kV	0.635@ -2.0	0.635@-122.0	0.635@ 118.0	YES
3 3LG BUS	KFST T1T2 13.8 kV	0.784@ -6.7	0.784@-126.7	0.784@ 113.3	YES
3 3LG BUS	UHJG 345. kV	0.514@ 5.0	0.514@-115.0	0.514@ 125.0	YES
3 3LG BUS	URAS 138. kV	0.771@ -1.8	0.771@-121.8	0.771@ 118.2	YES
3 3LG BUS	URAU FIC1 138. kV	0.746@ -3.0	0.746@-123.0	0.746@ 117.0	YES
4 3LG BUS	L.C.BAR.345 345. kV	0.672@ 1.5	0.672@-118.5	0.672@ 121.5	YES
4 3LG BUS	UHJG 500. kV	0.632@ 2.6	0.632@-117.4	0.632@ 122.6	YES
4 3LG BUS	URAS Fic 138. kV	0.784@ -2.2	0.784@-122.2	0.784@ 117.8	YES
4 3LG BUS	Uberaba 2 138. kV	0.775@ -2.6	0.775@-122.6	0.775@ 117.4	YES
4 3LG BUS	URAU 138. kV	0.746@ -3.0	0.746@-123.0	0.746@ 117.0	YES
4 3LG BUS	URAU FIC 138. kV	0.746@ -3.0	0.746@-123.0	0.746@ 117.0	YES
5 3LG BUS	UHEM 500. kV	0.768@ -0.9	0.768@-120.9	0.768@ 119.1	YES
5 3LG BUS	Estreito 345. kV	0.694@ 1.1	0.694@-118.9	0.694@ 121.1	YES
5 3LG BUS	Estreito 500. kV	0.712@ 1.2	0.712@-118.8	0.712@ 121.2	YES
5 3LG BUS	UHNP 500. kV	0.761@ -0.0	0.761@-120.0	0.761@ 120.0	YES
5 3LG BUS	M.MORAES345 345. kV	0.745@ 0.6	0.745@-119.4	0.745@ 120.6	YES

318 faults successfully simulated