

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

***CARACTERÍSTICAS DO DISJUNTOR
PARA ABERTURA DE LINHA DE TRANSMISSÃO EM VAZIO
METODOLOGIA DE ESTUDO***

Por

FERNANDO RODRIGUES ALVES

**ITAJUBÁ-MG
2006**

FERNANDO RODRIGUES ALVES

***CARACTERÍSTICAS DO DISJUNTOR
PARA ABERTURA DE LINHA DE TRANSMISSÃO EM VAZIO
METODOLOGIA DE ESTUDO***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Itajubá, em cumprimento às exigências para a obtenção do título de *Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica*

Antonio Carlos Zambroni de Souza

Orientador

Manuel Luís Barreira Martinez

Co-orientador

**ITAJUBÁ-MG
2006**

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

A474c

Alves, Fernando Rodrigues

Características do disjuntor para abertura de linha em vazio : metodologia de estudo / Fernando Rodrigues Alves. -- Itajubá(MG) : [s.l.], 2006.

160 p. : il.

Orientador : Prof. Dr. Antônio Carlos Zambroni de Souza.

Co-orientador : Prof. Dr. Manuel Luís Barreira Martinez.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Disjuntor. 2. Abertura de linha em vazio. 3. Metodologia de estudo. 4. Transitórios. I. Souza, Antônio Carlos Zambroni, orient. II. Martinez, Manuel Luís Barreira , co-orient. III. Universidade Federal de Itajubá. IV. Título.

CDU 621.318.57(043)



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

A N E X O I

PRONUNCIAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

A Banca Examinadora, abaixo assinada, nomeada pela Portaria nº 254 de 05 de julho de 2006, considerando o resultado do Julgamento da Prova de Defesa Pública da Dissertação de Mestrado intitulada: **“Características do Disjuntor para Abertura de Linha de Transmissão em Vazio – Metodologia de Estudo”** apresenta pronunciamento no sentido de que o Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Itajubá solicite ao DRA (Departamento de Registro Acadêmico) a expedição do título de **Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica, na Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência**, satisfeitas as demais exigências regimentais, a **Fernando Rodrigues Alves**.

Itajubá, 07 de julho de 2006.

Francisco Manoel Salgado Carvalho
Dr. Francisco Manoel Salgado Carvalho
1º Examinador - CEPEL

Robson Celso Pires
Prof. Dr. Robson Celso Pires
2º Examinador – UNIFEI

Manuel Luis Barreira Martinez
Prof. Dr. Manuel Luis Barreira Martinez
3º Examinador - (Co-Orientador) - UNIFEI

Antonio Carlos Zambroni de Souza
Prof. Dr. Antonio Carlos Zambroni de Souza
4º Examinador – (Orientador) - UNIFEI

*Dedico este trabalho à
minha esposa Ivonise e aos meus filhos
Flaviano, Fernando, André e Henrique*

AGRADECIMENTOS

A Deus, criador de todas as coisas, responsável único pela origem da vida e da sabedoria. Na Sua ausência, toda ciência é vã. Sem a Sua ajuda jamais teria sequer iniciado este trabalho.

Ao amigo, Professor Doutor Antonio Carlos Zambroni de Souza, orientador desta dissertação, pelas valiosas contribuições, ajuda, incentivo e confiança manifestada desde as primeiras idéias sobre o assunto até a conclusão deste trabalho.

Ao Professor Doutor Manuel Luís Barreira Martinez, co-orientador desta dissertação, pelas suas contribuições indispensáveis para a consecução deste trabalho.

Ao Professor Doutor Francisco Manoel Salgado Carvalho, pelos valiosos comentários e contribuições a este trabalho.

Ao Professor Doutor Robson Celso Pires, por suas observações e sugestões a esta dissertação.

Ao Professor Doutor José Wanderley Marangon Lima, por toda colaboração e apoio dispensado durante a execução deste trabalho sem os quais a sua realização não teria sido possível.

À Ivonise, Flaviano, Fernando, André e Henrique, pelo sacrifício e tolerância aos momentos de ausência em suas vidas durante o período de realização desse meu sonho.

Aos meus pais, Antonia Rodrigues Alves e Pedro Bento Alves, a quem devo tudo o que sou. Minha eterna gratidão e reconhecimento aos seus esforços para minha formação como ser humano e profissional, bem como a toda minha família.

À Carmelita e Severino Galdino Ferreira (in memoriam), responsáveis diretos por grande parte da minha educação e cujo exemplo de vida, obstinação, honestidade, ética e dedicação à família foram sempre um farol no direcionamento de minha vida e de minha carreira.

À amiga de todos os momentos, Professora Ruth de Castro Lima, pelo carinho,

companheirismo, apoio, palavras de incentivo, confiança e otimismo.

Ao amigo Murilo Sérgio Lucena Pinto, Gerente do Departamento de Estudos do Sistema, cujo aconselhamento, apoio e encorajamento nos momentos difíceis foram fundamentais para a execução deste trabalho.

Ao amigo Doutor José Toshiyuki Honda, pela partilha da idéias, incentivo nas horas de cansaço, colaboração e sugestões fundamentais para o êxito deste trabalho.

À CHESF – Companhia Hidro Elétrica do São Francisco, na pessoa do seu Diretor de Engenharia e Construção, José Ailton de Lima e do seu Superintendente da Expansão da Transmissão Ronaldo Honório de Albuquerque.

À Fabiana da Silva Leal e André Luiz Pereira da Cruz, pelas sugestões, discussões, e valiosa ajuda durante várias etapas deste projeto.

A toda equipe da DEAT, pelo apoio e troca de idéias durante a elaboração dessa dissertação.

Às equipes da DEPT e DEET, em especial a Gustavo Henrique Santos Vieira de Melo pela importante colaboração na etapa de simulações dinâmicas.

Aos amigos Alberto de Carvalho Machado, Oswaldo Regis Júnior, Methódio Varejão de Godoy, Maria Julieta Carvalho Aguiar, Miguel Carlos Medina Pena e Valnita Cardoso Guerra, pelo incentivo constante, colaboração e confiança na minha capacidade de fazer este trabalho.

Aos funcionários da Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação da UNIFEI, em especial à Cristina Silva, pelo apoio.

Enfim, a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização desse sonho.

Fernando Rodrigues Alves

Itajubá, julho de 2006

RESUMO

Este trabalho apresenta um breve histórico dos principais fatores determinantes das características elétricas padronizadas para os disjuntores utilizados na rede de alta e extra-alta tensão do Setor Elétrico Brasileiro.

Descreve os principais tipos de sobretensões, definidores dessas características, além dos tipos e funções mais relevantes dos disjuntores disponíveis no mercado de equipamentos.

Apresenta uma descrição breve das metodologias normalmente empregadas pelo Setor Elétrico Brasileiro para determinação dos requisitos dos disjuntores necessários para abertura de linha em vazio, enfatizando suas vantagens e desvantagens.

O principal produto desse trabalho consiste na apresentação de uma metodologia alternativa, mais precisa, para o estudo do fenômeno de abertura de linha em vazio após rejeição de carga, capaz de propiciar redução nos requisitos elétricos dos disjuntores e no seu custo de aquisição.

Efetua uma análise comparativa das características elétricas para especificação dos disjuntores da linha de tensão nominal de 500kV Teresina-Sobral-Fortaleza, parte integrante do sistema Chesf, relativas a esse fenômeno, mediante estudos com a utilização das metodologias vigentes no setor e com a metodologia proposta. As simulações são efetuadas com a ajuda do programa digital Alternative Transients Program (ATP) de modo a validar os resultados obtidos com o emprego da metodologia proposta no trabalho.

Em síntese, o trabalho apresenta uma metodologia de estudo para a determinação dos requisitos de suportabilidade do disjuntor, de forma mais precisa, durante o processo de abertura de linha em vazio após rejeição de carga, mediante simulações digitais e compara os resultados obtidos segundo esta metodologia com os determinados com outras duas comumente empregadas pelas empresas do Setor Elétrico Brasileiro.

ABSTRACT

This work presents a brief historical of the main factors responsible for standardized electric characteristics of circuit breakers used in the high and extra-high voltage in Brazilian Electric System.

It describes the main types of overvoltages that define those characteristics, besides types and more relevant functions of circuit breakers supplied by the market.

It describes study methods usually adopted by the Brazilian Electric Utilities to find the requirements of the circuit breakers during no-load line switching, with emphasis in their advantages and disadvantages.

The main product of this work consists to describe an alternative method, to analyse the phenomenon for no-load line switching after load rejection, in order to provide reduction in the requirements of the circuit breakers and in its acquisition costs.

Comparative analysis of the requirements are made for the circuit breakers of the Teresina-Sobral-Fortaleza 500kV transmission line, part of the Chesf transmission system, for that phenomenon, using the proposed methodology and two other ones. Simulations are made with the Alternative Transients Program (ATP) in order to validate the methodology proposed.

In synthesis, this work describes a method to determine the requirements of overvoltage, current and frequency for circuit breakers during the process of line charging opening after load rejection, by means of simulations using digital program, Alternative Transients Program (ATP), and comparison the results with others obtained from two others methodologies commonly used by Brazilian Electric System Utilities.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	VII
RESUMO	IX
ABSTRACT	X
SUMÁRIO.....	XI
LISTA DE TABELAS.....	XIII
LISTA DE FIGURAS	XIV
1 INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA	18
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	19
2 LINHA DE TRANSMISSÃO: EQUAÇÕES E PARÂMETROS.....	21
2.1 INTRODUÇÃO.....	21
2.2 EQUAÇÕES DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	22
2.2.1 Constante de Propagação.....	25
2.2.2 Comprimento de Onda	26
2.2.3 Impedância Característica	26
2.2.4 Potência Característica	27
2.2.5 Efeito Ferranti	27
2.2.6 Modelo da Linha de Transmissão para Estudos de Sistema	28
2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	30
3 SOBRETENSÕES EM SISTEMAS ELÉTRICOS.....	32
3.1 INTRODUÇÃO.....	32
3.2 SOBRETENSÕES: CONCEITUAÇÃO E TIPOS.....	33
3.2.1 Sobretensão	34
3.2.1.1 Tensão Contínua de Frequência Fundamental.....	34
3.2.1.2 Sobretensão Temporária.....	35
3.2.1.4 Sobretensão Transitória.....	35
3.2.1.4 Sobretensões de Origem Externa.....	35
3.2.1.5 Sobretensões de Origem Interna.....	36
3.3 PRINCIPAIS TIPOS DE SOBRETENSÃO QUE ORIGINAM SOLICITAÇÕES DIELÉTRICAS EM DISJUNTORES.....	36
3.3.1 Tensão de Restabelecimento Transitória - TRT	37
3.3.1.1 Apresentação do Problema e Descrição do Fenômeno.....	38
3.3.1.2 Cálculo da TRT	42
3.3.1.3 Severidade das Sobretensões.....	44
3.3.1.4 Alternativas para Redução das Solicitações de TRT (Uc e TCTRT).....	46
3.3.1.5 Normas e Procedimentos para Avaliação Simplificada de Solicitações de TRT	48
3.3.2 Abertura em Discordância de Fases	52
3.3.2.1 Metodologia e Critérios de Análise	53
3.3.3 Abertura de Linha em Vazio	55
3.3.3.1 A Rigidez Dielétrica Interna da Câmara na Abertura dos Disjuntores	56
3.3.3.2 Tensão de Restabelecimento Durante a Abertura de Correntes Capacitivas	58
3.3.3.3 Linhas com Reatores em Derivação para Compensação	68
3.3.3.4 Abertura de Linha em Vazio sem Falta Após Rejeição de Carga.....	69
3.3.3.5 Abertura de Linhas em Vazio sob Falta Monofásica após Rejeição de Carga.....	72
4 DISJUNTORES: FUNÇÕES E TIPOS.....	75
4.1 INTRODUÇÃO.....	75
4.2 DEFINIÇÃO DE DISJUNTOR, DISJUNTOR IDEAL E DISJUNTOR REAL.....	75
4.3 FUNÇÃO DOS DISJUNTORES	76
4.4 TIPOS DE DISJUNTORES	77

4.4.1	Disjuntor a Sopro Magnético.....	77
4.4.2	Disjuntor a Óleo	79
4.4.3	Disjuntor a Vácuo.....	81
4.4.4	Disjuntor a Ar Comprimido.....	85
4.4.5	Disjuntor a Hexafluoreto de Enxofre – SF ₆	877
5	METODOLOGIAS PARA ESTUDO DE ABERTURA DE LINHA EM VAZIO	91
5.1	INTRODUÇÃO.....	91
5.2	METODOLOGIAS EMPREGADAS PELO SETOR ELÉTRICO NA ANÁLISE DO FENÔMENO	92
5.2.1	Metodologia para Análise de Abertura de Linha em Vazio a partir do Pré-ajuste das Tensões do Sistema e da Freqüência das Fontes – Metodologia 1	92
5.2.2	Metodologia para Análise de Abertura de Linha em Vazio a partir da Rejeição da Carga do Sistema Devida à Abertura dos Disjuntores de um dos Terminais da Linha em Condições Desfavoráveis de Fluxo de Potência e de Tensão - Metodologia 2.....	95
5.3	METODOLOGIA ALTERNATIVA PARA ANÁLISE DO FENÔMENO DE ABERTURA DE LINHA EM VAZIO.....	97
5.3.1	Fluxo de Carga para a Análise de Abertura	99
5.3.2	Curvas de Tensão versus Freqüência versus Tempo dos Geradores.....	99
5.3.2	Tempo de Arco Mínimo do Disjuntor	101
5.3.4	Simulações dos Transitórios de Abertura	101
6	ANÁLISES DE SISTEMA SEGUNDO AS METODOLOGIAS APRESENTADAS E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	102
6.1	INTRODUÇÃO.....	102
6.2	CONDIÇÕES DE SISTEMA	103
6.2.1	Configuração do Sistema.....	103
6.2.2	Dados dos Componentes	104
6.3	ESTUDOS DE REJEIÇÃO DE CARGA NA FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL.....	105
6.3.1	Sobretensões Dinâmicas Devidas à Rejeição de Carga	105
6.3.2	Curvas de Tensão Versus Tempo e Freqüência Versus Tempo.....	111
6.4	ANÁLISES DOS TRANSITÓRIOS DE ABERTURA DE LINHA EM VAZIO	112
6.4.1	Análise de Abertura de Linha em Vazio Segundo a Metodologia 1	112
6.4.2	Análise de Abertura de Linha em Vazio Segundo a Metodologia 2	116
6.4.2.1	Análise de Abertura de Linha em Vazio Segundo a Metodologia 2 – Sistema Íntegro	117
6.4.2.2	Análise de Abertura de Linha em Vazio Segundo a Metodologia 2 – Sistema Degradado	119
6.4.3	Análise de Abertura de Linha em Vazio Segundo a Metodologia Alternativa	122
6.4.4	Análise Comparativa dos Resultados das Solicitações no Disjuntor Durante a Abertura de Linha em Vazio Obtidos com o Uso das Três Metodologias.....	124
7	CONCLUSÕES E TEMAS PARA NOVAS PESQUISAS	128
7.1	CONCLUSÕES.....	128
7.2	TEMAS PARA NOVAS PESQUISAS	131
APÊNDICE A	136
DEFINIÇÕES DE SIGLAS, TERMOS E EXPRESSÕES.....		136
APÊNDICE B	140
PARÂMETROS ELÉTRICOS DO SISTEMA E DOS EQUIPAMENTOS		140
APÊNDICE C	145
OSCILOGRAMAS.....		145

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1	–	Envoltórias de TRT para abertura em discordância de fase.....	55
TABELA 5.1	–	Correntes de abertura de linha em vazio para diferentes classes de tensão.....	94
TABELA 6.1	–	Sobretensões dinâmicas nas SEs Teresina, Sobral e Fortaleza devidas à abertura simples das Linhas Teresina-Sobral e Sobral-Fortaleza, sem defeito e com falta monofásica na linha.....	108
TABELA 6.2	–	Sobretensões dinâmicas nas SEs Teresina, Sobral e Fortaleza devidas à abertura dupla das Linhas Teresina-Sobral e Sobral-Fortaleza, sem defeito e com falta monofásica no barramento.....	109
TABELA 6.3	–	Abertura de linha em vazio, SE Teresina, SE Sobral e SE Fortaleza, sem falta.....	113
TABELA 6.4	–	Abertura de linha em vazio, SE Teresina, SE Sobral e SE Fortaleza, com falta no terminal remoto.	113
TABELA 6.5	–	Abertura de linha em vazio, SE Teresina, SE Sobral e SE Fortaleza, sem falta.	117
TABELA 6.6	–	Abertura de linha em vazio, SE Teresina, SE Sobral e SE Fortaleza, com falta no terminal remoto.	118
TABELA 6.7	–	Abertura de linha em vazio, SE Teresina, SE Sobral e SE Fortaleza, sem falta.....	120
TABELA 6.8	–	Abertura de linha em vazio, SE Teresina, SE Sobral e SE Fortaleza, com falta no terminal remoto.	120
TABELA 6.9	–	Rejeição de carga por abertura dupla de linha sobre a SE Teresina, SE Sobral e SE Fortaleza, devida à perda do barramento da subestação, com falta, seguida de abertura de linha em vazio na frequência de 60Hz.....	123
TABELA 6.10	–	Análise comparativa das solicitações no disjuntor obtidas com as três metodologias de estudo.....	125
TABELA B1	–	Linhas de transmissão 500 kV - Parâmetros elétricos.....	141
TABELA B2	–	Linhas de transmissão 230 kV - Parâmetros elétricos.....	141
TABELA B3	–	Transformadores – Impedâncias.....	142
TABELA B4	–	Curva VxI - AT1 - 550/230/13,8kV-3x100MVA - SE Teresina II.....	142
TABELA B5	–	Curva VxI - AT2 - 550/230/13,8kV-3x100MVA - SE Teresina II.....	142
TABELA B6	–	Curva VxI - AT1 e AT2 - 550/230/13,8kV-3x200MVA - SE Fortaleza II.....	142
TABELA B7	–	Curva VxI – AT 550/230/13,8kV-3x100MVA - SE B.Esperança.....	142
TABELA B8	–	Impedâncias equivalentes - Configuração 2005.....	143
TABELA B9	–	Potência nominal e relação X_0/X_1 dos reatores.....	143
TABELA B10	–	2005 e 2010 – Cargas.....	144

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1	– Parâmetros distribuídos ao longo de uma linha de transmissão.....	23
FIGURA 2.2	– Elemento série para representação dos parâmetros de uma linha de transmissão.....	23
FIGURA 2.3	– Circuito equivalente de uma linha de transmissão.....	29
FIGURA 3.1	– Classificação das sobretensões.....	36
FIGURA 3.2	– Envoltória da TRT – Representação a dois parâmetros.....	37
FIGURA 3.3	– Envoltória da TRT – Representação a quatro parâmetros.....	38
FIGURA 3.4	– Forma de onda típica de TRT e diferentes taxas de crescimento da tensão.....	42
FIGURA 3.5	– Circuito LC para cálculo simplificado da TRT durante eliminação de falta....	43
FIGURA 3.6	– Forma de onda da TRT durante eliminação de falta.....	45
FIGURA 3.7	– Características dielétricas para diferentes valores de probabilidade de descarga.....	58
FIGURA 3.8	– Escalada de tensão devida ao reacendimento do arco no disjuntor.....	60
FIGURA 3.9	– Forma geral de circuitos capacitivos energizados a partir de uma fonte aterrada.....	62
FIGURA 3.10	– Pico da tensão de restabelecimento através dos contatos do primeiro pólo do disjuntor ao abrir uma corrente capacitiva sem reacendimento.....	62
FIGURA 3.11	– Circuito equivalente monofásico simplificado de uma linha manobrada em vazio.....	64
FIGURA 3.12	– Fluxo de potência reativa de uma linha em vazio ligada a um gerador.....	70
FIGURA 3.13	– Fluxo de potência reativa de uma linha com uma carga indutiva ligada a um gerador.....	70
FIGURA 3.14	– Circuito equivalente trifásico de uma falta fase-terra.....	73
FIGURA 4.1	– Interrupção do arco em disjuntores a sopro magnético.....	78
FIGURA 4.2	– Percentual de participação dos diversos tipos de disjuntores no mercado de fornecimento.....	83
FIGURA 4.3	– Detalhamento de uma ampola de vácuo.....	84
FIGURA 4.4	– Partes integrantes de um disjuntor a vácuo.....	84
FIGURA 4.5	– Vista completa de um disjuntor a ar comprimido.....	86
FIGURA 4.6	– Partes componentes de um disjuntor a ar comprimido.....	86
FIGURA 4.7	– Característica dielétrica de diferentes isolantes.....	88
FIGURA 4.8	– Princípio de funcionamento do disjuntor tipo puffer – autocompressão.....	89

FIGURA 4.9 – Partes componentes do disjuntor tipo SF ₆	90
FIGURA 5.1 – Parâmetro R ₀ /X ₁ (R ₁ /X ₁ =1,0).....	96
FIGURA 5.2 – Parâmetro R ₁ /X ₁ (R ₀ /X ₁ =1,0).....	96
FIGURA 6.1 – Rede Básica 500 e 230kV da Chesf selecionada para estudo.....	103
FIGURA C1 – Estudo Dinâmico - Abertura simples da LT TSD-SBT sobre SBT permanecendo conectada em SBT com o autotransformador 550/230kV de SBT em operação.....	146
FIGURA C2 – Estudo Dinâmico - Abertura simples da LT SBT-FZD sobre FZD permanecendo conectada em FZD com o autotransformador 550/230kV de SBT em operação.....	146
FIGURA C3 – Estudo Dinâmico - Abertura dupla da LT TSD-SBT sobre SBT Permanecendo conectada em SBT com o autotransformador 550/230kV de SBT em operação.....	147
FIGURA C4 – Estudo Dinâmico - Abertura dupla da LT SBT-FTZ sobre SBT permanecendo conectadas em SBT sem o autotransformador 550/230kV de SBT em operação.....	147
FIGURA C5 – Abertura de linha em vazio, LT Teresina-Sobral 500 kV C2, SE Teresina - Caso 1 - Sem falta.....	148
FIGURA C6 – Abertura de linha em vazio, LT Teresina-Sobral 500 kV C2, SE Sobral - Caso 2 - Sem falta.....	149
FIGURA C7 – Abertura de linha em vazio, LT Sobral-Fortaleza 500 kV C2, SE Sobral - Caso 3 - Sem falta.....	150
FIGURA C8 – Abertura de linha em vazio, LT Sobral-Fortaleza 500 kV C2, SE Fortaleza - Caso 4 - Sem falta.....	151
FIGURA C9 – Abertura de linha em vazio, LT Teresina-Sobral 500 kV C2, SE Teresina - Caso 5 - Com falta.....	152
FIGURA C10 – Abertura de linha em vazio, LT Teresina-Sobral 500 kV C2, SE Sobral - Caso 6 - Com falta.....	153
FIGURA C11 – Abertura de linha em vazio, LT Sobral-Fortaleza 500 kV C2, SE Sobral - Caso 7 - Com falta.....	154
FIGURA C12 – Abertura de linha em vazio, LT Sobral-Fortaleza 500 kV C2, SE Fortaleza - Caso 8 - Com falta.....	155
FIGURA C13 – Abertura de linha em vazio, LT Teresina-Sobral 500 kV C2, SE Sobral - Caso 10 - Sem falta.....	156
FIGURA C14 – Abertura de linha em vazio, LT Sobral-Fortaleza 500 kV C2, SE Sobral - Caso 11 - Sem falta.....	156
FIGURA C15 – Abertura de linha em vazio, LT Teresina-Sobral 500 kV C2, SE Sobral - Caso 13 - Com falta.....	157
FIGURA C16 – Abertura de linha em vazio, LT Sobral-Fortaleza 500 kV C2, SE Sobral - Caso 15 - Com falta.....	157

FIGURA C17 – Abertura de linha em vazio, LT Teresina-Sobral 500 kV C2, SE Teresina - Caso 17 - Sem falta.....	158
FIGURA C18 – Abertura de linha em vazio, LT 500 kV Sobral-Fortaleza C2, SE Sobral - Caso 19 - Sem falta.....	158
FIGURA C19 – Abertura de linha em vazio, LT Teresina-Sobral 500 kV C2, SE Teresina - Caso 21 - Com falta.....	159
FIGURA C20 – Abertura de linha em vazio, LT Sobral-Fortaleza 500 kV C2, SE Sobral - Caso 23 - Com falta.....	159
FIGURA C21 – Abertura de linha em vazio, LT Teresina-Sobral 500 kV C2, SE Sobral - Caso 27 - Com falta.....	160
FIGURA C22 – Abertura de linha em vazio, LT Sobral-Fortaleza 500 kV C2, SE Fortaleza - Caso 31 - Com falta.....	160

Capítulo 1

Introdução

A década de 70 foi marcada por um grande desenvolvimento econômico no Brasil acompanhado de elevadas taxas de crescimento, notadamente no setor industrial. Em consequência houve uma acelerada demanda por energia elétrica e a ação governamental em resposta a esta crescente demanda foi direcionar elevados investimentos para o setor elétrico.

Os grandes potenciais de recursos hídricos disponíveis no Brasil viabilizaram a estratégia de promover a geração de energia através do seu aproveitamento hidroelétrico.

Foram construídas inúmeras e importantes usinas hidroelétricas, com prioridade para os aproveitamentos situados em regiões próximas aos grandes centros consumidores e, posteriormente, na medida em que ocorria o esgotamento destas possibilidades, usinas foram instaladas em regiões cada vez mais distantes. Ainda hoje esta tendência se mantém.

A compreensão desse processo fornece a dimensão exata do impacto destes investimentos na expansão do sistema de transmissão de energia elétrica brasileiro. Foram construídas linhas de transmissão cada vez mais longas, para interligação elétrica entre diferentes regiões do país, conexão das novas usinas aos centros consumidores e para aumentar a capacidade de transporte e distribuição de energia elétrica em volumes crescentes, tornando o sistema de transmissão brasileiro cada vez mais complexo e malhado. Os níveis de tensão de transmissão também sofreram incrementos e, atualmente, o maior valor de tensão nominal é 550 kV, excluindo o sistema de transmissão ligado à UHE Itaipu (750kV).

Associado às expansões de geração e de transmissão, também houve um crescente aumento do número de subestações que demandou a compra e instalação de equipamentos de potência em grandes volumes.

Nesse processo evolutivo se verificou uma tendência à padronização dos equipamentos em função das culturas vigentes nas empresas, predominantemente estatais, bem como à uniformização de procedimentos e metodologias, incluindo critérios, relacionados com a especificação desses equipamentos, tendência esta patrocinada e incentivada pelo governo consensualmente entre as empresas de geração e transmissão de energia elétrica e indústrias fornecedoras de equipamentos. A luz de novos conhecimentos sistêmicos e evoluções tecnológicas, atualmente, muitas destas padronizações e metodologias poderiam ser consideradas conservadoras, implicando em um sobre dimensionamento das instalações e equipamentos, se não de um modo generalizado, pelo menos em aplicações específicas.

Em tempos recentes, o modelo de expansão do setor elétrico, de natureza determinística, baseado em uma intervenção direta do governo, tem sido substituído por um modelo indicativo, caracterizado pela multipropriedade, baseado em competição entre as empresas, tanto estatais como de capital privado, sendo a outorga de concessão dos novos empreendimentos efetuada através leilões promovidos pelo Estado, onde o menor custo do empreendimento é um fator decisivo para obtenção dessa concessão.

Apesar das mudanças do modelo, muitas das metodologias, que atenderam tão bem o Setor Elétrico Brasileiro no passado, ainda vigoram sob forma de herança cultural.

Torna-se oportuno uma reavaliação das metodologias de estudo para especificação dos equipamentos dos novos empreendimentos, tomando por base análises sistêmicas detalhadas, com exploração das peculiaridades relativas à sua localização, de modo a minimizar os custos dos equipamentos e, conseqüentemente, do empreendimento como um todo, beneficiando, em tese, a sociedade.

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

Esta dissertação tem por objetivo principal apresentar uma metodologia alternativa para estudo e definição de requisitos mínimos para especificação dos disjuntores de alta e extra-alta

tensão no que se refere à manobra de abertura de linha em vazio.

A principal motivação pela escolha desse tema é a visualização da necessidade de otimização destes requisitos para fazer frente aos freqüentes apelos por parte do setor pela redução dos preços destes equipamentos de chaveamento, em função do novo cenário do setor elétrico, mais competitivo, sem, no entanto, provocar perda da qualidade do seu desempenho no sistema.

O trabalho objetiva ainda apresentar uma descrição dos principais tipos de disjuntores e de sobretensões importantes para o seu dimensionamento e definidoras de suas características básicas.

Espera-se com esse trabalho, ao nível do setor, motivar a revisão das especificações técnicas dos disjuntores de alta e extra-alta tensão, incorporando os requisitos obtidos segundo a metodologia alternativa apresentada, na busca de adquirir dispositivos com custos menores. Naturalmente para atingir esse objetivo, pesquisas adicionais em outros parâmetros importantes para o dimensionamento do disjuntor devem ser efetuadas, com destaque para as sobretensões originadas de eliminação de defeito.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho está dividido em sete capítulos, resumidos a seguir:

Capítulo 1: Introduce o tema, mediante histórico da filosofia que norteou a especificação dos equipamentos e sua aplicação em um cenário caracterizado por grande crescimento de demanda e de expansão do Sistema Elétrico Brasileiro, apresenta os objetivos gerais do trabalho e suas justificativas.

Capítulo 2: Descreve equações e parâmetros básicos da linha de transmissão. Enfoca, de forma resumida, a teoria das ondas trafegantes e o seu modelo para estudos de sistema. Adicionalmente disserta sobre o comportamento das linhas de transmissão em regime permanente. Esse capítulo tem por objetivo constituir um referencial teórico para o desenvolvimento dos modelos para os estudos de abertura de linha em vazio.

Capítulo 3: Aborda as sobretensões em sistemas de potência, sua conceituação e tipos, e descreve, de forma sucinta, as principais manobras responsáveis por solicitações dielétricas em disjuntores. Os aspectos mais relevantes da tensão de restabelecimento transitória que surge entre os contatos dos disjuntores durante interrupção de faltas são mostrados de forma resumida. Adicionalmente é dado um enfoque às solicitações de tensão e corrente provenientes da abertura em oposição de fases. Ainda nesse capítulo são detalhados os aspectos sistêmicos e as equações para determinação dos requisitos necessários ao disjuntor para fazer frente às solicitações de tensão e corrente durante a abertura de linha em vazio.

Capítulo 4: Descreve os principais tipos de disjuntores disponíveis no mercado, seu princípio de funcionamento durante operações de manobra em condições anormais de operação e fornece subsídios para a escolha do disjuntor mais adequado às condições de serviço para o qual o mesmo está destinado.

Capítulo 5: Apresenta metodologias de análise de abertura de linha sem carga normalmente empregadas pelo setor elétrico, faz uma crítica às mesmas e propõe uma metodologia alternativa para avaliação desse fenômeno visando reduzir os requisitos nos disjuntores durante a manobra sem, no entanto, aumentar o risco de falha do equipamento e do sistema durante o desenvolvimento do fenômeno.

Capítulo 6: Mostra os resultados obtidos nas simulações de abertura de linha em vazio em um determinado subsistema da Rede Básica da Chesf utilizando as metodologias descritas no Capítulo 5.

Capítulo 7: Resume as principais conclusões deste trabalho e apresenta sugestões para novas pesquisas relacionadas ao tema.

APÊNDICE A: Apresenta tabela contendo definições de termos, siglas e expressões usadas neste trabalho, em ordem alfabética.

APÊNDICE B: Lista os parâmetros e dados gerais da rede e dos equipamentos utilizados na montagem do sistema para execução das simulações.

APÊNDICE C: Mostra oscilogramas de tensão relativos aos estudos dinâmicos na frequência fundamental e de tensão e corrente dos estudos transitórios de abertura de linha em vazio após rejeição de carga no sistema selecionado para análise.

Capítulo 2

Linha de Transmissão: Equações e Parâmetros

2.1 INTRODUÇÃO

A denominação linha de transmissão se aplica a todos os elementos de circuitos que têm por finalidade o transporte de qualquer quantidade de energia de uma fonte, aqui denominada de transmissor de energia ou emissor, para um consumidor de energia, aqui denominado de receptor de energia ou simplesmente receptor (FUCHS, 1979).

As cargas elétricas nas linhas originam os campos elétricos e o seu deslocamento ao longo da mesma dá origem aos campos magnéticos. Dessa forma, ao se energizar uma linha de transmissão, longitudinalmente à mesma irão se estabelecendo, progressivamente, campos elétricos e campos magnéticos do emissor para o receptor, com uma velocidade, definida como velocidade de propagação, dada pelo quociente entre o seu comprimento (ℓ) e o intervalo de tempo (T) necessário para que a tensão no receptor atinja um determinado valor (U).

Essas linhas quando submetidas a uma tensão ou qualquer outro tipo de distúrbio no seu terminal emissor têm seus efeitos medidos no terminal receptor, somente após certo intervalo de tempo durante o qual o sinal percorre toda a sua extensão. Ao atingir o terminal receptor e estando esse aberto, o sinal é refletido e transmitido de volta ao terminal emissor. Dessa forma, o sinal é

refletido continuamente entre os dois terminais da linha, sofrendo atenuações por perdas resistivas e efeito corona até atingir o regime permanente. O intervalo de tempo necessário para que o sinal se desloque de um terminal para o outro é definido como tempo de propagação. Esse tempo está relacionado à velocidade de propagação do sinal, caracterizado como uma onda eletromagnética, na linha de transmissão. As ondas de tensão e de corrente que se propagam nas linhas de transmissão são denominadas ondas viajantes.

É importante enfatizar que não faz parte do escopo deste trabalho efetuar uma descrição detalhada do fenômeno de propagação de ondas em linhas de transmissão uma vez que esse assunto é há muito tempo conhecido, estando disponível, com suficiente nível de detalhes, em (FUCHS, 1979), (GREENWOOD, 1971) e (STEVENSON, 1976).

Os estudos de distribuição de correntes e de diferenças de potencial nessas linhas bem como a transferência de energia ao longo das mesmas podem ser efetuados mediante processos que permitam chegar a expressões matemáticas finais a serem utilizadas de forma direta na solução de problemas práticos.

As equações que regem o fenômeno de propagação de ondas em linhas podem ser determinadas partindo-se de um modelo simples, envolvendo uma linha de transmissão monofásica e são apresentadas de maneira resumida nos itens subseqüentes.

2.2 EQUAÇÕES DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

Os parâmetros de uma linha de transmissão não estão concentrados e sim uniformemente distribuídos ao longo desta. Portanto, a obtenção da solução exata para a linha, com um alto grau de precisão considera essa característica (STEVENSON, 1976).

Uma das formas de se representar o caráter distribuído dos parâmetros de uma linha é considerá-la como a conexão de uma série de elementos discretos, em que estão representadas parcelas de todos os seus parâmetros, conforme a Figura 2.1 onde Δx [km] representa o comprimento deste elemento, g [Ω^{-1}/km] a perda nos dielétricos, r [Ω/km] a perda nos condutores, c [F/km] a capacitância e l [H/km] a indutância.

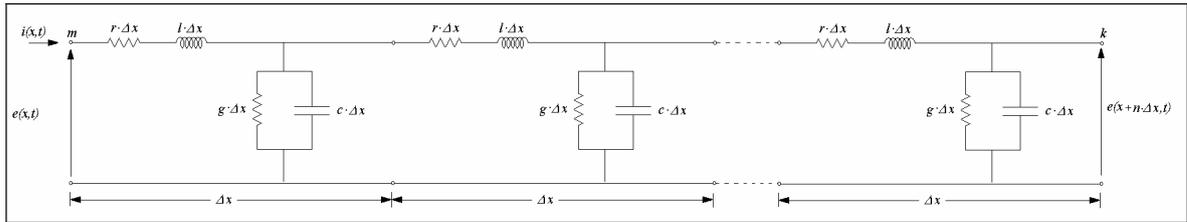


Figura 2.1 – Parâmetros distribuídos ao longo de uma linha de transmissão

Um comprimento discreto Δx da linha pode ser representado pelo circuito da Figura 2.2 a seguir:

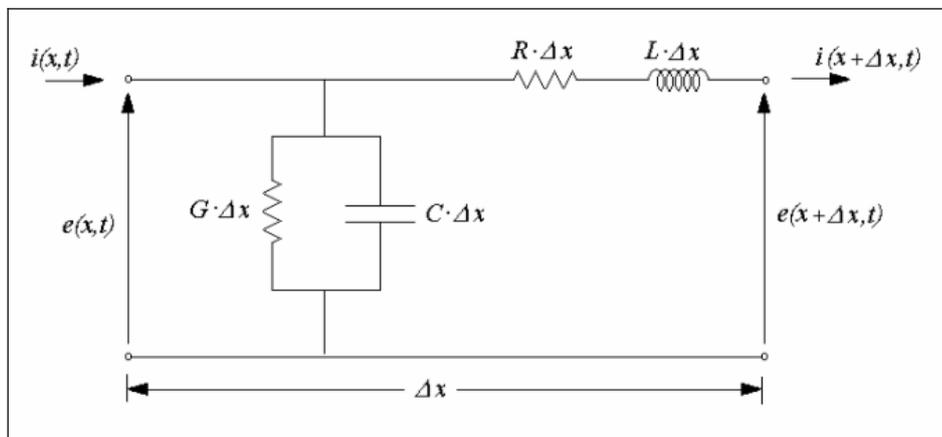


Figura 2.2 – Elemento série para representação dos parâmetros de uma linha de transmissão.

Sendo:

R : resistência série da linha, Ω/km ;

L : indutância série da linha, H/km ;

C : capacitância *shunt* da linha, F/km ;

G : condutância de dispersão da linha, Ω^{-1}/km ;

Δx : comprimento da porção escolhida da linha, km .

A tensão e a corrente no circuito da Figura 2.2 são dadas por:

$$e(x,t) - e(x + \Delta x,t) = R \cdot \Delta x \cdot i(x + \Delta x,t) + L \cdot \Delta x \frac{\partial i(x + \Delta x,t)}{\partial t}, \quad \text{ou ainda :}$$

$$\frac{e(x,t) - e(x + \Delta x,t)}{\Delta x} = R \cdot i(x + \Delta x,t) + L \frac{\partial i(x + \Delta x,t)}{\partial t};$$

$$i(x + \Delta x, t) - i(x, t) = -G \cdot \Delta x \cdot e(x, t) - C \cdot \Delta x \frac{\partial e(x, t)}{\partial t}, \quad \text{ou ainda :}$$

$$\frac{i(x + \Delta x, t) - i(x, t)}{\Delta x} = -G \cdot e(x, t) - C \cdot \frac{\partial e(x, t)}{\partial t}.$$

Tomando-se o limite, quando $\Delta x \rightarrow 0$:

$$-\frac{\partial e(x, t)}{\partial x} = R \cdot i(x, t) + L \frac{\partial i(x, t)}{\partial t};$$

$$-\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = G \cdot e(x, t) + C \frac{\partial e(x, t)}{\partial t}.$$
(2.1)

A interpretação física destas equações indica que a taxa de variação de tensão ao longo da linha resulta de uma queda resistiva e indutiva de tensão e que a variação diferencial da corrente ao longo da linha resulta da corrente de carga capacitiva.

Derivando 2.1 em relação a x e t e explicitando sua solução em relação a x resulta nas equações das linhas de transmissão:

$$-\frac{\partial^2 e(x, t)}{\partial x^2} = RC \cdot \frac{\partial e(x, t)}{\partial t} + LC \frac{\partial^2 e(x, t)}{\partial t^2};$$

$$-\frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial x^2} = RC \cdot \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} + LC \frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial t^2}.$$
(2.2)

Considerando os objetivos deste trabalho, onde as análises de tensões e correntes durante a abertura de linha em vazio são desenvolvidas em regime fasorial, a linha de transmissão é considerada excitada por corrente e tensão alternadas e frequência constante. Nesta situação é possível definir essas correntes e tensões como funções senoidais no tempo, representáveis como fasores (FUCHS, 1979). Desta forma as equações gerais de uma linha de transmissão podem ser reescritas da seguinte forma:

$$e(x, t) = E_x \text{ sen } \omega t = \dot{E}$$

$$i(x, t) = I_x \text{ sen } (\omega t + \phi) = \dot{I}$$
(2.3)

Nessas equações a tensão e a corrente são representadas por fasores \dot{E} e \dot{I} . Para este sistema de equações, as variáveis E_x e I_x são funções de x , de modo que as equações 2.2 podem ser reescritas da seguinte forma:

$$\begin{aligned} -\frac{d^2 \dot{E}}{dx^2} &= j\omega RC \dot{E} - \omega^2 LC \dot{E} = \gamma^2 \dot{E} \\ -\frac{d^2 \dot{I}}{dx^2} &= j\omega RC \dot{I} - \omega^2 LC \dot{I} = \gamma^2 \dot{I} \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\text{sendo } \gamma = \sqrt{ZY} = \sqrt{j\omega C(R + j\omega L)}$$

As equações diferenciais (2.4) apresentam as seguintes soluções gerais:

$$\begin{aligned} \dot{E}(x) &= \dot{E}_1 e^{-\gamma x} + \dot{E}_2 e^{+\gamma x} \\ \dot{I}(x) &= \dot{I}_1 e^{-\gamma x} + \dot{I}_2 e^{+\gamma x} = \frac{1}{Z_c} (\dot{E}_1 e^{-\gamma x} - \dot{E}_2 e^{+\gamma x}) \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$\text{Sendo } Z_c = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{j\omega C}} \quad (2.6)$$

As constantes \dot{E}_1 e \dot{E}_2 devem ser obtidas a partir das condições de tensão e corrente conhecidas, nos terminais emissor e receptor da linha, aqui denominadas de condições de contorno.

Nos itens subseqüentes são explicitados alguns parâmetros importantes nos estudos das linhas de transmissão.

2.2.1 Constante de Propagação

A constante de propagação γ determina a forma como as correntes e tensões se propagam ao longo da linha, sendo geralmente um número complexo escrito sob a forma:

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (2.7)$$

Onde α e β são conhecidos como fator de atenuação e fator de distorção da linha, respectivamente, e representam os efeitos de atenuação e distorção sofridos pela onda eletromagnética ao percorrer uma linha física.

A parte real α , denotada como constante de atenuação, é responsável pelo amortecimento ou atenuação da onda. Sua unidade é Néper por quilômetro. Deste parâmetro dependem os módulos da tensão e da corrente. As perdas de energia na linha de transmissão estão diretamente relacionadas a este parâmetro.

A parte imaginária β , denominada de constante de fase, indica a forma como as fases da tensão e da corrente variam ao longo da linha. Sua unidade é o radiano por quilômetro. Deste parâmetro dependem os módulos da tensão e corrente.

Pode-se escrever a seguinte expressão:

$$e^{-\gamma x} = e^{-(\alpha + j\beta)x} = e^{-\alpha x} e^{-j\beta x}$$

2.2.2 Comprimento de Onda

Quando a distância x torna o deslocamento de fase β igual a 360 graus, esta distância é dita igual a um comprimento de onda, denotado por λ . Daí tem-se que:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} \tag{2.8}$$

2.2.3 Impedância Característica

A impedância característica da linha de transmissão, representada pela expressão 2.9, a seguir, é definida para uma determinada frequência ω . Este parâmetro independe da extensão da linha, uma vez que R, L e C estão referidos a um quilômetro da linha.

$$Z_c = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{j\omega C}} \quad (2.9)$$

2.2.4 Potência Característica

Um outro parâmetro de fundamental importância no estudo das linhas de transmissão é a sua potência característica, também denominada de potência natural. Esta corresponde ao nível de potência transportada pela linha numa situação em que a potência reativa gerada pela capacitância em derivação da linha é consumida na indutância série da mesma, quando se despreza a sua resistência, sendo definida como:

$$P_n = \frac{E^2}{Z_s} \quad (2.10)$$

Onde E é a tensão nominal da linha e $Z_s = \sqrt{\frac{L}{C}}$ é a sua impedância de surto.

2.2.5 Efeito Ferranti

Quando não há carga ativa suprida por um determinado sistema, costuma-se dizer que o mesmo se encontra em vazio. Esta situação ocorre quando o mesmo está sendo energizado ou foi submetido a um grande distúrbio, perdeu estabilidade, saiu de operação e agora está sendo recomposto ou então foi submetido a uma rejeição total de carga. Estas condições de operação provocam o surgimento de sobretensões sustentadas originadas do fenômeno denominado de *Efeito Ferranti* entre outros. Este fenômeno tem origem no fluxo de corrente de natureza capacitiva na indutância da linha. Para compensar este efeito, característico de sistemas de grande extensão, é prática comum instalar reatores em derivação em um ou em ambos os terminais da linha, de forma a compensar a potência reativa gerada e reduzir a sobretensão no terminal aberto. A instalação destes reatores visa, entre outros objetivos, evitar danos aos isolamentos dos equipamentos de conexão da linha, tais como, transformadores de corrente e de potencial, pára-raios, filtros de onda e transformadores de potência durante condições normais e anormais de operação.

2.2.6 Modelo da Linha de Transmissão para Estudos de Sistema

A tensão e a corrente no fim da linha são variáveis de grande importância nos estudos de sistema. Desta forma, essas são explicitadas a partir da equação (2.5) como função da tensão e corrente no início da linha.

$$\text{Para } x = 0 \text{ tem-se } \dot{E}(0) = \dot{E}_i \text{ e } \dot{I}(0) = \dot{I}_i$$

$$\text{Para } x = \ell \text{ tem-se } \dot{E}(\ell) = \dot{E}_f \text{ e } \dot{I}(\ell) = \dot{I}_f$$

Então:

$$\begin{aligned} \dot{E}_i &= \dot{E}_1 + \dot{E}_2 \\ \dot{E}_f &= \dot{E}_1 e^{-\gamma \ell} + \dot{E}_2 e^{+\gamma \ell} \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_i &= \frac{1}{Z_c} (\dot{E}_1 - \dot{E}_2) \\ \dot{I}_f &= \frac{1}{Z_c} (\dot{E}_1 e^{+\gamma \ell} - \dot{E}_2 e^{-\gamma \ell}) \end{aligned} \quad (2.12)$$

Determinando-se as constantes \dot{E}_1 e \dot{E}_2 das equações do início da linha tem-se como resultado:

$$\begin{aligned} \dot{E}_1 &= \frac{\dot{E}_i + Z_c \dot{I}_i}{2} \\ \dot{E}_2 &= \frac{\dot{E}_i - Z_c \dot{I}_i}{2} \end{aligned} \quad (2.13)$$

Substituindo-se (2.13) nas equações de fim de linha resulta:

$$\begin{aligned} \dot{E}_f &= \dot{E}_i \left(\frac{e^{+\gamma \ell} + e^{-\gamma \ell}}{2} \right) - Z_c \dot{I}_i \left(\frac{e^{+\gamma \ell} - e^{-\gamma \ell}}{2} \right) \\ \dot{I}_f &= \dot{I}_i \left(\frac{e^{+\gamma \ell} + e^{-\gamma \ell}}{2} \right) - \frac{\dot{E}_i}{Z_c} \left(\frac{e^{+\gamma \ell} - e^{-\gamma \ell}}{2} \right) \end{aligned} \quad (2.14)$$

Considerando que:

$$\begin{aligned} \text{Cosh } \gamma \ell &= \left(\frac{e^{+\gamma \ell} + e^{-\gamma \ell}}{2} \right) \\ \text{Senh } \gamma \ell &= \left(\frac{e^{+\gamma \ell} - e^{-\gamma \ell}}{2} \right) \end{aligned} \quad (2.15)$$

Pode-se finalmente determinar que:

$$\begin{aligned} \dot{E}_f &= \dot{E}_i \text{Cosh } \gamma \ell - Z_c \dot{I}_i \text{Senh } \gamma \ell \\ \dot{I}_f &= \dot{I}_i \text{Cosh } \gamma \ell - \frac{\dot{E}_i}{Z_c} \text{Senh } \gamma \ell \end{aligned} \quad (2.16)$$

De forma semelhante, pode-se obter a tensão e a corrente no início da linha em função da tensão e da corrente no fim da linha, o que tem como resultado:

$$\begin{aligned} \dot{E}_i &= \dot{E}_f \text{Cosh } \gamma \ell + Z_c \dot{I}_f \text{Senh } \gamma \ell \\ \dot{I}_i &= \dot{I}_f \text{Cosh } \gamma \ell + \frac{\dot{E}_f}{Z_c} \text{Senh } \gamma \ell \end{aligned} \quad (2.17)$$

As equações (2.16) e (2.17) definem o comportamento físico das ondas de tensão e corrente no início e no fim da linha e podem ser aplicadas na resolução de problemas de diversas naturezas em sistemas de potência para linhas de qualquer comprimento.

A transformação das equações gerais de linha em um circuito equivalente (STEVENSON, 1976), resulta no sistema mostrado na Figura 2.3, a seguir:

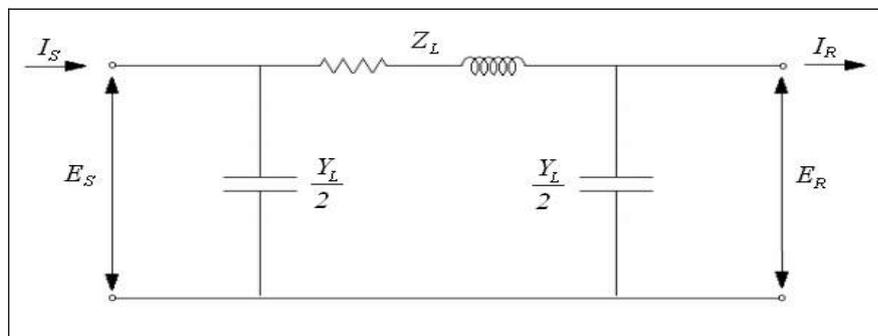


Figura 2.3– Circuito equivalente de uma linha de transmissão.

Sendo:

$$Z_L = R_L + jX_L = \ell(R + j\omega L) \frac{\text{Senh } \gamma \ell}{\gamma \ell} \quad (2.18)$$

$$Y_L = \ell(j\omega C) \frac{\text{Tgh } \frac{\gamma \ell}{2}}{\frac{\gamma \ell}{2}} \quad (2.19)$$

R – resistência distribuída de seqüência positiva

L – indutância distribuída de seqüência positiva

C – capacitância distribuída de seqüência positiva

Z_L – impedância série equivalente da linha

Y_L – admitância série equivalente da linha

O circuito apresentado na Figura 2.3 e as equações (2.18) e (2.19) representam com exatidão a linha de transmissão em regime permanente equilibrado e com frequência constante. As variáveis Z_L e Y_L correspondem aos parâmetros distribuídos da linha multiplicados pelo seu comprimento e pelos termos de correção hiperbólica, *Senh* e *Tgh*. Estes parâmetros são denotados como impedâncias e admitâncias nominais.

As linhas de comprimento pequeno e médio, abaixo de 100 km, não necessitam de correção hiperbólica. Já nas linhas de grande extensão, superiores a 100 km, os termos *Senh* e *Tgh* têm o efeito de reduzir a impedância série e aumentar a admitância paralela da linha de transmissão.

2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As equações apresentadas neste capítulo, de maneira simplificada, objetivam contextualizar os fenômenos das ondas trafegantes e o comportamento das linhas de transmissão em

regime permanente. Esta fundamentação teórica é básica para o desenvolvimento, mais adiante, dos modelos a serem utilizados na representação das linhas de transmissão em estudos de transitórios de abertura após rejeição de carga.

Capítulo 3

Sobretensões em Sistemas Elétricos

3.1 INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de potência quando submetidos a situações anormais de serviço dão origem a fenômenos transitórios. No âmbito das análises desses fenômenos é importante enfatizar que existe uma forte vinculação entre a topologia da rede elétrica simulada e a magnitude das sobretensões, sobrecorrentes e sobrefreqüências, dentre outros parâmetros, decorrentes de distúrbios. Observa-se ainda que a resposta do sistema em regime permanente e transitório, seja eletromecânico ou eletromagnético, está relacionada à área estudada e, geralmente, difere de um subsistema para o outro.

Os resultados quantificados nas análises efetuadas em uma área específica, determinam as características elétricas básicas para a especificação dos novos componentes da rede em expansão pertencentes a essa área.

Tendo em consideração estes aspectos, não é recomendável extrapolar requisitos obtidos nos estudos de uma parte física e específica do sistema para outro local da rede onde se pretende instalar um novo ponto de suprimento ou um reforço indicado pelos estudos de expansão, sob o risco de subestimar ou superestimar as características dos novos componentes deste empreendimento e eventualmente, pôr em risco a operação do sistema como um todo. Pode-se então inferir que estudos elétricos para especificação de equipamentos, associados a novos reforços ou

expansões do sistema, devem, de preferência, ser efetuados para a nova condição de rede, de modo a garantir margens de segurança e custos adequados para esses equipamentos.

Neste capítulo são apresentados, de forma breve, os principais tipos de fenômenos envolvendo transitórios eletromagnéticos de manobra, necessários para embasar os aspectos abordados nesta dissertação, com ênfase nas manobras de linhas em vazio.

3.2 SOBRETENSÕES: CONCEITUAÇÃO E TIPOS

Os componentes de sistemas elétricos de potência têm suas características funcionais normalmente dimensionadas para suportar as solicitações de tensão e corrente de regime permanente.

Esses componentes devem também estar adequados às sobretensões transitórias originadas, dentre outras, das seguintes condições de operação não permanentes:

- Descargas atmosféricas;
- Faltas trifásicas e bifásicas, aterradas ou não aterradas, e faltas monofásicas;
- Atuação de equipamentos de manobra, tais como disjuntores, seccionadores e chaves de aterramento;
- Conexão e desconexão de linhas, reatores em derivação, bancos de capacitores ou transformadores;
- Rejeição de carga.

Na definição das características elétricas e dielétricas destes dispositivos, os fenômenos são analisados para diversas topologias de rede com elevados níveis de degradação devidos a contingências de seus componentes principais.

Situações de recomposição, caracterizadas por baixas potências de curto-circuito e reduzidos fluxos de potência nas linhas, são também objeto de pesquisa. As análises nessas condições que constituem, regra geral, as mais severas, visam assegurar o bom desempenho do

equipamento em qualquer outra situação.

As simulações são efetuadas sob condições bastante estressantes para os equipamentos. Os parâmetros principais desses componentes, tais como curva de saturação dos transformadores e reatores, tensão nominal dos pára-raios e suas curva de tensão residual versus corrente associada, são representados para diferentes tipos de características de modo a avaliar a resposta do sistema quando ocorrem mudanças nesses parâmetros. Essas análises constituem um atributo valioso para apoiar a decisão de aceitação ou rejeição de um novo componente durante o processo aquisitivo, quando as suas características, ofertadas pelo fabricante, em geral apresentam diferenças em relação às especificadas.

Neste aspecto, as análises prospectivas do sistema devem ser suficientemente abrangentes e robustas para suportar, de forma segura, a decisão de aceitação do novo equipamento.

Para embasar esta dissertação nos capítulos subseqüentes, são definidos, tomando como base a norma ABNT (NBR 6939, 1999), os principais tipos de sobretensões prováveis de ocorrer em um sistema elétrico de potência:

3.2.1 Sobretensão

É qualquer tensão entre fase e terra, ou entre fases, cujo valor de crista excede o valor de crista deduzido da tensão máxima do equipamento, $U_m \sqrt{2} / \sqrt{3}$ ou $U_m \sqrt{2}$, respectivamente.

De acordo com a forma e a duração, tensões e sobretensões são divididas nas seguintes classes:

3.2.1.1 Tensão Contínua de Freqüência Fundamental

É a tensão de freqüência fundamental, considerada como tendo valor eficaz constante, continuamente aplicada a qualquer par de terminais de uma configuração de isolamento.

3.2.1.2 Sobretensão Temporária

É a sobretensão de frequência fundamental de duração relativamente longa. Esta sobretensão pode ser não amortecida ou fracamente amortecida. Em alguns casos sua frequência pode ser várias vezes menor ou maior do que a frequência fundamental.

3.2.1.4 Sobretensão Transitória

Sobretensão de curta duração, de alguns milissegundos ou menos, oscilatória ou não oscilatória e em geral fortemente amortecida, sendo classificada em:

- a) *Sobretensão de frente lenta*: Sobretensão transitória, usualmente unidirecional, com tempo até a crista tal que $20 \mu\text{s} < T_{cr} \leq 5000 \mu\text{s}$, e tempo até o meio valor, na cauda, $T_2 \leq 20 \text{ ms}$, originada por impulso de manobra.
- b) *Sobretensão de frente rápida*: Sobretensão transitória, usualmente unidirecional, com tempo até a crista tal que $0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$, e tempo até o meio valor, na cauda, $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$, originada por impulso atmosférico.
- c) *Sobretensão de frente muito rápida*: Sobretensão transitória, usualmente unidirecional, com tempo até a crista tal que $T_f \leq 0,1 \mu\text{s}$, duração total $T_t \leq 3 \text{ ms}$, e com oscilações superpostas de frequências $30 \text{ kHz} < f < 100 \text{ MHz}$, originada de operações de chaveamento de reatores e capacitores e outros equipamentos em subestações isoladas a gás.
- d) *Sobretensão combinada*: Temporária, frente lenta, frente rápida e frente muito rápida. Consiste de duas componentes de tensão simultaneamente aplicadas entre cada um dos terminais de fase de uma isolação fase-fase ou longitudinal e a terra. Normalmente esta sobretensão é classificada pela componente de maior valor de crista.

3.2.1.4 Sobretensões de Origem Externa

Devidas a causas externas ao sistema considerado, como, por exemplo, as descargas atmosféricas, agindo diretamente sobre os sistemas elétricos ou nas suas proximidades.

3.2.1.5 Sobretensões de Origem Interna

São originadas de variações rápidas na topologia da rede devidas a eventos dentro do sistema em consideração, tais como curto-circuito, rupturas dielétricas de isolamentos ou operações de chaveamento.

A figura 3.1 resume, de forma ilustrativa, a classificação das sobretensões apresentadas neste capítulo.

Classe	Baixa frequência		Transitório		
	Contínua	Temporária	Frente lenta	Frente rápida	Frente muito rápida
Forma da tensão					
Faixas de formas de tensão	$f = 50 \text{ Hz ou } 60 \text{ Hz}$ $T_t \geq 3600 \text{ s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $3600 \text{ s} \geq T_t \geq 0,03 \text{ s}$	$5000 \mu\text{s} \geq T_{cr} > 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$20 \mu\text{s} \geq T_1 > 0,1 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$100 \text{ ns} \geq T_t > 3 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$ $T_t \leq 3 \text{ ms}$
Forma normalizada da tensão	$f = 50 \text{ Hz ou } 60 \text{ Hz}$ T_t^*	$48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_t = 60 \text{ s}$	$T_{cr} = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2500 \mu\text{s}$	$T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	*
Ensaio normalizado de tensão suportável	*	Ensaio de frequência fundamental de curta duração	Ensaio de impulso de manobra	Ensaio de impulso atmosférico	*

*) A ser especificado pela norma do respectivo equipamento.

Figura 3.1 – Classificação das sobretensões

3.3 PRINCIPAIS TIPOS DE SOBRETENSÃO QUE ORIGINAM SOLICITAÇÕES DIELÉTRICAS EM DISJUNTORES

Considerando o disjuntor, de modo particular, as principais solicitações dielétricas que aparecem entre os seus contatos em condições anormais de serviço são apresentadas de forma bastante breve a seguir. Estes fenômenos dão origem a esforços dielétricos nos isolamentos destes componentes:

3.3.1 Tensão de Restabelecimento Transitória - TRT

Quando ocorre um curto-circuito no sistema, a corrente de defeito é sem dúvida a solicitação mais severa que pode ser imposta ao disjuntor. Um dos principais fatores associados à corrente de falta é a Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT) que aparece entre os contatos do disjuntor após a interrupção dessa corrente.

Durante o processo de interrupção, o arco perde rapidamente a condutividade à medida que a corrente se aproxima do zero. Em alguns microssegundos após o zero de corrente, essa cessa de fluir no circuito. A resposta do sistema a interrupção da corrente é que gera a Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT).

A TRT é a tensão que surge entre os terminais de um pólo do disjuntor, sendo caracterizada por um valor de pico (U_c) e uma taxa de crescimento da tensão (TCTRT) entre os seus terminais e a terra, durante a eliminação de uma falta trifásica aterrada ou não aterrada, bifásica aterrada ou não aterrada e finalmente devida a uma falta monofásica à terra. Essas faltas podem ser do tipo terminal, quando se verificam nos terminais do disjuntor ou quilométrica, quando ocorrem a uma distância em torno de um a cinco quilômetros do equipamento de manobra.

Dependendo da tensão nominal do sistema e de outras características da rede, pode-se ter, na prática, diferentes formas de onda de TRT que são determinadas através da representação por dois ou quatro parâmetros, conforme apresentado nas Figuras 3.2 e 3.3 a seguir:

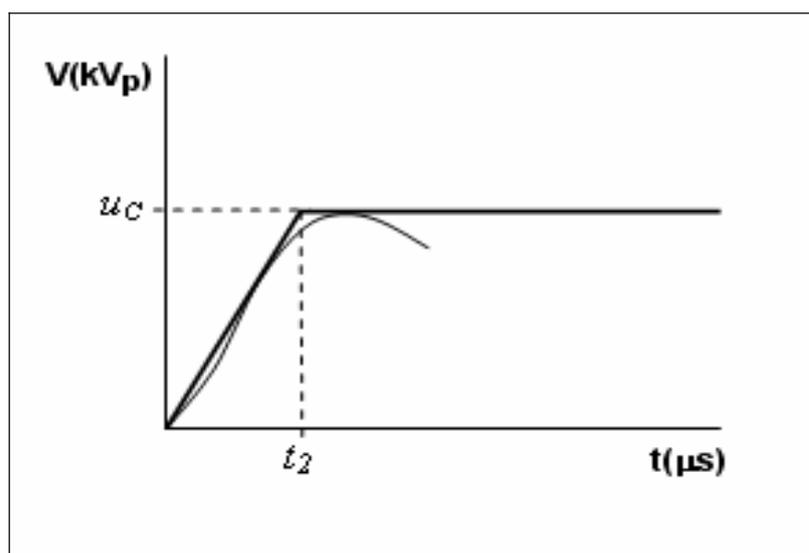


Figura 3.2 – Envoltória da TRT – Representação a dois parâmetros

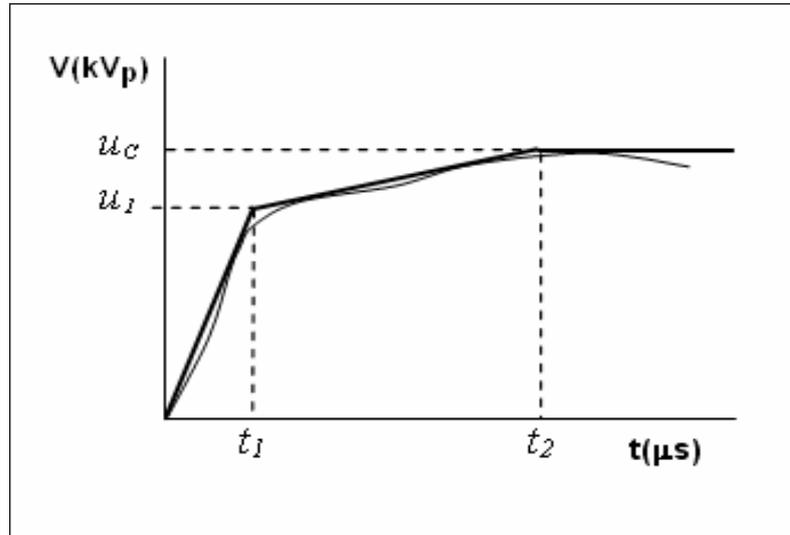


Figura 3.3 – Envoltória da TRT – Representação a quatro parâmetros

O valor da TRT é dependente da natureza do circuito que está sendo interrompido, se predominantemente resistivo, capacitivo ou indutivo, ou ainda uma combinação destes. É também dependente da impedância equivalente vista dos terminais do disjuntor, da topologia da rede, da potência de curto-circuito, do nível de tensão do sistema, da magnitude da corrente e da condição de defeito e finalmente da sua localização.

Neste item é efetuada uma descrição do fenômeno a que os disjuntores são submetidos quando solicitados a interromper correntes de curtos-circuitos e também são abordados de forma bastante breve processos práticos usados no cálculo da TRT.

3.3.1.1 Apresentação do Problema e Descrição do Fenômeno

Os disjuntores têm como principal função interromper correntes de falta, o que deve acontecer em um tempo suficientemente pequeno, de forma a limitar a um valor mínimo a probabilidade de ocorrência de danos aos equipamentos do sistema devidos ao defeito. Observa-se que quanto maior é a corrente de falta, mais severa é a solicitação a ele imposta.

Quando ocorre um curto-circuito em um sistema de potência, os disjuntores mais próximos à falta devem isolar o trecho defeituoso com rapidez, minimizando os seus efeitos sobre o resto do sistema.

Durante a interrupção da falta, tão logo é iniciada a separação mecânica dos contatos do disjuntor, a continuidade do circuito elétrico se processa através de um arco que se forma entre esses contatos, visto que a corrente não pode variar instantaneamente devido à conservação do fluxo magnético nas indutâncias do circuito.

Dependendo do tipo do disjuntor, existem diferentes processos de extinção desse arco que possibilitam um rápido aumento da suportabilidade dielétrica entre os contatos e evitam a reignição do mesmo. Como a corrente é alternada, o arco só é efetivamente extinto quando essa passa pelo zero.

Entretanto, durante esse processo, no período transitório anterior ao amortecimento das oscilações, aparece uma tensão entre os contatos do disjuntor que tende a restabelecer o arco, seja por reignição térmica ou por ruptura do dielétrico. Esta tensão é denominada de Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT).

Para garantir a interrupção do arco e evitar danos ao sistema, as suportabilidades térmica e dielétrica do disjuntor devem ser sempre superiores à TRT. Dessa forma, a capacidade de interrupção de um disjuntor deve ser determinada pela magnitude da corrente de falta e pela TRT através de seus contatos.

A operação de abertura é considerada bem sucedida se o disjuntor for capaz de suportar a TRT e a tensão de restabelecimento a frequência industrial.

A TRT é particularmente elevada após a abertura de faltas terminais e quilométricas, definidas a seguir:

Faltas terminais correspondem a defeitos trifásicos aterrados ou não, bifásicos aterrados ou não e monofásicos ocorridos nos terminais dos disjuntores das conexões dos transformadores, das linhas de transmissão, das linhas de distribuição ou verificados nos barramentos.

Faltas quilométricas são defeitos trifásicos aterrados ou não, bifásicos aterrados ou não e monofásicos que acontecem nas linhas de transmissão ou nos alimentadores a poucos quilômetros do disjuntor.

A magnitude do pico da onda inicial da TRT é determinada pela combinação de duas componentes, sendo uma delas de natureza transitória, de alta frequência, resultante da composição

dos modos de oscilação da rede, frequência natural, e a outra, de baixa frequência, que só depende das fontes e da topologia da rede, frequência industrial.

A componente de frequência natural decai exponencialmente devido às resistências do circuito, enquanto que, a componente de frequência industrial oscila à frequência das fontes de tensão do sistema.

Na análise do fenômeno de interrupção de um curto-circuito pelo disjuntor, dois parâmetros da TRT são considerados importantes:

i - O primeiro é medido em $\text{kV}/\mu\text{s}$ e diz respeito à taxa de crescimento da tensão de restabelecimento transitória (TCTRT). Nos instantes iniciais da separação dos contatos do disjuntor, quando estes ainda estão muito próximos um do outro e as temperaturas internas estão ainda bastante elevadas, é necessário que o resfriamento no interior da câmara de extinção seja mais rápido que o crescimento da TRT de modo a não permitir a ionização do meio de extinção, evitando a reignição térmica.

A TCTRT é função da corrente de curto-circuito que circula no pólo do disjuntor antes da interrupção e corresponde à variação da TRT no tempo.

ii - O segundo são os picos da onda da TRT, em kV, que não podem ser superiores à suportabilidade dielétrica do meio de extinção, para que não haja ruptura do dielétrico. Este parâmetro é considerado quando os contatos do disjuntor já estão mais afastados entre si e as temperaturas no interior da câmara já são menores, havendo, portanto, menores riscos de reignição térmica.

A magnitude da TRT depende de vários parâmetros do sistema, da sua topologia e da composição da carga. Durante os primeiros microssegundos após a interrupção de uma corrente de falta, a TRT é determinada essencialmente pelas características dos elementos situados a uma distância muito pequena do disjuntor, fazendo com que o arranjo da subestação assumam uma importância fundamental na sua determinação.

A falta terminal é mais severa para o valor de pico da TRT, enquanto que a falta quilométrica é mais severa para o valor da taxa de crescimento da TRT.

Dessa forma, levando-se em consideração a TCTRT e o valor de pico da TRT, a solicitação na câmara de extinção do disjuntor pode ser dividida em duas regiões de interesse para análise. São elas:

1 - A região até 100 μs , de grande importância para o fenômeno, pois nesse período a TCTRT é mais elevada, devendo ser estudada em detalhes de modo a se ter um disjuntor com capacidade de resfriamento suficiente para compensar a elevação da temperatura e assim evitar a ionização do meio de extinção com a conseqüente reignição do arco.

2 - A região entre 100 μs e 1000 μs onde se verifica o valor de pico da TRT. Neste intervalo as ondas da TRT refletidas após encontrarem o primeiro ponto de descontinuidade, retornam ao disjuntor, produzindo um acréscimo na TRT, podendo ultrapassar os valores para os quais o disjuntor foi projetado, causando a superação da suportabilidade dielétrica do meio de extinção, com a conseqüente ruptura do dielétrico. As reflexões da onda de tensão determinam a extensão dessa segunda região a partir das características do sistema e da distância até os pontos de descontinuidade.

Existe uma grande variedade de formas de onda de TRT possíveis de ocorrer. Para as que possuem mais de um pico, como a apresentada na Figura 3.3, são considerados como mais importantes o primeiro pico e o pico máximo.

Já a TCTRT pode ser definida de quatro maneiras diferentes conforme apresentado na Figura 3.4 a seguir, através das retas i, ii, iii e iv detalhadas abaixo (FLURSCHEIM, 1975):

- i - Taxa média de crescimento de zero ao pico máximo da TRT.
- ii - Taxa média de crescimento de zero ao primeiro pico da TRT.
- iii - Máxima taxa média de crescimento, expressa como a tangente à curva da TRT que passa pela origem.
- iv - Máximo valor instantâneo da TCTRT.

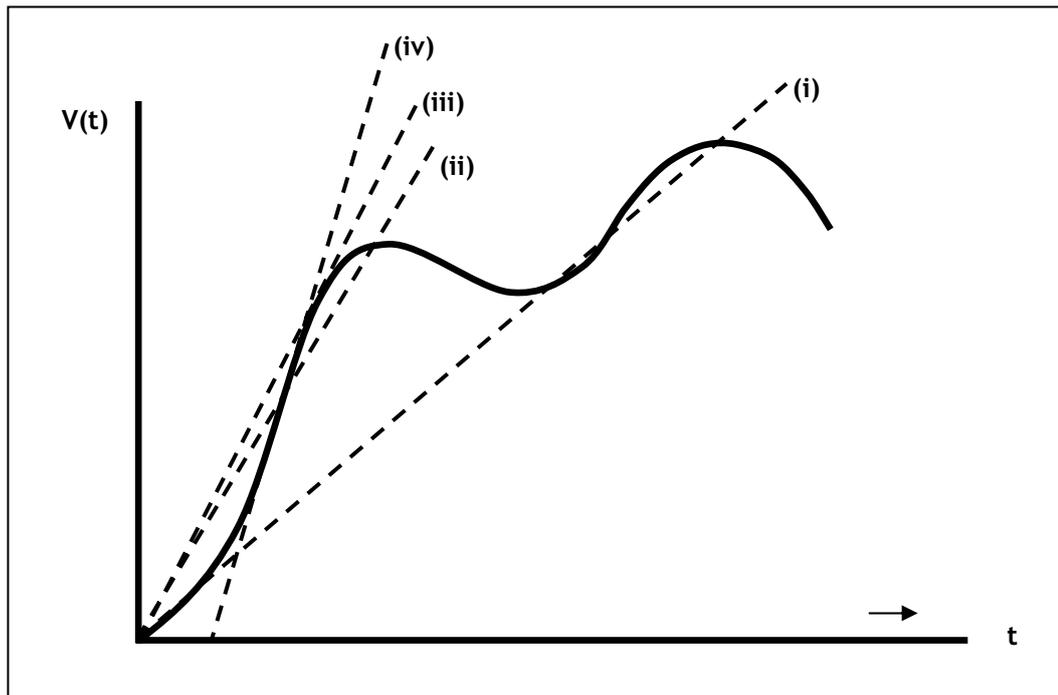


Figura 3.4 – Forma de onda típica de TRT e diferentes taxas de crescimento da tensão

Segundo (FLURSCHEIM, 1975), para selecionar a definição de TCTRT a ser adotada, deve-se levar em consideração o tipo do disjuntor objeto de análise. Para disjuntores a óleo, as definições i e ii são mais apropriadas, enquanto que para disjuntores a ar comprimido e a SF_6 é recomendável considerar as definições iii e iv, respectivamente.

3.3.1.2 Cálculo da TRT

O cálculo da TRT, por se tratar de um fenômeno transitório, requer a resolução de equações diferenciais mediante processos de integração numérica.

O valor da TRT determinado para uma situação particular de falta e de seqüência de abertura dos pólos, depende de que elementos da rede elétrica são considerados nos cálculos, do modelo adotado para a representação desses elementos e do método de avaliação empregado. (D'Ajuz, 1987) e (GTE/SCEE/CCON, 1991) apresentam exemplos de cálculo da TRT para diversas situações, indicando o tratamento matemático a ser dado em cada caso.

A equação clássica para a determinação da TRT, derivada de um circuito RLC, é apresentada a seguir:

$$\frac{d^2U_c}{dt^2} + \frac{R}{C} \cdot \frac{dU_c}{dt} + \frac{U_c}{L \cdot C} = \frac{U_m}{L \cdot C} \quad (3.1)$$

Cuja solução indica que a TRT deverá ser calculada pela expressão:

$$U_c(t) = U_m \cdot \left[\cos(\omega \cdot t) - e^{-\frac{R}{2L}t} \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) \right] \quad (3.2)$$

No caso do circuito monofásico simplificado apresentado a seguir, onde são desprezadas as resistências e outras formas de perdas, a corrente de curto-circuito é considerada simétrica e totalmente reativa, sendo limitada apenas pela indutância do circuito. Observa-se que o tempo de duração do fenômeno é contado a partir do instante da passagem da corrente de falta pelo zero, quando ocorre a sua interrupção. Considera-se que a fonte de tensão está em seu valor de pico, sendo expressa por $U_m \cdot \cos(\omega \cdot t)$.

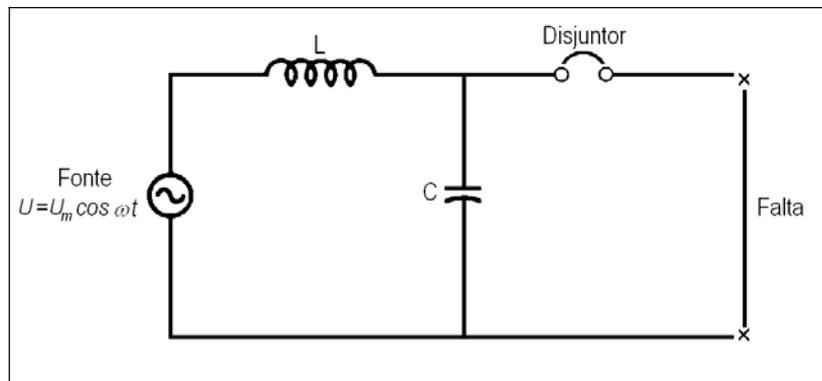


Figura 3.5 – Circuito LC para cálculo simplificado da TRT durante eliminação de falta.

Para este caso, onde são desprezadas todas as formas de perdas ($R=0$), as expressões de cálculo da TRT podem ser escritas da seguinte forma:

$$\frac{d^2U_c}{dt^2} + \frac{U_c}{L \cdot C} = \frac{U_m}{L \cdot C} \quad (3.3)$$

Cuja solução é dada por:

$$U_c(t) = U_m \cdot [\cos(\omega \cdot t) - \cos(\omega_0 \cdot t)] \quad (3.4)$$

Nota-se que a equação para determinação da curva da TRT entre os contatos do disjuntor na forma simplificada corresponde a um sistema representado por um número reduzido de elementos, ao passo que na forma de onda completa corresponde a um sistema representado com maior nível de precisão.

O detalhamento da representação do sistema, mediante introdução de maior número de elementos, faz com que ocorram amortecimentos na onda de tensão. Com este refinamento os valores da TRT obtidos são mais exatos. Já as modelagens simplificadas desprezam os amortecimentos e as perdas, obtendo, por conseguinte, resultados conservativos para as solicitações.

3.3.1.3 Severidade das Sobretensões

Os disjuntores devem ser capazes de suportar as tensões de restabelecimento transitórias mais severas que podem ocorrer e solicitar estes equipamentos durante a sua operação. Como mencionado anteriormente, os parâmetros que definem a severidade da tensão de restabelecimento transitória são sua taxa de crescimento (TCTRT) e seu pico máximo (U_c).

Sabe-se que os parâmetros do sistema têm uma influência decisiva na TRT. Um aumento da indutância do sistema contribui para elevar o valor de pico da TRT ao passo que um acréscimo na capacitância resulta em uma diminuição na TCTRT.

Todavia, em virtude do inter-relacionamento que normalmente existe entre os valores de L e C, pode haver ocasiões em que estes fatos não ocorrem de forma tão bem definida.

Os principais fatores indicativos de uma condição de operação menos favorável para o disjuntor do ponto de vista das tensões de restabelecimento transitórias são os seguintes:

- i - Potência de curto-circuito elevada no ponto da falta

Durante uma falta no sistema, o primeiro pico da TRT ocorre em um tempo aproximadamente igual a metade do período da componente de frequência natural ($\omega_0=2\pi f_n$) da tensão da rede, conforme pode ser observado na figura a seguir.

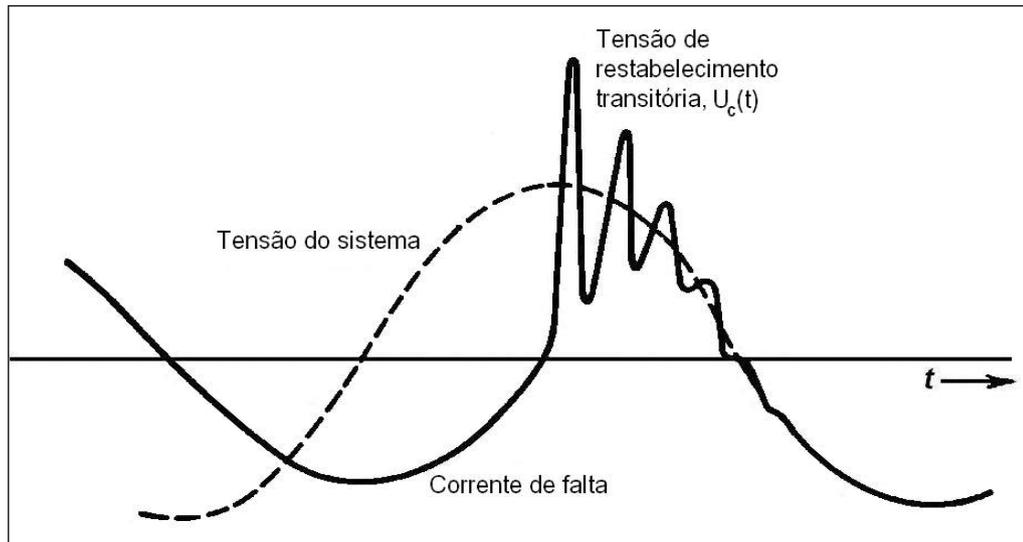


Figura 3.6 – Forma de onda da TRT durante eliminação de falta.

Logo, quanto maior for a frequência natural mais rápido é o crescimento da tensão a partir do seu valor inicial (zero, considerando desprezível a tensão de arco) até atingir o valor de pico. Assim sendo, a frequência natural é proporcional à TCTRT.

Como $\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_n = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$, tem-se que a frequência natural e, conseqüentemente, a

TCTRT são bastante elevadas para valores pequenos de L, de C, ou de ambos.

Sendo L a impedância total limitadora do curto-circuito para o ponto da falta, menores valores de L estão associados a maiores potências de curto-circuito, condição em que as taxas de crescimento da TRT são mais elevadas.

ii - Ausência de outras linhas na barra, além daquela em que ocorre a falta

O efeito de linhas adicionais conectadas à barra onde o disjuntor está sendo manobrado é a atenuação da TCTRT, pois estas linhas diminuem as componentes de onda refletidas que se somam com a TRT inicial, tendo em vista o efeito resistivo da impedância de surto.

iii - Falta nos terminais do disjuntor sem a presença da linha associada ao mesmo

O efeito da linha em falta na onda incidente da TRT é provocar uma redução na sua taxa de crescimento. Sendo assim, não considerar esse efeito nos estudos leva à obtenção de resultados

conservativos, uma vez que não são contabilizados os efeitos resistivos inerentes à linha de transmissão.

iv - Ausência de bancos de capacitores na barra onde está o disjuntor

Todo circuito elétrico apresenta um valor de capacitância natural C que sempre deve ser considerado nas avaliações de TRT, visto que provoca uma atenuação na TCTRT, conforme mostrado antes, pois um aumento no valor de C , ocasiona uma diminuição na frequência natural.

No caso de existirem bancos de capacitores em derivação na barra onde o disjuntor está sendo manobrado, o valor de C a ser considerado é bem maior que o somatório da capacitância natural do circuito e das capacitâncias parasitas dos barramentos e equipamentos da subestação, provocando um efeito muito mais acentuado sobre a onda incidente da TRT, assegurando valores bem mais reduzidos na TCTRT, devido à diminuição no valor de ω_0 . Entretanto, esta capacitância pode provocar um aumento da tensão U_c .

Com isso, pode-se concluir que a ausência de bancos de capacitores em derivação na barra do disjuntor em análise pode provocar condições menos favoráveis à atenuação da TCTRT.

3.3.1.4 Alternativas para Redução das Solicitações de TRT (U_c e TCTRT)

Conforme apresentado nos itens anteriores, as sobretensões decorrentes de eliminação de faltas em sistemas elétricos de potência através de disjuntores não podem ser evitadas, assim como sua total supressão é algo improvável. Entretanto, valores de picos máximos e taxas de crescimento podem ser limitados a valores compatíveis com a suportabilidade dielétrica desses disjuntores. A seguir apresenta-se, de forma bastante breve, alguns métodos comumente usados para atingir este objetivo:

i - Redução do Pico da Tensão de Restabelecimento Transitória – U_c

Em disjuntores de alta e extra-alta tensão é possível utilizar resistores de pré-inserção na abertura de faltas para reduzir os efeitos da TRT. Os resistores são instalados em câmaras auxiliares, em paralelo com as câmaras principais do disjuntor. Em dispositivos equipados com esse componente, quando da interrupção de um defeito, o primeiro contato a abrir é o principal que

insere no circuito o resistor através do contato auxiliar ainda fechado. Após alguns milissegundos, esse contato abre o circuito de forma definitiva, interrompendo o defeito. O resistor é bastante efetivo para reduzir a sobretensão a valores inferiores à suportabilidade do disjuntor, bem como diminuir a sua taxa de crescimento. Essa solução não é aplicável em média e baixa tensão em função do seu elevado custo quando comparado com o custo do disjuntor.

Outro meio empregado para mitigar a sobretensão é limitar a operação do disjuntor a topologias favoráveis ao equipamento. Isto pode ser feito mediante restrição da operação do disjuntor apenas a condições em que estejam presentes agentes amortecedores de sobretensão, tais como alimentadores com um determinado nível de carga, ou redutores da potência de curto-circuito tais como desligamento seqüencial, que consiste, por exemplo, em desconectar uma das unidades transformadoras existentes, antes da manobra do disjuntor da linha ou do alimentador sob falta, para reduzir a solicitação térmica nesse disjuntor. Quando essas medidas não são suficientes para adequar o disjuntor à solicitação de tensão, pode ser então efetuado o bloqueio da sua abertura ou fechamento, com a transferência do disparo (trip) para um disjuntor com maior capacidade de interrupção, em série com esse equipamento, como é o caso do disjuntor do lado de alta do transformador que alimenta o barramento de média ou de baixa tensão.

ii - Redução da Taxa de Crescimento da Tensão de Restabelecimento Transitória

A redução da Taxa de Crescimento da Tensão de Restabelecimento Transitória, TCTRT, é um processo relativamente simples e de baixo custo. Uma das formas bastante utilizada em sistemas de baixa tensão, por exemplo, 13,8 kV, é a instalação de células capacitivas de pequeno valor, da ordem de nanofarad, de cada fase para a terra, entre o barramento e o disjuntor que está sendo manobrado. Estes componentes têm a propriedade de reduzir a frequência de oscilação da tensão nos instantes iniciais da interrupção, minimizando assim a TCTRT. A experiência do setor elétrico na redução desta taxa em disjuntores de baixa tensão consiste no uso de células da ordem de 150 nF em disjuntores de 15 kV. Quando não se dispõe desses capacitores de surto, pode-se utilizar, provisoriamente, células capacitivas de bancos de capacitores de 13,8kV, normalmente da ordem de 50 kVAr, disponíveis em grandes quantidades no sistema.

iii - Outras formas de solução do problema

Não sendo possível a redução dos valores das solicitações de TRT por processos economicamente viáveis, resta a solução trivial de substituição desses disjuntores por outros de

tensão nominal superior ou de mesma tensão, porém com características dielétricas especiais compatíveis com o fenômeno ou ainda disjuntores de mesma tensão, porém com maior número de câmaras de extinção.

Algumas vezes, uma representação mais detalhada das instalações e dos equipamentos, por exemplo, tendo em consideração as capacitâncias parasitas dos barramentos e demais componentes da subestação, bem como as resistências dos transformadores e, quando possível, do próprio arco elétrico, é suficiente para se obter valores de sobretensões menores e adequados à suportabilidade dos equipamentos de manobra, sem a necessidade de proceder a sua substituição.

3.3.1.5 Normas e Procedimentos para Avaliação Simplificada de Solicitações de TRT

A avaliação preliminar de solicitações de TRT nos disjuntores pode ser efetuada mediante normas ABNT, IEC e ANSI, atendendo à seqüência de procedimentos explicitada nas mesmas. Como produto final, obtém-se uma envoltória da TRT definida pela sua taxa de crescimento e pelo seu valor máximo, de modo a compará-las com a suportabilidade do disjuntor.

Estas normas definem valores de TRT para determinados percentuais da capacidade de interrupção simétrica dos disjuntores (10%, 30%, 60% e 100%). Como na maioria dos casos estudados os valores das correntes de curto-circuito que ocorrem no sistema diferem dos valores normalizados, deve-se fazer interpolações lineares a partir dos valores fornecidos pela norma para as diversas classes de tensão dos disjuntores de modo a se obter as características correspondentes às correntes verificadas.

i - Procedimento para uma verificação inicial

Uma primeira verificação das condições de TRT deve estar de acordo com as seguintes diretrizes para a correta definição da adequacidade dos disjuntores, conforme normas (ANSI C37.0721, 1971) e (ANSI C37.0722, 1971).

i.1 – Determinar a Taxa de Crescimento da Tensão (TCTRT) mediante quantificação do seu valor máximo com a retirada das linhas conectadas ao barramento, uma de cada vez, calculando os valores da corrente de curto-circuito simétrica (I) e da impedância de surto equivalente das linhas (Z_e), para cada condição. Se a TCTRT for excedida, o disjuntor é considerado inadequado.

$$TCTRT = 1,5 \cdot \sqrt{2} \cdot \omega \cdot I \cdot Ze \cdot 10^{-6} \text{ (kV / } \mu\text{s)} \quad (3.5)$$

i.2 - Calcular T_2 , tempo de crista da TRT, considerando apenas a primeira reflexão da linha de menor comprimento M (km), ligada ao barramento com terminação em aberto ou com um transformador terminal.

$$T_2 = M \cdot 6,67 (\mu\text{s}) \quad (3.6)$$

i.3 - Calcular E_2 , valor de pico da curva da TRT, considerando a primeira reflexão e desprezando a influência da indutância efetiva do barramento (L_B), no cálculo dos coeficientes de reflexão.

$$E_2 = 1,5 \cdot \sqrt{2} \cdot \omega \cdot L_B \cdot \left(\frac{1 + 2 \cdot Z_B}{Z_B + Z} \right) \quad (3.7)$$

Onde:

Z_B – Paralelo das impedâncias de surto das linhas ligadas ao barramento, com exceção da linha de menor comprimento.

Z - Impedância de surto da linha.

Dependendo dos valores de E_2 e T_2 obtidos, pode-se considerar o disjuntor adequado ou inadequado, mediante utilização dos valores normalizados das tabelas da norma (ANSI C37.0722, 1971), revisão de 1976, como referência, isto é:

a) Se $E_2 < E_2$ (norma) e $T_2 > T_2$ (norma), o disjuntor é considerado adequado.

b) Se $E_2 < E_2$ (norma) e $T_2 < T_2$ (norma) torna-se necessário executar o procedimento ii, apresentado a seguir, que fornece as diretrizes para cálculos mais detalhados e informações sobre as condições de TRT do sistema.

c) Se $E_2 > E_2$ (norma) o disjuntor não é considerado adequado, fazendo-se necessário seguir o procedimento ii, se desejado um método mais preciso.

ii - Segunda verificação – Procedimento para cálculo mais preciso das condições de TRT nos disjuntores (Norma ANSI)

Deve ser usado o seguinte procedimento:

ii.1 - Considerar o valor já calculado da TCTRT.

ii.2 - Determinar a exponencial que representa a tensão de restabelecimento antes do retorno da primeira onda refletida, de acordo com a expressão:

$$e(t) = 1,5 \cdot \sqrt{2} \cdot I \cdot \omega \cdot L_B \left[1 - e^{\frac{-Z}{(n+1) \cdot L_B} t} \right] \quad (3.8)$$

Onde:

$\frac{Z}{n+1} = Z_e$ - Impedância de surto equivalente, considerando todas as linhas ligadas ao barramento.

n - número de linhas

ii.3 - Determinar o tempo t_k necessário para a chegada da primeira onda refletida pela extremidade da menor linha aberta de comprimento M, ligada ao barramento.

$$t_k = M \cdot 6,67 (\mu s) \quad (3.9)$$

ii.4 - Determinar a exponencial que representa a primeira onda refletida pela extremidade da menor linha aberta, ligada ao barramento.

$$E_r = 1,5 \cdot \sqrt{2} \cdot M \cdot I \cdot L_B \cdot \frac{2 \cdot Z_b}{Z_b + Z} \left[1 - e^{\frac{-Z}{(n+1) \cdot L_B} t} \right] \quad (3.10)$$

Ou seja,

$$E_r = e(t) \cdot \frac{2 \cdot Z_b}{Z_b + Z} = K_t \cdot e(t) \quad (3.11)$$

Onde: $K_t = \frac{2 \cdot Z_b}{Z_b + Z}$ representa o coeficiente de refração na barra local.

Deve-se lembrar que o coeficiente de reflexão é considerado unitário, pois a linha está aberta na sua extremidade.

ii.5 - Fazer a composição da exponencial dada pela expressão $e(t)$ com a exponencial dada pela expressão E_r , deslocando esta última de um tempo t_k em relação à origem, de forma que:

Para $t \leq t_K$,

A curva é dada por: $e'(t) = e(t)$

Para $t > t_K$,

A curva é dada por:

$$e'(t) = e(t) \cdot \left[1 + \frac{2 \cdot Z_b}{Z_b + Z} \right] \quad (3.12)$$

A curva resultante $e'(t)$, é a envoltória calculada da TRT, considerando-se a primeira reflexão da menor linha aberta na extremidade e desprezando-se a indutância da fonte local.

ii.6 - Comparar a curva obtida $e'(t)$, com a envoltória definida para o disjuntor. Se essa curva situar-se dentro da envoltória normalizada, o disjuntor é considerado adequado, caso contrário, efetuar os seguintes procedimentos adicionais:

a) Determinar a exponencial que representa a primeira onda refletida pela extremidade da linha de menor comprimento, aberta e ligada ao barramento, através da expressão seguinte, que considera a influência da indutância efetiva da fonte.

$$E_r = 1,5 \cdot \sqrt{2} \cdot \omega \cdot I \cdot \frac{2 \cdot Z}{(n+1)^2} \cdot t \cdot \left[e^{\frac{-Z}{(n+1) \cdot L_B} \cdot t} \right] \quad (3.13)$$

b) Fazer a composição da exponencial dada pela expressão $e(t)$ com a exponencial E_r , deslocando esta última de um tempo t_k em relação à origem, onde se obtém:

Para $t \leq t_K$,

A curva é dada por: $e''(t) = e(t)$

Para $t > t_K$,

A curva é dada por:

$$e''(t) = e(t) + E_r \quad (3.14)$$

A curva resultante $e''(t)$ é a envoltória calculada da TRT, considerando-se a primeira reflexão da menor linha aberta na extremidade e também a influência da indutância da fonte local.

c) Comparar a curva obtida $e''(t)$ com a envoltória normalizada para o disjuntor. Se a curva se situar dentro da envoltória ANSI para o disjuntor, este é considerado adequado, caso contrário, efetuar verificação da possibilidade de realizar o cálculo com refinamentos adicionais, tais como: considerar a verdadeira terminação das linhas, por exemplo, por meio de indutância, representar as capacitâncias parasitas dos barramentos e dos equipamentos a eles ligados. A Norma (ANSI C 37.0721, 1971) estabelece que se o disjuntor não atender às condições verificadas através dos procedimentos já descritos, este deverá ser substituído ou o circuito modificado.

3.3.2 Abertura em Discordância de Fases

A manobra de abertura de disjuntores em condições de discordância de fases entre duas estações geradoras ou dois subsistemas interligados normalmente ocorre em situações anormais de operação destes subsistemas como, por exemplo, oscilação de potência ou mesmo perda de sincronismo entre os mesmos.

A condição de abertura em discordância de fases tem origem na abertura do último circuito de interligação, na presença de grandes distúrbios provocados por faltas ou perda súbita de carga ou geração, entre outros. Também pode ocorrer mesmo na permanência de um ou mais elos fracos.

Essa manobra é sempre comandada pela proteção, sensibilizada pela corrente de sincronização que circula pelos elos existentes, cujo valor é da ordem de grandeza das correntes de curto-circuito.

De acordo com (D'AJUZ, 1985), nos sistemas de neutro aterrado e de neutro isolado, a condição mais severa para este tipo de manobra está relacionada a uma abertura com defasagem de

180° entre as tensões em cada lado do disjuntor. Nesta situação, a componente de frequência industrial da tensão é da ordem do dobro do valor de pico da tensão fase-terra nos sistemas de neutro solidamente aterrado e o triplo nos sistemas de neutro isolado.

A Tensão de Restabelecimento Transitória entre os contatos do disjuntor é determinada pelas oscilações de tensão em cada lado do disjuntor, que estão associadas, nesta situação, a diferentes subsistemas, com potência de curto-circuito e características topológicas distintas.

3.3.2.1 Metodologia e Critérios de Análise

O procedimento de análise comumente utilizado pelo Setor Elétrico Brasileiro para abertura de subsistemas em discordância de fases, consiste em considerar apenas a condição onde se verifica 180° de defasagem no ângulo da tensão entre os contatos do disjuntor. Esta forma de análise pode constituir-se em uma metodologia bastante conservadora. Eventualmente, dependendo das solicitações de tensão de restabelecimento resultantes, os requisitos obtidos podem demandar um custo adicional para os disjuntores, em virtude da necessidade de um maior número de câmaras em série para que o equipamento de manobra suporte a elevada solicitação conseqüente.

Observa-se que na maioria dos sistemas a ocorrência de uma oscilação de potência, com um perfil de tensão mantido próximo ao nominal, em torno de 1,0 p.u. em cada lado do disjuntor, associado a uma defasagem de 180° no ângulo da tensão, pode ser considerada remota. Para acontecer uma situação como esta, com a manutenção do perfil de tensão anterior ao distúrbio, há necessidade de duas ou mais fontes geradoras, eletricamente próximas, com forte interação entre as mesmas na presença de um distúrbio com uma oscilação de potência e simultaneamente mantendo a tensão constante.

Na realidade, quando ocorrem oscilações de potência entre áreas, com possibilidade de causar uma defasagem de 180° nos fasores de tensão de subestações vizinhas, este evento é originado por uma interação entre usinas localizadas em regiões distintas, como, por exemplo, nas regiões Norte e Nordeste, e normalmente é seguido de um colapso de tensão ao longo do sistema de transmissão, em função da ausência de fontes que proporcionem suporte de reativos necessário ao controle da tensão e devido, inclusive, ao elevado comprimento das interligações entre áreas.

O comportamento da rede nessas circunstâncias pode ser avaliado por meio de um estudo preliminar de estabilidade eletromecânica que considere na sua metodologia as características do sistema de transmissão como um todo, com uma grande abrangência. Os resultados dessas análises agregam subsídios importantes para simulação do fenômeno e para a especificação de disjuntores quanto a este requisito de forma mais realista.

Na ausência de um estudo de estabilidade dinâmica, pode-se optar por efetuar uma análise considerando a tensão invariante (1,0 p.u.), com parametrização da defasagem angular visando, sobretudo, fornecer opções para definição das características do disjuntor. A parametrização tem por objetivo determinar:

a) O limite máximo de defasagem para o atendimento aos requisitos de tensão e corrente existentes nas normas técnicas de disjuntores e fornecimento de subsídios para a eventual definição de um esquema de proteção e ao estudo de estabilidade dinâmica;

b) As solicitações máximas a serem especificadas e que o disjuntor deve suportar durante uma abertura em oposição de fases.

Finalizada a análise, deve-se efetuar uma avaliação dos resultados, considerando as conclusões obtidas no estudo de estabilidade eletromecânica de modo a balizar a parametrização realizada e ajudar no processo de escolha do ângulo de defasagem mais conveniente para o envio do comando de abertura do disjuntor pela proteção.

A norma ABNT (NBR 7118, 1994), estabelece os seguintes requisitos quanto ao valor da capacidade de interrupção e a TRT do disjuntor para a manobra de abertura em discordância de fases:

i – Capacidade de interrupção nominal de corrente

Para este parâmetro a norma estabelece um valor igual a 25% do valor eficaz da capacidade de interrupção nominal em curto-circuito.

ii - TRT

As características de Tensão de Restabelecimento Transitória durante a abertura em discordância de fases devem ser obtidas a partir de simulações, quando esse tipo de operação for previsto para o sistema. A TRT é caracterizada, para fins de ensaio e especificação, por envoltórias

a dois e quatro parâmetros como ocorre com as envoltórias de TRT definidas para ensaios de curto circuito e já suficientemente detalhadas no item 3.3.1. As envoltórias prescritas em norma a dois e quatro parâmetros para TRT de abertura em discordância de fase são apresentadas na tabela a seguir:

Tabela 3.1: Envoltórias de TRT para abertura em discordância de fase

<i>Características a dois parâmetros – Sistemas não solidamente aterrados até 72,5 kV</i>				
Valor de crista da TRT - U_c		Tempo - t_3	Taxa de crescimento - s	
(kV)		(μ s)	(kV/ μ s)	
$1,25.2,5. \sqrt{2}/\sqrt{3} .U_n$		U_c/s	0,12 a 0,55	
<i>Características a quatro parâmetros – Sistemas com tensão igual ou superior a 100 kV</i>				
1ª Tensão de referência - u_1	Tempo t_1	Valor de crista da TRT U_c	Tempo t_2	Taxa de crescimento s
(kV)	(μ s)	(kV)	(μ s)	(kV/ μ s)
$2,0. \sqrt{2}/\sqrt{3} .U_n$	u_1/s	$1,25u_1$	$3t_1$	1,54 (1)
$2,5. \sqrt{2}/\sqrt{3} .U_n$	u_1/s	$1,25u_1$	$3t_1$	1,67 (2)

(1) Sistemas solidamente aterrados com tensão nominal U_n igual ou superior a 100 kV.

(2) Sistemas não solidamente aterrados com tensão nominal U_n entre 100 kV e 170 kV.

3.3.3 Abertura de Linha em Vazio

A abertura de linha em vazio ocorre durante o acionamento do segundo disjuntor de um determinado trecho de linha, estando o primeiro já aberto, quando se torna necessário separar parte de um sistema do seu restante seja para efetuar uma determinada intervenção ou para isolar uma falta ocorrida. Nesta situação o disjuntor é comandado a interromper uma corrente a princípio de natureza capacitiva. No item 3.3.1 é dito que mesmo tendo os seus contatos se separado mecanicamente, uma corrente de magnitude variada continua a fluir através do arco que se

estabelece entre esses contatos e só é interrompida na sua passagem pelo zero, instante em que o arco se extingue.

Após a extinção do arco, o meio físico da câmara inicia progressivamente a sua recuperação dielétrica. Neste mesmo instante surge entre os contatos uma tensão de restabelecimento imposta pelo sistema, conforme mostrado na Figura 3.6. A rapidez de recuperação da suportabilidade dielétrica da câmara é função do tipo do disjuntor utilizado na manobra e também da amplitude da corrente nos instantes precedentes e no momento da extinção do arco.

Ainda no item 3.3.1 mostra-se que a tensão entre os contatos imediatamente após a interrupção do arco é uma função dos parâmetros do sistema. Observa-se que durante a interrupção do arco fica caracterizada uma corrida entre a taxa de crescimento da tensão imposta pelo sistema e a taxa de recuperação da rigidez dielétrica do meio extintor. Quando a tensão de restabelecimento é superior à rigidez dielétrica desse meio, ocorre o reacendimento do arco e o restabelecimento da corrente. Nesta situação a interrupção é dita mal sucedida. Portanto, o sucesso da interrupção do arco depende de qual das duas grandezas cresce mais rapidamente. Deve ser assegurado através de avaliações sistêmicas, cujos resultados são incorporados nas especificações técnicas dos disjuntores, que a recuperação da rigidez dielétrica da câmara se verifique sempre em taxas superiores a do crescimento da tensão de restabelecimento entre os contatos do disjuntor.

A curva de tensão suportável pelo disjuntor em função do tempo e da distância entre os contatos representa a sua característica de suportabilidade dielétrica, sendo dependente do tipo da câmara, do meio de extinção do arco e da velocidade de separação dos contatos.

3.3.3.1 A Rigidez Dielétrica Interna da Câmara na Abertura dos Disjuntores

A característica dielétrica de abertura condiciona a ocorrência de reignições e de reacendimentos após a interrupção de uma corrente pelo disjuntor (DUPONT, 1997). O surgimento de reignições não representa necessariamente maiores problemas ao nível das sobretensões geradas. Já os reacendimentos devem, entretanto, ser evitados devido aos seus efeitos danosos sobre os isolamentos dos equipamentos associados à instalação.

Para um melhor entendimento da suportabilidade dielétrica na abertura do disjuntor são relacionados a seguir alguns termos essenciais para facilitar a compreensão do assunto, extraídos

das normas (IEC 62271-100, 2001) e ABNT (NBR 7118, 1994):

- *Característica quente de um disjuntor* – corresponde à curva de suportabilidade que se estabelece imediatamente após a interrupção de uma corrente de amplitude elevada, basicamente a corrente de curto-circuito, quando ainda estão presentes os efeitos térmicos de uma interrupção anterior.

- *Característica fria de um disjuntor* – corresponde à curva de suportabilidade que se estabelece imediatamente após a interrupção de uma corrente de amplitude zero, que nos disjuntores a SF₆ corresponde à corrente de carga, e não se fazem presentes os efeitos térmicos de uma interrupção anterior.

- *Reignição* – é definida como o restabelecimento da corrente através do disjuntor, decorrido no máximo um intervalo de tempo igual a $T/4$ do instante de interrupção da corrente, sendo T o período da frequência industrial.

- *Reacendimento* – aplica-se ao restabelecimento da corrente após um intervalo de tempo superior a $T/4$, contado a partir da interrupção.

Visto sob o aspecto físico, pode-se dizer que a *reignição* está normalmente associada à fase térmica e o *reacendimento* à fase dielétrica.

- *Tempo mínimo de arco* – considerando a interrupção final da corrente, o tempo mínimo de arco é o menor tempo em que o disjuntor é capaz de interromper a corrente em uma determinada condição de manobra sem que venha a ocorrer reignição térmica ou dielétrica entre os seus contatos mediante restabelecimento do arco.

O restabelecimento do arco é um fenômeno que deve ser submetido a um tratamento estatístico em vista da complexidade e dificuldade de representação determinística das variáveis envolvidas, principalmente quando se trata de interrupção de correntes de pequena amplitude em relação à sua capacidade de interrupção nominal, como é o caso de correntes capacitivas (CARVALHO, 1987).

No momento em que a corrente se extingue e a tensão de restabelecimento surge entre os contatos, o meio entre esses se encontra ainda aquecido e a recuperação dielétrica ainda está em curso. Em função destes aspectos a suportabilidade dielétrica tende a ser tão menor quanto maior

for a corrente interrompida. Segundo (CARVALHO, 1987), dependendo do tipo do disjuntor e da faixa de corrente, essa tendência pode não se verificar.

Observa-se também, mediante ensaios, em laboratório, de diferentes disjuntores, com distintos meios de interrupção de corrente, que para cada característica de suportabilidade dielétrica existe uma probabilidade de restabelecimento do arco associada. A figura 3.7, (CARVALHO, 1987) mostra exemplos de características dielétricas obtidos para diferentes valores de probabilidade de ocorrência de descarga, denotadas como P_1 , P_2 e P_3 .

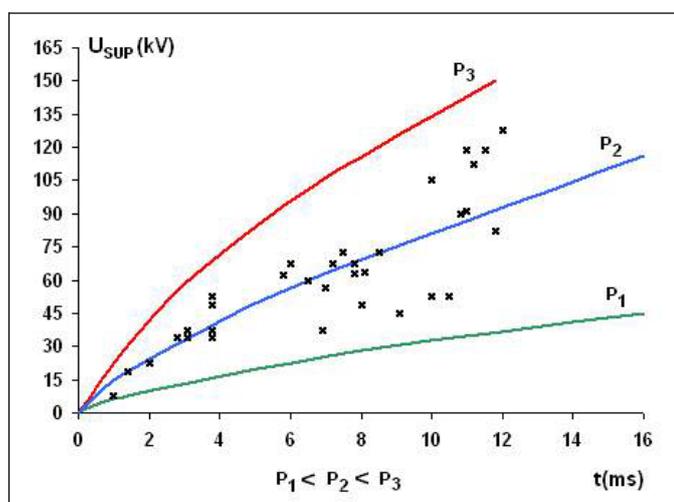


Figura 3.7 – Características dielétricas para diferentes valores de probabilidade de descarga

Conforme mencionado antes, o tempo de arco é outro parâmetro com grande influência na característica dielétrica do disjuntor. Este tempo está associado à velocidade de abertura que, por sua vez, determina a distância entre os contatos no instante da interrupção da corrente e é função da capacidade térmica de interrupção do disjuntor e de particularidades do seu projeto.

Este parâmetro tem grande relevância na interrupção de correntes capacitivas que, por serem essas de baixa intensidade, são interrompidas com tempos de arco muito curtos. Nessa situação, a distância entre os contatos é pequena, caracterizando baixas suportabilidades dielétricas.

3.3.3.2 Tensão de Restabelecimento Durante a Abertura de Correntes Capacitivas

De acordo com (JOHNSON, 1955) na ausência de faltas, a tensão de restabelecimento

através do primeiro pólo do disjuntor a abrir possui diferentes valores para manobra de linhas aéreas, bancos de capacitores com neutro aterrado ou bancos de capacitores desaterrados. Considerando que não ocorra o reacendimento do arco, os picos da tensão de restabelecimento nessas manobras são da ordem de 2,0, 2,4 e 3,0 p.u. do valor de crista da tensão normal de operação fase-terra, respectivamente, quando o sistema é efetivamente aterrado.

A tensão de restabelecimento no dispositivo de interrupção pode aumentar bastante quando ocorre o reacendimento do arco elétrico.

Particularmente no caso de linhas de transmissão, as correntes de carga são muito pequenas quando comparadas com as correntes de curto-circuito que os disjuntores devem ser capazes de interromper. Em função desta característica, a interrupção do arco acontece quando a distância entre os contatos ainda é muito pequena, o que aumenta o risco de reacendimentos com efeitos indesejáveis tais como a escalada de tensão conforme relatado por (GREENWOOD, 1971) e (SOLVER, 1998).

A Figura 3.8 a seguir apresenta as formas de onda da tensão e da corrente na abertura de uma linha em vazio na condição em que ocorre o reacendimento do arco do disjuntor. Observa-se nessa figura que quando isto acontece, a tensão no lado fonte possui polaridade inversa a da tensão do lado linha. Com o reacendimento, as tensões em ambos os terminais do disjuntor tendem a se igualar, uma vez que a tensão do lado linha deve seguir a tensão da rede. Este evento é acompanhado de uma oscilação transitória da tensão da carga capacitiva da linha. Observa-se ainda o surgimento de uma corrente através do disjuntor, de frequência mais alta que a frequência da rede, que pode ser interrompida na sua passagem pelo zero. Por outro lado, a tensão remanescente no lado linha, após a extinção da corrente, tem um valor no máximo igual ao valor de pico da tensão transitória que surge durante a equalização das tensões. Considerando a evolução da tensão do lado fonte, que segue o comportamento da tensão da rede, a tensão nos terminais do disjuntor pode atingir valores elevados com a possibilidade de novo reacendimento e a conseqüente escalada de tensão. É importante observar que a tensão no lado linha pode atingir um valor de 3,0 p.u. no primeiro reacendimento.

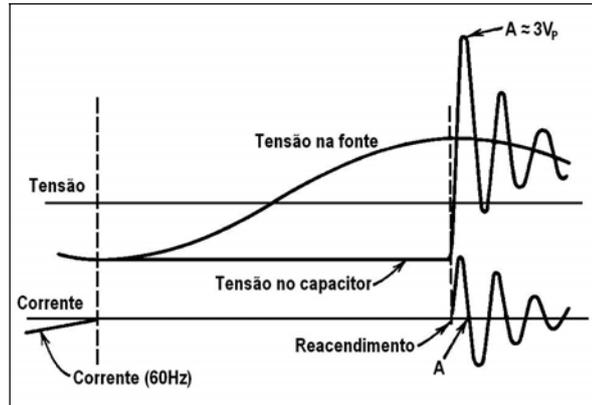


Figura 3.8 – Escalada de tensão devida ao reacendimento do arco no disjuntor

O maior problema para o projetista do disjuntor consiste em assegurar que este equipamento suporte os elevados valores de tensão de restabelecimento que surgem após a interrupção da corrente sem que ocorra reacendimento, ou garantir que a probabilidade de ocorrência deste fenômeno seja muito baixa (IEC 62271-100, 2001).

O máximo valor alcançado pela tensão de restabelecimento durante a manobra de abertura de linhas aéreas em vazio é influenciado pelo aumento da tensão que ocorre em um ou em ambos os terminais do disjuntor antes ou depois da interrupção da corrente.

Este incremento de tensão é causado por vários fatores entre os quais se destacam o acoplamento fase-fase das capacitâncias (PORTELA, 1989), presença de falta na linha, *Efeito Ferranti* e os efeitos da rejeição de carga nas solicitações de tensão e de corrente durante a abertura do disjuntor do terminal remoto da linha.

De acordo com (SOLVER, 1998), para uma linha não compensada, o máximo valor da tensão de restabelecimento pode ser calculado pela seguinte fórmula:

$$U_c = k_b U_o (k_{as} + k_a) \quad (3.15)$$

Sendo:

U_o o valor de pico fase-terra da tensão de regime permanente que se estabelece em ambos os lados do disjuntor no terminal emissor antes da abertura da linha no seu terminal remoto;

$k_b = 1 + r_b$, sendo r_b a elevação de tensão em relação a U_o que ocorre em ambos os lados do disjuntor do terminal emissor, após a abertura da linha no terminal remoto, como consequência

dessa abertura e de qualquer evento subsequente tal como uma falta, mas antes da interrupção da corrente capacitiva pelo disjuntor.

$$k_a = 1 + r_a ;$$

$$k_{as} = 1 + r_{as} ;$$

Onde r_a e r_{as} representam as variações de tensão em relação a $k_b U_0$ que podem ocorrer respectivamente no lado linha e no lado fonte do disjuntor após a interrupção da corrente capacitiva.

Algumas vezes não ocorrem variações relevantes nos picos de tensão em qualquer dos terminais do disjuntor do lado fonte e nesse caso tem-se $k_a + k_{as} = 2$. Frequentemente é a variação no lado fonte que pode ser desprezada e nesse caso $k_{as} = 1$.

Quando a linha é compensada por reatores em derivação, a tensão nas fases, em cada pólo do disjuntor, após a interrupção da corrente da linha em vazio, é oscilatória e os picos de oscilação nos dois lados de cada pólo dificilmente são coincidentes. Devido a essa característica, a máxima tensão de restabelecimento é, geralmente, menor que o valor determinado pela equação 3.15.

Um outro parâmetro de grande influência na magnitude das sobretensões que surgem entre os contatos do disjuntor na abertura de correntes de natureza capacitiva, com destaque para a abertura de linha em vazio, é o *acoplamento capacitivo entre fases*.

As linhas de transmissão aéreas possuem capacitâncias entre fases e das fases para a terra. A relação entre a capacitância de seqüência positiva e a de seqüência zero, C_1/C_0 , é maior que a unidade e apenas uma porção da capacitância de seqüência positiva é aterrada (JOHNSON, 1955). De acordo com o autor, nas linhas de transmissão, de uma forma geral, esta relação varia de 1,6 a 2,0.

A Figura 3.9 mostra todos os tipos básicos de circuitos capacitivos energizados a partir de uma fonte aterrada.

As capacitâncias aterradas e não aterradas são definidas em termos de componentes de seqüência positiva e zero. No circuito, a capacitância de seqüência zero C_0 é igual à soma de todas as capacitâncias para a terra e a capacitância C_1 é igual a soma das capacitâncias aterradas e

desaterradas. Os valores de tensão de restabelecimento para as diferentes relações C_1/C_0 estão representados, em p.u. da tensão de pico fase-neutro, na Figura 3.10. Essa figura mostra o efeito da relação C_1/C_0 no valor de pico da tensão de restabelecimento através do primeiro pólo do disjuntor a abrir. Adota-se como premissa que o disjuntor interrompe a corrente no instante em que esta passa pelo zero e que a regulação envolvendo a indutância da fonte é desprezível. Nota-se que a tensão de restabelecimento varia de duas a três vezes em relação ao valor de pico da tensão fase-neutro nominal quando a relação C_1/C_0 varia de 1 a ∞ . Quando a relação C_1/C_0 varia de 1,2 a 1,4 a tensão de restabelecimento cresce de 2,2 para 2,4 p.u..

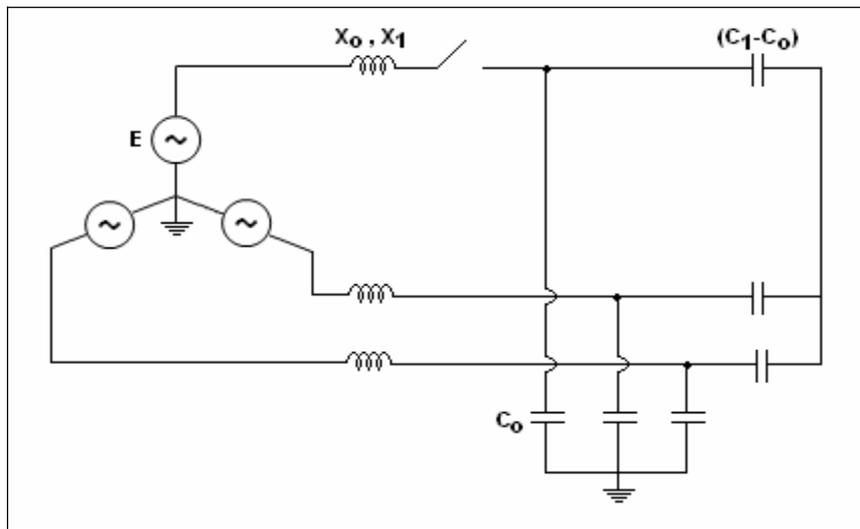


Figura 3.9 – Forma geral de circuitos capacitivos energizados a partir de uma fonte aterrada

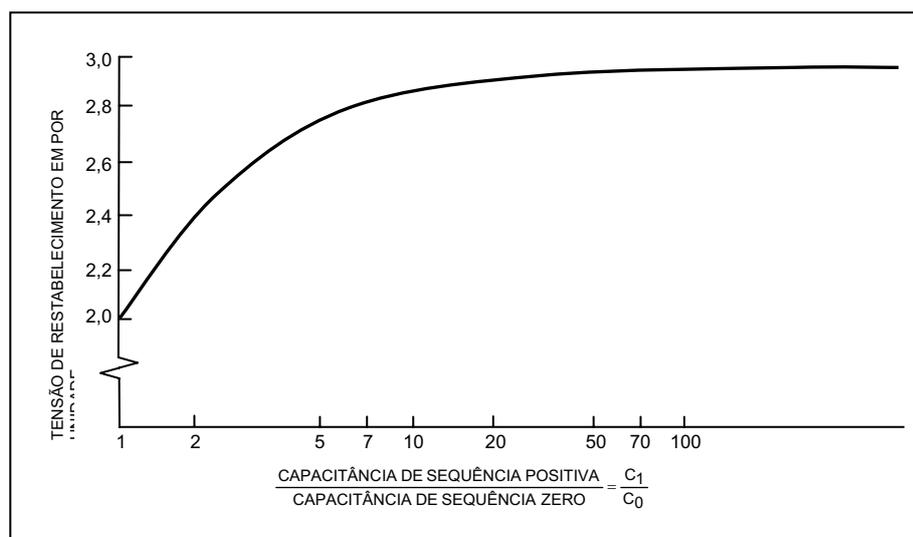


Figura 3.10 – Pico da tensão de restabelecimento através dos contatos do primeiro pólo do disjuntor ao abrir uma corrente capacitiva sem reacendimento

Um outro fator importante a ser considerado na análise da abertura de uma linha em vazio é o *Efeito Ferranti*, já comentado no Capítulo 2. Quando uma linha se encontra sem carga, este efeito dá origem a um crescimento progressivo da tensão do terminal emissor para o terminal remoto. Esse efeito é tão mais significativo quanto maiores forem a linha de transmissão e a tensão nela aplicada. A tensão no terminal emissor, embora inferior à do terminal remoto, é ainda maior que a existente quando a linha se encontra em carga.

Quando a linha em vazio é desconectada do terminal emissor, a tensão em cada lado do disjuntor para a terra se modifica de forma diferente. A tensão do lado fonte se auto ajusta para um nível inferior através de uma oscilação transitória denominada de *voltage jump* (SOLVER, 1998), enquanto que a tensão do lado linha é aumentada, mediante uma oscilação transitória durante o processo de redistribuição da carga eletrostática que surge ao longo da linha, resultante da abertura da corrente capacitiva da mesma.

Os principais parâmetros capazes de influenciar as solicitações de tensão durante a abertura de uma linha em vazio são resumidos a seguir:

- a) Potência de curto – circuito da rede de alimentação, denotada por P ;
- b) Tensão pré - abertura nos terminais do disjuntor, conhecida comumente como tensão de linha conectada, valor fase-terra, designado por U ;
- c) Comprimento da linha, ℓ ;
- d) Relação entre a reatância equivalente de seqüência zero e a reatância equivalente de seqüência positiva, x_0/x_1 da rede de alimentação;
- e) Relação entre a capacitância equivalente de seqüência positiva e a capacitância equivalente de seqüência zero, C_1/C_0 , da linha manobrada.

Em seqüência serão apresentadas as principais equações representativas dos fenômenos de tensão que regem a manobra de abertura de uma linha de transmissão em vazio. Para facilitar este equacionamento são feitas algumas hipóteses simplificadoras listadas a seguir:

- a) A linha de transmissão é considerada sem perdas, representada pela sua impedância Z_s e pelo tempo de trânsito τ , sendo $Z_s = \sqrt{L/C}$, $\ell = c \cdot \tau$ e c igual à velocidade de

propagação da onda na linha;

b) A relação x_0/x_l é considerada igual à unidade. Desta suposição decorre que $x_0 = x_l = x_f$. Em consequência desta identidade, a potência de curto-circuito pode ser expressa por: $P_{cc} = U^2/x_f$

c) A relação C_l/C_0 é considerada constante;

d) A linha de transmissão é não compensada.

A Figura 3.11, a seguir, mostra o circuito equivalente monofásico, simplificado, da linha a ser manobrada.

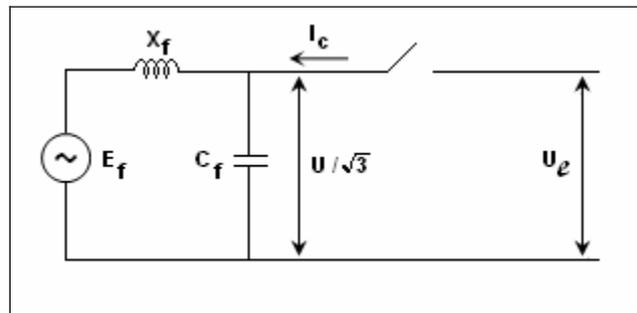


Figura 3.11 – Circuito equivalente monofásico simplificado de uma linha manobrada em vazio

Para a linha de transmissão representada na figura anterior se pode deduzir as seguintes relações:

$$x_f = \frac{U^2}{P_{cc}} \quad (3.16)$$

A tensão de restabelecimento na abertura do primeiro pólo do disjuntor pode ser considerada resultante dos componentes de tensão E_1 , E_2 , E_3 e E_4 assim definidos:

1 - E_1 - Tensão da fonte na frequência de 60 Hz

O valor eficaz da tensão da fonte do circuito da Figura 3.11, após a abertura do disjuntor do terminal receptor, desprezando a elevação de tensão devida à capacitância C_f , pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$E_1 = E_f = \frac{U}{\sqrt{3}} - x_f \cdot I_c \quad (3.17)$$

Sendo I_c a corrente capacitiva da linha a ser interrompida, tendo magnitude dependente do comprimento desta.

A partir da equação (2.16) apresentada no Capítulo 2 para a linha de transmissão, têm-se as seguintes expressões:

$$\dot{E}_0 = \dot{E}_i \text{Cosh } \gamma \ell - Z_c \dot{I}_i \text{Senh } \gamma \ell \quad (3.18)$$

$$\dot{I}_0 = -\frac{\dot{E}_i}{Z_c} \text{Senh } \gamma \ell + \dot{I}_i \text{Cosh } \gamma \ell$$

Quando $I_0 = 0$, $I_i = I_c$ e $E_i = \frac{U}{\sqrt{3}}$, pode-se facilmente deduzir, a partir de (3.18), que:

$$\dot{I}_c = \frac{U}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{Z_c} \cdot \frac{\text{Senh } \gamma \ell}{\text{Cosh } \gamma \ell} \quad (3.19)$$

Para o caso particular de linhas sem perdas, $\gamma = j\beta = j\omega\sqrt{LC} = j\frac{\omega}{c}$ e $Z_c = Z_s$. Dessa forma tem-se que:

$$\dot{I}_c = \frac{U}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{Z_s} \cdot \text{tg } \frac{\omega}{c} \ell \quad (3.20)$$

Substituindo (3.20) em (3.17) tem-se:

$$\dot{E}_1 = \sqrt{\frac{2}{3}} U \left(1 - \frac{x_f}{Z_s} \cdot \text{tg } \frac{\omega}{c} \ell \right) \quad (3.21)$$

Nesta equação x_f pode ser expresso em função da potência de curto-circuito e da tensão pré-abertura da linha, resultando em:

$$\dot{E}_1 = \sqrt{\frac{2}{3}} U \left(1 - \frac{U^2}{P_{cc} \cdot Z_s} \cdot \text{tg } \frac{\omega}{c} \ell \right) \quad (3.22)$$

Quando ocorre a abertura do primeiro terminal, a tensão no segundo terminal onde está

situado o disjuntor apresenta uma elevação de tensão devida ao efeito capacitivo da linha conectada ao sistema. Este incremento de tensão é definido pela razão entre $\sqrt{2/3}U$ e E_1 e representado pelo fator k_1 .

A partir da expressão (3.22) esse fator pode ser determinado pela seguinte equação:

$$k_1 = \frac{1}{1 - \frac{x_f}{Z_s} \cdot \text{tg} \frac{\omega}{c} \ell} \quad (3.23)$$

2 – E_2 - Tensão do lado fonte devida a abertura da carga capacitiva

A abertura da carga capacitiva da linha dá origem uma tensão oscilatória amortecida do lado fonte cuja amplitude de oscilação é igual ao degrau de tensão devido a essa manobra.

A amplitude desse degrau é igual à queda de tensão em x_f provocado pela corrente capacitiva da linha existente antes da abertura. Neste caso tem-se:

$$\begin{aligned} \dot{E}_2 &= \sqrt{2} x_f I_c = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U \cdot x_f \cdot \frac{1}{Z_s} \cdot \text{tg} \frac{\omega}{c} \ell \\ \dot{E}_2 &= \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U \cdot x_f \cdot \frac{1}{Z_s} \cdot \text{tg} \frac{\omega}{c} \ell \end{aligned} \quad (3.24)$$

Expressando E_2 em função da potência de curto-circuito tem-se:

$$\dot{E}_2 = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{U^3}{P_{cc} \cdot Z_s} \cdot \text{tg} \frac{\omega}{c} \ell \quad (3.25)$$

Neste caso a frequência é a frequência natural da rede e é dada por:

$$f_n = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_f C_f}} \quad (3.26)$$

3 – E_3 - Tensão do lado linha

A tensão no lado linha oscila entre os valores iniciais da tensão nos dois terminais, na busca de um ponto de equilíbrio. Esta tensão contém uma componente contínua devida à carga

armazenada na linha. No terminal do disjuntor do lado fonte, a tensão é a mesma existente antes da abertura, pois essa não varia instantaneamente e é dada por:

$$E_{3\min} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U \quad (3.27)$$

Na extremidade em vazio da linha, a tensão inicial é igual à tensão inicial no terminal do disjuntor do lado fonte multiplicada pelo fator de amplificação devido ao *Efeito Ferranti*, dado por $1 / (\text{Cosh} \gamma \ell)$, que para linhas sem perdas se torna igual a $\frac{1}{\cos(\omega \ell / c)}$. Desta forma:

$$E_{3\max} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U \cdot \frac{1}{\cos(\omega \ell / c)} \quad (3.28)$$

O período de oscilação desta onda é o dobro do tempo de tráfego da linha, sendo descrito por:

$$T = 2\tau = \frac{2\ell}{c} \quad (3.29)$$

O fator de amplificação da tensão na extremidade em vazio da linha quando o disjuntor do lado fonte está ainda fechado pode ser calculado por:

$$k_2 = \frac{E_{3\max}}{E_1} = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}} U \cdot \left(\frac{1}{\cos(\omega \ell / c)} \right)}{E_1} = \frac{k_1}{\cos(\omega \ell / c)}$$

$$k_2 = \frac{1}{\cos(\omega \ell / c) - \left(\frac{x_f}{Z_s} \right) \text{sen}(\omega \ell / c)} \quad (3.30)$$

Observa-se através das equações (3.23) e (3.30) que os fatores k_1 e k_2 decrescem em função do aumento da relação entre a potência de curto-circuito da fonte e a potência natural da linha, conhecida com Pn ou SIL (Surge Impedance Load).

4 – E_4 - Tensão de 60Hz do lado linha induzida pelo efeito do acoplamento capacitivo

A tensão de 60Hz do lado linha, induzida pelo efeito do acoplamento capacitivo com as

fases ainda fechadas, tem o valor de pico determinado pela seguinte expressão:

$$E_4 = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{U}{2} \cdot \frac{C_1/C_0 - 1}{C_1/C_0 + 0,5} \quad (3.31)$$

Os aspectos mais importantes, relativos ao fenômeno de abertura da linha em vazio, são destacados a seguir:

- As oscilações iniciais em ambos os lados do disjuntor são função do comprimento da linha e, por conseqüência, da corrente capacitiva interrompida;
- As amplitudes das oscilações são tão maiores quanto maior for o comprimento da linha manobrada, fixados os demais parâmetros;
- As amplitudes das oscilações iniciais de alta freqüência do lado fonte são inversamente proporcionais à potência de curto – circuito da rede elétrica e à impedância de surto da linha;
- A taxa de crescimento inicial da tensão de restabelecimento dU/dt é proporcional ao degrau de tensão inicial do lado fonte sendo esta igual a queda de tensão na impedância equivalente da rede, vista do ponto de chaveamento antes da abertura da linha. Este parâmetro é função da potência de curto-circuito e da corrente capacitiva;
- O tempo de arco do disjuntor é função da potência de curto-circuito da rede e do comprimento da linha.

3.3.3.3 Linhas com Reatores em Derivação para Compensação

Quando as linhas de transmissão de alta e extra-alta tensão são dotadas de grande comprimento, a potência reativa de natureza capacitiva gerada pela mesma é de magnitude elevada, trazendo como conseqüência, níveis de tensão, em regime permanente, superiores ao máximo permitido pelos isolamentos dos equipamentos e cargas a ela conectados em determinadas condições de operação e de fluxo de potência na mesma. Além disso, por ocasião da sua energização em vazio, a tensão no terminal aberto, devida ao *Efeito Ferranti*, já comentado antes, é

de tal valor que torna impossível a conexão de transformadores e outros equipamentos neste terminal ou o fechamento de anel com sistemas vizinhos. Em função destes e de outros aspectos, há necessidade de instalação de reatores em derivação, da fase para a terra, em um ou em ambos os terminais do circuito para garantir seu adequado desempenho em qualquer condição de operação. Desta forma é importante apresentar uma breve análise qualitativa do processo de abertura em vazio para linhas compensadas por reatores.

A presença destes reatores na linha tem como primeira consequência a redução da corrente capacitiva e a diminuição do degrau de tensão U que aparece na abertura em vazio o que reduz a probabilidade de surgimento de reignições e aumenta a probabilidade de reacendimentos no disjuntor.

A tensão de restabelecimento que aparece entre os contatos do disjuntor na abertura de linhas em vazio compensadas, possui uma componente de baixa frequência de oscilação caracterizada, principalmente, pela oscilação das capacitâncias para a terra com as indutâncias dos reatores em derivação na linha.

A forma de onda dessa oscilação depende do fator de compensação da linha (relação entre a indutância dos reatores derivação e a capacitância própria de seqüência positiva da linha), do tempo de abertura dos pólos do disjuntor e notadamente do fator de qualidade dos reatores. Dependendo do circuito equivalente formado pela linha e pelos reatores este pode ser ressonante, ocasionando elevados picos de tensão de restabelecimento.

Entretanto, em geral, o batimento da tensão da rede com a componente de baixa frequência da linha faz com que a tensão máxima entre os contatos do disjuntor se verifique em um tempo relativamente longo tendo a câmara de extinção já atingido um nível de recuperação dielétrica que a torna capaz de suportar as solicitações da tensão de restabelecimento impostas pela manobra.

3.3.3.4 Abertura de Linha em Vazio sem Falta Após Rejeição de Carga

Considere-se uma linha de transmissão em vazio, conectada a um sistema de geração, de impedância equivalente x_f , como mostrado na Figura 3.12.

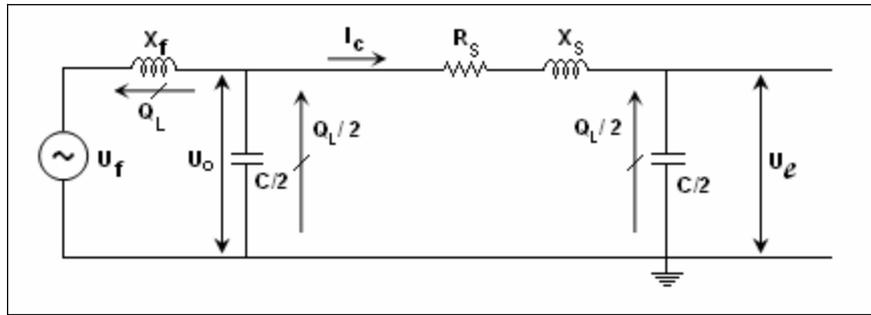


Figura 3.12 – Fluxo de potência reativa de uma linha em vazio ligada a um gerador

Devido ao *efeito Ferranti* observa-se que $U_l > U_0$ e pelo efeito capacitivo da linha $U_0 > U_f$.

Para um sistema radial, sem carga conectada, em que U_f é a tensão interna dos geradores, estes devem estar subexcitados para manter os níveis das tensões U_l e U_0 dentro dos limites estabelecidos.

Considere-se agora o caso em que o sistema está suprindo uma carga indutiva de grande valor, conectada à extremidade da linha. Nesta nova situação, as condições das tensões e da potência reativa são bastante distintas, como mostrado na Figura 3.13.

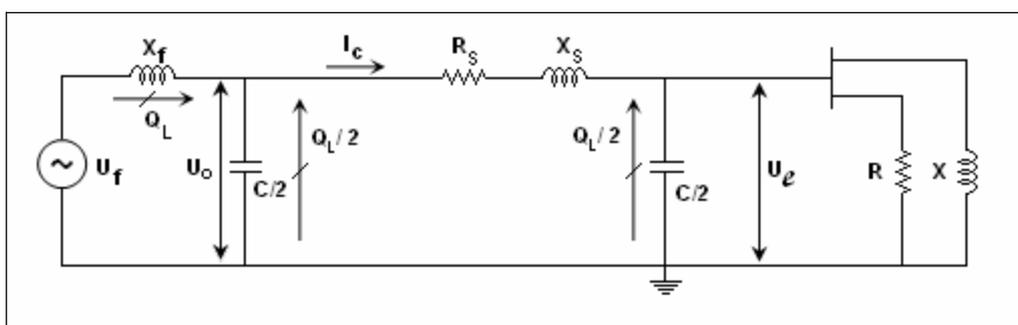


Figura 3.13 – Fluxo de potência reativa de uma linha com uma carga indutiva ligada a um gerador

Nesta nova condição os geradores estão sobexcitados, com elevado valor para a tensão interna de modo a garantir o fornecimento de energia reativa necessária para alimentar a carga e $U_f > U_0 > U_l$.

Se nessas condições ocorrer uma rejeição total da carga e a linha de transmissão permanecer conectada ao sistema pelo seu terminal emissor, após o transitório eletromagnético, cuja duração é da ordem de 0,5 a 2 ciclos, surge uma sobretensão sustentada na frequência fundamental. A tensão interna dos geradores, U_f , que já estava elevada antes da perda da carga tem seu valor aumentado ainda mais pelo efeito capacitivo da linha em vazio, resultando em um valor de $U_0 > U_f$. Adicionalmente, devido ao *Efeito Ferranti* tem-se $U_l > U_0 > U_f$.

O efeito da rejeição da carga será maior na tensão da extremidade em vazio da linha que pode atingir valores da ordem de 1,4 p.u. da tensão existente antes da abertura, dependendo das características do sistema.

Desprezando as perdas e o efeito capacitivo da linha e do sistema, antes da atuação dos reguladores de tensão, a sobretensão de frequência fundamental pode ser estimada de forma bastante simplificada pela expressão (CARVALHO, 1995):

$$\frac{U_l}{U_f} = 1 + \frac{Q_l}{P_{cc}} \quad (3.33)$$

Sendo:

Q_l – parte indutiva da carga rejeitada

P_{cc} – potência de curto-circuito trifásica no ponto de rejeição

Imediatamente após a detecção da sobretensão devida à rejeição da carga, os reguladores de tensão dos geradores reduzem a tensão interna mediante diminuição da corrente de campo das máquinas. A efetividade da atuação dos reguladores para a redução da sobretensão é tão maior quanto mais próximas dos geradores estiverem as barras com sobretensão.

Um outro componente de sistema capaz de reduzir as sobretensões decorrentes de rejeição de carga são os compensadores estáticos presentes na área sensível a perda da carga. Também neste caso, quanto mais próximos estiverem estes equipamentos da barra com sobretensão, mais efetivo é o seu efeito no controle desta.

Observa-se, em resumo, que a atuação dos reguladores e de eventuais compensadores presentes no sistema, bem como os efeitos dos amortecimentos naturais da rede são bastante

efetivos na diminuição das sobretensões originárias da rejeição de carga, a ponto de reduzir as solicitações de natureza sustentada a valores compatíveis com a suportabilidade dos equipamentos. A depender dos níveis de tensão alcançados em regime permanente, após a rejeição da carga, podem ocorrer situações em que não seja necessário o chaveamento da linha, evitando assim, solicitações dielétricas severas no último disjuntor a abrir. Todavia, quando a atuação dos reguladores e controladores de tensão ou o próprio amortecimento do sistema não são efetivos, a linha deve ser removida logo nos primeiros ciclos, o que pode acarretar severas solicitações aos terminais do disjuntor. A efetividade destes elementos de controle deve ser verificada mediante estudos dinâmicos e de transitórios eletromagnéticos.

3.3.3.5 Abertura de Linhas em Vazio sob Falta Monofásica após Rejeição de Carga

Quando um sistema é submetido a uma rejeição de carga, normalmente ocorre uma mudança na topologia desse sistema. Esta mudança é acompanhada de transitórios eletromagnéticos rapidamente amortecidos originados da acomodação do sistema à nova configuração. Estas oscilações dão origem a sobretensões transitórias de pequena duração, em torno de 2 ciclos, que podem vir acompanhadas de sobretensões temporárias de mais longa duração, na faixa de 20 a 30 ciclos, devidas às correntes harmônicas geradas pelos elementos saturáveis da rede em sintonia com as ressonâncias do sistema nos harmônicos de baixa ordem. Neste período, há possibilidades de ocorrer descarga para a terra na extremidade de uma das fases da linha em vazio onde a sobretensão tem seu valor mais elevado. O disjuntor da outra extremidade da linha deve ser capaz de abrir a corrente capacitiva das fases sãs da linha sob condições de elevados níveis de sobretensão decorrentes da rejeição da carga e da falta monofásica.

A ocorrência dessa falta fase-terra na extremidade da linha de transmissão em vazio, como mostrado na Figura 3.14, faz com que as fases sãs fiquem submetidas a uma elevação de tensão que é função, entre outros fatores, da relação x_0/x_1 no ponto de falta.

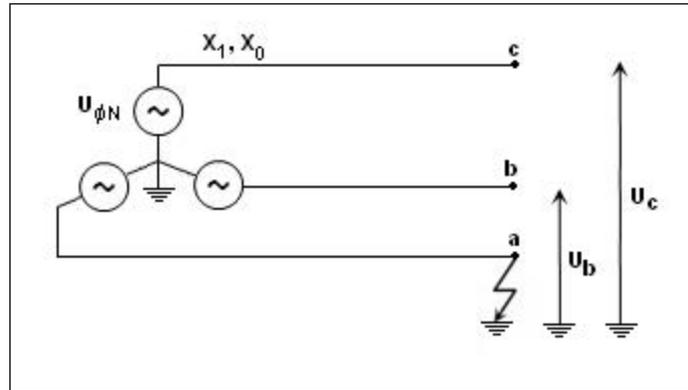


Figura 3.14 – Circuito equivalente trifásico de uma falta fase-terra

Desprezando-se as resistências e as capacitâncias do circuito, o módulo da tensão nas fases sem defeito, para uma falta na fase a, pode ser determinado pela seguinte expressão (CARVALHO, 1995)

$$|U_b| = |U_c| = \sqrt{3}U_{FN} \frac{\sqrt{(x_0/x_1)^2 + x_0/x_1 + 1}}{2 + x_0/x_1} \quad (3.32)$$

Sendo U_{FN} igual a tensão fase – neutro antes da falta no ponto onde ocorre a falta.

Considerando que na abertura da fase sob falta o pólo do disjuntor necessita de um tempo de arco maior que o das fases sadias, em que correntes capacitivas são interrompidas, a fase faltosa é normalmente a última a abrir fazendo com que a interrupção das fases sãs ocorra sob condições de tensão elevada, tendo como consequência correntes capacitivas aumentadas e maiores solicitações de tensão entre os contatos disjuntor.

Nestas condições, os principais parâmetros que influenciam a tensão de restabelecimento são a relação x_0/x_1 do sistema, os parâmetros elétricos (indutância e capacitância), o comprimento da linha, a localização da falta, o nível de amortecimento da rede e finalmente o grau de compensação da linha.

(PETERSON, 1966), mostra que levar em conta o amortecimento existente no ponto de falta tem como consequência o aparecimento de desequilíbrio nas sobretensões das fases sãs e como benefício a redução de sua amplitude.

É importante observar que os pára-raios instalados nos terminais da linha e a

suportabilidade dos isolamentos desta, são também fatores limitantes das sobretensões nas fases sãs.

Pode-se concluir que a abertura das fases sãs de uma linha na presença de uma falta monofásica, após rejeição de carga, constitui, provavelmente, o caso mais severo para o disjuntor. Em geral, as situações mais graves de solicitação de tensão se verificam quando o curto-circuito está aplicado na extremidade aberta da linha em vazio.

Capítulo 4

Disjuntores: Funções e Tipos

4.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo descreve de forma resumida, com base em (FLURSCHEIM, 1975), (HEDMAN, 1979), (COLOMBO, 1990) e (NBR 7118, 1994), os principais tipos de disjuntores existentes no mercado de equipamentos, seu princípio de interrupção de correntes normais e anormais de circuitos e suas limitações durante esse processo. São também apresentados subsídios para nortear a escolha do disjuntor, considerando a sua finalidade e as condições do sistema onde o mesmo deve ser instalado. É importante observar que definir, a priori, o disjuntor para uma determinada aplicação no sistema, sem pelo menos avaliar os parâmetros aqui abordados, pode acarretar em custos adicionais para os novos empreendimentos e uma eventual necessidade de substituição destes equipamentos em curto prazo por outros compatíveis com o local de aplicação, devido a problemas relacionados à superação ou obsolescência em virtude da sua inadequação para a função.

4.2 DEFINIÇÃO DE DISJUNTOR, DISJUNTOR IDEAL E DISJUNTOR REAL

O disjuntor pode ser definido como um dispositivo mecânico de manobra capaz de estabelecer, conduzir e interromper correntes nas condições normais de circuito, assim como

estabelecer, conduzir durante um tempo definido e interromper correntes sob condições anormais especificadas do circuito, tais como as de curto-circuito.

O disjuntor ideal é aquele em que a impedância entre os seus contatos passa instantaneamente de valor zero para infinito no instante da interrupção de corrente no seu zero natural (COLOMBO, 1986). Neste aspecto, trata-se de um dispositivo com resistência e tensão de arco elétrico nulas e a partir do instante de interrupção da corrente a condutância passa a ser zero desprezando-se o período de trocas térmicas durante a condutividade.

O disjuntor real possui resistência e tensão de arco não nulas, variáveis com o tempo, principalmente na região próxima do zero, onde a instabilidade faz com que as duas grandezas mudem de valor, podendo deformar a onda de corrente e modificar a sua inclinação, dada por di/dt , e as solicitações de tensão de restabelecimento transitória após a passagem pelo zero de corrente. Nos instantes próximos ao zero de corrente, aproximadamente 100 μ s antes do zero e após o arco elétrico, o disjuntor interage com o sistema através dos parâmetros característicos do arco e a forma como esta interação se processa depende das características do sistema onde o disjuntor está inserido.

4.3 FUNÇÃO DOS DISJUNTORES

O disjuntor tem como função principal, controlar sistemas elétricos de potência mediante manobras de chaveamento.

Quando em condições normais de serviço, na posição fechada, deve conduzir correntes de carga continuamente sem que venha a aquecer além dos limites permissíveis.

Deve ser capaz de conduzir correntes anormais durante um tempo definido.

Quando da manobra de fechamento, inclusive sob falta, o disjuntor deve atingir de maneira correta a sua posição fechada e conduzir as correntes de curto-circuito.

Quando da manobra de abertura, o disjuntor deve ser capaz de efetuar todos os casos

possíveis de chaveamento do sistema onde está instalado.

Deve também assegurar isolamento na posição aberta.

Quando necessário, o que ocorre muito poucas vezes, a menos que o disjuntor esteja ligado a uma linha que deve ser retirada de operação na transição do sistema da condição de carga pesada para a de carga leve, deve ser capaz de realizar manobras de energização e abertura de linhas de transmissão, cargas e transformadores. Durante o ciclo de carga diário, leve, média e pesada, deve ser capaz de manobrar bancos de capacitores e reatores, o que pode acontecer com grande frequência a depender do nível de regulação do sistema.

Em regime não permanente, na ocorrência de distúrbios, deve ser capaz de realizar manobras de abertura de falta.

Em condições de rejeição de carga, acompanhada de sobretensões dinâmicas, com ou sem defeito, o disjuntor deve ser capaz de efetuar, de forma segura, manobra de abertura de linha em vazio, sem que ocorra reacendimento do arco elétrico entre os seus contatos devido às solicitações dielétricas que caracterizam o fenômeno. O presente trabalho analisa de forma mais aprofundada este tipo de manobra.

4.4 TIPOS DE DISJUNTORES

Neste item são apresentados, de forma breve, os principais tipos de disjuntores existentes, suas vantagens e desvantagens em determinadas aplicações.

4.4.1 Disjuntor a Sopro Magnético

O processo de interrupção neste tipo de disjuntor consiste na abertura dos contatos no ar, forçando o arco elétrico para dentro das câmaras de extinção, onde ocorre a interrupção. São utilizadas duas bobinas, excitadas pela corrente do circuito a ser interrompido, cujo campo magnético resultante provoca o deslocamento do arco para o interior da câmara desionizante, fracionando-o, resfriando-o e extinguindo-o na primeira passagem da corrente pelo zero natural.

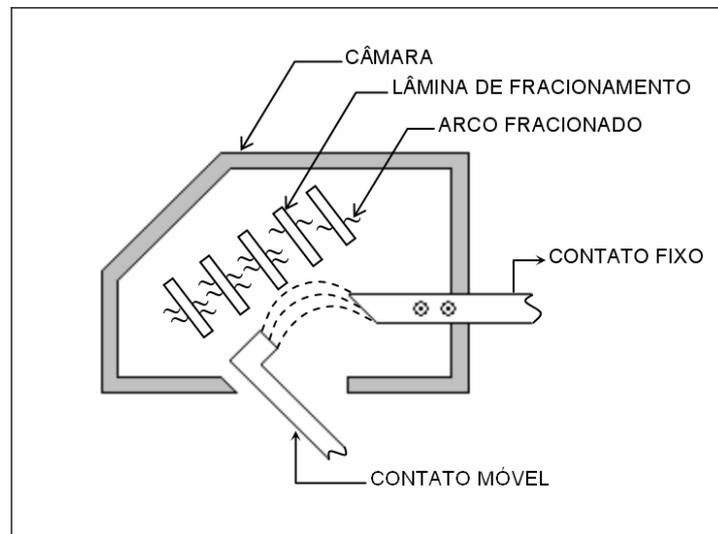


Figura 4.1 – Interrupção do arco em disjuntores a sopro magnético

Este tipo de disjuntor possui elevados valores de resistência e tensão de arco devido à sua ocorrência no ar o que o impele a se alongar de forma considerável. A interrupção é favorecida pelo aumento da resistência e tensão deste arco.

Essa característica faz com que o valor instantâneo da tensão de restabelecimento após a extinção do arco seja reduzido.

O crescimento da resistência do arco ocorre devido ao aumento do seu comprimento, da sua fragmentação em arcos menores, em série, nas fendas das câmaras de extinção e do resfriamento do arco pelo contato com as paredes da câmara do disjuntor.

O campo magnético produzido pela corrente de interrupção através das bobinas é o responsável pela produção das forças magnéticas que direcionam o arco para o interior das fendas da câmara. Quando o campo magnético gerado não é suficiente para forçar o arco para dentro dessas fendas, como ocorre no caso de interrupção de pequenas correntes indutivas, é comum se utilizar um sopro pneumático auxiliar de forma a evitar tempos de arco muito longos.

Uma desvantagem deste disjuntor é que ele pode apresentar correntes críticas na faixa de 50 a 200 A (COLOMBO 1990). Neste intervalo, os tempos de arco são muito longos, posto que o campo magnético é de baixa intensidade em virtude do valor reduzido da corrente.

Os disjuntores a sopro magnético não correm risco de incêndio e são utilizados em faixas de tensões de 600 V até 24 kV e comumente são montados em cubículos. A extinção do arco elétrico no ar provoca rápida oxidação dos contatos. As câmaras de arco devem ser trocadas periodicamente de acordo com o número médio de capacidade de operação especificado pelo fabricante. Quando aplicados em locais em que estejam sujeitos a elevado número de operações em curto-circuito em pequeno intervalo de tempo, podem exigir manutenções mais freqüentes.

4.4.2 Disjuntor a Óleo

Os primeiros disjuntores utilizavam como dielétrico o óleo mineral devido a suas características de isolante e extintor.

O óleo sob efeito do arco a temperaturas muito elevadas gera vários gases por decomposição, com predominância do hidrogênio. A condutividade térmica deste gás é bastante alta e produz a retirada de calor das vizinhanças do arco de forma eficiente.

Os disjuntores a óleo podem ser de dois tipos, a saber: a grande volume de óleo, GVO, e a pequeno volume de óleo, PVO.

Os disjuntores GVO possuem câmaras de extinção dentro de um grande tanque de óleo, aterrado, onde se força o fluxo deste isolante sobre o arco. Neste tipo de disjuntor existem transformadores de corrente montados na própria bucha.

Os disjuntores GVO são utilizados em média e alta tensões, limitadas a 230 kV.

A característica principal do disjuntor GVO é a sua grande capacidade de ruptura, facilitada pelo processo de extinção descrito antes. Segundo (COLOMBO, 1990), existem disjuntores de 63 kA aplicados em 230 kV e 138 kV onde se requer uma capacidade de ruptura dessa ordem. Esse tipo de disjuntor é inapropriado para interrupção de correntes de baixa amplitude, pois nesta situação o arco elétrico dissipa uma baixa potência que pode ser insuficiente para desencadear a dissociação do óleo em gases nos níveis necessários à sua extinção. Dessa forma este tipo de disjuntor não deve ser aplicado para manobras de linha em vazio, bancos de capacitores ou reatores.

Os disjuntores PVO começaram a ser desenvolvidos nos anos de 1930. Constituem uma evolução dos disjuntores GVO. Nesta concepção foi projetada uma câmara de extinção onde o fluxo forçado de óleo sobre o arco aumenta a eficiência do processo de extinção da corrente com conseqüente redução do volume de óleo do disjuntor.

A existência de uma zona de atuação crítica, na abertura de corrente de valor reduzido quando a quantidade de gases liberada pela decomposição do óleo é menor, favorece a duração do arco e devido a esse efeito foram registrados casos de explosão do disjuntor. Outra limitação dos disjuntores a pequeno volume de óleo é a sua propensão para o reacendimento durante a abertura de pequenas correntes capacitivas onde a solicitação de tensão atinge picos elevados. Nos disjuntores mais modernos essa limitação foi eliminada mediante adição de uma bomba de injeção de óleo sobre o arco que força o fluxo de óleo para a região entre os contatos, incrementando a taxa de crescimento da suportabilidade dielétrica pelo resfriamento intensificado e pela eliminação das bolhas de gás formadas na região entre os contatos. Um outro mecanismo utilizado é a pressurização permanente das câmaras do disjuntor a uma pressão de 6 a 8 bar. Esta sobrepressão é obtida pela injeção de nitrogênio ou ar nas cabeças das unidades após montagem dos disjuntores nos locais de operação. A alta pressão reduz a quantidade de gás liberada durante a interrupção de correntes de pequeno valor e a possibilidade de um bolsão de gás estender-se por todo o espaço entre os contatos após a interrupção do arco.

Nas concepções mais atuais, durante o processo de interrupção de pequenas correntes, ponto crítico para os disjuntores do tipo GVO, o fluxo de óleo necessário ao processo é obtido pelo movimento descendente da haste do contato móvel durante a operação de abertura. O óleo contido na parte inferior do disjuntor é forçado para cima, através da haste oca do contato móvel, agindo imediatamente sobre a base do arco localizado na ponta do contato móvel.

Para interrupção de correntes mais elevadas é utilizado um fluxo de óleo gerado pela própria corrente do arco que é intensificado, gerando sobrepressões e gases e intenso fluxo de óleo que são forçados diretamente na região do arco de modo a facilitar o processo de interrupção sem necessidade de grandes volumes de óleo.

O desempenho deste tipo de disjuntor para manobras capacitivas em cabos e linhas em vazio e bancos de capacitores está limitado a uma tensão máxima de 60 a 65 kV por câmara (COLOMBO, 1990) para uma operação livre de reacendimento, o que torna necessário ter-se várias câmaras em série, dependendo do tipo de disjuntor e da solicitação a que o mesmo está submetido.

4.4.3 Disjuntor a Vácuo

Os primeiros disjuntores a vácuo datam de 1926 quando uma corrente de 900 A na tensão de 40 kV foi interrompida utilizando este dielétrico (COLOMBO, 1990). Em virtude de dificuldades técnicas de produção do vácuo, esses disjuntores só foram fabricados em grande escala a partir da década de 70.

O uso do vácuo como meio isolante permite alta rigidez dielétrica pela inexistência de moléculas ionizáveis. Nos primeiros modelos, os arcos não se extinguíam devido à liberação da camada de gás molecular absorvida pelos eletrodos. Atualmente, a camada de gás pode ser evitada e o arco se mantém devido à vaporização dos metais dos contatos. Esta vaporização fornece os íons positivos e negativos originados da nuvem de partículas metálicas provenientes da evaporação dos contatos que forma o substrato para o arco voltaico.

O processo de extinção do arco neste disjuntor consiste na abertura dos contatos do interruptor no interior de uma câmara de vácuo. Em consequência do alto vácuo (até 10^{-9} bar = 10^{-10} atm) nas câmaras de interrupção, distâncias de 6 a 20 mm entre contatos são suficientes para se obter elevada rigidez dielétrica.

Quando os contatos se separam, uma descarga em forma de vapor metálico é estabelecida pela corrente a ser interrompida que flui através deste plasma até a próxima passagem por zero. O arco é então extinto e o vapor metálico condutivo se condensa sobre superfícies metálicas em poucos microssegundos, restabelecendo rapidamente a rigidez dielétrica entre os contatos. Esta dinâmica permite altas capacidades de ruptura em câmaras relativamente pequenas.

O arco que se forma nos disjuntores a vácuo não é resfriado. O plasma de vapor metálico é altamente condutivo. Disto resulta uma tensão de arco excepcionalmente baixa com valores entre 20 e 200 V. Por este motivo e devido à pequena duração do arco, a energia dispersada no local de extinção é muito reduzida. Isto explica a elevada expectativa de vida elétrica dos contatos.

Em disjuntores a vácuo, não existem produtos de decomposição, pois, aqui se forma apenas o vapor metálico na interrupção de corrente. Como a câmara a vácuo é, ao contrário dos outros tipos de disjuntores, absoluta e hermeticamente soldada, não ocorrem interações com o meio ambiente. Em consequência disto, a câmara não é atingida por sujeira, poeira ou umidade. Dessa

forma evita-se qualquer tipo de oxidação no seu interior. Todos os materiais na câmara são mantidos limpos durante toda sua vida útil.

Nos primeiros projetos, um dos grandes problemas deste tipo de disjuntor era a perda de vácuo no interior de suas câmaras, acarretando na não interrupção da corrente e fundição dos contatos.

Nos disjuntores a vácuo existem dois tipos de arco, a saber:

O *arco difuso*, que se manifesta na interrupção de pequenas correntes, até 10 kA, cuja característica é sua distribuição por toda superfície dos contatos, o que proporciona a partir de diversas propriedades desta formação, a recuperação da rigidez dielétrica entre os contatos de forma extremamente rápida, garantindo uma extinção segura do arco voltaico.

O *arco contraído*, que ocorre em correntes a partir de 10 kA, dependendo do diâmetro e da configuração dos contatos e do grau de homogeneidade do campo elétrico entre os mesmos, do campo magnético e de blindagens na câmara. A partir desta contração é possível localizar o foco de emissão iônica sobre os contatos de alguns milímetros de diâmetro. Segundo (COLOMBO, 1990), a transição do arco difuso para o arco contraído é proporcionada pelo aumento do campo magnético dos vários arcos paralelos com o aumento de corrente. Nesta situação as forças de atração começam a superar as forças termodinâmicas do plasma que sustentavam estes arcos. Os focos de emissão iônica vão se deslocando e se juntam contraindo o arco. A constante de tempo de resfriamento deste arco contraído formado por grande conteúdo de vapor emitido seria muito grande, o que seria muito perigoso, não fosse o efeito do campo magnético gerado pelo próprio arco que o obriga a percorrer todo o contato atuando sob a camada fria do mesmo. Elimina-se assim o efeito de erosão sobre os contatos e evita-se a formação de uma coluna de plasma estável capaz de manter o arco após o zero de corrente.

As aplicações de disjuntor a vácuo estão mais difundidas nas tensões até 38 kV, denotadas como média tensão. Entretanto existem aplicações também em níveis superiores, limitadas a 138 kV. A sua grande aceitação decorre dos seguintes fatos:

- Apresentam grande segurança de operação uma vez que não emitem gases ou chamas;
- Não requerem manutenção nas câmaras de extinção;

- Possuem vida extremamente longa no que se refere à necessidade de manutenção de número de operações;
- Requerem pouca energia mecânica para operação em face do reduzido curso dos contatos necessário para garantir a rigidez dielétrica;
- São adequados para uso em cubículos devido à elevada relação entre a capacidade de ruptura e o volume necessário e para abertura de correntes capacitivas sem reacendimentos;
- São capazes de efetuar religamentos automáticos múltiplos.

A figura 4.1 a seguir (SIEMENS) mostra a participação dos diversos tipos de disjuntores no mercado de equipamentos de média tensão. Observa-se neste gráfico que de 1980 a 2000 a aplicação de disjuntores a vácuo cresceu de 20% para 65% do total de aplicações, enquanto que a de disjuntores a óleo decresceu de 63% para 10%.

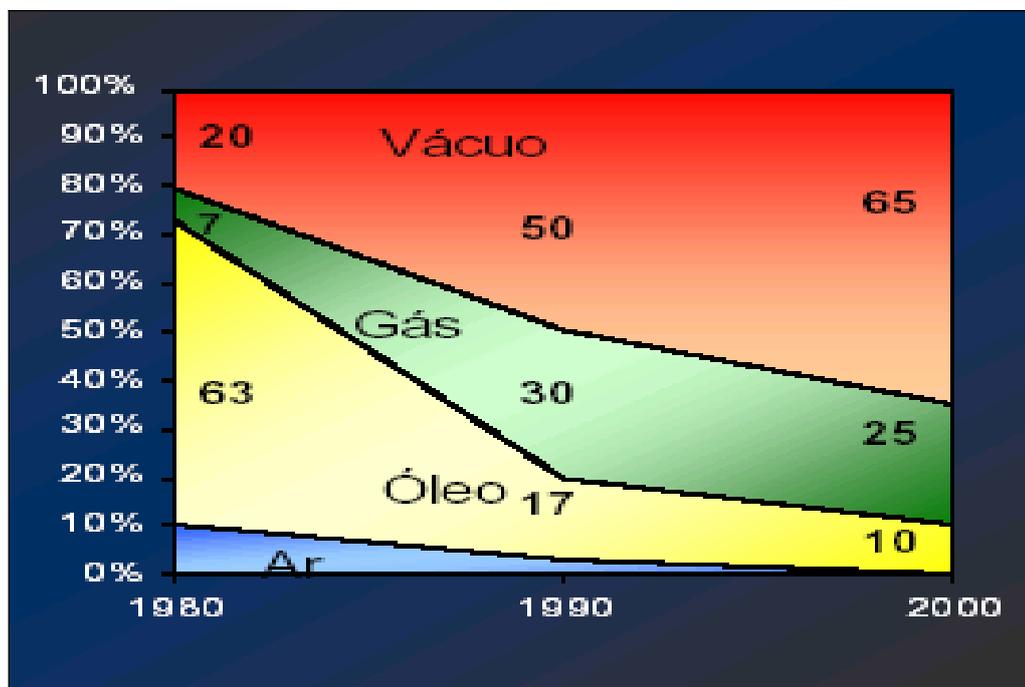


Figura 4.2 – Percentual de participação dos diversos tipos de disjuntores no mercado de fornecimento

As figuras a seguir mostram as partes constituintes de um disjuntor à vácuo.

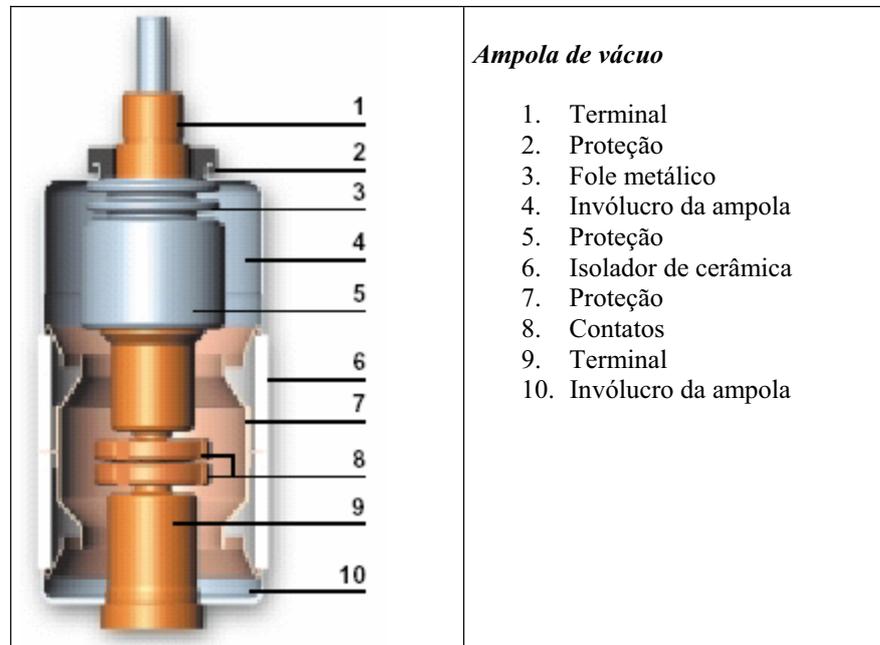


Figura 4.3– Detalhamento de uma ampola de vácuo

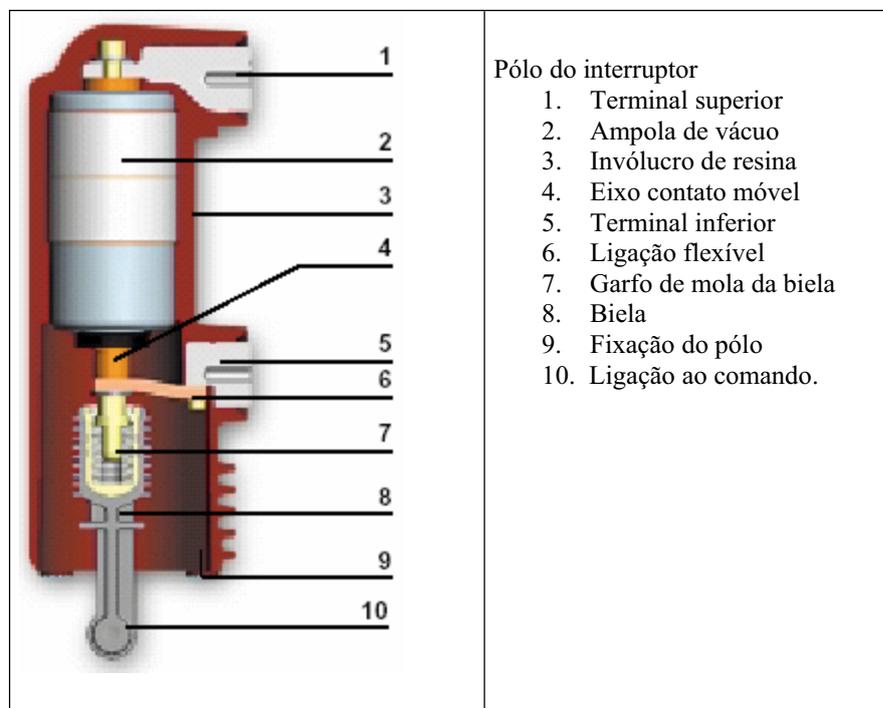


Figura 4.4 – Partes integrantes de um disjuntor a vácuo

4.4.4 Disjuntor a Ar Comprimido

A extinção do arco nos disjuntores a ar comprimido é efetuada a partir da admissão de ar comprimido nas câmaras. Neste tipo de disjuntor, o mecanismo eletropneumático proporciona a operação mecânica do disjuntor pela abertura e fechamento dos contatos e também a extinção do arco. Nesta última função são fornecidas a pressão e quantidade necessárias para concluí-la com sucesso.

O princípio de extinção consiste em criar um fluxo de ar sobre o arco, através de um diferencial de pressão, descarregando o ar comprimido após a extinção para a atmosfera.

Os atuais projetos de disjuntores a ar comprimido utilizam o sistema de sopro axial, em que o arco é distendido e soprado axialmente em relação aos bocais e contatos.

O sistema de sopro pode ser em uma única direção, concepção original, *mono blast*, onde somente um dos contatos é oco, permitindo a saída após a extinção em uma única direção, ou em duas direções, bidirecional ou *dual blast*, onde os contatos fixo e móvel são ocós e o arco expande-se em ambas as direções.

O sistema de pressurização das câmaras, fator muito importante no processo, pode ser dos seguintes tipos:

- Pressurização somente durante a interrupção;
- Pressurização durante a interrupção e na posição de contatos abertos;
- Pressurização permanente.

As desvantagens do disjuntor a ar comprimido são o custo elevado do sistema de geração de ar comprimido e distribuição do ar comprimido em alta pressão por toda subestação na alternativa de centrais de geração o que requer um alto custo de manutenção. No caso de operação próxima a áreas residenciais um fator desfavorável é o alto nível de ruído provocado pela sua atuação, sendo obrigatório o uso de silenciadores nas unidades interruptoras.



Figura 4.5 — Vista completa de um disjuntor a ar comprimido

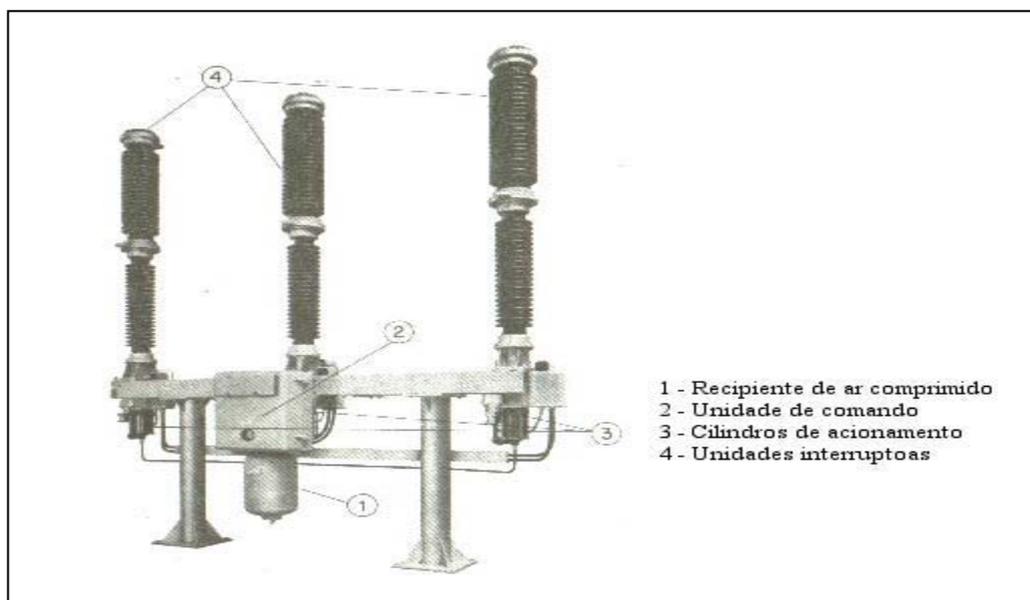


Figura 4.6 — Partes componentes de um disjuntor a ar comprimido

4.4.5 Disjuntor a Hexafluoreto de Enxofre – SF₆

O hexafluoreto de enxofre, SF₆, foi sintetizado pela primeira vez em 1904 (D'AJUZ, 1985) e somente em 1930 esse gás encontrou aplicação como meio isolante em transformadores. Foi no final da década de 1940 que teve início o desenvolvimento de disjuntores e chaves de abertura em carga utilizando o SF₆ como dielétrico após intensivas pesquisas onde ficou comprovado que o mesmo possui propriedades físicas e químicas que o torna um excelente meio isolante e extintor.

É um gás incombustível, incolor, inodoro, quimicamente estável e inerte até cerca de 500 °C, tendo, portanto, um comportamento semelhante ao de um gás nobre. Isto significa que na temperatura ambiente não reage com qualquer outra substância. Esta estabilidade vem do arranjo simétrico dos seis átomos de fluoreto ao redor do átomo de enxofre central e é essa estabilidade que o torna um excelente dielétrico. É formado por uma reação química entre enxofre fundido e gás x

O SF₆ puro é não venenoso, não havendo perigo na sua inalação até em uma mistura de 20% de oxigênio e 80% de SF₆. É aproximadamente, seis vezes mais pesado que ar.

À pressão atmosférica normal, o SF₆ tem uma constante dielétrica 2,5 vezes maior que a do ar. Normalmente o gás é usado a uma pressão de valor equivalente a 5 vezes a pressão atmosférica. Nesta pressão a sua capacidade dielétrica é dez vezes maior que a do ar. A extinção do arco pelo SF₆ ocorre devido à sua forte eletronegatividade. Isso significa que as moléculas do gás capturam elétrons livres e geram íons negativos pesados que não se movem rapidamente.

No momento, os disjuntores mais utilizados em extra-alta tensão são os que possuem o ar comprimido e o SF₆ como meio de extinção. Esta posição de liderança se deve principalmente à sua rapidez de atuação (dois ciclos) e à alta capacidade de recuperação dielétrica do meio de extinção. Os disjuntores a SF₆ estão tomando posição de destaque nas aplicações nos sistemas de potência devido à experiência operacional bem sucedida. Nas tensões de 138 kV, 230 kV, 326 kV, 550 kV e 800 kV é onde esses disjuntores encontram as maiores aplicações. É importante enfatizar que a característica de eletronegatividade do SF₆ favorece a ocorrência de uma rápida recuperação dielétrica, reduzindo a possibilidade de reacendimento do arco. Devido a esta característica, disjuntores a SF₆ são os mais indicados para abertura de linhas em vazio em alta e extra-alta tensão.

Na manobra de bancos de capacitores, onde a característica do disjuntor ter muito baixa

probabilidade de reacendimento é muito importante, esse tipo de disjuntor também tem sido recomendado.

A figura a seguir apresenta uma comparação da tensão suportável do SF₆ a 1 bar e 5 bar de pressão com a do ar e do vácuo em função da distância de isolamento. Nesta figura pode-se observar a superioridade do desempenho do SF₆ como dielétrico a 5 bar de pressão em relação ao ar e até mesmo ao vácuo.

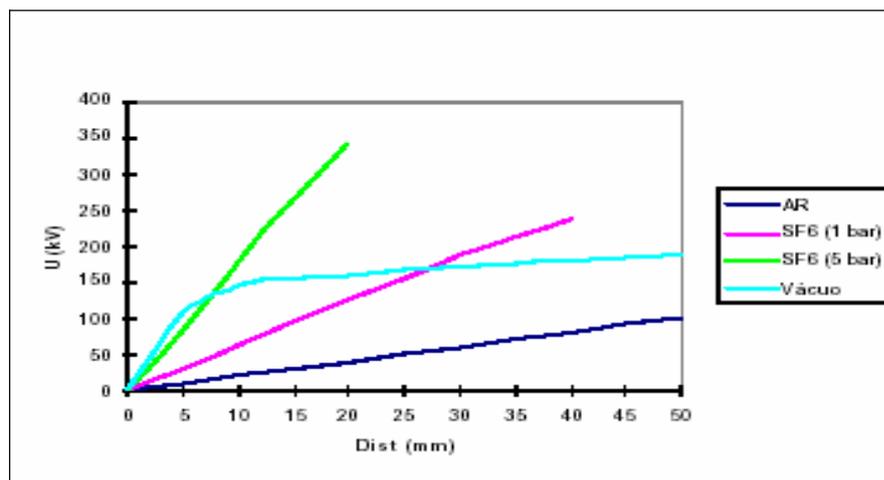


Figura 4.7 – Característica dielétrica de diferentes isolantes

Os disjuntores de *dupla pressão* formaram a primeira geração dos disjuntores a SF₆. Em virtude de suas dificuldades operacionais e da complexidade mecânica do seu projeto, hoje estão praticamente fora de linha de produção. Este tipo de disjuntor é constituído de dois circuitos de pressão. Um de alta pressão de SF₆, 20 bar, geralmente localizado na parte superior do equipamento e outro de baixa pressão, 2,5 bar. O gás é injetado a alta pressão, através de válvulas, do reservatório intermediário de pressão para os bocais de contato extinguindo o arco, o que é feito em sincronismo com a abertura destes contatos pelo mecanismo de transmissão. O gás, agora localizado no lado de baixa pressão, é bombeado para o lado de alta pressão através de um compressor. Devido às suas características construtivas, este tipo de disjuntor possui uma alta potência de interrupção.

Os disjuntores de *pressão única* constituem uma simplificação dos disjuntores de *dupla pressão* e foram desenvolvidos em fins da década de 60. Nesta concepção o gás fica confinado em um sistema fechado com pressão única variando entre 6 e 8 bar, a depender dos requisitos de

abertura especificados, notadamente os que requerem grandes suportabilidades dielétricas tais como abertura de linhas e cabos em vazio, manobra de bancos de capacitores, tensão de restabelecimento transitória para defeito terminal e quilométrico e abertura em oposição de fases.

Nos disjuntores tipo *puffer* – autocompressão, quando os contatos começam a abrir, o pistão provoca, por ocasião do movimento de abertura, uma ligeira compressão de SF₆ dentro da câmara de compressão. O arco se forma entre os contatos. O pistão continua seu curso. Uma pequena quantidade de gás, canalizado pelo duto isolante, é injetado sobre o arco. A distância entre os dois contatos de arco desvia-se então o suficiente para que na passagem de corrente pelo zero esta seja interrompida de modo definitivo em função das qualidades dielétricas do SF₆.

As partes móveis terminam seu curso, enquanto que a injeção de gás frio continua até o momento da abertura completa dos contatos. A figura a seguir ilustra o princípio de funcionamento desse disjuntor:

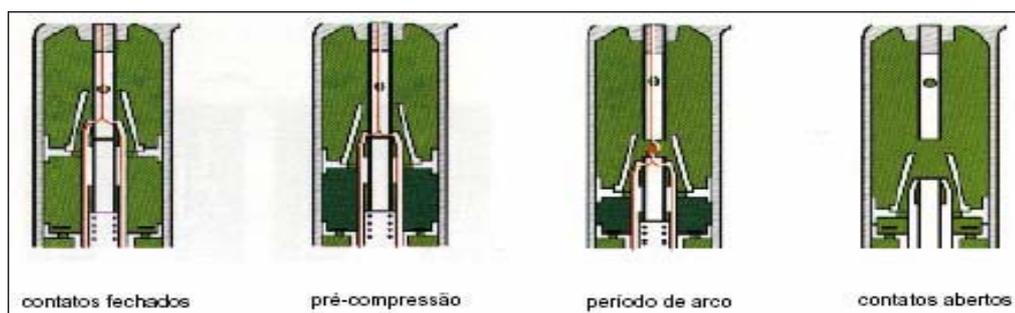


Figura 4.8 – Princípio de funcionamento do disjuntor tipo puffer- autocompressão

Fazendo uma comparação de desempenho do resfriamento do arco elétrico de disjuntores que utilizam outro meio de resfriamento e os disjuntores a SF₆, observa-se que em disjuntores comuns, a gás ou a óleo, utilizam-se meios para resfriar o arco elétrico. Com este processo, o arco elétrico tem sua energia retirada, a fim de evitar o estabelecimento da tensão após a passagem da corrente pelo zero.

Nesse procedimento, o arco elétrico, devido à alta temperatura, altera o meio de extinção a cada nova manobra. Em disjuntores a SF₆, o gás decomposto pode reagir com as partes internas dos terminais de chaveamento. Deve-se tomar cuidado para que o vapor d'água não chegue ao interior do pólo do disjuntor, pois a combinação de materiais do pólo, vapor d'água e SF₆ em

decomposição possibilita a formação de ligações corrosivas como ácido fluorídrico, que, sob certas circunstâncias, causa alterações prejudiciais das superfícies de contato e de alguns isoladores.

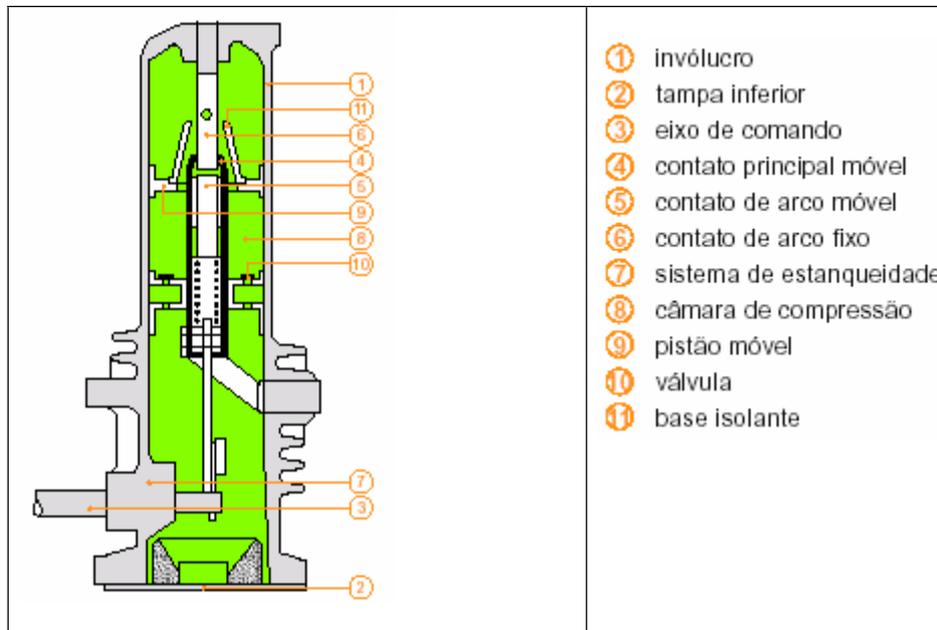


Figura 4.9 – Partes componentes do disjuntor tipo SF₆

Em resumo, a recuperação dielétrica do disjuntor, durante a interrupção de correntes anormais, principalmente as de natureza capacitiva, tem uma forte dependência com o meio de extinção do arco. Portanto, para garantir o sucesso da abertura de uma linha sem carga, pelo menos dois aspectos deverão estar bem quantificados e conhecidos: a suportabilidade dielétrica do disjuntor e as solicitações impostas pelo sistema a esse equipamento durante o chaveamento. A escolha do tipo de disjuntor mais adequado para essa manobra está ligada ao sistema onde o mesmo é aplicado e aos esforços que devem surgir durante o chaveamento. As variáveis importantes a serem levadas em consideração na escolha deste disjuntor são principalmente o custo e a confiabilidade do sistema.

Se for possível assegurar uma boa performance do equipamento nas manobras para as quais o disjuntor está destinado, com um tipo menos dispendioso, porém seguro, este equipamento deve ser escolhido de modo a garantir também a modicidade tarifária para o consumidor final.

Capítulo 5

Metodologias para Estudo de Abertura de Linha em Vazio

5.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo descreve as metodologias normalmente empregadas pelo setor elétrico para análise de abertura de linha em vazio após rejeição de carga e, adicionalmente, apresenta uma metodologia alternativa para quantificar as solicitações dielétricas no disjuntor durante a ocorrência deste fenômeno.

Essas solicitações são caracterizadas basicamente pela magnitude da corrente capacitiva da linha, taxa de crescimento e amplitude da sobretensão que se estabelece através dos contatos do disjuntor durante a abertura e após a extinção do arco elétrico. A abertura de linha em vazio apresenta maiores esforços no disjuntor quando essa ocorre após uma rejeição de carga no sistema, coincidente com uma falta monofásica conforme descrito no Capítulo 3.

As avaliações de rejeição de carga têm por objetivo principal quantificar as sobretensões máximas e sustentadas durante a sua ocorrência, potencialmente capazes de constituir risco para os equipamentos do sistema. As simulações de rejeição de carga abordadas nesta dissertação correspondem à interrupção simples do fluxo de potência através de uma ou mais linhas de transmissão, transformadores ou outro equipamento do sistema. Estes estudos normalmente são efetuados com ou sem a presença de curto-circuito.

5.2 METODOLOGIAS EMPREGADAS PELO SETOR ELÉTRICO NA ANÁLISE DO FENÔMENO

O conhecimento dos esforços no disjuntor durante a abertura de uma linha sem carga não é algo que constitua uma preocupação para todos os agentes integrantes do Sistema Elétrico Brasileiro. Na subtransmissão e na distribuição, onde os equipamentos normalmente são de média e baixa tensão, regra geral, fenômenos dielétricos que provocam solicitações no disjuntor, cujo conhecimento é necessário para especificar esse equipamento de forma adequada à sua aplicação, não são detalhados. Nesses ambientes, as aquisições de disjuntores novos normalmente são feitas mediante oferta, por parte dos fabricantes, de projetos padronizados já existentes no mercado e comercializados em larga escala. É no ambiente dos estudos de engenharia das grandes empresas transmissoras, onde, baseado em análises exaustivas e até conservativas, esses fenômenos são avaliados com bastante detalhes e os resultados destas análises são incluídos nas especificações do equipamento como requisitos básicos.

Nos estudos de transitórios eletromagnéticos para avaliação dos esforços nos disjuntores, decorrentes de rejeição de carga seguida de abertura de linha em vazio, existem duas metodologias amplamente empregadas pelo Setor Elétrico Brasileiro, resumidas a seguir.

5.2.1 Metodologia para Análise de Abertura de Linha em Vazio a partir do Pré-ajuste das Tensões do Sistema e da Frequência das Fontes – Metodologia 1

Esta metodologia de estudo, doravante denominada de **Metodologia 1**, teve sua origem nos critérios elaborados pelo antigo GCPS, Grupo de Critérios de Planejamento de Sistemas da Eletrobrás, e consiste em ajustar todo o sistema selecionado para um perfil de tensão pré-manobra de 1,4 p.u. da tensão nominal do sistema. Ainda de acordo com estes critérios, os parâmetros das linhas e demais componentes da rede são modelados na frequência de 66 Hz. Todas as fontes equivalentes e máquinas consideradas são também sincronizadas para esta frequência.

Estas diretrizes foram preservadas e adotadas pelos agentes integrantes do novo modelo do Setor Elétrico, notadamente pelo Operador Nacional do Sistema - ONS que estabelece no submódulo 2.3, item 7.4, dos Procedimentos de Rede, que os disjuntores devem ser capazes de efetuar, em função das características específicas de cada aplicação e dos requisitos sistêmicos, a

manobra de abertura de linha em vazio com sobretensão 40% e sobrefrequência de 66 Hz sem reacendimento do arco. Contudo, é importante ressaltar que este critério é flexibilizado pelo ONS quando esse, no mesmo submódulo, estabelece que são aceitas frequências inferiores a 66 Hz desde que seja comprovada, mediante estudos, a impossibilidade de a mesma atingir este valor.

De forma geral, em análises efetuadas com essa metodologia, a curva característica de saturação dos equipamentos não lineares, tais como reatores e transformadores, é também considerada para avaliar o efeito deste parâmetro no comportamento das sobretensões. Esse nível de detalhamento é fundamental para a investigação de eventuais ocorrências de ressonâncias ou ferrorressonâncias que são bastante perigosas para o sistema como um todo.

Nesta abordagem, as manobras de abertura de disjuntores de subestações adjacentes não são simuladas, pois se parte da premissa de que, como estes equipamentos levam alguns milissegundos para realizar essa operação, as sobretensões transitórias de manobra do disjuntor do terminal remoto da linha já foram amortecidas, não sendo razoável, segundo a metodologia, simular as oscilações iniciais decorrentes da manobra do disjuntor do outro terminal da linha. Desta forma, o sistema é considerado em uma condição onde já foi atingido o regime permanente dinâmico após a rejeição da carga. Com essa metodologia a rede é analisada nas condições sem e com falta monofásica.

Ainda no que concerne a essa metodologia, é importante esclarecer os seguintes aspectos: o ajuste da sobretensão para 1,4 p.u. visa aumentar a energia reativa envolvida na manobra de abertura da linha e, conseqüentemente, criar condições para que maiores valores de sobretensão fase-terra em cada lado do disjuntor possam ocorrer. Este procedimento dá origem a uma maior solicitação de tensão entre os contatos desse dispositivo no momento da extinção do arco elétrico. A segunda ação, elevação da frequência para 66 Hz, objetiva diminuir o tempo de ocorrência do primeiro pico de tensão que, usualmente para linhas não compensadas, acontece em meio ciclo da frequência considerada, acarretando uma maior taxa de crescimento da sobretensão com conseqüente surgimento de maior solicitação no dielétrico durante a separação dos contatos do disjuntor, nos instantes iniciais após a interrupção do arco elétrico.

Conforme comentado no Capítulo 3 é prática comum o uso de reatores em derivação em linhas de transmissão de grande extensão, para compensar os altos valores de capacitância própria da mesma e reduzir o *Efeito Ferranti*. Entretanto, a presença desses reatores dá origem ao fenômeno de batimento, decorrente da troca de energia entre os elementos capacitivos da linha e o reator,

podendo causar elevadas solicitações de tensão de natureza transitória entre os contatos do disjuntor durante a manobra, a depender do grau de compensação adotado. As normas técnicas ABNT (NBR 7118, 1994) e (IEC 62271-100, 2001) não fazem menção a este tipo de solicitação. Em consequência, quando esta situação é detectada nas análises, o fabricante deve ser notificado e as formas de onda, os valores de sobretensão e a sua taxa de crescimento devem ser informados, sendo necessário estabelecer uma garantia, por parte deste, de que o equipamento ofertado atende aos requisitos especiais solicitados.

A corrente de natureza capacitiva a ser interrompida pelo disjuntor, durante a abertura da linha em vazio, é medida no instante imediatamente anterior à sua interrupção e comparada com os valores de corrente indicados nas normas técnicas. A tabela a seguir lista as amplitudes dessa corrente, apresentadas na ABNT e IEC para os disjuntores com tensões nominais normalmente utilizadas no setor.

Tabela 5.1: Correntes de abertura de linha em vazio para diferentes classes de tensão

Tensão Nominal (kV eficaz)	Corrente Capacitiva (A eficaz)	
	ABNT	IEC
800	1300	900
550	710	500
242	130	125
145	75	50
72,5	30	10

Destaca-se que os valores de corrente capacitiva definidos para os disjuntores, normalizados pela IEC, para as diversas classes de tensão, são inferiores aos constantes da norma ABNT. As correntes de disjuntores com tensão nominal de 550 kV segundo essas duas normas são, em geral, superiores à corrente capacitiva de uma linha em vazio nesta tensão, principalmente em linhas com reatores em derivação.

As análises de sistema quando efetuadas com a Metodologia I podem maximizar as solicitações no disjuntor para o evento de abertura de linha em vazio, tendo como resultado sobretensões entre contatos superiores às esperadas. O valor de sobretensão de 1,4 p.u. para a tensão

pré-abertura provavelmente não permanece nesta magnitude por um tempo equivalente ao da abertura do disjuntor, devido à ação dos reguladores de tensão das máquinas, dos equipamentos de compensação, notadamente dos compensadores estáticos e do próprio amortecimento do sistema, conforme relatado no Capítulo 3. Tendo estes parâmetros em consideração, a aplicação dessa metodologia deve ser então efetuada de forma criteriosa e a tensão entre os contatos e a sua correspondente taxa de crescimento, definidoras das características dos disjuntores durante a abertura de linha em vazio, devem ser comparadas com os valores propostos para essas grandezas nas normas pertinentes e caso esses sejam demasiadamente elevados, uma reavaliação do fenômeno mediante análises com outras metodologias deve ser efetuada de modo a evitar um possível sobredimensionamento do disjuntor.

5.2.2 Metodologia para Análise de Abertura de Linha em Vazio a partir da Rejeição da Carga do Sistema Devida à Abertura dos Disjuntores de um dos Terminais da Linha em Condições Desfavoráveis de Fluxo de Potência e de Tensão - Metodologia 2

Esta metodologia de estudo de abertura de linha em vazio consiste em, preliminarmente, efetuar um elevado nível de degradação no sistema, mediante contingenciamento de várias linhas e até de transformadores de potência localizados na área de influência do fenômeno objeto de análise. Esse procedimento tem como consequência uma redução na potência de curto-circuito e maior fluxo de potência ativa e reativa no circuito, permitindo à rede oscilações de tensão de maior amplitude.

A perda do barramento de subestações adjacentes àquela onde se pretende quantificar os esforços no disjuntor sob análise é também simulada. Quando os disjuntores das subestações remotas são comandados a abrir, o sistema resultante, agora com nova topologia e diferente nível de aterramento, pode ficar submetido a maiores valores de sobretensão. Esta elevação de tensão é decorrente, entre outros fatores, da capacitância das linhas abertas no terminal remoto. Para esta nova condição de rede, o último disjuntor da linha é então manobrado, ficando submetido às solicitações de tensão e corrente impostas pela linha em vazio e pelo sistema.

A abertura da linha em vazio é simulada considerando-se esta em duas condições, a saber: sem defeito e com falta monofásica, aplicada após a abertura de um dos disjuntores dos terminais dessa linha. Para maximizar as solicitações no último disjuntor da linha a abrir, costuma-

se efetuar aplicação de falta após a rejeição de carga, no instante em que ocorre o pico da onda de tensão correspondente à fase cuja elevação de tensão apresenta a maior amplitude. É também feita uma varredura no ponto de aplicação da falta ao longo da linha para determinar o local que causa as maiores sobretensões nas fases sãs. É também pesquisada qual das três fases, a, b ou c, sob falta, provoca maior sobretensão nas fases sadias.

Conforme descrito no Capítulo 3, as fases sãs ficam submetidas a maiores magnitudes de sobretensão sob condição de falta monofásica devido ao deslocamento do neutro e estas sobretensões dependem, também, dos parâmetros da rede elétrica, entre os quais se destacam as relações r_0/x_1 , r_1/x_1 e x_0/x_1 no ponto de falta. Estas relações quantificam, de forma indireta, o nível de aterramento do sistema. As figuras a seguir, (DIESENDORF, 1974), apresentam os vários fatores de sobretensão para diferentes valores dessas relações.

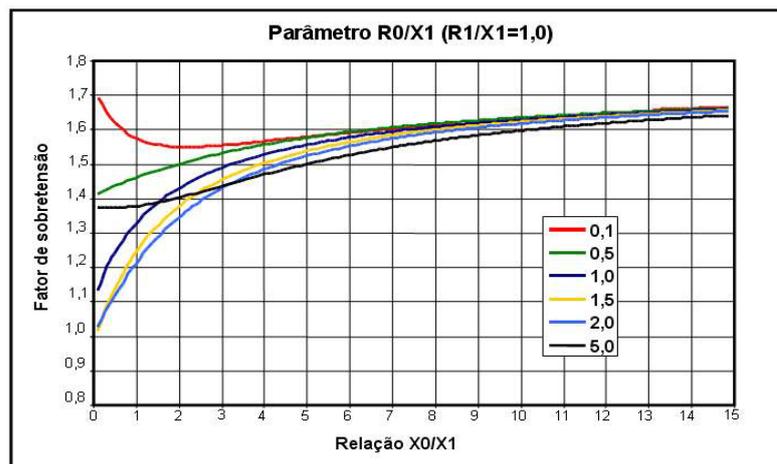


Figura 5.1 – Parâmetro R_0/X_1 ($R_1/X_1=1,0$)

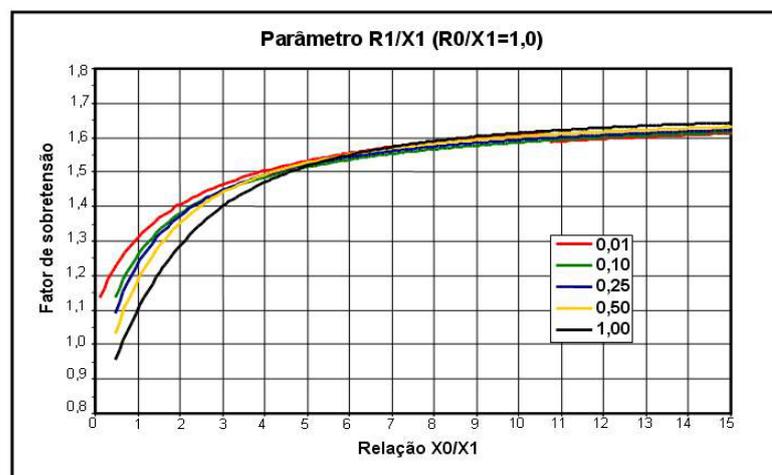


Figura 5.2 – Parâmetro R_1/X_1 ($R_0/X_1=1,0$)

A corrente, de natureza puramente capacitiva antes da abertura, e a tensão que se estabelece entre os contatos do disjuntor são então verificadas. Uma série de casos é simulada com vistas a determinar as piores condições de tensão para o disjuntor. São também investigadas as seguintes situações:

- Contingência de reator derivação para o caso de linhas compensadas;
- Presença de compensação série, quando prevista pelo planejamento;
- Compensação série fora de operação.

A análise dessas diversas condições de sistema tem por objetivo garantir que as situações anormais de serviço mais relevantes, capazes submeter o disjuntor a uma solicitação superior à sua suportabilidade, sejam investigadas. A ocorrência destes eventos tem como consequência o reacendimento do arco, logo após a sua extinção, com conseqüente escalada de tensão entre os contatos do disjuntor (GREENWOOD, 1971), (SOLVER, 1998) pondo em risco a integridade do equipamento de manobra e de outros componentes da instalação.

O uso dessa metodologia apresenta as seguintes limitações e imprecisões:

- Nas avaliações, as sobrefreqüências que podem ocorrer durante a rejeição da carga do sistema não são investigadas. Os valores das sobretensões fase-terra, a tensão de restabelecimento entre os contatos do disjuntor e a taxa de crescimento dessa tensão dependem diretamente da freqüência. Maiores valores para este parâmetro ocasionam maiores solicitações dielétricas entre os contatos do disjuntor, podendo gerar reignições ou reacendimentos.

- As sobretensões obtidas na freqüência de 60 Hz são incorporadas nas especificações técnicas para realização de testes nos disjuntores a uma freqüência de 66 Hz.

5.3 METODOLOGIA ALTERNATIVA PARA ANÁLISE DO FENÔMENO DE ABERTURA DE LINHA EM VAZIO

As formas de análise de abertura de linha em vazio após rejeição de carga, apresentadas nos itens anteriores, partem de premissas que, conforme já comentado, podem, pelo menos para

subsistemas específicos, não corresponder à situação real da malha de transmissão, durante a ocorrência da manobra. A tensão e a frequência da rede elétrica durante uma rejeição de carga não necessariamente permanecem invariantes em relação ao valor de regime permanente pré-existente ou atingem os valores de 1,40 p.u. e 66 Hz, respectivamente. Portanto, é de toda conveniência quantificar o fenômeno a partir de condições iniciais que reproduzam, da forma mais próxima possível, a situação do sistema, com relação à tensão e frequência, imediatamente antes da manobra de abertura do último disjuntor da linha.

Neste item, essa outra forma de análise do fenômeno de abertura de linha em vazio pelo disjuntor é apresentada.

Este método de avaliação, denominado de **Metodologia Alternativa**, consiste em simular a manobra de abertura de linha em vazio sempre adotando, como condições iniciais para montagem do fluxo de carga, os resultados obtidos dos casos mais severos derivados dos estudos de transitórios eletromecânicos.

As máximas sobretensões observadas nesse regime devem estar em concordância com a curva de suportabilidade dos equipamentos para as sobretensões sustentadas. Essas solicitações ocorrem quando já houve a abertura prévia de um dos terminais da linha, ficando esta sem carga e ainda conectada ao outro terminal, que pode ser, segundo o sentido do fluxo, o emissor ou o receptor. O nível de esforço dielétrico a que o equipamento fica submetido, nesta situação, depende de vários fatores a serem detalhados neste capítulo.

Procura-se, nesta avaliação, incorporar todos os aspectos de sistema capazes de influenciar os resultados das simulações, de forma a garantir uma análise mais precisa da manobra. Notadamente para o caso de manobra de abertura da linha em vazio pelo disjuntor, as peculiaridades da rede e as condições imediatamente anteriores à separação dos contatos e extinção do arco devem ser consideradas, de forma a diferenciar essa metodologia das demais.

Os itens, a seguir, detalham, de forma sistemática, os aspectos importantes para dar suporte à análise de abertura de linha sem carga segundo essa metodologia, apresentando comentários sobre a importância de sua utilização no estudo.

5.3.1 Fluxo de Carga para a Análise de Abertura

Os fluxos de carga necessários para estabelecer as condições pré-abertura durante rejeição de carga devem ser obtidos a partir dos estudos dinâmicos efetuados para o empreendimento sob análise.

Observa-se que as análises exaustivas das várias situações de topologia derivadas de contingenciamento de linhas e equipamentos são efetuadas, preferencialmente, neste regime de operação, pois, nestas condições, o esforço computacional para montagem e estudo desses casos é bem menor e apresenta significativas facilidades quando comparado com o dispensado durante estudo de transitórios eletromagnéticos, realizado com o programa ATP (Alternative Transients Program). Todas as situações passíveis de ocorrência e todas as condições críticas de topologia do sistema são inicialmente processadas com ferramentas mais simples, tais como o ANATEM (Análise de Transitórios Eletromecânicos), do Cepel. Os casos mais críticos observados nestas análises são então selecionados para simulações com maior rigor de detalhes com o programa ATP. Com esta última ferramenta, a representação mais precisa dos componentes, incluindo, entre outros aspectos, a curva de saturação dos equipamentos não lineares e presença de pára-raios é considerada.

5.3.2 Curvas de Tensão versus Frequência versus Tempo dos Geradores

Conforme relatado no item 5.2, a representação do sistema para análise de abertura de linha em vazio a partir de uma tensão pré-abertura de 1,4 p.u. e de uma frequência de 66 Hz pode ser demasiadamente conservativa e ter como conseqüência o sobredimensionamento dos disjuntores. Por outro lado, executar a abertura de linha sem considerar elevação da tensão ou da frequência devida à manobra pode também ser otimista e levar o sistema a situações de risco.

A proposta apresentada neste trabalho consiste em selecionar previamente, através de estudos dinâmicos, referenciados no item anterior, as condições de maior severidade para o sistema no que concerne às sobretensões sustentadas, levantar as curvas tensão versus tempo e frequência versus tempo das máquinas nesta situação e efetuar os estudos de abertura do disjuntor considerando estes parâmetros no estabelecimento das condições pré-abertura. Deve-se garantir que haja uma correspondência entre o instante da abertura da linha, pelo disjuntor, com o valor da

sobretensão e sobrefrequência do sistema naquele momento.

Os fluxos de carga do sistema relativos aos pontos de operação selecionados devem ser também obtidos dos estudos de estabilidade dinâmica para subsidiar a modelagem do sistema no programa ATP, estabelecendo, assim, as condições pré-abertura. É esperado que, senão para o sistema como um todo, mas pelo menos para partes específicas do mesmo, nesta condição de operação, as sobretensões e a taxa de crescimento da tensão de restabelecimento, observadas entre os contatos do equipamento durante a manobra, permitam o uso de disjuntores com menor número de câmaras, hoje ofertados no mercado por muitos fabricantes, propiciando uma redução do custo do equipamento e do empreendimento como um todo. Adicionalmente se enseja que maior quantidade de proponentes possa participar da licitação de fornecimento, o que é provável quando se propõe a aplicação de equipamentos padronizados.

A Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL, em consonância com os Procedimentos de Rede, submódulo 2.3, antes detalhado, estabelece nos editais de leilão de novas linhas de transmissão que o disjuntor deve ser capaz de suportar entre os seus contatos uma tensão correspondente a 2,8 p.u. da tensão nominal do sistema a uma frequência de 66 Hz. Seguindo a orientação dos procedimentos de rede, ainda propõem que caso a transmissora demonstre através de estudos que as maiores sobretensões e sobrefrequências prováveis de acontecer na rede são inferiores aos valores exigidos pela Agência, essas novas grandezas são aceitas e os disjuntores podem ser adquiridos de acordo com essas novas características. Sob este aspecto, a metodologia aqui apresentada está perfeitamente de acordo com os objetivos da ANEEL de se especificar equipamentos com características adequadas à sua aplicação específica, sem majorações desnecessárias e sem risco de sobredimensionamento que implicam em custos mais elevados.

É importante observar que, apesar das sobretensões e a sua taxa de crescimento durante a abertura de linha em vazio serem parâmetros dominantes no dimensionamento da câmara do disjuntor, a sua suportabilidade não é determinada unicamente pelas solicitações decorrentes desta manobra. Considera-se igualmente importante investigar outros fenômenos tais como a TRT durante a eliminação defeitos terminal trifásico e quilométrico, além da abertura em oposição de fases, mediante simulações digitais em partes de interesse do sistema. Estas análises têm por objetivo averiguar a possibilidade de redução dos esforços na câmara provocados por estes fenômenos. A partir dos resultados, as especificações técnicas dos disjuntores devem ser reavaliadas, otimizando as suas características básicas e comparando esses novos requisitos com os

valores de suportabilidade dos disjuntores ofertados pelo mercado de equipamentos, de forma a validar a sua aplicação.

5.3.2 Tempo de Arco Mínimo do Disjuntor

No Capítulo 3 foi observado que o tempo de arco do disjuntor é determinado pela sua capacidade térmica de interrupção, pelos parâmetros elétricos do sistema e por características inerentes ao seu projeto. Foi também visto que esse parâmetro tem grande influência na característica de suportabilidade dielétrica do equipamento. Desta forma, caso se tenha definido, a priori, o tipo de disjuntor a ser aplicado e se disponha do seu tempo de arco mínimo, deve-se considerar esse parâmetro nas simulações de abertura de linha em vazio.

5.3.4 Simulações dos Transitórios de Abertura

Tendo em consideração os elementos apresentados nos itens anteriores e principalmente aqueles tidos como relevantes na maximização das solicitações nos disjuntores durante a manobra de rejeição de carga seguida de abertura de linha em vazio, devem ser efetuadas as avaliações necessárias para garantir a especificação do disjuntor com segurança e aderência à realidade do sistema. Essa especificação deve assegurar a confiabilidade do equipamento durante a execução da manobra em toda sua vida útil esperada sem pôr em risco o sistema ou provocar a interrupção do suprimento de energia.

Capítulo 6

Análises de Sistema Segundo as Metodologias Apresentadas e Comparação dos Resultados

6.1 INTRODUÇÃO

Nos capítulos anteriores foi mostrada a importância do conhecimento e da modelagem adequada das características do sistema e do disjuntor para determinação das solicitações de tensão e estabelecimento da suportabilidade térmica e dielétrica entre os contatos desse equipamento durante a manobra de abertura de linha em vazio. Foram também ressaltados os aspectos mais relevantes a serem considerados nas análises desse tipo de chaveamento.

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações de manobra de abertura de linha em vazio após rejeição de carga, efetuadas na linha de transmissão de 500kV Teresina–Sobral–Fortaleza, segundo circuito, em conformidade com as metodologias apresentadas no Capítulo 5. Adicionalmente é feita uma comparação dos requisitos obtidos para os disjuntores da linha segundo essas diferentes metodologias.

6.2 CONDIÇÕES DE SISTEMA

A seguir, são detalhadas as configurações do sistema e os dados utilizados nas simulações:

6.2.1 Configuração do Sistema

A Figura 6.1 mostra a rede elétrica selecionada para análise do fenômeno de abertura de linha em vazio. Esse sistema elétrico é parte integrante da Rede Básica da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco – Chesf, responsável pelo suprimento de energia aos estados do Nordeste do Brasil exceto, o Maranhão.

A configuração refere-se ao ano 2005.

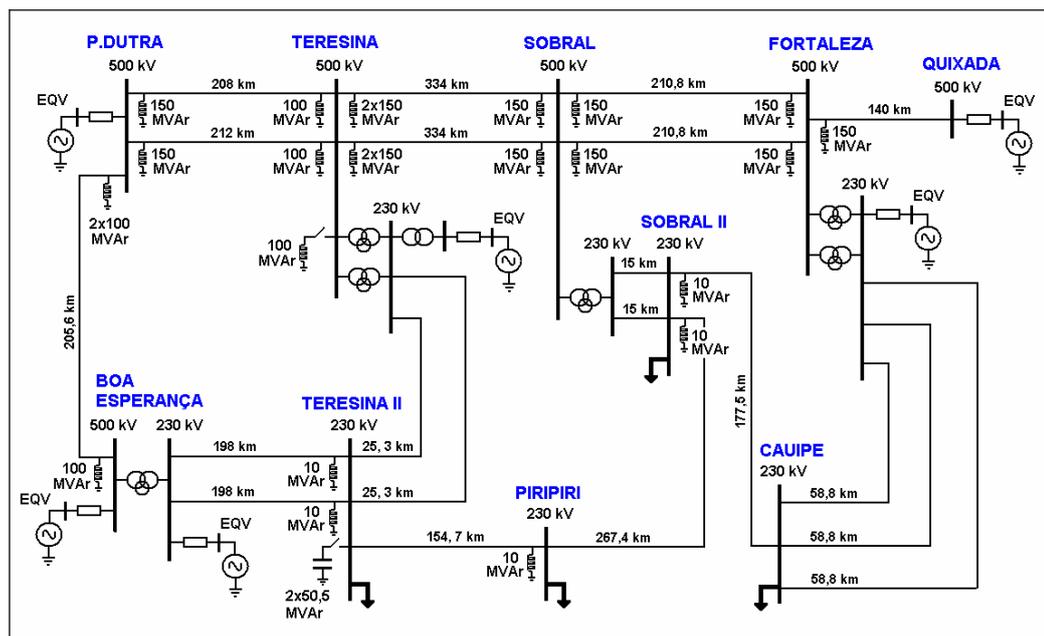


Figura 6.1 – Rede Básica 500 e 230kV da Chesf selecionada para estudo

Nessa representação da rede, considera-se uma modelagem detalhada do sistema de transmissão de 500 kV e 230 kV nos trechos compreendidos entre as subestações de P.Dutra, Teresina, Sobral e Fortaleza. O sistema externo a esses trechos é modelado por meio de equivalentes de Thévenin, sendo as potências de curto-circuito calculadas com o uso do programa

ANAFAS (Análise de Falhas Simultâneas), do Cepel.

Os equivalentes são escolhidos e localizados de modo a garantir que as frequências envolvidas no fenômeno durante os estudos de transitórios e as reflexões características das manobras não comprometam a precisão dos resultados.

6.2.2 Dados dos Componentes

Na montagem do sistema, apresentado na Figura 6.1, são utilizados os seguintes modelos para os diversos equipamentos existentes:

Pára-raios - nas simulações de transitórios eletromagnéticos, em cada extremidade da linha de transmissão sob análise é representado um conjunto de pára-raios de óxido de zinco (ZnO) com tensão nominal de 420kV, representado pela sua curva característica $V \times I$ através do modelo 92 do ATP.

Disjuntores - os disjuntores são modelados por chaves simples.

Linhas de Transmissão - para efeito de simulação considera-se a linha de transmissão modelada por parâmetros distribuídos continuamente transpostos (*Clarke Model*).

Cargas – são representadas por impedâncias constantes correspondentes à tensão e potência obtidas dos fluxos de carga de referência.

Reatores – são representados pelas suas curvas $\varphi \times I$.

Tensão interna das máquinas e atrás da reatância equivalente de Thevenin – para estudos de rejeição de carga seguida de abertura de linha em vazio em conformidade com a Metodologia 1, é considerado um valor de tensão atrás da reatância subtransitória ou do equivalente de Thevenin que resulte em uma tensão pré-manobra de 1,4 p.u. da tensão nominal do sistema nas barras de interesse. Para a Metodologia 2 esta tensão é ajustada de forma a se obter um valor 1,10 p.u. nos barramentos de 500 kV. Esse valor corresponde à máxima tensão operativa do sistema em regime permanente. Na Metodologia Alternativa, este dado é obtido a partir dos estudos dinâmicos, mais precisamente das curvas tensão x tempo e frequência x tempo resultantes de rejeição de carga.

Os parâmetros elétricos relativos aos equipamentos, equivalentes e linhas de transmissão estão apresentados no Apêndice B.

6.3 ESTUDOS DE REJEIÇÃO DE CARGA NA FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL

Os equipamentos instalados nas redes de alta e extra-alta tensão normalmente são dimensionados tomando por base o desempenho do sistema em condições de regime permanente, regime dinâmico e durante os transitórios eletromagnéticos.

Nessas condições são definidas as características elétricas principais necessárias para elaboração das suas especificações técnicas.

Os estudos dinâmicos, que abrangem análises de energização, religamento e rejeição de carga, são importantes no dimensionamento do montante de compensação de potência reativa, suficiente para evitar sobretensões transitórias ou sustentadas que possam comprometer a integridade dos equipamentos conectados ao sistema, em consequência de manobras programadas ou impestivas dos circuitos na região onde a linha está instalada. Estas análises têm também como objetivo subsidiar os estudos de transitórios eletromagnéticos, notadamente nas análises de rejeição de carga seguida de abertura de linha em vazio e estudos de abertura em oposição de fases nesse regime.

Dentro desse enfoque, de forma a dar um embasamento à Metodologia Alternativa proposta nesse trabalho, são efetuadas simulações de rejeição de carga na frequência fundamental em cada um dos terminais da linha de transmissão de 500 kV Teresina – Sobral – Fortaleza, para diversas condições de distúrbio e de topologia do sistema. Nessa etapa são também pesquisadas possíveis ocorrências de sobretensões sustentadas proibitivas para os equipamentos envolvidos na manobra. Os fluxos de carga necessários para estabelecer as condições do sistema imediatamente antes da abertura do disjuntor são derivados dessas análises.

6.3.1 Sobretensões Dinâmicas Devidas à Rejeição de Carga

Nos estudos de transitórios eletromecânicos aqui apresentados, as simulações de rejeição de carga são efetuadas mediante interrupção simples do fluxo de potência passante em cada

trecho da linha de transmissão 500 kV Teresina-Sobral-Fortaleza. Esta situação é mais severa que a simples perda da carga de uma das subestações terminais da linha sem a abertura dos seus disjuntores.

Essas análises são efetuadas para os casos mais críticos de carga e intercâmbio entre os sistemas Norte e Nordeste para a estabilidade do sistema interligado.

Para atender a essas premissas, a rede elétrica é modelada em condições de carga leve, no ano 2005, em duas situações de operação, a saber:

1 - Com o autotransformador 550/230kV – 600MVA na subestação de Sobral, Nordeste importando 2300 MW da região Norte.

2 - Sem o autotransformador 550/230kV – 600MVA na subestação de Sobral, Nordeste importando 1875 MW da região Norte.

Nessas duas condições são avaliadas as sobretensões máximas e temporárias prováveis de ocorrer na presença de grandes distúrbios no sistema interligado.

As condições de sistema que dão origem às solicitações mais graves para os equipamentos na área de interesse dos estudos, bem como os resultados das simulações dinâmicas, são apresentadas a seguir nas Tabelas 6.1 e 6.2. Estes casos foram selecionados a partir do relatório LT 500 kV Teresina II – Sobral III – Fortaleza II – Projeto Básico Parte II – Relatório de Estudo de Sistema, onde é avaliado o desempenho dinâmico do sistema em presença de grandes perturbações e em diferentes condições de carga e intercâmbio.

A partir dos resultados listados nessas tabelas é feita uma seleção do caso mais severo em cada trecho, para avaliar o comportamento do sistema, nessa situação, durante o período do transitório eletromagnético.

As análises transitórias são necessárias para complementar os estudos de sobretensões à frequência fundamental, uma vez que as verificações efetuadas nesta condição não são suficientes para definir, de forma segura, todo o comportamento do sistema em condições anormais de serviço e as sobretensões máximas que podem ocorrer e solicitar os isolamentos dos equipamentos.

A ação de outros componentes, tais como pára-raios, e representação mais detalhada dos equipamentos, a exemplo da inserção das curvas de saturação dos transformadores e reatores, pode

influenciar o comportamento dessas sobretensões e sobrecorrentes no sentido de atenuar ou aumentar a sua amplitude pela superposição das tensões e correntes harmônicas geradas com as componentes de frequência fundamental em decorrência da operação dos equipamentos na região de saturação.

A Tabela 6.1 resume as sobretensões e frequências resultantes da abertura simples das linhas 500kV Teresina – Sobral, ora em Teresina, ora em Sobral e Sobral – Fortaleza ora em Sobral, ora em Fortaleza, nas condições de malha descritas acima, com e sem defeito monofásico na linha. Estas análises também são efetuadas para as situações de perda do barramento das subestações de Teresina, Sobral e Fortaleza, com e sem defeito nesse barramento, seguido de abertura dos dois circuitos sobre a subestação adjacente a eles conectada. Os resultados obtidos nessa última condição estão apresentados na Tabela 6.2.

De forma geral, como esperado, em todas as situações analisadas, as sobretensões resultantes são mais severas para a perda do barramento do que as obtidas durante a abertura simples de uma das linhas do trecho em análise. Na primeira situação, além das conseqüências da abertura da linha, tem-se o efeito da rejeição da carga que acarreta sobretensão adicional na barra da subestação remota onde a linha permanece conectada, em decorrência da sobreexcitação das máquinas do sistema.

Sabe-se que a possibilidade de perda do barramento de uma subestação de 500kV é um evento de baixa probabilidade de ocorrência, por ter esse barramento configuração de arranjo em anel ou em disjuntor e meio. Contudo, quando se trata de especificar equipamentos, as situações mais severas e pouco prováveis de se verificar devem ser estudadas, de modo a se ter em consideração todos os estados indesejáveis a que o sistema pode estar submetido. Desta forma presume-se que essa situação deve ser objeto de análise.

Tabela 6.1: Sobretensões dinâmicas nas SEs Teresina, Sobral e Fortaleza devidas a abertura simples das linhas Teresina-Sobral e Sobral-Fortaleza sem defeito e com falta monofásica na linha. Tensão base 500kV

C A S O	Descrição	Curto-circuito monofásico durante 100ms no terminal de	Sobretensão máxima (pu)	Sobretensão sustentada (pu)	Sobrefrequência máxima (Hz)	F I G U R A
1	SE Teresina (TSD) Abertura simples da LT TSD-SBT sobre TSD permanecendo conectada em TSD	-	1,0941	1,090	60,00	
2	com o autotransformador 550/230kV de SBT em operação	SBT	1,1785	1,090	60,07	
3	SE Sobral (SBT) Abertura simples da LT TSD-SBT sobre SBT permanecendo conectada em SBT	-	1,1180	1,109	60,00	
4	com o autotransformador 550/230kV de SBT em operação	TSD	1,2453	1,109	60,05	
5	SE Teresina (TSD) Abertura simples da LT TSD-SBT sobre TSD permanecendo conectada em TSD	-	1,0927	1,090	60,00	
6	sem o autotransformador 550/230kV de SBT	SBT	1,1883	1,090	60,08	
7	SE Sobral (SBT) Abertura simples da LT TSD-SBT sobre SBT permanecendo conectada em SBT		1,1000	1,097	60,00	
8	sem o autotransformador 550/230kV de SBT em operação	TSD	1,2530	1,097	60,08	C1
9	SE Sobral (SBT) Abertura simples da LT SBT-FZD sobre SBT permanecendo conectada em SBT	-	1,1150	1,114	60,00	
10	com o autotransformador 550/230kV de SBT em operação	FZD	1,2462	1,114	60,07	
11	SE Fortaleza (FZD) Abertura simples da LT SBT-FZD sobre FZD permanecendo conectada em FZD		1,100	1,097	60,00	
12	com o autotransformador 550/230kV de SBT em operação	SBT	1,2616	1,097	60,05	C2
13	SE Sobral (SBT) Abertura simples da LT SBT-FTZ sobre SBT permanecendo conectada em SBT	-	1,1075	1,107	60,00	
14	sem o autotransformador 550/230kV de SBT	FZD	1,2450	1,107	60,09	
15	SE Fortaleza (FZD) Abertura simples da LT SBT-FTZ sobre FZD permanecendo conectada em FZD	-	1,0832	1,078	60,00	
16	sem o autotransformador 550/230kV de SBT	SBT	1,2581	1,078	60,07	

Tabela 6.2: Sobretensões dinâmicas nas SEs Teresina, Sobral e Fortaleza devidas a abertura dupla das linhas Teresina-Sobral e Sobral-Fortaleza sem defeito e com falta monofásica no barramento
Tensão base 500kV

CASO	Descrição	Curto-circuito monofásico durante 100ms no barramento de	Sobretensão máxima (pu)	Sobretensão sustentada (pu)	Sobrefrequência máxima (Hz)	FIGURA
17	SE Teresina (TSD) Abertura dupla da LT TSD-SBT sobre TSD permanecendo conectada em TSD	-	1,1415	1,102	60,04	
18	com o autotransformador 550/230kV de SBT em operação	SBT	1,1984	1,102	60,09	
19	SE Sobral (SBT) Abertura dupla da LT TSD-SBT sobre SBT permanecendo conectada em SBT	-	1,1839	1,124	60,04	
20	com o autotransformador 550/230kV de SBT em operação	TSD	1,3565	1,124	60,04	C3
21	SE Teresina (TSD) Abertura dupla da LT TSD-SBT sobre TSD permanecendo conectada em TSD	-	1,1453	1,112	60,04	
22	sem o autotransformador 550/230kV de SBT	SBT	1,1965	1,112	60,07	
23	SE Sobral (SBT) Abertura dupla da LT TSD-SBT sobre SBT permanecendo conectada em SBT	-	1,1154	1,108	60,03	
24	sem o autotransformador 550/230kV de SBT	TSD	1,3565	1,108	60,12	
25	SE Sobral (SBT) Abertura dupla da LT SBT-FZD sobre SBT permanecendo conectada em SBT	-	1,1851	1,154	60,02	
26	com o autotransformador 550/230kV de SBT em operação	FZD	1,2695	1,154	60,08	
27	SE Fortaleza (FZD) Abertura dupla da LT SBT-FZD sobre FZD permanecendo conectada em FZD	-	1,1000	1,090	60,02	
28	com o autotransformador 550/230kV de SBT em operação	SBT	1,2348	1,090	60,03	
29	SE Sobral (SBT) Abertura dupla da LT SBT-FTZ sobre SBT permanecendo conectadas em SBT	-	1,2307	1,194	60,03	
30	sem o autotransformador 550/230kV de SBT	FZD	1,2944	1,194	60,08	C4
31	SE Fortaleza (FZD) Abertura dupla da LT SBT-FTZ sobre FZD permanecendo conectadas em FZD	-	1,0832	1,055	60,02	
32	sem o autotransformador 550/230kV de SBT	SBT	1,2353	1,055	60,06	

Observa-se nessas tabelas que as sobretensões sustentadas não ultrapassam o nível de 1,20 p.u. (600kV) nas várias situações estudadas e, portanto, estão compatibilizadas com os limites preconizados pelos critérios do (CCPE, 2001).

A minimização dos esforços computacionais de simulação dos transitórios eletromagnéticos de abertura de linha em vazio após rejeição de carga, de acordo com as diretrizes estabelecidas na Metodologia Alternativa, pode ser conseguida a partir de uma análise prévia dos resultados apresentados nas Tabelas 6.1 e 6.2.

Um estudo detalhado das situações apresentadas nessas tabelas mostra que, de forma geral, as operações de abertura simples de linha apresentam sobretensões dinâmicas bem menores que as observadas na condição de perda do barramento das subestações. Essa última situação se torna mais grave quando a perda do barramento é provocada pela ocorrência de uma falta monofásica no mesmo.

É conveniente que apenas os casos mais severos, observados nos estudos de estabilidade dinâmica em cada trecho da linha Teresina – Fortaleza, sejam modelados com maior nível de precisão no programa ATP.

Dessa forma, partindo das premissas estabelecidas anteriormente para selecionar as situações de distúrbios que devem ser analisadas com maior nível de detalhes, recomenda-se simular com o auxílio do programa de análise de transitórios, ATP, os seguintes casos listados a seguir, extraídos da Tabela 6.2, decorrentes da perda do barramento de 500kV das subestações do eixo Teresina – Fortaleza, devido a uma falta monofásica nesse barramento:

1 - Abertura dupla da LT Teresina - Sobral sobre Teresina, permanecendo conectada em Teresina, devida a curto no barramento de Sobral, com o autotransformador 550/230kV desta subestação em operação – Caso 18;

2 - Abertura dupla da LT Teresina - Sobral sobre Sobral permanecendo conectada em Sobral, devida a curto no barramento de Teresina, com o autotransformador 550/230kV de Sobral em operação – Caso 20;

3 - Abertura dupla da LT Teresina - Sobral sobre Teresina, permanecendo conectada em Teresina, devida a curto no barramento de Sobral, com o autotransformador 550/230kV desta subestação fora de operação – Caso 22;

4 - Abertura dupla da LT Teresina - Sobral sobre Sobral, permanecendo conectada em Sobral, devida a curto no barramento de Teresina, com o autotransformador 550/230kV de Sobral fora de operação – Caso 24;

5 - Abertura dupla da LT Sobral - Fortaleza sobre Sobral permanecendo conectada em Sobral, devida a curto no barramento de Fortaleza, com o autotransformador 550/230kV de Sobral em operação – Caso 26;

6 - Abertura dupla da LT Sobral - Fortaleza sobre Sobral permanecendo conectada em Sobral, devida a curto no barramento de Fortaleza, com o autotransformador 550/230kV de Sobral em operação – Caso 28;

7 - Abertura dupla da LT Sobral - Fortaleza sobre Sobral permanecendo conectada em Sobral, devido a curto no barramento de Fortaleza, com o autotransformador 550/230kV de Sobral fora de operação – Caso 30;

8 - Abertura dupla da LT Sobral - Fortaleza sobre Fortaleza, permanecendo conectada em Fortaleza, devida a curto no barramento de Sobral, com o autotransformador 550/230kV de Sobral fora operação – Caso 32.

6.3.2 Curvas de Tensão Versus Tempo e Freqüência Versus Tempo

As curvas de tensão versus tempo e freqüência versus tempo, obtidas das simulações dinâmicas para os sistemas de interesse, são de grande relevância no embasamento dos estudos apresentados neste trabalho, pois permitem avaliar, com adequado nível de precisão, para as contingências mais severas na rede elétrica, qual o maior valor esperado de freqüência e tensão durante o regime permanente dinâmico da rejeição de carga, no instante da abertura da linha em vazio pelo disjuntor.

Esta informação é básica para a especificação dos requisitos do disjuntor a ser projetado pelo fabricante e garantir que os ensaios de abertura de linha em vazio efetuados nesse equipamento sejam bem sucedidos. Ademais, este parâmetro pode ter impacto direto no dimensionamento do disjuntor sendo, em parte, definidor do número mínimo de câmaras que esse deve possuir.

As normas técnicas não estabelecem frequência superior à nominal para os ensaios de abertura de linha em vazio. Entretanto, caso se visualize nos estudos dinâmicos, situações em que na condição de rejeição de carga surgem frequências superiores à nominal, o maior valor obtido deve ser especificado.

É possível constatar nas simulações dinâmicas efetuadas e apresentadas nas Tabelas 6.1 e 6.2 que não são esperadas sobrefrequências preocupantes durante a ocorrência de distúrbios no sistema em análise e que os disjuntores podem ser especificados para abrir a linha Teresina-Sobral-Fortaleza em vazio na frequência de 60 Hz.

6.4 ANÁLISES DOS TRANSITÓRIOS DE ABERTURA DE LINHA EM VAZIO

Neste item são apresentados os resultados das simulações de transitórios eletromagnéticos de abertura de linha em vazio efetuadas para a LT 500 kV Teresina-Sobral-Fortaleza, após rejeição de carga, sem e com falta monofásica para a terra no barramento ou na linha. Nessa última situação os tempos de abertura dos pólos do disjuntor são ajustados para que o pólo correspondente à fase em falta seja o último a abrir. As análises são efetuadas considerando as três metodologias apresentadas nessa dissertação, conforme descrito a seguir:

6.4.1 Análise de Abertura de Linha em Vazio Segundo a Metodologia 1

A Metodologia 1, conforme Capítulo 5, consiste em ajustar as tensões nos barramentos das subestações do sistema mostrado na Figura 6.1 para uma tensão pré-abertura de 1,4 p.u. e a frequência para 66 Hz. Nessa abordagem os dados obtidos dos estudos dinâmicos não são relevantes e os transitórios de aplicação de falta ou de rejeição de carga também não são representados, pois se admite que o regime permanente já foi estabelecido no instante de abertura do disjuntor sob análise.

Os principais resultados verificados nas simulações de abertura de linha em vazio nessas condições, com e sem falta monofásica na linha, estão apresentados nas Tabelas 6.3 e 6.4 e as oscilações de tensão nos terminais do disjuntor para a terra e entre os contatos estão mostrados nas figuras referenciadas nestas tabelas.

A configuração analisada considera a presença de três reatores na LT Teresina–Sobral, sendo dois reatores de 150 Mvar no terminal de Teresina, um reator de 150 Mvar no terminal de Sobral e dois reatores de 150 Mvar na LT Sobral-Fortaleza, um em cada terminal da linha.

Tabela 6.3: Abertura de linha em vazio, SE Teresina, SE Sobral e SE Fortaleza, sem falta.
LT Teresina-Sobral compensada em 88% e LT Sobral-Fortaleza compensada em 90%
 $f=66\text{Hz}$ - Tensão base 500kV

C A S O	Disjuntor	Tensão pré- manobra	Máxima corrente	1º Pico de tensão	Tempo para o 1º pico de tensão	Sobre- tensão máxima entre contatos	Tempo para a sobre- tensão máxima	F I G U R A
		(pu)	(Aef)	(kVpico)	(ms)	(kVpico)	(ms)	
1	SE Teresina LT Teresina-Sobral C2	1,4	122	75	3,9	1060	98	C5
2	SE Sobral LT Teresina-Sobral C2	1,4	128	80	4,0	1130	99	C6
3	SE Sobral LT Sobral-Fortaleza C2	1,4	64	50	4,7	1160	159	C7
4	SE Fortaleza LT Sobral-Fortaleza C2	1,4	64	40	4,0	1120	160	C8

Tabela 6.4: Abertura de linha em vazio, SE Teresina, SE Sobral e SE Fortaleza, com falta no terminal remoto.
LT Teresina-Sobral compensada em 88% e LT Sobral-Fortaleza compensada em 90%
 $f=66\text{Hz}$ - Tensão base 500kV

C A S O	Disjuntor	Tensão pré- manobra	Máxima corrente	1º Pico de tensão	Tempo para o 1º pico de tensão	Sobre- tensão máxima entre contatos	Tempo para a sobre- tensão máxima	F I G U R A
		(pu)	(Aef)	(kVpico)	(ms)	(kVpico)	(ms)	
5	SE Teresina LT Teresina-Sobral C2	1,4	147	296	3,3	1240	98	C9
6	SE Sobral LT Teresina-Sobral C2	1,4	126	94	4,2	1290	98	C10
7	SE Sobral LT Sobral-Fortaleza C2	1,4	54	58	4,0	1330	157	C11
8	SE Fortaleza LT Sobral-Fortaleza C2	1,4	52	207	2,8	1290	159	C12

Para balizar as análises efetuadas no sistema durante a abertura de linha em vazio e avaliar o grau de severidade da manobra, observa-se a necessidade de se ter um valor de referência para a magnitude da sobretensão suportável pelo disjuntor. As normas ABNT (NBR 7118, 1994) e (IEC 62271-100, 2001) estabelecem que, para ensaios monofásicos e trifásicos de tensão nos disjuntores, com circuito capacitivo a ser manobrado, a tensão de ensaio, medida entre fases no local do mesmo, imediatamente antes da abertura, deve ser tão próxima quanto possível da tensão nominal U_n do disjuntor. Para ensaios monofásicos de laboratório, a tensão de ensaio medida no local do disjuntor imediatamente antes da manobra de abertura, deve ser tão próxima quanto possível do produto de $U_n / \sqrt{3}$ por um dos seguintes fatores:

a - 1,0 – para ensaios que correspondam a condições normais de serviço, em sistemas de neutro aterrado sem influência mútua significativa entre fases adjacentes do circuito capacitivo, que é o caso típico de bancos de capacitores com neutro aterrado e cabos blindados;

b - 1,2 – para ensaios em cabos armados e para ensaios de manobra de correntes de linhas em vazio, correspondendo às condições normais de serviço nos sistemas de neutro aterrado, com influência mútua entre fases;

c - 1,4 – para ensaios de interrupção nas condições normais de serviço em sistemas que não os de neutro aterrado, bem como para ensaios de interrupção de bancos de capacitores com neutro isolado;

d - 1,4 – para ensaios de interrupção de faltas monofásicas ou bifásicas para a terra, em sistemas de neutro aterrado;

e - 1,7 – para ensaios de interrupção de faltas monofásicas ou bifásicas para a terra, em sistemas que não os de neutro aterrado;

f - Fator a ser especificado pelo usuário para disjuntores aplicáveis a sistemas sujeitos a rejeição de carga.

Partindo dessas premissas para os sistemas de neutro aterrado, um valor recomendável para o fator de tensão a ser aplicado na definição da suportabilidade do disjuntor durante a manobra de abertura de linha em vazio deve ser 1,4. A tensão suportável entre os contatos do disjuntor é dada então pela diferença da tensão fase-terra entre cada terminal do disjuntor e calculada pela seguinte expressão:

$$U = 2 \cdot 1,4 \cdot U_n \sqrt{2} / \sqrt{3} \text{ kV pico} \quad (6.1)$$

Nesta dissertação se propõe que essa tensão seja utilizada como referência nas análises de abertura de linha em vazio em sistemas de neutro aterrado quando submetidos a uma falta fase-terra ou bifásica. Nas situações em que os estudos de rejeição de carga indicarem um valor superior para o fator de tensão, este deve ser especificado e acordado com o fabricante, conforme proposto pela Norma.

Considerando o exposto e a expressão (6.1), pode-se estabelecer que o valor de tensão suportável assegurado pelos ensaios normalizados de abertura de linha em vazio para disjuntores de 550 kV é de *1257 kV pico*. Esta grandeza deve ser utilizada, doravante, como parâmetro de referência nas análises dos sistemas de 550 kV.

Estabelecido esse valor de referência para a suportabilidade do disjuntor à solicitação decorrente de abertura de linha em vazio, pode-se retornar às análises.

Os estudos de abertura efetuados para a linha de 500 kV Teresina-Sobral-Fortaleza, circuito 2, com a compensação através de reatores em derivação, mostram que:

Na abertura do ultimo disjuntor de 500 kV da linha Teresina-Sobral-Fortaleza, nos terminais de Teresina, Sobral ou Fortaleza, sem falta, as sobretensões entre os contatos do disjuntor são inferiores ao valor de referência, *1257 kV pico*. A maior solicitação de tensão observada durante o evento foi de 1160 kV pico, com um tempo para a crista máxima de 159ms, conforme caso 3 da Tabela 6.3. Essa sobretensão representa 92% do valor estipulado como padrão, caracterizando uma folga operativa de 8% em relação à suportabilidade do disjuntor.

A manobra de abertura da linha em vazio sob condições de falta monofásica para a terra dá origem a sobretensões bastante superiores às obtidas para a condição sem falta. Este aumento é decorrente do deslocamento do neutro provocado pela situação anormal de operação, conforme detalhado no Capítulo 5.

A abertura do disjuntor de Teresina, da linha Teresina-Sobral, com falta monofásica para a terra no terminal de Sobral, ocasiona uma sobretensão máxima de 1240 kV pico, conforme caso 5 da Tabela 6.4. Essa sobretensão possui valor inferior ao limite estabelecido para o disjuntor de 550 kV (*1257 kV pico*). Quando o último disjuntor a abrir é o do terminal de Sobral, com falta em Teresina, a sobretensão entre os contatos deste disjuntor é de 1290 kV em um tempo de 98ms

(caso 6). A solicitação de maior severidade para o disjuntor, 1330 kV em um tempo de 159ms, se verifica quando a abertura do segundo disjuntor da linha acontece na SE Sobral, com falta no terminal de Fortaleza, na linha Sobral – Fortaleza (caso 7). A magnitude desta sobretensão é 6% superior à suportabilidade estabelecida nos procedimentos de ensaio do disjuntor, devendo esta, portanto, ser especificada e assegurada pelo fabricante. Vale ressaltar que este requisito superior à suportabilidade normalizada pode ter como conseqüência a exigência de uma câmara com características especiais e uma provável elevação no custo do disjuntor por estar o mesmo fora dos padrões de fabricação.

No que se refere à abertura de corrente capacitiva da linha na condição de vazio, as normas ABNT e IEC estabelecem valores de 710 A eficaz e 500 A eficaz, respectivamente, como valores máximos padronizados para os disjuntores com tensão nominal de 550 kV, conforme mostrado na Tabela 5.1 do Capítulo 5. Sob esse aspecto, pode-se considerar que o disjuntor não necessita de requisitos especiais, pois o valor máximo verificado é de apenas 147 A eficaz (caso 5, Tabela 6.4), inferior, portanto, ao estipulado pelas normas.

6.4.2 Análise de Abertura de Linha em Vazio Segundo a Metodologia 2

Quando se emprega esta metodologia para simulação de abertura de linha em vazio, costuma-se inicialmente efetuar um certo nível de degradação no sistema simulado, conforme estabelecido no Capítulo 5. As análises são também efetuadas para a situação crítica de perda do barramento da subestação, dado que este evento constitui uma situação bastante severa para o último disjuntor a abrir uma vez que toda a carga vista pelo terminal emissor é rejeitada nesta condição além de se ter o efeito capacitivo da linha ainda conectada nesse terminal, contribuindo para a elevação da tensão pré-abertura do disjuntor.

Considerando que a aplicação da Metodologia 1 foi efetuada com o sistema íntegro, neste item são executados dois conjuntos de simulações, a saber: o primeiro, considerando o sistema íntegro, isto é, com dois circuitos de 500kV entre as subestações de Teresina e Fortaleza e o autotransformador 550/230 kV – 600MVA da subestação de Sobral em operação de forma a se ter, para efeito de comparação dos resultados, o mesmo sistema simulado com o uso da Metodologia 1 e o segundo, com apenas um circuito entre essas subestações de modo a simular um sistema degradado, condição esta recomendada para o emprego da Metodologia 2.

6.4.2.1 Análise de Abertura de Linha em Vazio Segundo a Metodologia 2 – Sistema Íntegro

As simulações de rejeição de carga seguida de abertura de linha em vazio nas subestações do eixo 500 kV Teresina-Fortaleza para o sistema íntegro estão sintetizadas nas Tabelas 6.5 e 6.6. As oscilações de tensão nos terminais dos disjuntores para a terra e entre os seus contatos estão mostradas nas figuras referenciadas nessas tabelas.

Para a configuração analisada considera-se a presença de três reatores nas LTs Teresina–Sobral circuitos 1 e 2, sendo dois reatores de 150 Mvar no terminal de cada linha de Teresina, um reator de 150 Mvar no terminal de cada linha de Sobral e dois reatores de 150 Mvar nas LTs Sobral-Fortaleza, circuitos 1 e 2, um em cada terminal destes circuitos.

Tabela 6.5 - Abertura de linha em vazio, SE Teresina, SE Sobral e SE Fortaleza, sem falta.
LT Teresina-Sobral compensada em 88% e LT Sobral-Fortaleza compensada em 90%
Sistema íntegro - $f=60\text{Hz}$ - Tensão base 500kV

C A S O	Disjuntor	Tensão pré- manobra	Máxima corrente	1º Pico de tensão	Tempo para o 1º pico de tensão	Sobre- tensão máxima entre contatos	Tempo para a sobre- tensão máxima	F I G U R A
		(pu)	(Aef)	(kVpico)	(ms)	(kVpico)	(ms)	
09	SE Teresina LT Teresina-Sobral C2	1,1	105,4	63,8	56,5	886,4	162,4	
10	SE Sobral LT Teresina-Sobral C2	1,1	99,2	68,1	57,4	888,6	163,3	C13
11	SE Sobral LT Sobral-Fortaleza C2	1,1	68,4	43,0	57,0	892,5	246,5	C14
12	SE Fortaleza LT Sobral-Fortaleza C2	1,1	60,0	44,3	54,8	891,7	244,2	

Tabela 6.6 - Abertura de linha em vazio, SE Teresina, SE Sobral e SE Fortaleza, com falta no terminal remoto. LT Teresina-Sobral compensada em 88% e LT Sobral-Fortaleza compensada em 90%
Sistema íntegro - $f=60\text{Hz}$ - Tensão base 500kV

C A S O	Disjuntor	Tensão pré- manobra	Máxima corrente	1º Pico de tensão	Tempo para o 1º pico de tensão	Sobre- tensão máxima entre contatos	Tempo para a sobre- tensão máxima	F I G U R A
		(pu)	(Aef)	(kVpico)	(ms)	(kVpico)	(ms)	
13	SE Teresina LT Teresina-Sobral C2	1,1	124,2	81,3	51,0	1040,2	154,3	C15
14	SE Sobral LT Teresina-Sobral C2	1,1	97,2	66,0	51,3	1007,6	155,2	
15	SE Sobral LT Sobral-Fortaleza C2	1,1	65,1	441,3	51,4	1049,7	230,0	C16
16	SE Fortaleza LT Sobral-Fortaleza C2	1,1	59,1	417,1	52,0	1024,5	221,9	

Nas simulações sem defeito na linha, com resultados apresentados na Tabela 6.5, as sobretensões entre os contatos do último disjuntor a abrir são bastante inferiores ao valor de referência, 1257 kV pico . O maior valor obtido nesta situação, $892,5\text{ kV pico}$, reportado no caso 11, apresenta uma folga de 29% em relação à suportabilidade do disjuntor para este fenômeno.

Sob condições de falta monofásica para a terra na linha, a Tabela 6.6 sumariza os principais resultados verificados na manobra de abertura em vazio dos diversos trechos da linha em análise. É importante destacar que, em função do deslocamento do neutro, fenômeno já detalhado no Capítulo 5, as sobretensões nas fases sadias são bastante superiores às obtidas para a condição sem falta.

Na linha 500 kV Teresina-Sobral, quando o último disjuntor a abrir é o do terminal de Teresina, com falta em Sobral, a sobretensão entre os contatos do disjuntor atinge $1040,2\text{ kV}$ (caso 13 da Tabela 6.6). Quando o último disjuntor a abrir é o do terminal de Sobral, com falta em Teresina, esta sobretensão tem uma magnitude de $1007,6\text{ kV}$ (caso 14).

A abertura do disjuntor de Sobral, da linha Sobral-Fortaleza, com falta monofásica para a terra no terminal de Fortaleza, ocasiona uma sobretensão máxima de $1049,7\text{ kV}$, conforme caso 15 da Tabela 6.6. Este é o maior valor verificado na situação de abertura de um dos dois trechos de linha sob falta. Contudo sua magnitude é ainda inferior a suportabilidade limite estabelecida para o

disjuntor de 550 kV (1257 kV pico).

O grau de severidade para a câmara do disjuntor, durante a abertura da linha em vazio é caracterizado pelas grandezas tensão, taxa de crescimento da tensão e corrente de interrupção. Na presente situação, a maior corrente capacitiva interrompida na fase sã ocorre, como esperado, na presença de falta monofásica na linha. A maior amplitude dessa grandeza é de 124,2 A eficaz (caso 13, Tabela 6.6), sendo inferior ao estabelecido pelas normas ABNT e IEC que correspondem a 710 A eficaz e 500 A eficaz respectivamente, para disjuntores de tensão nominal de 550 kV.

As simulações efetuadas com esta metodologia para o sistema íntegro, que constitui o ponto de operação mais freqüente, apresentam valores de sobretensão inferiores aos obtidos com o uso da metodologia 1 na avaliação dos esforços no disjuntor, oriundos da abertura de linha em vazio após rejeição de carga.

6.4.2.2 Análise de Abertura de Linha em Vazio Segundo a Metodologia 2 – Sistema Degradado

Para análise da abertura em vazio da linha de 500 kV Teresina-Sobral-Fortaleza utilizando esta metodologia tendo como base o sistema degradado é efetuada a retirada de operação do primeiro circuito entre as subestações de 500 kV de Teresina e Fortaleza. Esta medida tem por objetivo estabelecer condições mais desfavoráveis para o último disjuntor a abrir. Na realidade, a possibilidade de se ter os dois trechos de linha fora de operação é remota, entretanto esta condição visa, além de reduzir a potência de curto-circuito nas subestações de Teresina, Sobral e Fortaleza e de outras subestações do sistema, criar condições favoráveis para um maior fluxo de potência reativa nos disjuntores dos terminais dos dois trechos de linha. As tensões em todas as barras da área de influência do fenômeno antes da abertura são ajustadas para 550 kV. Este nível de tensão representa o máximo permitido, por critério, para as tensões nos barramentos do sistema quando operando em regime permanente. São também incluídos os transitórios de rejeição de carga e de aplicação de defeito na linha.

Estabelecidas essas condições, são efetuados os chaveamentos dos disjuntores nas condições sem falta e na presença de defeito monofásico para a terra, em cada trecho estudado e os resultados são sintetizados nas Tabelas 6.7 e 6.8 a seguir.

Tabela 6.7 - Abertura de linha em vazio, SE Teresina, SE Sobral e SE Fortaleza, sem falta.
 LT Teresina-Sobral compensada em 88% e LT Sobral-Fortaleza compensada em 90%
 Sistema degradado - $f=60\text{Hz}$ - Tensão base 500kV

C A S O	Disjuntor	Tensão pré- manobra	Máxima corrente	1º Pico de tensão	Tempo para o 1º pico de tensão	Sobre- tensão máxima entre contatos	Tempo para a sobre- tensão máxima	F I G U R A
		(pu)	(Aef)	(kVpico)	(ms)	(kVpico)	(ms)	
17	SE Teresina LT Teresina-Sobral C2	1,1	122,6	64,6	3,5	967,1	107,2	C17
18	SE Sobral LT Teresina-Sobral C2	1,1	142,8	73,2	6,1	953,0	107,7	
19	SE Sobral LT Sobral-Fortaleza C2	1,1	47,2	54,7	6,1	978,5	191,2	C18
20	SE Fortaleza LT Sobral-Fortaleza C2	1,1	59,8	37,0	3,0	917,2	182,0	

Tabela 6.8 - Abertura de linha em vazio, SE Teresina, SE Sobral e SE Fortaleza, com falta no terminal remoto.
 LT Teresina-Sobral compensada em 88% e LT Sobral-Fortaleza compensada em 90%
 Sistema degradado - $f=60\text{Hz}$ - Tensão base 500kV

C A S O	Disjuntor	Tensão pré- manobra	Máxima corrente	1º Pico de tensão	Tempo para o 1º pico de tensão	Sobre- tensão máxima entre contatos	Tempo para a sobre- tensão máxima	F I G U R A
		(pu)	(Aef)	(kVpico)	(ms)	(kVpico)	(ms)	
21	SE Teresina LT Teresina-Sobral C2	1,1	145,6	75,1	5,4	1136,1	108,8	C19
22	SE Sobral LT Teresina-Sobral C2	1,1	109,6	76,0	4,8	1050,7	108,8	
23	SE Sobral LT Sobral-Fortaleza C2	1,1	69,0	17,1	0,8	1135,0	182,8	C20
24	SE Fortaleza LT Sobral-Fortaleza C2	1,1	69,8	32,5	4,4	1030,4	175,8	

Nas simulações sem defeito na linha e com as premissas estabelecidas para a Metodologia 2, constata-se que as sobretensões entre os contatos do último disjuntor a abrir são ainda inferiores ao valor de referência, 1257 kV pico , porém superiores aos obtidos com o sistema íntegro. A máxima sobretensão registrada, $978,5\text{ kV pico}$, ocorrida na abertura do trecho de linha

Sobral – Fortaleza, sobre Sobral, caso 19, é em torno de 10% superior à obtida com o sistema íntegro para a mesma situação e 23% inferior à tensão de referência.

Esses resultados comprovam a hipótese de que, quando o sistema se encontra em situação de contingência, as sobretensões esperadas durante a abertura de linha em vazio são mais severas.

Os principais resultados obtidos na abertura da linha sem carga com o sistema degradado, sob condições de falta monofásica para a terra nos trechos estudados, encontram-se sumarizados na Tabela 6.8.

A exemplo do que ocorreu nas simulações com o sistema íntegro, também na situação atual, o deslocamento do neutro provoca sobretensões mais elevadas nas fases sadias quando comparadas com as obtidas na situação sem falta.

A abertura em vazio da linha 500 kV Teresina-Sobral, pelo disjuntor de Teresina, com falta em Sobral, dá origem a maiores sobretensões entre contatos no disjuntor do circuito. Nesta situação a máxima sobretensão entre os contatos do disjuntor de Teresina atinge 1136,1 kV pico (caso 21 da Tabela 6.8), sendo 9% superior ao registrado para a mesma situação com o sistema íntegro. Quando o último disjuntor a abrir é o do terminal de Sobral, com falta em Teresina, a sobretensão entre os contatos do disjuntor atinge 1050,7 kV (caso 22, Tabela 6.8), em torno de 4% superior ao valor obtido para a mesma situação com o sistema íntegro.

A abertura do disjuntor de Sobral, da linha Sobral-Fortaleza, com falta monofásica para a terra no terminal de Fortaleza, origina a maior sobretensão entre os contatos dos disjuntores desse trecho com uma amplitude de 1135,0 kV, conforme caso 23 da Tabela 6.8. Esta sobretensão tem magnitude 8% maior que a obtida na mesma situação com o sistema completo.

Em resumo, constata-se que a maior sollicitação entre os contatos dos disjuntores do circuito Teresina-Fortaleza, durante a abertura de linha em vazio após rejeição de carga nesse circuito, estando o sistema em condição degradada, possui valor 10% inferior ao limite estabelecido para o disjuntor de 550 kV (*1257 kV pico*) e 8% superior à verificada para a mesma situação, porém com o sistema completo.

A maior corrente capacitiva interrompida na fase sã ocorre, como esperado, na presença de falta monofásica na linha. A maior amplitude dessa grandeza é de 182,8 A eficaz (caso 23,

Tabela 6.8), sendo inferior aos valores estabelecidos pelas normas ABNT e IEC que correspondem a 710 A eficaz e 500 A eficaz, respectivamente, para disjuntores de tensão nominal de 550 kV.

6.4.3 Análise de Abertura de Linha em Vazio Segundo a Metodologia Alternativa

No item 6.3.1. deste trabalho foram estabelecidas as condições dinâmicas para elaboração dos estudos de abertura de linha em vazio precedida de rejeição de carga que servem de referência para as análises transitórias dessa manobra de acordo com a Metodologia Alternativa.

Ainda neste item, são selecionadas as situações mais críticas de distúrbio no sistema para detalhamento das sobretensões no período transitório de modo a definir as características elétricas básicas principais que devem constar das especificações técnicas do disjuntor a ser instalado nas conexões da linha Teresina-Fortaleza. As situações escolhidas derivam da condição de perda do barramento 500 kV das subestações ligadas a essa linha devida a defeito monofásico nesse barramento.

Os resultados obtidos nas análises transitórias efetuadas de acordo com essas condições e com a aplicação da Metodologia Alternativa são apresentados na Tabela 6.9, mostrada a seguir:

Tabela 6.9 – Rejeição de carga por abertura dupla de linha sobre a SE Teresina, SE Sobral e SE Fortaleza, devida a perda do barramento da subestação, com falta, seguida de abertura de linha em vazio na frequência de 60Hz.
 LT Teresina-Sobral compensada em 88% e LT Sobral-Fortaleza compensada em 90%
 Tensão base 500kV

C A S O	Disjuntor	Tensão pré- manobra (pu)	Auto- trans- forma- dor de Sobral em ope- ração	Máxima corrente (Aef)	1º Pico de tensão (kVpico)	Tempo para o 1º pico de tensão (ms)	Sobre- tensão máxima entre contatos (kVpico)	Tempo sobre- tensão máxima (ms)	F I G U R A
25	SE Teresina	1,1984	Sim	184	53,3	1,1	1058,4	107,7	
26	LT Teresina-Sobral C2	1,1965	Não	166	41,0	1,2	1064,3	107,8	
27	SE Sobral	1,3565	Sim	134	100,5	5,0	1165,8	107,7	C21
28	LT Teresina-Sobral C2	1,3032	Não	126	101,1	5,2	1139,6	107,8	
29	SE Sobral	1,2695	Sim	72	65,3	3,3	1105,1	190,5	
30	LT Sobral-Fortaleza C2	1,2944	Não	67	68,8	4,1	1138,1	190,5	
31	SE Fortaleza	1,3310	Sim	46	49,5	4,9	1163,8	191,5	C22
32	LT Sobral-Fortaleza C2	1,2353	Não	50	51,0	4,7	1085,4	191,6	

Mediante análise detalhada dos casos apresentados nessa tabela observa-se que os maiores valores de corrente ocorrem para o trecho de linha Teresina-Sobral, o que é esperado, pois essa LT possui maior extensão (334 km) que a LT Sobral-Fortaleza (210,8 km). Vale ressaltar que o maior valor observado, 184 A eficaz, ainda é bastante inferior aos estabelecidos nas normas técnicas para este parâmetro. Em parte, o valor reduzido encontrado nos estudos se deve ao alto grau de compensação da linha, em torno de 88%.

Para o trecho de linha Teresina-Sobral, a maior magnitude de sobretensão entre os contatos do disjuntor foi de 1165,8 kV e ocorreu em 107,7 milissegundos, conforme caso 27 da Tabela 6.9, na situação com o autotransformador de Sobral em operação.

Essa sobretensão representa 92,7% do valor de referência estabelecido neste trabalho (1257 kVpico). As sobretensões entre os contatos do disjuntor, obtidas na abertura dupla da linha sobre Sobral são maiores que as verificadas na abertura sobre Teresina. Essa diferença é justificada, em parte, pela maior potência de curto-circuito da subestação de Teresina quando comparada com a da SE Sobral na situação estudada. Quanto maior for a potência de curto circuito da subestação, maior é a rigidez elétrica da barra da subestação e menores são as oscilações de tensão durante distúrbios.

Para o trecho Sobral-Fortaleza a máxima sobretensão esperada entre os contatos do disjuntor na abertura após rejeição de carga é da ordem de 1163,8 kV pico e ocorre com o autotransformador 550/230kV - 600MVA de Sobral em operação e equivale a 92,6% do valor de referência.

Uma comparação dos valores máximos obtidos nas análises do fenômeno mostra que a avaliação das sobretensões no disjuntor durante a abertura de linha em vazio após rejeição de carga com o emprego dessa metodologia conduz a amplitudes maiores que as registradas com o uso da Metodologia 2.

Considerando o grau de detalhamento das situações de topologia e intercâmbio entre os sistemas interligados e das características dos componentes representados nas simulações, esses valores podem ser incorporados nas especificações com maior segurança e, de alguma forma, sem o conservadorismo da Metodologia 1 ou as possíveis imprecisões da Metodologia 2.

Com o emprego dessa metodologia, o comportamento do sistema é exaustivamente examinado no regime dinâmico e as situações mais rigorosas para avaliação da manobra no regime transitório são obtidas com o grau de precisão desejado.

6.4.4 Análise Comparativa dos Resultados das Solicitações no Disjuntor Durante a Abertura de Linha em Vazio Obtidos com o Uso das Três Metodologias

Os estudos apresentados nos itens anteriores mostram que as sobretensões entre os contatos do disjuntor no processo de abertura de linha em vazio após rejeição de carga é função, entre outros aspectos, da condição do sistema antes da abertura e da metodologia escolhida para

análise. Nesse item é feita uma comparação das maiores sobretensões obtidas utilizando as três metodologias, tomando como parâmetro de referência a sobretensão estabelecida nas normas ABNT e IEC para ensaios de tensão nos disjuntores de 550 kV que corresponde a *1257 kV pico*.

Tabela 6.10 – Análise comparativa das solicitações no disjuntor obtidas com as três metodologias de estudo

Caso	Máxima corrente (Aef)	Máxima frequência (Hz)	Sobretensão máxima entre contatos (kVpico)	Tempo para a sobretensão máxima (ms)	Sobretensão máxima entre contatos em relação ao valor de referência (1257 kV pico) (%)
<i>Metodologia 1</i>	147,0	66,00	1330,0	157,0	106
<i>Metodologia 2 - Sistema Íntegro</i>	124,2	60,00	1049,7	230,0	84
<i>Metodologia 2 - Sistema Degradado</i>	145,6	60,00	1136,1	108,8	90
<i>Metodologia Alternativa</i>	184,0	60,12	1165,8	107,7	93

A partir dos resultados das análises, apresentados de forma resumida nessa tabela, é possível concluir o seguinte:

- Os maiores esforços de tensão, corrente e frequência, ocorrem quando se utiliza a Metodologia 1.

De acordo com esse método, independente da parte do sistema em que esteja sendo estudado o fenômeno e do montante de carga rejeitado, a sobretensão máxima fase-terra no terminal da linha conectada antes da abertura do disjuntor é assumida igual a 1,4 p.u. e a frequência é 66 Hz.

Observando os estudos dinâmicos efetuados para a linha 500 kV Teresina – Fortaleza, apresentados no item 6.3, é possível aduzir que esta premissa não reproduz, com o nível de aproximação desejado, a resposta do sistema em análise quando submetido a um grande distúrbio decorrente da rejeição de carga seguida de abertura de linha em vazio em cada trecho dessa linha e em ambos os seus terminais.

Para esse caso específico, o uso da Metodologia 1 na análise do fenômeno leva a um

valor de tensão 6 % superior ao parâmetro de referência extraído dos requisitos de norma para testes de suportabilidade do disjuntor durante a abertura de linha em vazio. Caso se pretenda utilizar essas tensão e frequência na especificação técnica do disjuntor é prudente que seja efetuada uma consulta prévia aos fornecedores sobre a viabilidade de atender a esses parâmetros com um disjuntor padrão de 550 kV. Para subsidiar de forma mais objetiva a posição do fabricante do equipamento sobre o assunto recomenda-se também fornecer os oscilogramas da tensão e da corrente durante a manobra.

- Quando se analisa o fenômeno a partir das premissas estabelecidas para a Metodologia 2 com o sistema íntegro, considerando uma tensão pré-abertura de 1,1 p.u. e uma frequência de 60Hz, pode-se constatar que a maior sobretensão entre os contatos do disjuntor registrada é 16,5% inferior ao valor selecionado como limite de suportabilidade da câmara (*1257 kV pico*).

Essa situação do sistema, apesar de corresponder àquela em que esse permanece operando na maior parte do tempo, não é recomendada para determinação do maior esforço a que o disjuntor fica submetido na manobra da linha em vazio, pois a mesma não cobre as situações mais desfavoráveis que podem ocorrer. Desta forma, torna-se necessário pesquisar a pior condição para a situação analisada. A topologia correspondente a esta condição aliada ao emprego da Metodologia 2 é proposta no parágrafo seguinte.

- A análise do sistema sob condição degradada, é efetuada na situação de recomposição, porém com o autotransformador da subestação de Sobral já em operação, uma tensão pré-abertura de 1,1 p.u. e uma frequência de 60 Hz.

Nessas condições, a máxima sobretensão entre contatos do disjuntor na abertura de linha sem carga é em torno de 8% superior à obtida na simulação com o sistema íntegro, atingindo uma magnitude de 1136,1 kV pico. Contudo, este valor representa apenas 90% da tensão de referência.

A especificação do disjuntor de acordo com os requisitos assim obtidos pode dispensar a compra de um equipamento com características não padronizadas para manobras capacitivas. Entretanto deverá ser investigado se realmente esta abordagem engloba todas as situações possíveis de ocorrer e se os esforços de tensão, frequência e corrente não podem ser superados por algum outro evento com probabilidade e frequência de ocorrência que não possa ser desprezado.

- Segundo (ONS, 2003), em conformidade informações vindas da operação do Sistema

Interligado Nacional – SIN, vinculadas a registros de medições de frequência nesse sistema, durante grandes perturbações, a ocorrência de sobrefrequências na rede em presença desses distúrbios é um evento de probabilidade muito baixa, podendo se manifestar apenas em algumas áreas, notadamente na área Norte do SIN ou em condições de formação de ilhas. De acordo com essas informações e as estatísticas apresentada pelo ONS, se considera de grande relevância efetuar simulações dinâmicas nas condições de intercâmbio e carga mais desfavoráveis para o sistema interligado e área de interesse, para avaliar se o sistema sob análise perde sincronismo na presença de grandes distúrbios, quantificando o maior valor de sobrefrequência que poderá acontecer e a sobretensão entre os contatos no instante da abertura do segundo disjuntor da linha. Essa, em resumo, é a proposição da Metodologia Alternativa apresentada neste trabalho.

Por tudo que foi exposto nesta dissertação, julga-se que uma análise dos esforços no disjuntor, efetuada segundo a Metodologia Alternativa, pode estar quantificando o fenômeno de abertura de linha em vazio após rejeição de carga de forma mais realista e segura, quando comparada com as outras metodologias apresentadas neste trabalho. Os resultados assim obtidos podem ser considerados confiáveis para especificar o disjuntor de modo a atender a este requisito operativo.

A sobretensão máxima quantificada por esse método é a mais severa, a menos dos registrados com a Metodologia 1. Entretanto observa-se que a mesma não excede a tensão de referência, sendo apenas 93% deste valor.

Capítulo 7

Conclusões e Temas para Novas Pesquisas

7.1 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou, no decorrer do seu desenvolvimento, os principais conceitos de fenômenos transitórios e tipos de disjuntores, necessários para embasar a metodologia mais apropriada para avaliar as solicitações de tensão, corrente e frequência, importantes para especificar e projetar um disjuntor no quesito referente à abertura de linha em vazio.

Adicionalmente, foram efetuadas simulações de abertura de linha em vazio após rejeição de carga com o uso do programa ATP como ferramenta, onde se quantificou os requisitos para especificação do disjuntor considerando as três diferentes metodologias.

As simulações descritas no Capítulo 6 mostram que os requisitos de abertura de linha em vazio, para a especificação do disjuntor, obtidos com o emprego da Metodologia 1, onde a tensão e a frequência do sistema antes da abertura, são ajustadas para 1,4 p.u. e 66 Hz, respectivamente, podem ter como consequência a majoração das solicitações entre os contatos do disjuntor de 550kV e acarretar um maior custo para o equipamento devido à exigência de uma característica que não se espera venha a ser solicitada durante a vida útil do equipamento. A evolução do SIN, mediante integração de novas usinas, linhas de transmissão e de interligações entre sistemas de diferentes

regiões do Brasil e até interligações internacionais, bem como o crescimento da demanda, tornam este sistema cada vez mais malhado e estável. Em conseqüência, as oscilações de potência e freqüência nesse sistema tendem a ser cada vez menores.

Os disjuntores adquiridos com os requisitos obtidos nas análises com a Metodologia 1 podem estar fora dos padrões de fabricação e dos parâmetros existentes nas normas ABNT e IEC, em sua versão mais atual. Segundo essas análises, os disjuntores são projetados e fabricados para suportar uma solicitação de freqüência de 66 Hz e uma tensão pré-abertura de 1,4 p.u. durante a manobra de uma linha em vazio. Esta sobrefreqüência, 10% acima do valor nominal, e o requisito de tensão têm como conseqüência a necessidade de se dotar a câmara do disjuntor de maior taxa de recuperação dielétrica ou de um maior número de câmaras em série para evitar o reacendimento do arco durante o ensaio de abertura da linha em vazio. Estes requisitos de freqüência e tensão constituem um dos pontos de contestação por parte dos fabricantes quando se deparam com as especificações para fornecimento dos disjuntores para a Rede Básica do SIN. A sobrefreqüência especificada e outros aspectos ligados a solicitações dielétricas no disjuntor, podem impedir o fornecimento de um equipamento de custo mais baixo e com características padronizadas pelas normas técnicas pertinentes.

A aplicação da Metodologia 2 nas análises de abertura de linha em vazio resulta em requisitos bem menores para o disjuntor quando comparados com os obtidos com a Metodologia 1, porém traz em si a restrição de não englobar todos os estados a que o sistema pode estar submetido em condições anormais de serviço, mesmo que estes estados sejam pouco prováveis de ocorrer. Em vista das conseqüências de um reacendimento do arco do disjuntor durante a abertura de uma linha em vazio para toda a instalação e para o sistema, apresentadas de forma detalhada no Capítulo 3, onde a mais grave é a escalada de tensão, o planejador deve prospectar e analisar as situações mais adversas capazes de ocorrer no sistema de transmissão, de modo a assegurar que o dimensionamento do disjuntor seja efetuado de forma segura e confiável.

Os estudos de abertura de linha sem carga com a Metodologia Alternativa, apresentada nesta dissertação, estão embasados em análises exaustivas de sistema, efetuadas em regime dinâmico, para determinar a situação mais severa, passível de ocorrência. Estas análises dinâmicas são executadas de forma bastante simples e pouco labor é exigido do pesquisador na etapa de modelagem e ajuste do sistema, antes da simulação das manobras para eliminação dos distúrbios. Em função dessa peculiaridade é possível elaborar uma quantidade de casos bastante abrangente,

garantindo um exame suficientemente acurado dos estados do sistema em condições anormais de serviço. Apenas os casos mais graves, selecionados dos estudos dinâmicos, são simulados com o uso do programa Alternative Transients Program, ATP, onde a rede é modelada com maior nível de precisão e grande parte dos elementos capazes de influenciar as sobretensões é representada.

Os resultados obtidos com o emprego dessa metodologia mostram as piores situações de tensão e frequência a que o sistema pode estar submetido, sem o conservadorismo da Metodologia 1 ou as avaliações demasiadamente otimistas da Metodologia 2.

Observa-se que os requisitos do dispositivo de manobra para o sistema analisado, derivados da Metodologia Alternativa, estão compatíveis com as características dos disjuntores fabricados segundo as normas IEC e ABNT, ofertados no mercado de equipamentos, onde os requisitos de sobrefrequência não são levados em consideração. As características desses disjuntores para abertura de linha em vazio normalmente estão referidas à frequência do sistema em condições normais de operação que no caso do Brasil é 60 Hz.

É importante observar que a suportabilidade dielétrica da câmara do disjuntor é projetada para atender também às solicitações TRT decorrentes de eliminação de faltas terminais ou quilométricas trifásicas aterradas ou não, bifásicas aterradas ou não e faltas monofásicas, às sobretensões de manobra de linhas em vazio com e sem defeito, após rejeição de carga e, finalmente, às sobretensões decorrentes de abertura do disjuntor em situação de oposição de fases.

No caso particular de eliminação de faltas, pode-se dimensionar o disjuntor para um fator de primeiro pólo a abrir de 1,3 ou de 1,5 a depender dos resultados dos estudos. O Sistema Elétrico Brasileiro, de forma geral, tem seus disjuntores especificados para um fator de primeiro pólo de 1,5.

Esse fator elevado é, na maioria dos casos, decorrente da metodologia e dos critérios de análise empregados, herdados dos grupos de estudo de critérios e procedimentos da Eletrobrás, onde se considera que o disjuntor do terminal em falta abre quando o disjuntor do terminal oposto já está aberto. As faltas terminais são analisadas para a ocorrência de curto trifásico terminal isolado da terra. Sabe-se que este tipo de falta é de muito baixa probabilidade de ocorrência.

Análises efetuadas partindo da premissa de que o terminal oposto ao terminal em falta esteja fechado no momento da eliminação do defeito no terminal onde este ocorre e considerar o curto trifásico aterrado pode atenuar as solicitações de Tensões de Restabelecimento Transitórias

durante a eliminação da falta e um fator de primeiro pólo de 1,3 pode então ser adotado.

Associando esse fator de 1,3 a uma análise de abertura de linha em vazio segundo a Metodologia Alternativa, espera-se que as solicitações dielétricas no disjuntor venham a ser reduzidas e este equipamento, dimensionado e projetado para atender a estes novos valores, pode ter menores solicitações dielétricas, menor número de câmaras e conseqüentemente menor custo de aquisição.

Finalmente é importante observar que a generalização da aplicação de um mesmo conjunto de características elétricas básicas, obtido de análises em um determinado local do sistema para especificação de um disjuntor para manobras de eliminação de falta e de abertura de linha em vazio, a qualquer parte do Sistema Interligado Nacional, pode resultar em maximização da sua suportabilidade e, em contrapartida, em maiores dispêndios financeiros na sua aquisição para novos empreendimentos, onerando assim os custos da Rede Básica.

7.2 TEMAS PARA NOVAS PESQUISAS

Como proposta para novos trabalhos relacionados ao tema apresentado nesta dissertação sugere-se efetuar análises de abertura de linha em vazio em outras áreas do Sistema Interligado Nacional - SIN, para as malhas de 550 kV, 230kV e 138kV com o emprego da metodologia proposta neste trabalho, com ênfase na pesquisa dos valores máximos de frequência e tensão observados nas simulações dinâmicas.

As análises de abertura de linha em vazio na Rede Básica do SIN devem ser complementadas com estudos de eliminação de falta, pesquisando metodologias de estudo seguras e menos conservativas que as praticadas hoje no dimensionamento do disjuntor em adição com pesquisas de probabilidade de ocorrência dos diversos tipos de falta de modo a verificar a possibilidade de reduzir o fator de primeiro pólo de 1,5 para valores inferiores. As normas técnicas vigentes para disjuntores estabelecem que para tensões superiores a 100 kV o fator de pólo recomendado é 1,3 e não são apresentadas tabelas com requisitos de eliminação de falta para fator de pólo de 1,5. Essas pesquisas complementares podem resultar em outros padrões de sobretensão entre contatos e frequência, bem como menores solicitações de TRT nos disjuntores em outras áreas do SIN em diferentes níveis de tensão nominal.

Pesquisar metodologia alternativa para estudos de abertura de disjuntores em discordância de fases, focalizando a possibilidade de redução dos requisitos de TRT durante a interrupção da corrente de sincronização dos subsistemas por estes equipamentos considerando o comportamento da rede nessas circunstâncias. Estas análises devem ter como ponto de partida estudos preliminares de estabilidade eletromecânica que considere na sua metodologia as características do sistema de transmissão como um todo. Os resultados destas análises agregam subsídios importantes e realistas para simulação do fenômeno e para a especificação de disjuntores quanto a este requisito.

Referências Bibliográficas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Coordenação do Isolamento. NBR-6939, 1999.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Dicionário Brasileiro de Eletricidade, 1986.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Disjuntores de Alta Tensão, Especificação. NBR-7118, 1994.

ANSI – American National Standard. C37.0721. Application Guide for Transient Recovery Voltage for AC High-voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis, 1971.

ANSI – American National Standard. C37.0722. Schedules of Preferred Transient Recovery Voltage Ratings and Related Required Capabilities for AC High-voltage Circuit-Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis, 1971.

CARVALHO, A. C. C., Lacorte, M., Condições de Manobra de Disjuntor na Rede. Relatório Técnico Cepel nº 488/86, Outubro de 1986.

CARVALHO, A. C. C., Lacorte, M., Vorpe, M., Hofbauer, W. A Statistical Method to Evaluate Dielectric Characteristic of Circuit-Breakers. Cigré SC 13 Colloquium, Report n. 13-89, Sarajevo, Iugoslávia, Maio de 1989

CARVALHO, A. C. C., Lacorte, M., Portela, C., Colombo, R., Morais, S. A., Vorpe, M., Horigome, A. An Alternative Method to Forecast Circuit-Breaker Behavior upon Disconnection of

No-Load Lines. Paris, Sessão da Cigré de 1990.

CARVALHO, A. C. C. – Disjuntores e Chaves, Editora da Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 1995.

CCPE/CTET/GTDC/FTCP. Critérios e Procedimentos para o Planejamento da Expansão dos Sistemas de Transmissão, 2001.

COLOMBO, R. Disjuntores em Sistemas de Potência, Editora São Paulo: Siemens S/A.,1990

D'AJUZ, A. et al., Equipamentos Elétricos de Sistemas de Potência. Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, 1985.

D'AJUZ, A. et al., Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento – Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão. Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 1987.

DUPONT, C. J., Pinto, L.C., Influência do Envelhecimento de Disjuntores a SF₆ na Capacidade de Estabelecimento e Interrupção de Correntes Capacitivas. VII Erlac. Puerto Iguazú – Argentina, 1997.

FLURSCHEIM, C. H., Power Circuit Breaker Theory and Design. IEE Monograph Series 17. Peter Peregrinus Ltd, England, 1975.

FUCHS, R. D. – Transmissão de Energia Elétrica – Linhas Aéreas – Livros Técnicos e Científicos Editora – Escola Federal de Engenharia de Itajubá – MG

GREENWOOD, A., Electrical Transients in Power Systems, John Wiley & Sons, Inc New York, 1971.

GTE/SCEE/CCON – Metodologia e Critérios para Análise de Adequação de Disjuntores Quanto à Tensão de Restabelecimento Transitória, 1991.

HEDMAN, D. E., Coordenação de Isolamento. Imprensa Universitária da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, 1979.

IEC 62271-100 – High-voltage Switchgear and Controlgear – Part 100: High-voltage Alternating-Current Circuit-breakers, 2001-05

JOHNSON, I. B., Schultz, A.J., Schultz N. R., Shores R. B., Some Fundamentals on Capacitance

Switching. Transactions of the AIEE, Vol 74 Part III, August 1955.

MAIA, M. J. A., PINTO, M. S. L., MELO, P. A. Marcos Regulatórios para o Sistema Elétrico Brasileiro e seu Rebatimento nas Empresas de Transmissão. VII SEPOPE, Curitiba, 2000.

ONS – Operador Nacional do Sistema, Procedimentos de Rede, Submódulo 2.3, Requisitos Mínimos para Transformadores e para Subestações e seus Equipamentos, 2005.

ONS – Operador Nacional do Sistema, Reavaliação do Critério para Abertura de LTs em Vazio, Seminário – Requisitos Mínimos, Dezembro 2003.

PORTELA, C. Analysis of Main Aspects that Influence Recovery Voltage in No Load Line Switching Off. COPPE/UFRJ – C89-RT-ID001. Rio de Janeiro, 1989.

PETERSON, H. Transients in Power Systems. Dover Publications Incorporation. New York, 1966.

SOLVER, C., Morais, S. A., Line-Charging Current Interruption by EHV Circuit Breaker: Standard and Non-Standard Test Requirements as Determined by the Stress Applied and by Breaker-Capability Considerations . Rio de Janeiro, 1998.

STEVENSON, W. D. – Elements of Power Analysis, McGraw Hill Book Company, 4th Edition, USA.

Apêndice A

Definições de Siglas, Termos e Expressões

A seguir é apresentada, em ordem alfabética, a conceituação de alguns termos e expressões utilizados no texto.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica	Entidade pública federal, criada através da Lei 9427 de 26/12/96, subordinada ao Ministério das Minas e Energia, representante do Estado, com a função de equilibrar os interesses competitivos dos investidores e proteger pequenos consumidores, atuando nas chamadas imperfeições do mercado, assumindo o papel de arbitragem no setor, sendo responsável pelas concessões e autorizações para novos empreendimentos no setor. A ANEEL tem por finalidade regular e fiscalizar a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, em conformidade com as políticas e diretrizes do Governo Federal.
--	--

Batimento	Variação periódica da amplitude de uma oscilação que resulta da superposição de duas oscilações periódicas ligeiramente diferentes.
Ativos de Conexão	São as linhas de transmissão e subestações de uso exclusivo de um único usuário. A remuneração desses ativos é feita através de contratos de conexão celebrados entre a empresa transmissora e o usuário (CCT).
Autoprodutores	Pessoa física ou jurídica ou consórcio entre empresas que recebem concessão ou autorização para produção de energia elétrica destinada ao seu uso exclusivo (MAIA et al., 2000).
Barra de Carga	São aquelas onde estão diretamente ligados consumidores.
Barra de Geração	São aquelas onde estão diretamente ligados agentes de geração.
CCPE – Comitê Coordenador do Planejamento da Expansão dos Sistemas Elétricos	Agente do governo, diretamente subordinado ao Ministério das Minas e Energia, responsável pela elaboração do planejamento indicativo da expansão da geração e da transmissão, exceto no horizonte dos cinco primeiros anos, onde, apenas para a transmissão, assume o caráter determinativo.
Condição Normal de Operação	Condição em que o sistema está operando com todos os equipamentos e instalações previstos.
ELETROBRÁS – Centrais Elétricas Brasileiras S.A.	Empresa holding, controladora de empresas como a CHESF, FURNAS, ELETRONORTE e ELETROSUL, atua no setor com a função de viabilizar políticas de interesse do Governo Federal para o Setor Elétrico Brasileiro.

Empresas Distribuidoras	Pessoa jurídica que receba concessão ou permissão, precedida de licitação, para distribuir energia elétrica com tarifa regulada (MAIA et al., 2000).
Empresas Geradoras	Resultantes do processo de cisão das atuais empresas verticalizadas (MAIA et al., 2000).
Empresas Transmissoras	Empresas de transmissão, com receita regulada, resultantes do processo de cisão das empresas verticalizadas (MAIA et al., 2000).
ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico	Pessoa jurídica de direito privado com a atribuição legal de coordenar e controlar a operação da geração e transmissão nos Sistemas elétricos interligados.
Programa de Expansão	Conjunto de projetos que visam atender o mercado no horizonte planejado.
Projeto	Obra ou conjunto de obras com o objetivo de interligar sistemas existentes, aumentar a capacidade de transformação ou transmissão, ou ainda, melhorar a confiabilidade do sistema.
Rede Básica	Malha de transmissão responsável pela interligação entre a geração e a carga, sendo constituída por instalações energizadas em nível de tensão igual ou superior a 230kV, sendo operada e coordenada pelo ONS. De acordo com a resolução ANEEL nº 245 de 31/07/98, o poder concedente pode permitir que instalações com tensões inferiores a 230kV integrem a rede básica, desde que interliguem áreas do MAE, ou sejam relevantes para a operação do sistema elétrico da rede básica.

Regime Permanente	Condição do sistema quando não há variações transitórias em suas grandezas elétricas.
Sistema de Distribuição	Conjunto de instalações que servem para o transporte de energia elétrica, do sistema de subtransmissão, a partir das subestações de distribuição, até os consumidores finais, seja diretamente, ou através de transformação (a partir da rede secundária em baixa tensão). Este sistema opera geralmente com tensão igual ou inferior a 34,5kV.
Sistema de Subtransmissão	Conjunto de instalações que serve como elo de ligação entre os sistemas de transmissão e distribuição, destinado ao transporte de energia elétrica do sistema de transmissão, a partir das subestações de subtransmissão (abaixadoras transmissão/subtransmissão), até as subestações distribuidoras (abaixadoras subtransmissão/distribuição). Geralmente este sistema abrange as seguintes classes de tensão: 138, 88, 69 e 34,5kV.
Sistema de Transmissão	Conjunto de instalações, linhas e subestações, destinadas ao transporte de grandes blocos de energia elétrica entre a geração e as subestações que alimentam o sistema de subtransmissão. Este sistema abrange as classes de tensão superiores a 138kV.
Tensão Nominal de um Sistema	Valor eficaz da tensão de linha pelo qual o sistema é designado.

Apêndice B

Parâmetros Elétricos do Sistema e dos Equipamentos

A seguir são apresentados os parâmetros e dados gerais do sistema e dos equipamentos utilizados na modelagem da rede elétrica para execução das simulações.

Tabela B1: Linhas de transmissão 500 kV - Parâmetros elétricos

Linha de transmissão 500KV	Impedâncias						Comp. (km)
	Seqüência positiva			Seqüência zero			
	R1 (Ω /km)	X1 (Ω /km)	Y1 (mho/km)	Ro (Ω)	Xo (Ω)	Yo (mho/km)	
LT P.Dutra-B.Esperança	0,025	0,322	5,115	0,373	1,407	3,246	205,6
LT P.Dutra-Teresina C1	0,017	0,270	6,171	0,203	0,951	3,572	208,0
LT P.Dutra-Teresina C1	0,017	0,270	6,171	0,203	0,951	3,572	212,0
LT Teresina-Sobral C1	0,017	0,269	6,191	0,225	0,944	3,592	334,0
LT Teresina-Sobral C2	0,017	0,269	6,191	0,225	0,944	3,592	334,0
LT Sobral-Fortaleza C1	0,017	0,268	6,202	0,218	0,921	3,592	210,8
LT Sobral-Fortaleza C2	0,017	0,268	6,202	0,218	0,921	3,592	210,8
LT Fortaleza-Quixada	0,026	0,282	5,877	0,223	0,900	3,410	140,0

Tabela B2: Linhas de transmissão 230 kV - Parâmetros elétricos

Linha de transmissão 230KV	Impedâncias						Comp. (km)
	Seqüência positiva			Seqüência zero			
	R1 (Ω /km)	X1 (Ω /km)	Y1 (mho/km)	Ro (Ω)	Xo (Ω)	Yo (mho/km)	
LT B.Esperança-Teresina C1	0,102	0,520	3,185	0,453	1,642	2,256	198,0
LT B.Esperança-Teresina C2	0,102	0,520	3,185	0,453	1,642	2,256	198,0
LT Teresina-Teresina II C1	0,051	0,360	4,606	0,388	1,561	2,653	25,3
LT Teresina-Teresina II C2	0,051	0,360	4,606	0,388	1,561	2,653	25,3
LT Teresina-Piripiri	0,102	0,520	3,186	0,454	1,647	2,267	154,7
LT Piripiri-Sobral II	0,102	0,520	3,185	0,453	1,642	2,256	167,4
LT Sobral II-Cauipe	0,102	0,520	3,185	0,453	1,642	2,256	177,5
LT Sobral II-Sobral III C1	0,051	0,360	4,606	0,388	1,561	2,653	15,0
LT Sobral II-Sobral III C2	0,051	0,360	4,606	0,388	1,561	2,653	15,0
LT Cauipe-Fortaleza II C1	0,102	0,520	6,185	0,453	1,642	2,256	58,8
LT Cauipe-Fortaleza II C2	0,051	0,360	4,606	0,388	1,561	2,653	58,8
LT Cauipe-Fortaleza II C3	0,051	0,360	4,606	0,388	1,561	2,653	58,8

Tabela B3: Transformadores - Impedâncias

Subestação	Tensão (kV)			Impedância (% Sbase = 100MVA)			Pot. (MVA)	Unid.
	P	S	T	Xps	Xpt	Xst		
Fortaleza II	550 Y	230 Y	13,8 Δ	6,31	21,75	21,00	600	1
Fortaleza II	550 Y	230 Y	13,8 Δ	6,33	21,67	20,82	600	1
Sobral III	550 Y	230 Y	13,8 Δ	6,31	21,75	21,00	600	1
Teresina II	550 Y	230 Y	13,8 Δ	8,55	32,10	37,90	300	2
Teresina II	230 Y	-	13,8 Δ	-	12,21	-	150	1
Boa Esperança II	550 Y	230 Y	13,8 Δ	8,55	37,90	32,10	300	1

Legenda: Y = ligação estrela aterrada, Δ = ligação em delta

Tabela B4: Curva VxI - AT1
550/230/13,8kV-3x100MVA
SE Teresina II

I (pu)	V (pu)
0,634	1,00
0,641	1,10
0,655	1,20
0,733	1,30
0,988	1,40
1,667	1,45
3,168	1,15

$V_b = 550 / \sqrt{3}$ kV, $S_b = 100$ MVA

Tabela B5: Curva VxI - AT2
550/230/13,8kV-3x100MVA
SE Teresina II

I (pu)	V (pu)
0,530	0,80
0,573	0,90
0,766	1,00
1,382	1,10
1,992	1,15

$V_b = 550 / \sqrt{3}$ kV, $S_b = 100$ MVA

Tabela B6: Curva VxI - AT1 e AT2
550/230/13,8kV-3x200MVA
SE Fortaleza II

I (pu)	V (pu)
0,553	0,70
0,635	0,80
0,648	0,82
0,700	0,90
0,705	0,91
0,753	1,00
2,203	1,10
9,338	1,20

$V_b = 550 / \sqrt{3}$ kV, $S_b = 200$ MVA

Tabela B7: Curva VxI - AT
550/230/13,8kV-3x100MVA
SE B.Esperança

I (pu)	V (pu)
0,005	1,00
0,014	1,10
0,029	1,20
0,049	1,30
0,089	1,40
0,140	1,45
0,199	1,50
0,262	1,55

$V_b = 550 / \sqrt{3}$ kV, $S_b = 100$ MVA

Tabela B8: Impedâncias equivalentes - Configuração 2005

Subestação	Seqüência positiva		Seqüência zero	
	Resistência (Ω)	Reatância (Ω)	Resistência (Ω)	Reatância (Ω)
P.Dutra 500 kV	2,88	30,8	13,73	71,6
Quixadá 500 kV	10,74	156,2	83,82	396,7
Fortaleza II 230 kV	15,59	79,6	0,23	6,81
B.Esperança II 230 kV	0,32	66,4	132,25	21,6
B.Esperança II 500 kV	12,23	82,4	110,69	430,0

Tabela B9: Potência nominal e relação X0/X1 dos reatores

Reator	SE	Tipo	Vbase (kV)	Potência (MVA)	Xo/X1
LT P.Dutra-B.Esperança	P.Dutra	linha	500	96	1,70
LT P.Dutra-B.Esperança	P.Dutra	linha	500	96	1,70
LT P.Dutra-Teresina C1	P.Dutra	linha	500	146	1,80
LT P.Dutra-Teresina C2	P.Dutra	linha	500	146	1,80
LT P.Dutra-B.Esperança	B.Esperança	linha	500	100	1,73
LT P.Dutra-Teresina C1	Teresina	linha	500	98	1,53
LT P.Dutra-Teresina C2	Teresina	linha	550	98	1,53
LT Teresina-Sobral C1	Teresina	linha	500	146	1,80
LT Teresina-Sobral C1	Teresina	linha	500	146	1,80
LT Teresina-Sobral C2	Teresina	linha	500	150	-
LT Teresina-Sobral C2	Teresina	linha	500	150	-
LT Teresina-Sobral C1	Sobral	linha	500	146	1,80
LT Teresina-Sobral C2	Sobral	linha	500	150	-
LT Sobral-Fortaleza C1	Sobral	linha	500	146	1,80
LT Sobral-Fortaleza C2	Sobral	linha	500	150	-
LT Sobral-Fortaleza C1	Fortaleza	linha	500	150	1,80
LT Sobral-Fortaleza C2	Fortaleza	linha	500	150	-
LT Fortaleza-Quixadá	Fortaleza	linha	500	150	-
LT B.Esperança-Teresina C1	Teresina	linha	230	10	-
LT B.Esperança-Teresina C2	Teresina	linha	230	10	-
LT Piripiri-Sobral	Sobral	linha	230	10	-
LT Sobral-Caiupe	Sobral	linha	230	10	-
LT Piripiri-Sobral	Piripiri	linha	230	10	-

Obs.: Todos os reatores são representados como impedâncias constantes

Tabela B10: 2005 - Cargas

Subestação	Carga (MVA)
SE Cauipe 230 kV	203,7 + j44,7
SE Sobral 230 kV	217,8 + j13,8
SE Piripiri 230 kV	83,2 + j16,6
SE Teresina 230 kV	331,6 + j60,5
SE B.Esperança 230 kV	(55,6 + j20,6).

Obs. Todas as cargas são representadas como impedâncias constantes

Compensador síncrono da SE Teresina

Impedância subtransitória:

$$X''_d = 16,0\%, S_b = 150 \text{ MVA} \text{ e } V_b = 13,8 \text{ kV}$$

Apêndice C

Oscilogramas

A seguir são apresentados os oscilogramas de tensão e corrente correspondentes aos diversos casos de estudos dinâmicos na frequência fundamental e de rejeição de carga seguida de abertura de linha em vazio para a linha de 500 kV Teresina – Sobral – Fortaleza.

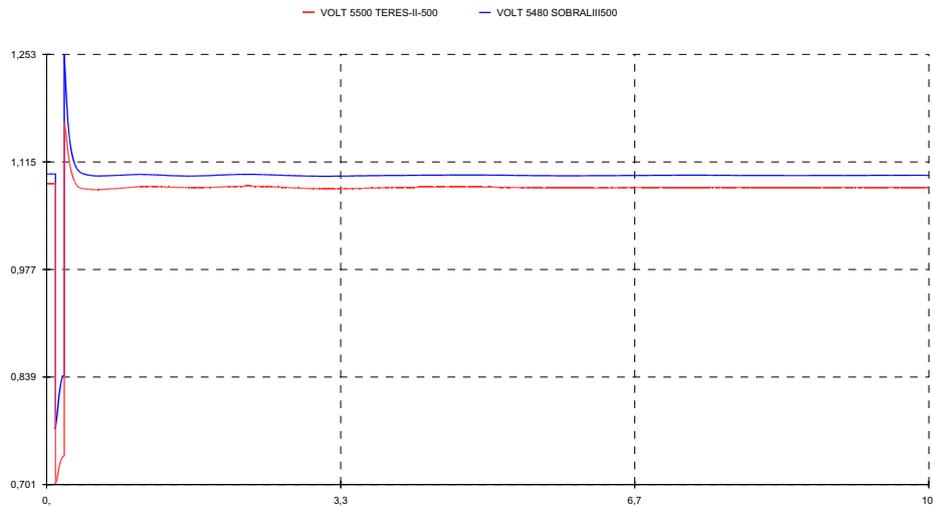


Figura C1: Estudo Dinâmico - Abertura simples da LT TSD-SBT sobre SBT permanecendo conectada em SBT com o autotransformador 550/230kV de SBT em operação

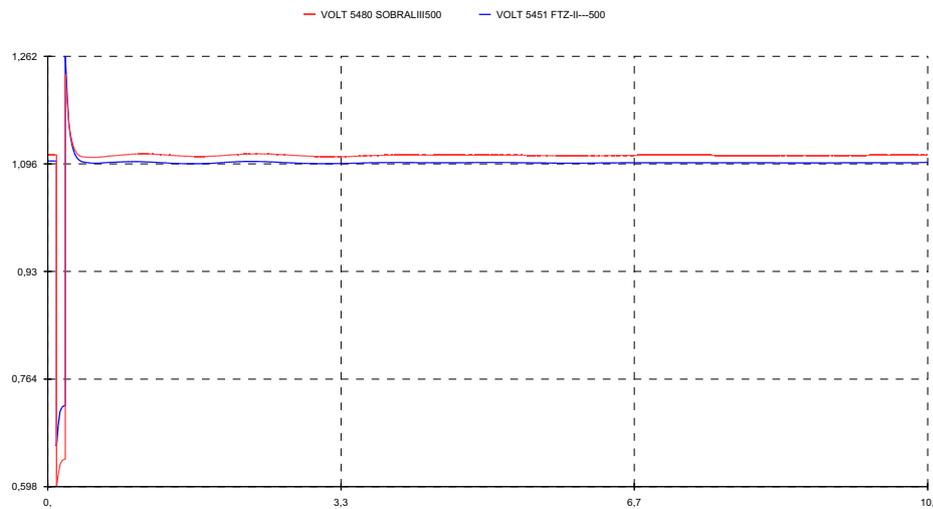


Figura C2: Estudo Dinâmico - Abertura simples da LT SBT-FZD sobre FZD permanecendo conectada em FZD com o autotransformador 550/230kV de SBT em operação

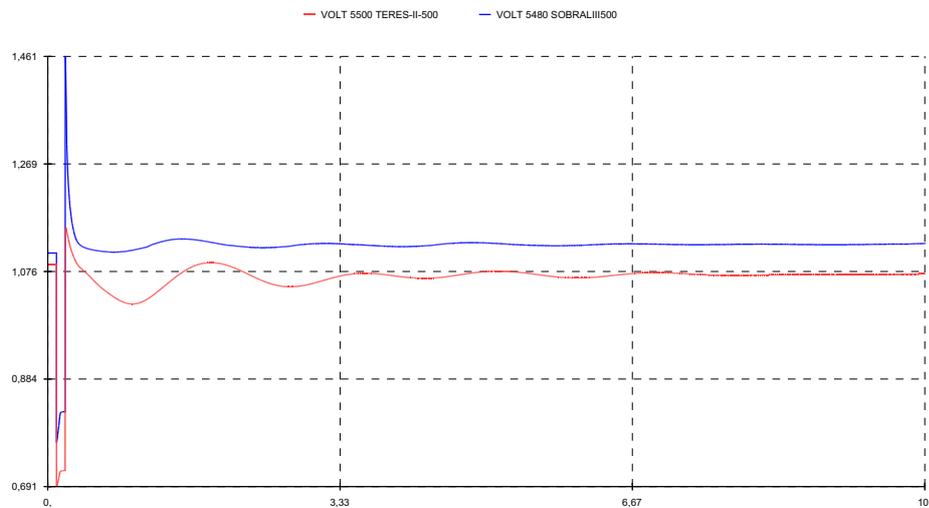


Figura C3: Estudo Dinâmico - Abertura dupla da LT TSD-SBT sobre SBT Permanecendo conectada em SBT com o autotransformador 550/230kV de SBT em operação

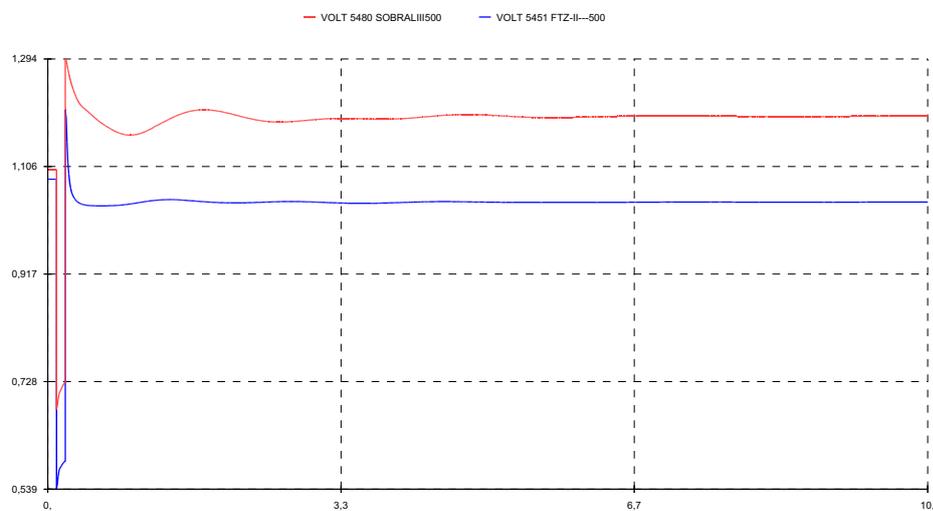
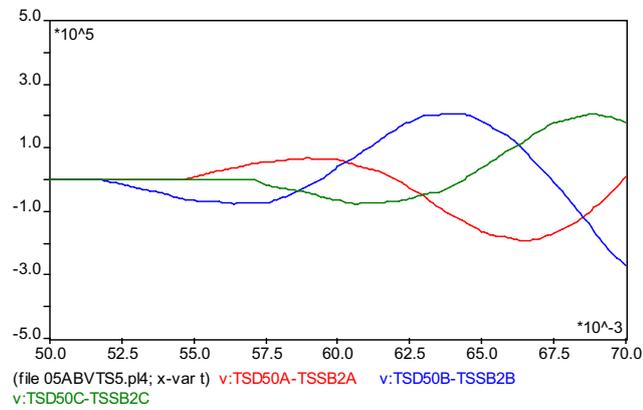
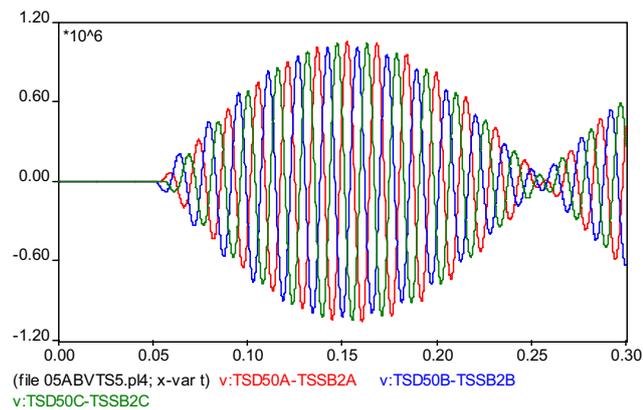


Figura C4: Estudo Dinâmico - Abertura dupla da LT SBT-FTZ sobre SBT permanecendo conectadas em SBT sem o autotransformador 550/230kV de SBT em operação

Corrente pré-abertura

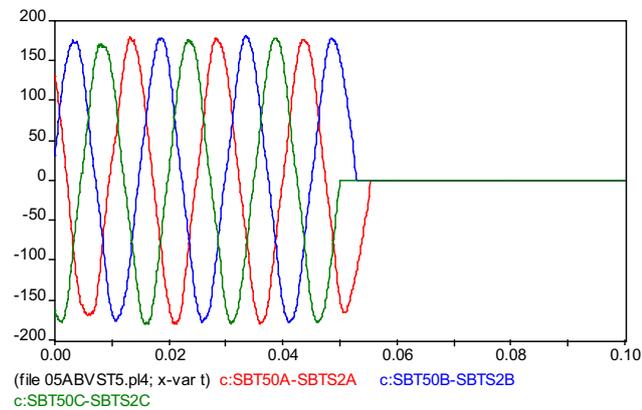


Tensão de restabelecimento

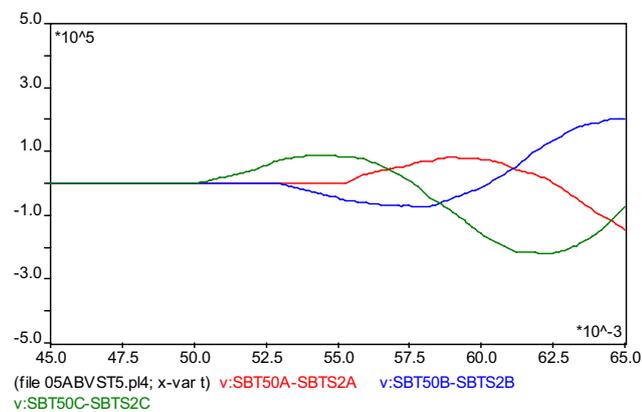


Tensão após a abertura - batimento

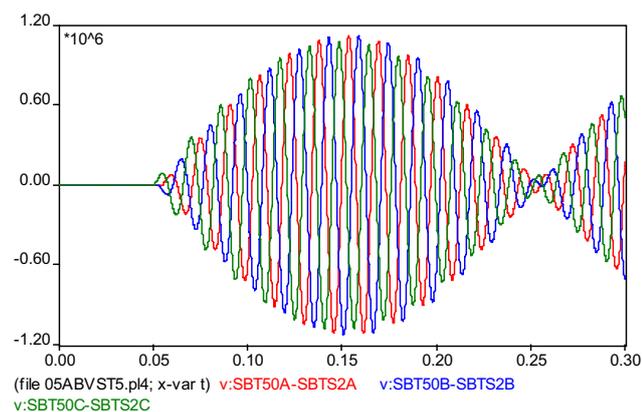
Figura C5: Metodologia 1 - Abertura de linha em vazio, LT Teresina-Sobral 500 kV C2
SE Teresina - Caso 1 - Sem falta



Corrente pré-abertura

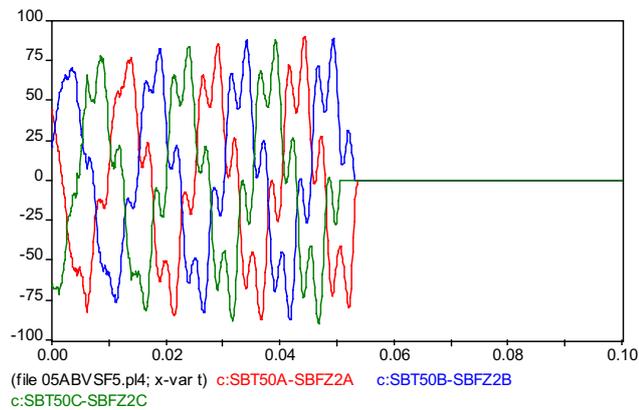


Tensão de restabelecimento

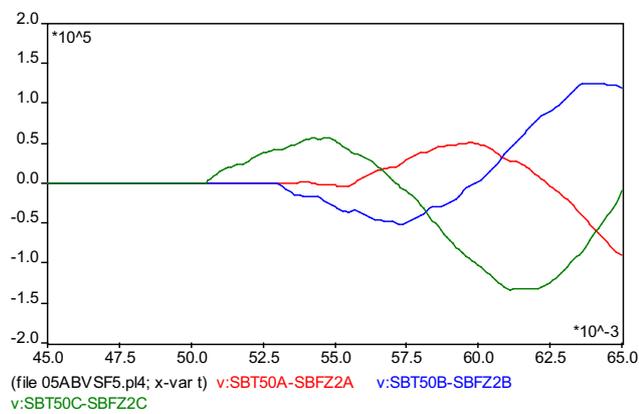


Tensão após a abertura - batimento

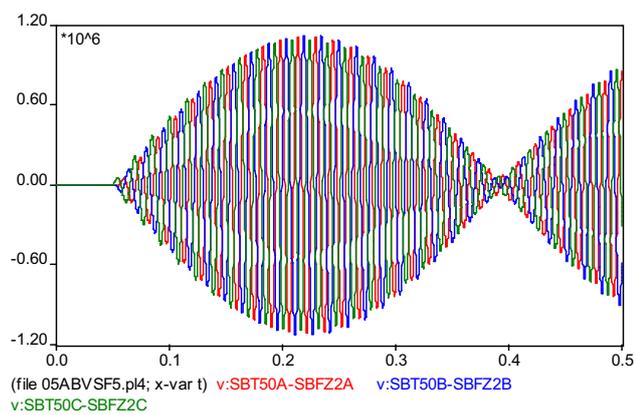
Figura C6: Metodologia 1 - Abertura de linha em vazio, LT Teresina-Sobral 500 kV C2
SE Sobral - Caso 2 - Sem falta



Corrente pré-abertura

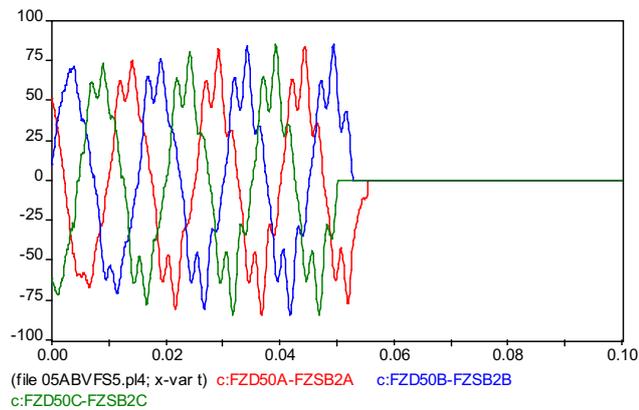


Tensão de restabelecimento

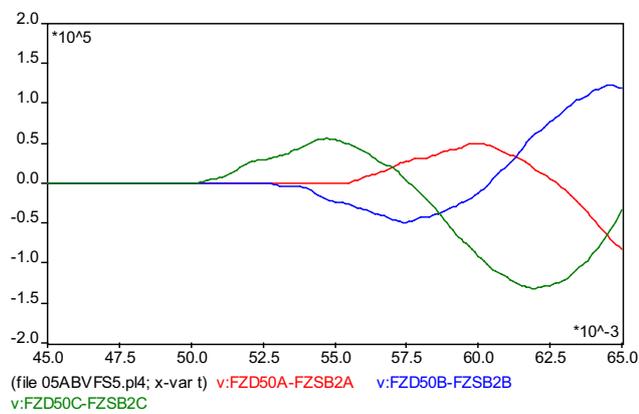


Tensão após a abertura - batimento

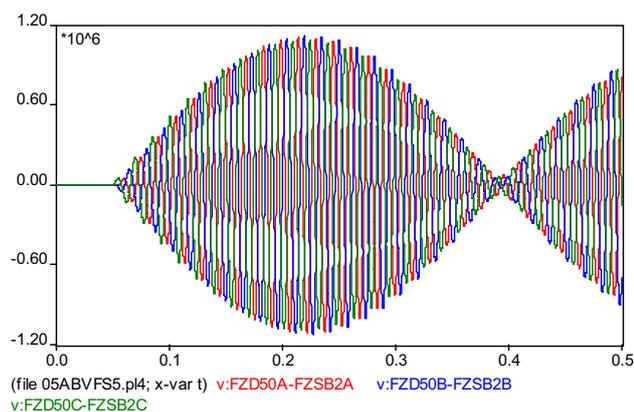
Figura C7: Metodologia 1 - Abertura de linha em vazio, LT Sobral-Fortaleza 500 kV C2
SE Sobral - Caso 3 - Sem falta



Corrente pré-abertura



Tensão de restabelecimento



Tensão após a abertura - batimento

Figura C8: Metodologia 1 - Abertura de linha em vazio, LT Sobral-Fortaleza 500 kV C2 SE Fortaleza - Caso 4 - Sem falta

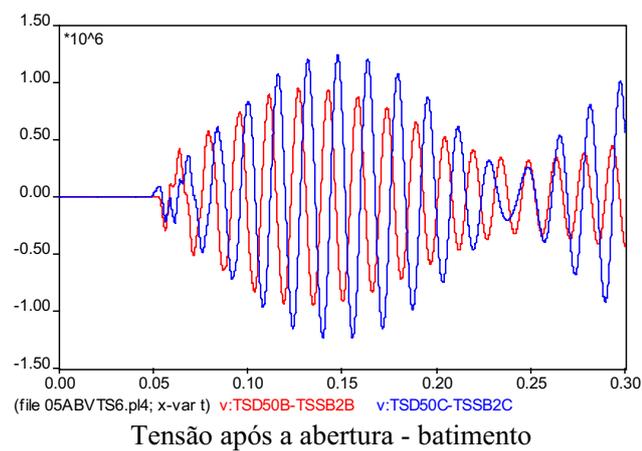
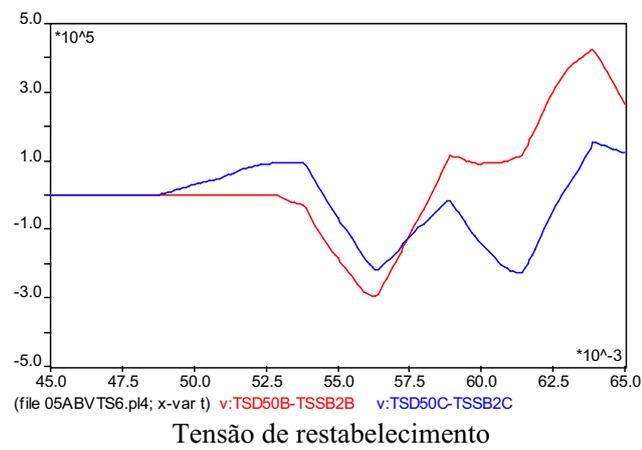
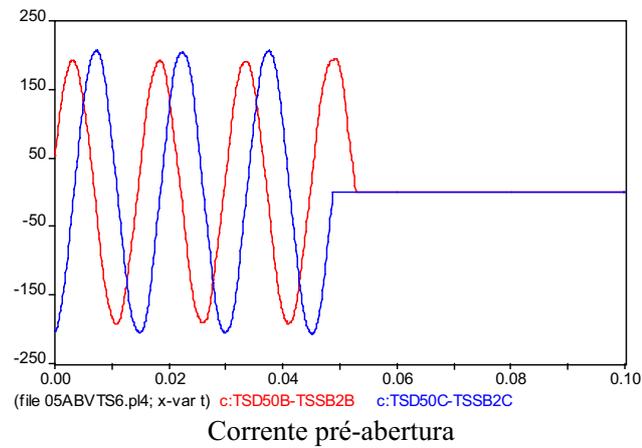


Figura C9: Metodologia 1- Abertura de linha em vazio, LT Teresina-Sobral 500 kV C2
SE Teresina - Caso 5 - Com falta

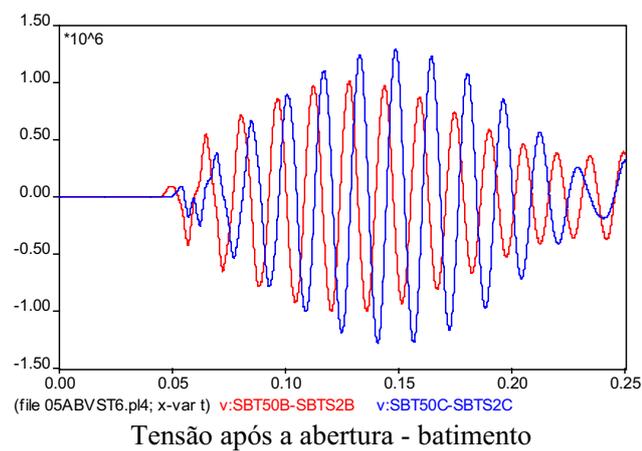
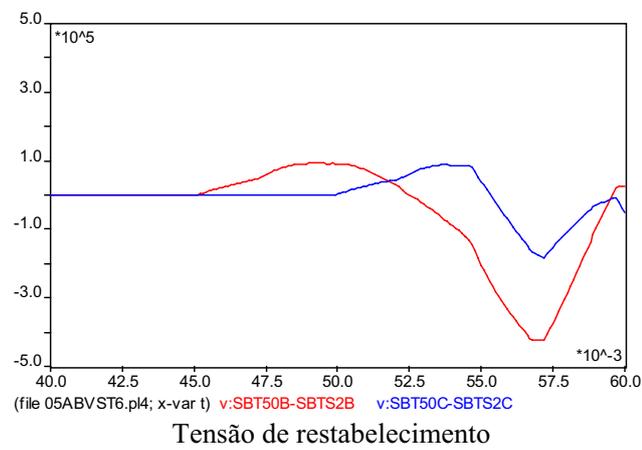
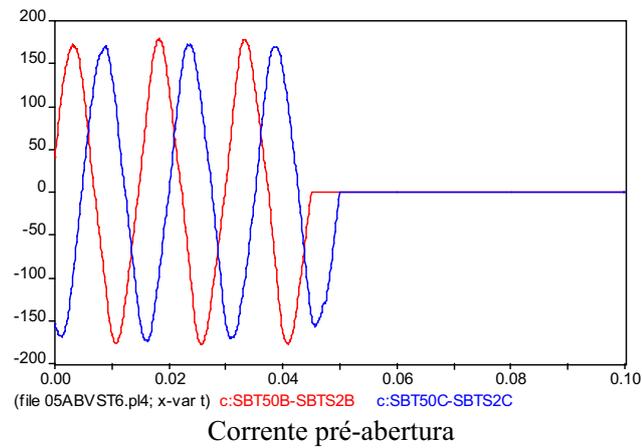


Figura C10: Metodologia 1-Abertura de linha em vazio, LT Teresina-Sobral 500 kV C2 SE Sobral - Caso 6 - Com falta

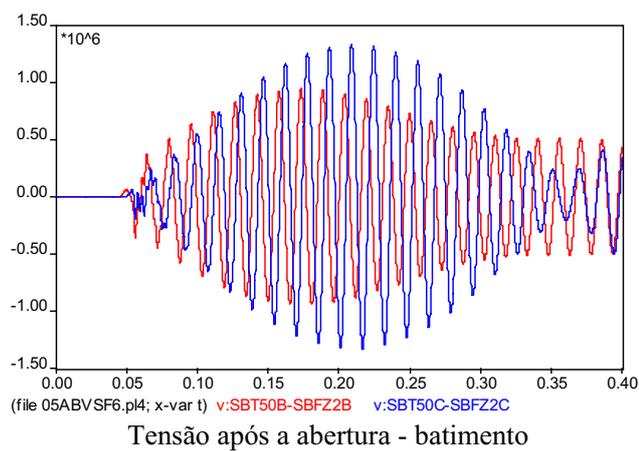
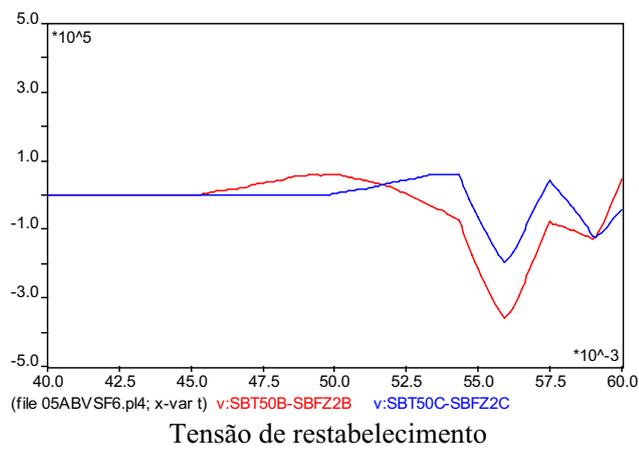
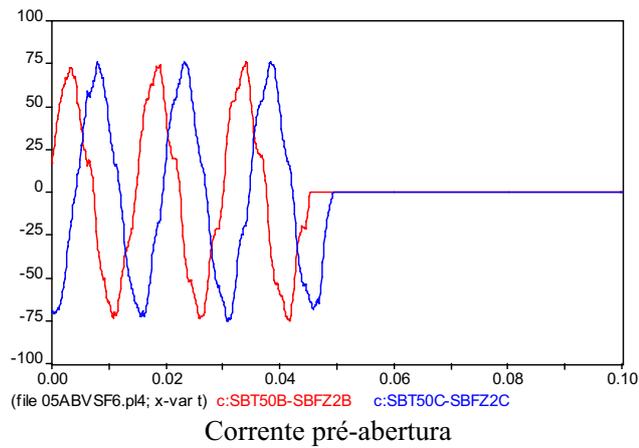


Figura C11: Metodologia 1-Abertura de linha em vazio, LT Sobral-Fortaleza 500 kV C2
SE Sobral - Caso 7 - Com falta

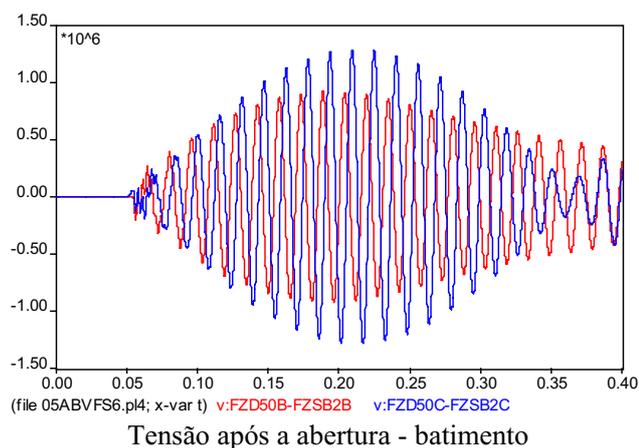
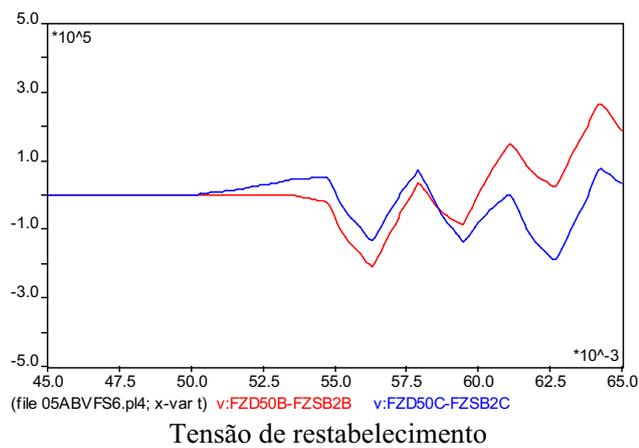
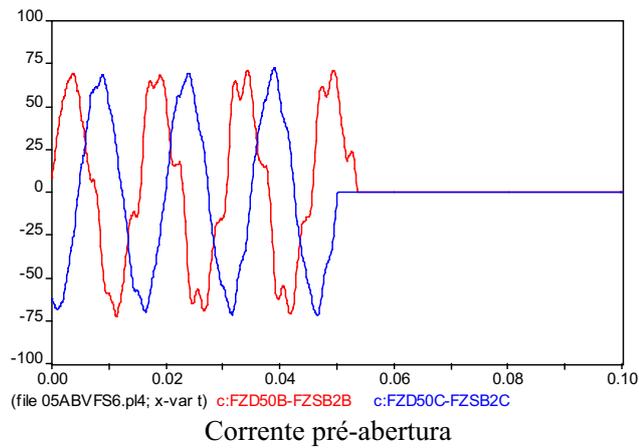


Figura C12: Abertura de linha em vazio, LT Sobral-Fortaleza 500 kV C2
SE Fortaleza - Caso 8 - Com falta

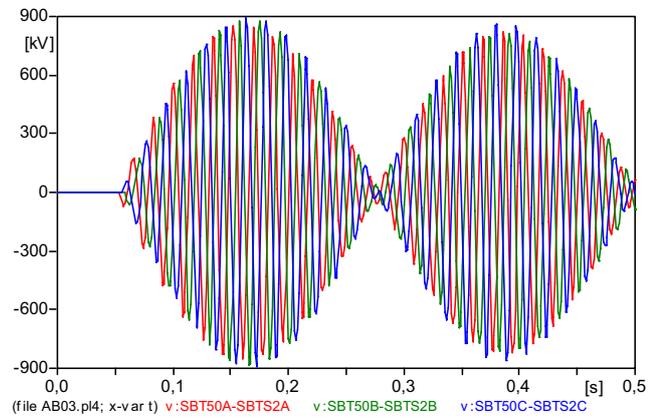


Figura C13: Abertura de linha em vazio, LT Teresina - Sobral 500 kV C2
SE Sobral - Caso 10 - Sem falta

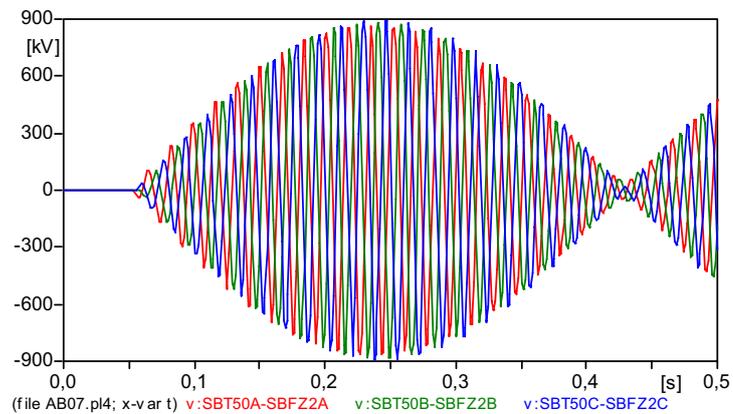


Figura C14: Abertura de linha em vazio, LT Sobral - Fortaleza 500 kV C2
SE Sobral - Caso 11 - Sem falta

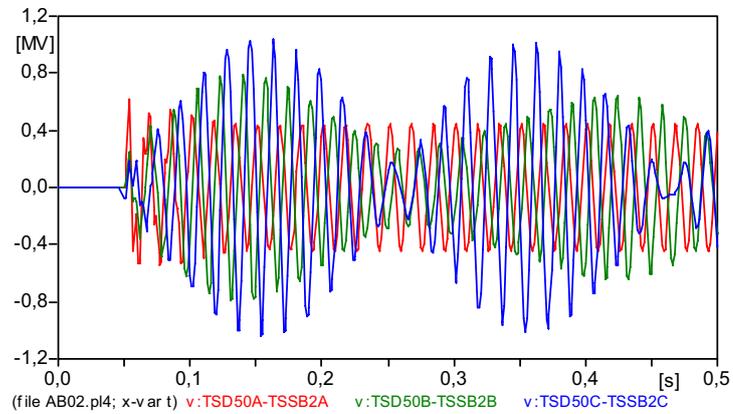


Figura C15: Abertura de linha em vazio, LT Teresina - Sobral 500 kV C2
SE Sobral - Caso 13 - Com falta

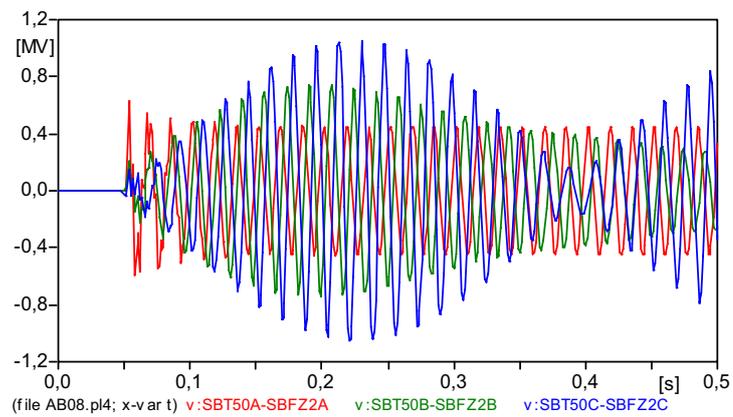


Figura C16: Abertura de linha em vazio, LT Sobral - Fortaleza 500 kV C2
SE Sobral - Caso 15 - Com falta

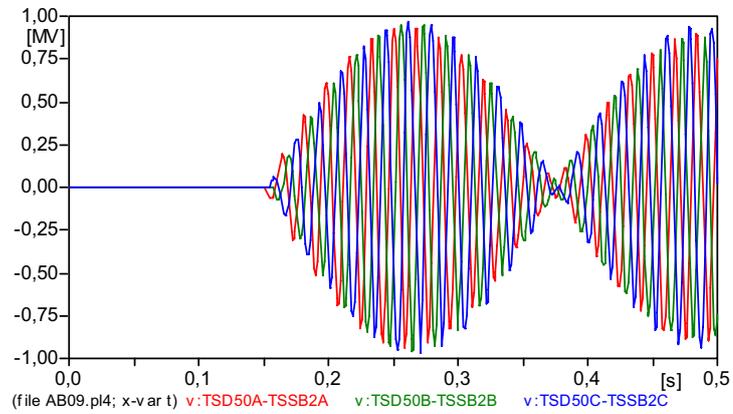


Figura C17: Abertura de linha em vazio, LT Teresina - Sobral 500 kV C2
SE Teresina - Caso 17 - Sem falta

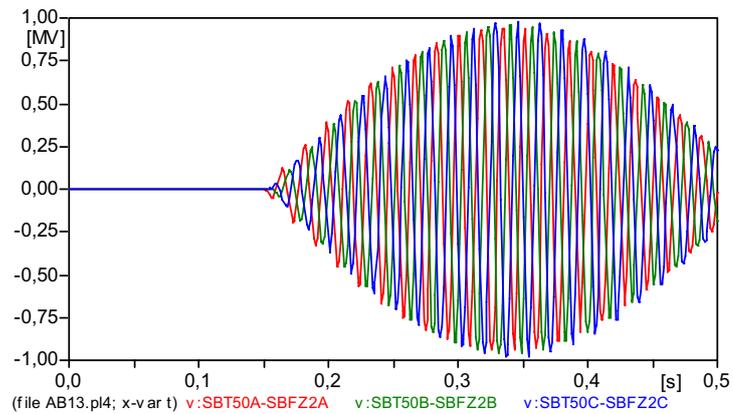


Figura C18: Abertura de linha em vazio, LT Sobral - Fortaleza 500 kV C2
SE Sobral - Caso 19 - Sem falta

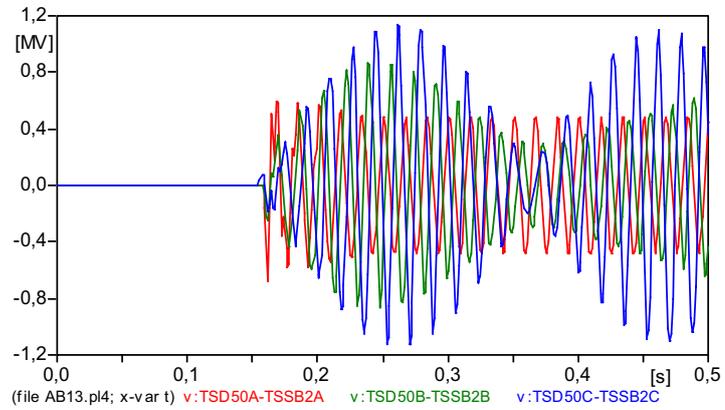


Figura C19: Abertura de linha em vazio, LT Teresina - Sobral 500 kV C2
SE Teresina - Caso 21 - Com falta

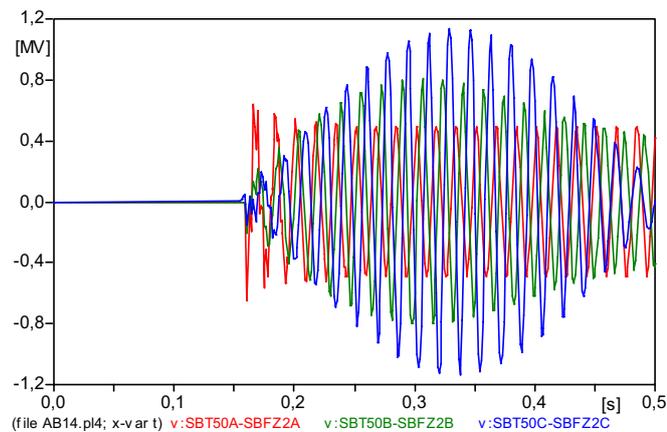


Figura C20: Abertura de linha em vazio, LT Sobral - Fortaleza 500 kV C2
SE Sobral - Caso 23 - Com falta

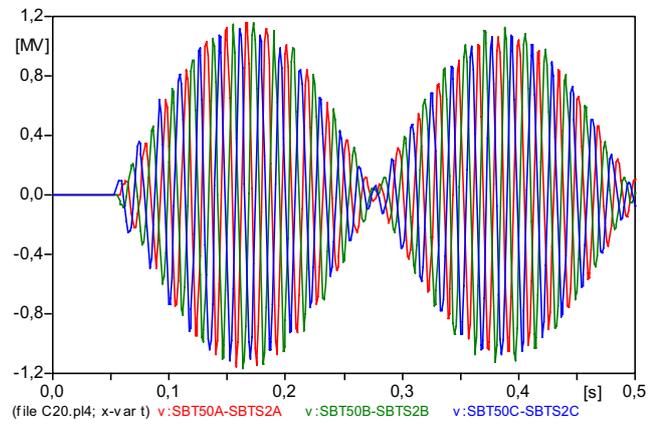


Figura C21: Abertura de linha em vazio, LT Teresina - Sobral 500 kV C2
SE Sobral - Caso 27 - Com falta

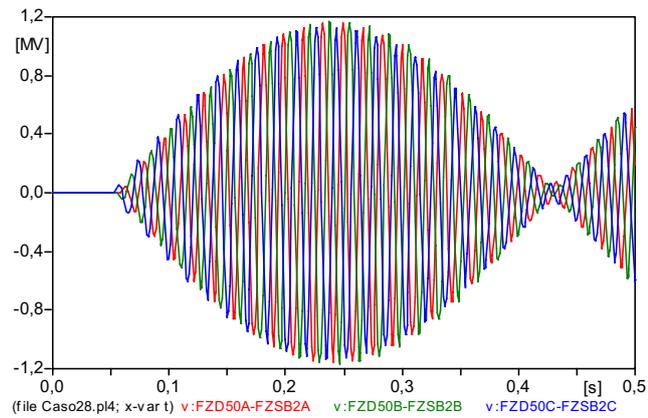


Figura C22: Abertura de linha em vazio, LT Sobral - Fortaleza 500 kV C2
SE Fortaleza - Caso 31 - Com falta