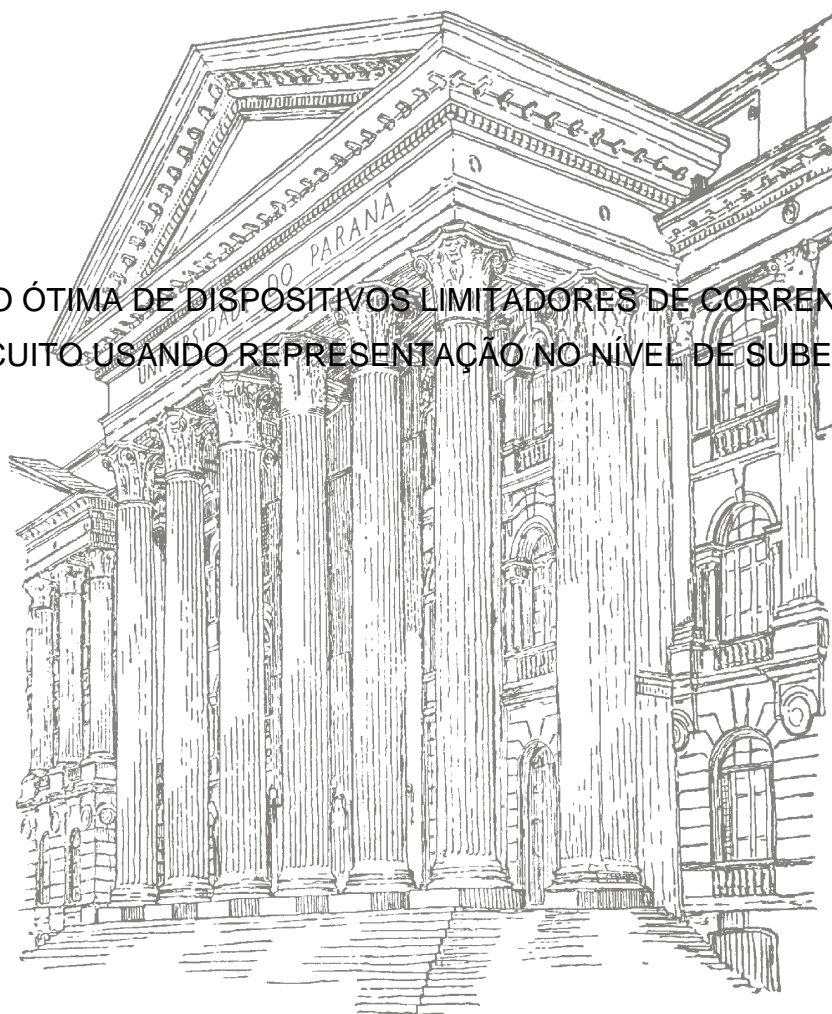


ISABEL SCHVABE DUARTE

ALOCAÇÃO ÓTIMA DE DISPOSITIVOS LIMITADORES DE CORRENTE DE
CURTO-CIRCUITO USANDO REPRESENTAÇÃO NO NÍVEL DE SUBESTAÇÃO



CURITIBA

2013

ISABEL SCHVABE DUARTE

ALOCAÇÃO ÓTIMA DE DISPOSITIVOS LIMITADORES DE CORRENTE DE
CURTO-CIRCUITO USANDO REPRESENTAÇÃO NO NÍVEL DE SUBESTAÇÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof^a Dr^a Thelma Piazza Fernandes
Co-orientadora: Prof^a Dr^a Elizete Maria Lourenço

CURITIBA

2013

Duarte, Isabel Schwabe

Alocação ótima de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito usando representação no nível de subestação / Isabel Schwabe Duarte. – Curitiba, 2013.

139 f. : il.; tab.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Thelma Piazza Fernandes

Coorientadora: Elizete Maria Lourenço

1. Disjuntores elétricos. 2. Algoritmos genéticos. I. Fernandes, Thelma Piazza. II. Lourenço, Elizete Maria. III. Título.

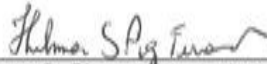
CDD 621.317

TERMO DE APROVAÇÃO

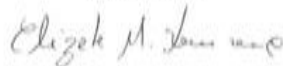
ISABEL SCHVABE DUARTE

**ALOCAÇÃO ÓTIMA DE DISPOSITIVOS LIMITADORES DE
CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO USANDO REPRESENTAÇÃO
NO NÍVEL DE SUBESTAÇÃO**

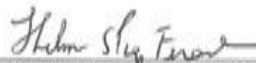
Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná.



Prof.^a Thelma S. Piazza Fernandes, Dr.^a
Orientadora

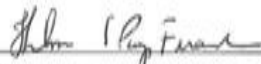


Prof.^a Elizete Maria Lourenço, Dr.^a
Co-Orientadora



Prof.^a Thelma S. Piazza Fernandes, Dr.^a
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora



Prof.^a Thelma Solange Piazza Fernandes, Dr.^a (UFPR)
Presidente



Prof. Katia Campos de Almeida, Dr.^a (UFSC)



Prof. Roman Kuiava, Dr. (UFPR)

CURITIBA, 04 DE MARÇO DE 2013.

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora Prof^a. Thelma Piazza Fernandes pela orientação, paciência e confiança. Obrigada por todas as conversas, conselhos e ensinamentos que contribuíram para o meu crescimento profissional e pessoal. A ela a minha enorme admiração pessoal e profissional.

À minha co-orientadora Prof^a Elizete Maria Lourenço por ter me aceitado como orientada, pelas importantes sugestões e contribuições no trabalho. Meu respeito e admiração.

Ao Prof. Gustavo, à Prof^a. Katia e ao Prof. Roman pelas contribuições para melhorias do trabalho. Também aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica, em especial ao Prof. Nelson Santos por sempre ser tão acessível e solícito, pela atenção e pelas conversas agradáveis e ao Prof. Evelio Fernández, pela dedicação com o programa.

Às secretárias Gina, Silvana, Deise e Raquel e ao Chico, sempre solícitos e disponíveis.

Aos colegas e amigos que tiveram paciência, deram apoio e torceram por mim.

À minha família, fundamental nesse processo. Amo muito vocês! À minha super mãe, Stelinha, pelo esforço incondicional de me formar cidadã, pela educação, formação, por todos os momentos alegres e de realizações. Meu pai, Augusto, que mostra o mundo através de uma perspectiva interessante, obrigada por acreditar, ajudar e incentivar meu trabalho. Meu “paidrasto”, Ednei, sempre presente, pelo incentivo, generosidade, conforto, segurança e paciência durante todos esses anos. Aos meus avós, Dona Elsa e Seu Victor, antes de tudo pelo exemplo de integridade. Tenho o maior orgulho de ser a neta de vocês. Obrigada pelos mimos (colo, cafés, biscoitinhos e etc) e amor. À minha irmã, Ana, agradeço muito pela atenção e paciência nos últimos meses. Sem você esse sonho não teria se tornado realidade.

À Universidade Federal do Paraná e ao programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica pela oportunidade e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pelo auxílio.

“Cada dia que nasce é o primeiro para uns e será o último para outros e que, para maioria, é só um dia a mais.”

José Saramago

RESUMO

O constante crescimento do parque gerador e transmissor exige a realização contínua do cálculo dos níveis de corrente de curto-circuito que circulam pelos disjuntores instalados nas subestações a fim de se sinalizar os que estão superados. No entanto, as metodologias existentes para cálculo das correntes de curto-circuito utilizam o convencional modelo barra-ramo que impede a análise dos componentes internos às subestações, e que quando necessários devem ser feitos a parte, num processo dispendioso de tempo e de precisão. Para contornar estas questões, este trabalho propõe uma extensão da tradicional formulação matemática para cálculo de curto-circuito, de forma a torná-la capaz de processar redes modeladas no nível de subestação. Visando obter soluções para contornar as superações dos disjuntores internos às subestações, o trabalho também apresenta uma ferramenta para a alocação otimizada de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito - DLCCs, que são alocados neste trabalho através da utilização dos Algoritmos Genéticos Multiobjetivos - AGM, juntamente com a formulação do cálculo de curto-circuito no nível de subestação. Assim, o trabalho tem a capacidade de sinalizar os disjuntores superados e de informar a dimensão e disposição dos DLCCs para solucionar o problema de superação destes disjuntores. Esta metodologia foi testada no sistema de 5 barras e no sistema real de 291 barras, referente ao sistema elétrico do estado do Paraná.

Palavras-chave: Algoritmo Genético Multiobjetivo, Alocação de Dispositivos Limitadores de Corrente de Curto-Circuito, Corrente de Curto-Circuito, Disjuntor, Modelagem no Nível de Subestação.

ABSTRACT

The constant growth of the power generation and transmission network requires continued calculation of the levels of short-circuit current through the circuit breakers installed in substations to signal possible overrating. Existing methodologies for calculating short-circuit currents, however, are based on the conventional bus/branch model that prevents the analysis of internal components of the substations, which should be conducted separately when needed, in a time consuming and detailed process. To contour these issues, this study proposes an extension of the traditional mathematical formula for short-circuit calculation to allow the processing of modeled networks at substation level. In order to solve the problem of circuit breakers overrating, the work also presents a tool for the optimized allocation of Current Limiting Devices - CLDs, which will be allocated in this work through the Multiobjective Genetic Algorithm - MGA together with the calculation of short-circuit by substation level. Thus, the work has the ability to signal circuit breakers overrated and inform the size and disposition of DLCCs to solve the problem of overvaluation of these circuit breakers. This methodology was tested using systems of 5 buses and 291 buses that is the equivalent of the electric network of the Paraná at Brazil.

Keywords: Multiobjective Genetic Algorithm, Allocation of Current Limiting Devices, Short-Circuit Current, Circuit Breaker, Substation Level Modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Critérios simplificados para identificação de superação das barras na análise preliminar	25
Figura 2.2 - Interior da câmara de extinção de um disjuntor a ar interrompendo uma falta	28
Figura 2.3 - Carregamento em condição normal e emergência	30
Figura 2.4 – Corrente de curto-circuito na subestação.....	32
Figura 2.5 - Corrente de curto-circuito em condição de <i>line-out</i>	33
Figura 2.6 - Restrição operativa por seccionamento de barra.....	37
Figura 2.7 - Restrição operativa por radialização de circuitos	38
Figura 2.8 - Comportamento dos DLCCs em uma falta típica	41
Figura 2.9 - RLC na subestação Mogi das Cruzes 345 kV.....	43
Figura 2.10 - Circuito com RLC como limitador de corrente de curto-circuito	43
Figura 2.11 - Componentes do dispositivo pirotécnico.....	44
Figura 2.12 - Etapas de funcionamento do dispositivo pirotécnico.....	45
Figura 2.13 - SLCC tipo resistivo.....	46
Figura 2.14 - SLCC tipo indutivo	46
Figura 2.15 - Circuito com SLCC tipo ponte como limitador da corrente de curto-circuito.....	46
Figura 2.16 - Circuito equivalente do TCSC.....	47
Figura 2.17 - Circuito equivalente genérico IPC	48
Figura 2.18 - Instalação dos DLCCs	49
Figura 2.19 - DLCCs seccionando barramento	50
Figura 2.20 - DLCCs em série com os circuitos alimentadores.....	50
Figura 2.21 - DLCCs em série com os circuitos de saída	51
Figura 3.1 - Casos de curtos-circuitos nas redes trifásicas	53
Figura 3.2 - Sequência positiva	54
Figura 3.3 - Sequência negativa.....	55
Figura 3.4 - Sequência zero	55
Figura 3.5 - Variação da corrente de curto-circuito e suas componentes	58
Figura 3.6 - Circuito equivalente por fase de sequência positiva, negativa e zero para o gerador.....	59

Figura 3.7 - Circuitos equivalentes por fase de seqüências positiva, negativa e zero para a linha de transmissão	60
Figura 3.8 - Modelo de transformador tipo “shell” e “core” para as seqüências positiva e negativa.....	61
Figura 3.9 - Modelo de transformador tipo shell para a seqüência zero.....	62
Figura 3.10 - Modelo de transformador tipo core para a seqüência zero	63
Figura 3.11 - Diagrama unifilar do sistema 5 barras.....	63
Figura 3.12 - Fluxograma principal do cálculo matricial de curto-circuito na modelagem barra-ramo a rede.....	67
Figura 4.1 - Diagrama unifilar do sistema 5 barras: (a)modelagem barra-ramo (b)modelagem no nível de seção de barras	74
Figura 4.2 - Representação de ramos convencionais	75
Figura 4.3 - Representação dos disjuntores.....	76
Figura 4.4 - Circuito elétrico com ramo de impedância nula	77
Figura 5.1 – Estrutura geral da metodologia	84
Figura 5.2 - Fluxograma da metodologia para alocação	91
Figura 5.3 – Codificação geral de um indivíduo	96
Figura 6.1 – Sistema teste original 5 barras – modelagem barra-ramo.....	102
Figura 6.2 – Sistema resultante 11 barras – barra 3 modelada no nível de seção de barras	103
Figura 6.3 – Sistema de 5 barras –falta trifásica na barra 1	104
Figura 6.4 – Sistema de 11 barras –falta trifásica na barra 1	104
Figura 6.5 - Contribuições das correntes de curto-circuito simétricas para uma falta na barra 3 do sistema teste 5 barras.....	106
Figura 6.6 –Contribuições das correntes de curto para a falta na barra 6 do sistema sem alocação - sistema 11 barras.....	107
Figura 6.7 – Sistema 11 barras - <i>Teste 1</i> - Contribuições para a falta na seção de barra 6s.....	109
Figura 6.8 – Sistema 11 barras - <i>Teste 2</i> - Solução 2 - Contribuições para a falta na seção de barra 6	111
Figura 6.9 – Sistema 11 barras - <i>Teste 3</i> - Fronteira de Pareto	115
Figura 6.10 – Sistema 11 barras - <i>Teste 3</i> - Solução 27 - Contribuições para a falta na seção de barra 6s.....	116
Figura 6.11 – Sistema teste original 291 barras – modelagem barra-ramo.....	117

Figura 6.12 – Sistema equivalente 296 barras – SE Bateias 525kV modelada no nível de seção de barras	117
Figura 6.13 – Sistema 291 barras – falta fase-terra na barra 116.....	118
Figura 6.14 - Sistema 291 barras – falta fase-terra na seção de barra 117s	118
Figura 6.15 --Contribuições das correntes de curto para a falta na seção de barra 106s do sistema sem alocação	120
Figura 6.16 – Sistema 296 barras - <i>Teste 1</i> - Contribuições para a falta na seção de barra 106s	122
Figura 6.17 – Sistema 296 barras - <i>Teste 2</i> - Contribuições para a falta na seção de barra 116s	124
Figura 6.18 – Sistema 296 barras - <i>Teste 3</i> - Fronteira de Pareto	125
Figura 6.19 – Sistema 296 barras - <i>Teste 3</i> - Solução MCG - Contribuições para a falta na seção de barra 106s.....	126
Figura A.1 – Sistema teste original 5 barras – modelagem barra-ramo	138
Figura A.2 – Sistema 11 barras – nível de seção de barras	139
Figura B.1 – Sistema teste original 291 barras – modelagem barra-ramo	140
Figura B.2 – Sistema teste 296 barras – modelagem no nível de seção de barras da subestação Bateiras 525kV	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Critérios adotados para análise de superação de equipamentos de alta tensão	26
Tabela 2.2 - Critérios simplificados para identificação de superação de disjuntores pela relação X/R	34
Tabela 2.3 - Principais DLCCs	42
Tabela 5.1 – Critérios de superação por assimetria adotados para os disjuntores ...	88
Tabela 5.2 – Valor de $ksupi$ para FO caso a solução não solucione o problema de superação.....	93
Tabela 5.3 - Parâmetros dos AGs	98
Tabela 6.1 - Custos dos RLCs	101
Tabela 6.2 – Representação binária das reatâncias do RLC	101
Tabela 6.3 – Resultados para o Sistema 5 barras	105
Tabela 6.4 – Análise preliminar para o caso base do sistema 5 barras	106
Tabela 6.5 – Caso base de superação para os disjuntores da subestação 3 – sistema 11 barras.....	107
Tabela 6.6 – Testes realizados para os disjuntores superados - Sistema 11 barras	108
Tabela 6.7– Solução do <i>Teste 1</i> - Sistema 11 barras	108
Tabela 6.8 – Funções objetivos do <i>Teste 1</i> - Sistema 11 barras.....	108
Tabela 6.9– Resultados do <i>Teste 1</i> - Sistema 11 barras	108
Tabela 6.10– Soluções do <i>Teste 2</i> - Sistema 11 barras.....	110
Tabela 6.11 – Funções objetivos do <i>Teste 2</i> - Sistema 11 barras.....	110
Tabela 6.12– Resultados do <i>Teste 2</i> - Solução 2 - Sistema 11 barras	111
Tabela 6.13– Soluções do <i>Teste 3</i> - Sistema 11 barras.....	112
Tabela 6.14 – Funções objetivos do <i>Teste 3</i> - Sistema 11 barras.....	114
Tabela 6.15– Resultados do <i>Teste 3</i> - Solução 27 - Sistema 11 barras	115
Tabela 6.16 – Resultados para o Sistema 291 barras	119
Tabela 6.17 – Análise preliminar para o caso base do sistema 291 barras	119
Tabela 6.18 – Caso base de superação para os disjuntores da subestação de bateias 525Kv.....	119
Tabela 6.19 – Testes realizados para os disjuntores superados da SE Bateias.....	120

Tabela 6.20– Resultado da análise de sensibilidade	121
Tabela 6.21– Locais para instalação dos RLCs	121
Tabela 6.22– Solução do <i>Teste 1</i> - Sistema 296 barras	121
Tabela 6.23 – Funções objetivos do <i>Teste 1</i> - Sistema 296 barras.....	122
Tabela 6.24– Resultados do <i>Teste 1</i> - Sistema 296 barras	122
Tabela 6.25– Soluções do <i>Teste 2</i> - Sistema 296 barras.....	123
Tabela 6.26 – Funções objetivos do <i>Teste 2</i> - Sistema 296 barras.....	123
Tabela 6.27– Resultados do <i>Teste 2</i> - Sistema 296 barras	124
Tabela 6.28– Soluções do <i>Teste 3</i> - Sistema 296 barras.....	125
Tabela 6.29 – Funções objetivos do <i>Teste 3</i> - Sistema 296 barras.....	125
Tabela 6.30– Resultados do <i>Teste 3</i> - Solução 27 - Sistema 296 barras	126
Tabela 6.31– Soluções dos testes 1, 2 e 3 - Sistema 11 barras	127
Tabela 6.32– Soluções dos testes 1,2 e 3 para o sistema 296 barras	127
Tabela 6.33– Módulo das correntes do caso base e dos testes 1, 2 e 3 - Sistema 11 barras	128
Tabela 6.34– Módulo das correntes do caso base e dos testes 1, 2 e 3 - Sistema 296 barras	128
Tabela 6.35– Relação X/R do caso base e dos testes 1, 2 e 3 - Sistema 11 barras	129
Tabela 6.36– Relação X/R do caso base e dos testes 1, 2 e 3 - Sistema 296 barras	129
Tabela 6.37– Porcentagem da capacidade nominal do caso base e dos testes 1, 2 e 3 - Sistema 11 barras	129
Tabela 6.38– Porcentagem da capacidade nominal do caso base e dos testes 1, 2 e 3 - Sistema 296 barras	129
Tabela 6.39 – Desempenho da metodologia - Sistema 11 barras.....	130
Tabela 6.40 – Desempenho da metodologia - Sistema 296 barras.....	130
Tabela 6.41 – Esforço computacional para obtenção da matriz Z	130
Tabela A.1 - Dados das linhas para o sistema 5 barras	138
Tabela A.2 - Dados das barras para o sistema 5 barras	139
Tabela A.3 - Dados das linhas para o sistema 11 barras	140
Tabela A.4 - Dados das barras para o sistema 11 barras	140

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 CONCEITOS PRELIMINARES.....	16
1.2 OBJETIVOS.....	20
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	21
2 DETECÇÃO E MÉTODOS DE SUPERAÇÃO DE DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO POR CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO	22
2.1 CONCEITOS PRELIMINARES.....	22
2.2 ASPECTOS GERAIS PARA AVALIAÇÃO DE SUPERAÇÃO DE EQUIPAMENTOS INTERNOS AS SUBESTAÇÕES	22
2.2.1 Generalidades sobre as análises de superação.....	23
2.2.2 Modelos computacionais para o estudo de suportabilidade no SEP	27
2.3 DETECÇÃO DA SUPERAÇÃO DOS DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO	27
2.3.1 PROCESSO DE INTERRUPÇÃO DE CORRENTE PELOS DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO	28
2.3.2 Detecção da superação por corrente de carga.....	29
2.3.3 Detecção da superação por curto-circuito	31
2.3.4 Detecção da superação por tensão de restabelecimento transitória	35
2.4 MÉTODOS PARA EVITAR A SUPERAÇÃO POR CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO DOS DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO	36
2.4.1 SOLUÇÕES PROVISÓRIAS	36
2.4.2 SOLUÇÕES DEFINITIVAS.....	39
2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	51
3 MÉTODO DA MATRIZ Z_{Barra} PARA O CÁLCULO DE CURTO-CIRCUITOS NA MODELAGEM BARRA-RAMO DA REDE	52
3.1 CONCEITOS PRELIMINARES.....	52
3.2 COMPONENTES SIMÉTRICAS	52
3.3 REPRESENTAÇÃO DOS COMPONENTES DO SISTEMA ELÉTRICO	57
3.3.1 Geradores síncronos	57
3.3.2 Linhas de transmissão.....	59
3.3.3 Transformador	60
3.4 MODELAGEM BARRA-RAMO DA REDE	63

3.4.1	Análise nodal da modelagem barra-ramo.....	64
3.5	CÁLCULO DE CURTO-CIRCUITO PELO MÉTODO DA MATRIZ <i>Zbarra</i>	67
3.5.1	Cálculo de curto-circuito trifásico.....	68
3.5.2	Cálculo de curto-circuito fase-terra.....	70
3.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	72
4	CÁLCULO DE CURTO-CIRCUITO NO NÍVEL DE SEÇÃO DE BARRAS.....	73
4.1	CONCEITOS PRELIMINARES.....	73
4.2	MODELAGEM NO NÍVEL DE SEÇÃO DE BARRAS.....	73
4.3	MÉTODO DA ANÁLISE NODAL MODIFICADO PARAREDES MODELADAS NO NÍVEL DE SEÇÃO DE BARRAS.....	75
4.4	CÁLCULO DE CURTO-CIRCUITO PELO MÉTODO DA MATRIZ <i>Zmod</i>	79
4.4.1	Cálculo de curto-circuito trifásico estendido.....	80
4.4.2	Cálculo de curto-circuito fase-terra estendido.....	81
4.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	82
5	METODOLOGIA PARA ALOCAÇÃO DE LIMITADORES DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO.....	83
5.1	CONCEITOS PRELIMINARES.....	83
5.2	ESTRUTURA DA METODOLOGIA.....	84
5.3	PREMISSAS.....	84
5.3.1	Caso base.....	85
5.3.2	Análises de superação.....	86
5.3.3	Limitadores de corrente de curto-circuito.....	88
5.4	ALGORITMO PARA SIMULAÇÃO DA METODOLOGIA.....	90
5.5	FUNÇÃO OBJETIVO.....	92
5.5.1	Violação do critério de suportabilidade.....	93
5.5.2	Custo da instalação dos DLCCs;.....	94
5.5.3	Número de DLCCs instalados.....	94
5.5.4	Variação dos níveis de curto-circuito no sistema.....	94
5.6	FUNÇÃO MULTIOBJETIVO.....	95
5.7	CODIFICAÇÃO DO INDIVÍDUO.....	96
5.8	MEMÓRIA.....	98
5.9	PARÂMETROS DOS AG.....	98
5.10	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	

6 ANÁLISES E RESULTADOS	100
6.1 CONCEITOS PRELIMINARES	100
6.2 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	100
6.3 SISTEMA TESTE ORIGINAL 5 BARRAS.....	101
6.4 SISTEMA TESTE ORIGINAL 291 BARRAS.....	116
6.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	127
6.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	130
7 CONCLUSÃO	132
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	133
APÊNDICE A - SISTEMA ORIGINAL 5 BARRAS	137
A.1 - SISTEMA BARRA-RAMO 5 BARRAS	137
A.2 - SISTEMA 11 BARRAS – MODELAGEM NO NÍVEL DE SUBESTAÇÃO	138
APÊNDICE B - SISTEMA ORIGINAL 291 BARRAS	139
B.1 - SISTEMA BARRA-RAMO 291 BARRAS	139
B.2 - SISTEMA 296 BARRAS - MODELAGEM NO NÍVEL DE SUBESTAÇÃO	139

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONCEITOS PRELIMINARES

A simulação numérica de correntes de curto-circuito em diversos pontos da rede elétrica tem enorme importância no planejamento e coordenação da proteção, pois permite prever as consequências dos mais diversos defeitos, e assim viabilizar medidas corretivas. Estas medidas incluem instalação, ajuste e/ou coordenação de dispositivos que promovem a interrupção dos circuitos prejudicados e que assegurem que todos os componentes da rede sejam capazes de suportar os efeitos das correntes de falta enquanto elas persistirem.

Os valores das correntes de curto-circuito são praticamente independentes das cargas da instalação, dependendo, na maior parte, da fonte e da capacidade da rede. Logo, sempre quando há aumento da capacidade geradora ou alteração topológica do sistema a análise de curto-circuito deve ser refeita.

De forma geral, calculam-se as correntes de curto-circuito com os seguintes objetivos:

- determinação do poder de interrupção de disjuntores e fusíveis, com a previsão da corrente máxima de curto-circuito no ponto da rede onde estão instalados;
- previsão dos esforços térmicos e eletrodinâmicos provocados pela passagem da corrente, pois todos os elementos da rede, sobretudo barramentos e seccionadoras, têm que suportar os efeitos destrutivos da passagem das correntes de curto-circuito;
- coordenação das proteções, envolvendo a especificação das correntes e tempos de disparo das mesmas.

Para se analisar, por exemplo, o problema de superação de equipamentos por corrente de curto-circuito, cuja solução pode ser a troca dos equipamentos obsoletos já existentes (o que pode envolver um alto custo) ou a instalação de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito (DLCCs), deve-se realizar o cálculo dos níveis de corrente de curto-circuito que circulam pelos disjuntores instalados nas subestações a fim de se sinalizar os disjuntores superados.

As metodologias existentes para cálculo matricial de curto-circuito (STEVENSON, 1976), assim como as convencionais formulações de fluxo de potência, fluxo de potência ótimo e estimação de estados utilizam a aplicação da análise nodal (NA) na convencional modelagem barra-ramo da rede. No entanto, estas metodologias impedem a análise direta dos componentes internos às subestações, que quando necessárias devem ser feitas a parte, num processo dispendioso de tempo e precisão. Estes ramos internos às subestações, se incluídos na formulação convencional dos problemas de curto-circuito geram problemas de condicionamento numérico causado pelos valores dos ramos de impedância nula das chaves e disjuntores em operação (fechados). Desta maneira, este trabalho apresenta uma solução para este antigo problema na análise de curto-circuito, que é encontrar o valor da corrente de falta através de ramos de impedância nula, o qual é de extrema importância quando da análise de capacidades dos mesmos.

Uma solução para este problema é o método da análise nodal modificada (ANM) proposta por Ho *et al.* (1975) que permite obter as correntes passantes por impedâncias de representação atípicas, como no caso dos disjuntores fechados, de maneira direta. O método ANM trata as correntes através das impedâncias atípicas como novas variáveis e as correspondentes relações dessas impedâncias como equações adicionais. Muitos estudos se beneficiaram com a versatilidade deste método, tal qual o Mat-EMTP (MAHSEREDJIAN e ALVARADO, 1997), que inclui a representação de chaves interruptoras na análise de transitórios, além dos estudos desenvolvidos com os resultados dos softwares que adotam o método da ANM, como o SPICE (*Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis*). Embora a ANM seja eficiente para a análise de complexos circuitos não é encontrado na literatura sua aplicação para representação dos ramos internos das subestações da rede elétrica.

A necessidade da representação no nível de seção de barras das subestações da rede foi inicialmente percebida na formulação do problema de estimação de estados. Pioneiramente, Monticelli e Garcia (1991) e Monticelli (1993) propuseram uma modelagem para ramos de impedância nula na estimação de estados de sistemas elétricos de potência, possibilitando a representação de chaves e disjuntores nas equações padrões de estimação de estado. Nessa abordagem, os fluxos de potência nos ramos chaveáveis são incluídos como novas variáveis de estado e as quedas de tensão e as diferenças angulares nulas dos dispositivos

fechados incluídas no problema como pseudomedidas ou como restrições de igualdade, de acordo com o estimador adotado. Assim, os problemas numéricos provocados pela adoção de valores atípicos de impedância dos ramos chaveáveis foram eliminados do problema de estimação de estado, dando origem à estimação de estados generalizada (ALSAÇ *et al.*, 1998) e a uma nova série de algoritmos de identificação de erros de topologias tais como: Clements e Simões Costa (1998), Exposito e Villa Jaen (2001) e Lourenço *et al.* (2006). Os conceitos de representação de ramos de impedância nula propostos em Monticelli e Garcia (1991), Monticelli (1993) e Alsaç *et al.* (1998) foram aplicados à formulação do problema de fluxo de potência, permitindo, assim, a representação explícita de chaves e disjuntores no modelo da rede e a determinação direta da distribuição de fluxo em componentes internos das subestações (RIBEIRO, 2005; LOURENÇO *et al.*, 2010). Nessa nova abordagem, igualmente baseada na inclusão dos fluxos nos disjuntores como novas variáveis do problema, são apontados os impactos dessa representação na estrutura da matriz Jacobiana do método de Newton-Raphson (RIBEIRO, 2005; LOURENÇO *et al.*, 2010) e do método desacoplado rápido (LOURENÇO, *et al.*, 2009) estabelecendo, assim, uma nova tendência para modelagem da rede elétrica que permita a representação detalhada (no nível de seção de barras) de partes selecionadas da rede sempre que necessário. Seguindo esta tendência, Rosas (2008) e Rosas, *et al.* (2010) propõe a extensão do problema de Fluxo de Potência Ótimo para redes modeladas no nível de seção de barras.

Assim, para calcular os valores de curto-circuito que circulam através dos equipamentos de proteção dentro de uma subestação, este trabalho utiliza o ANM (HO *et al.*, 1975), para incluir os disjuntores tal como modelados no nível de seção de barras (LOURENÇO, *et al.*, 2010), expondo uma formulação estendida do tradicional cálculo de curto-circuito (STEVENSON, 1975), que é capaz de obter estas correntes de curto diretamente.

Na sequência, esta formulação estendida é utilizada para detectar a superação da capacidade de interrupção nominal dos disjuntores por corrente de curto-circuito, visando obter soluções, através da alocação otimizada de DLCCs, para contornar estas superações.

A eficiência da utilização de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito, que limitam as correntes de curto a níveis suportáveis da capacidade nominal dos disjuntores, torna desnecessária a troca do restante dos equipamentos.

Porém, a escolha e alocação de DLCCs é bastante complexa e trabalhosa, pois envolvem localização espacial, capacidade, custo, níveis de tensão e outras análises de viabilidade técnica e econômica. Assim, é preciso descobrir dentre as configurações possíveis, qual a que melhor se ajusta para a solução do problema.

Os trabalhos que modelam o problema de alocação ótima de DLCCs resolvendo-o através de técnicas de inteligência artificial utilizam a metodologia tradicional de cálculo de curto-circuito (STEVENSON, 1976) para a análise de superação. Baseando-se em algoritmos genéticos (AGs), Teng e Lu (2006) otimiza o número e o local de instalação de limitadores supercondutores (FLCs) na rede considerando a minimização dos parâmetros desses dispositivos para a solução do problema de superação, Ferreira (2006) e Ferreira e Borges (2007) levou em consideração no problema de otimização através da instalação de reatores limitadores de corrente de curto-circuito (RLCs) os requisitos de custo mínimo, mínimo número de dispositivos alocados e máxima redução da corrente de curto-circuito nas barras do sistema. Em Ferreira (2006) discuti-se a dificuldade de se determinar os valores de correntes de curto-circuito que circulam através dos disjuntores, e assim como em Teng e Lu (2006) e Ferreira e Borges (2007), a superação dos disjuntores de uma subestação é avaliada comparando-se a corrente de falta injetada na subestação com a menor capacidade nominal de interrupção de corrente de curto-circuito dos disjuntores instalados nessa subestação. Baran e Duarte (2010) utilizam a técnica dos AGs para alocar RLCs nas linhas do sistema, analisando a suportabilidade nominal dos disjuntores instalados nas linhas de transmissão.

Tendo em vista a importância de se analisar correntes de curto-circuito no nível de subestação, ou seja, de se acessar diretamente estes valores sem realizar cálculos intermediários; e, a aplicação direta desta análise em outro problema relevante, que é o caso de disjuntores superados por corrente de curto-circuito, este trabalho propõe a formulação de um problema de otimização para alocação de DLCCs, utilizando como técnica de solução os algoritmos genéticos multiobjetivos (AGM), incorporando uma formulação estendida para o cálculo de curto circuito no nível de subestação.

Simulações realizadas no sistema teste 5 barras são utilizadas para ilustrar e validar o método proposto, e os resultados obtidos a partir do sistema teste de 291

barras, correspondente a rede elétrica do estado do Paraná, asseguram a eficiência do estudo para sistemas de grande porte.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho é desenvolver um algoritmo para facilitar os estudos de superação por corrente de curto-circuito dos disjuntores das subestações do sistema de transmissão através da alocação otimizada de DLCCs na rede.

A análise da superação dos disjuntores é feita para as faltas trifásica e fase-terra, através do módulo da corrente de curto-circuito simétrica passante pelo equipamento e da relação X/R equivalente entre seus terminais. Dessa forma, é apresentada a formulação estendida para o cálculo de curto-circuito resultante da aplicação do método da ANM na representação da rede no nível de subestação.

A solução da superação dos disjuntores é obtida considerando a instalação dos reatores limitadores de corrente de curto-circuito (RLC). Para a alocação otimizada dos RLCs, o trabalho apresenta o desenvolvimento de uma metodologia baseada em AGMs, restringindo o número de limitadores instalados para solucionar o problema de superação dos disjuntores, além de minimizar o custo de compra desses limitadores e reduzir o nível de corrente de curto-circuito através dos disjuntores.

Dessa forma, as etapas para atingir o objetivo são:

- modelar a rede elétrica incluindo os ramos das chaves e disjuntores dos arranjos das subestações;
- estender o método do cálculo de curto circuito para permitir a representação explícita de chaves e disjuntores de subestações selecionadas da rede;
- desenvolver uma metodologia para a alocação dos DLCCs utilizando os AGMs;
- implementar um algoritmo computacional para a alocação DLCCs no sistema modelado no nível de seção de barras;
- realizar testes para validar as propostas.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O trabalho está estruturado em sete capítulos, sendo que o Capítulo 1 é introdutório. O Capítulo 2 apresenta o problema de superação de disjuntores de alta tensão por corrente de curto-circuito. O Capítulo 3 apresenta os tipos de superação que os disjuntores de alta tensão podem apresentar e os tipos de limitadores de corrente de curto-circuito. O Capítulo 3 apresenta a formulação clássica (STEVENSON, 1986) para cálculo de curto-circuito trifásico e fase-terra pelo método da matriz \hat{Z}_{barra} , considerando a modelagem convencional barra-ramo.

O Capítulo 4 apresenta a formulação estendida para o cálculo de curto-circuito considerando a modelagem nível de seção de barras da rede, pelo método da matriz \hat{Z}_{mod} e o Capítulo 5 propõe um algoritmo computacional para solucionar o problema de superação por corrente de curto-circuito dos disjuntores internos às subestações dos sistemas de transmissão, através da instalação de DLCCs. O Capítulo 6 mostra os resultados obtidos para o sistema de 5 e 291 barras e, finalmente, o Capítulo 7 apresenta as conclusões referentes ao trabalho.

2 DETECÇÃO E MÉTODOS DE SUPERAÇÃO DE DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO POR CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

2.1 CONCEITOS PRELIMINARES

O crescimento da demanda por energia elétrica resulta no crescimento do sistema elétrico de potência (SEP) tanto em tamanho quanto em complexidade. A crescente expansão do sistema interligado nacional (SIN), principalmente após a desregulamentação do setor elétrico, elevou as solicitações elétricas na rede causando a superação das capacidades nominais dos equipamentos instalados.

Este cenário é suscetível ao aumento gradual dos níveis de corrente de curto-circuito nas subestações do SEP, saturando os valores nominais e de operação dos equipamentos por onde circulam. Dessa forma, faz-se necessário uma constante realização dos estudos de curto-circuito no SEP para a verificação da solicitação dos níveis de curto-circuito nas subestações, principalmente no que se refere aos disjuntores, pois são os equipamentos responsáveis pela proteção dos componentes do SEP mediante a ocorrência de faltas.

Nos casos em que os níveis de curto-circuito superam as capacidades máximas dos disjuntores instalados, é comum adotar para a solução do problema de superação a troca do disjuntor superado, mudanças na topologia e/ou dos parâmetros da rede ou a instalação de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito (DLCCs).

2.2 ASPECTOS GERAIS PARA AVALIAÇÃO DE SUPERAÇÃO DE EQUIPAMENTOS INTERNOS AS SUBESTAÇÕES

Com necessidade de manter o SEP dentro dos padrões de qualidade, desempenho e confiabilidade, a substituição dos equipamentos superados da Rede Básica (RB) e das Demais Instalações da Transmissão (DIT) é regulada pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) através da Resolução Normativa (REN) nº 158 de 23/05/2005 alterada pela Resolução nº 242 de 07/12/2006. Estas resoluções

estabelecem como responsabilidade do ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) o esclarecimento final da substituição dos equipamentos dos módulos de manobra (disjuntores, seccionadores, transformadores de corrente e bobinas de bloqueio) da RB e das DIT.

Para estabelecer conformidade com os órgãos reguladores quanto à correta operação do SEP, o Grupo de Trabalho de Análise de Superação de Equipamentos (GT-AS) coordena a análise da superação dos equipamentos das instalações da RB, das DIT e das instalações dos Agentes de geração. O GT-AS é coordenado pelo ONS e conta com os Agentes responsáveis pelas instalações com problemas de superação.

A análise de superação dos equipamentos inicia-se com o Relatório de Estudos de Curto-Circuito emitido anualmente pelo ONS, que fornece os níveis das correntes de curto-circuito simétricas e das relações X/R de todas as subestações do SIN, considerando os dados do horizonte de três anos do Plano de Ampliações e Reforços (PAR). A responsabilidade de analisar a superação dos equipamentos dos módulos de manobra fica a cargo dos agentes detentores da subestação com problemas de superação que, uma vez consolidadas pelo GT-AS, são homologadas pelo ONS e encaminhadas à ANEEL através do Plano de Modernização das Instalações de Interesse Sistêmico (PMIS).

2.2.1 Generalidades sobre as análises de superação

De acordo com o ONS, no Submódulo 11.3 *Estudos de curto-circuito* (SUBMODULO 11.3), a análise da superação dos equipamentos do SEP é realizada em duas etapas. A primeira, denominada de Análise Preliminar, resume-se na indicação das subestações da RB e das DIT com problemas de superação por corrente de curto-circuito. A segunda etapa, denominada Análise Detalhada, funda-se na avaliação detalhada dos equipamentos correspondentes a subestação sinalizada na etapa anterior.

2.2.1.1 Análise preliminar

A Análise Preliminar consiste em uma triagem para a identificação das subestações com possibilidade de equipamentos superados. Nesta etapa é calculado o nível da corrente de curto-circuito simétrica e a relação X/R equivalente para as faltas trifásica e fase-terra nas subestações da rede.

A capacidade máxima de suportabilidade simétrica de uma subestação é igual a capacidade do disjuntor com menor capacidade de interrupção nominal dessa subestação, e a capacidade de suportabilidade assimétrica é igual a relação X/R equivalente vista dos terminais da barra que representa a subestação na modelagem barra-ramo. A partir destes dados, a Análise Preliminar segue o fluxograma apresentado na Figura 2.1. para identificar as subestações com possíveis problemas de superação.

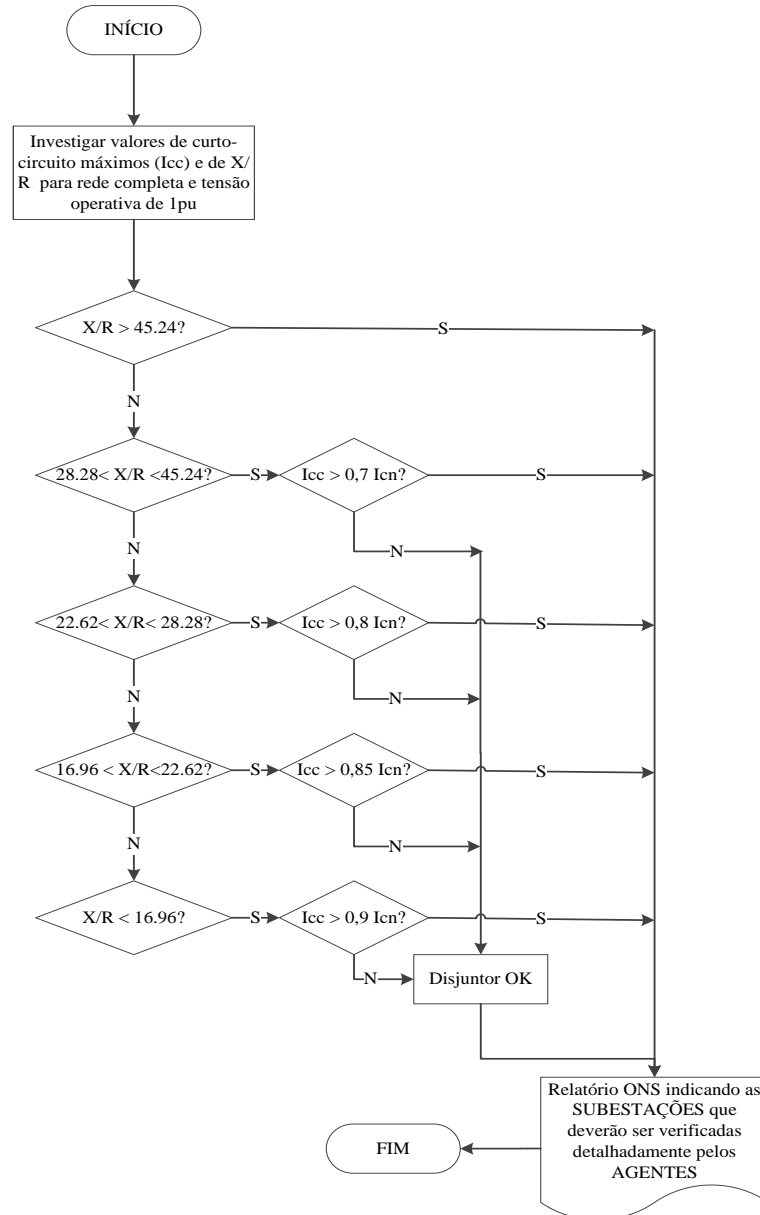


Figura 2.1 - Critérios simplificados para identificação de superação das barras na análise preliminar
 LEGENDA: I_{cc} (módulo da corrente de curto-circuito calculada nas subestações), I_{cn} (módulo da corrente máxima de curto-circuito suportada pelas subestações).
 Fonte: Adaptado de (SUBMODULO 11.3)

Dependendo do tipo da configuração da subestação, o maior valor de corrente de falta através de seus disjuntores é igual ou próximo ao nível de curto-circuito calculado. Portanto, se a análise de curto-circuito na subestação está dentro dos padrões estabelecidos não se considera que esta subestação esteja propensa à superação. Caso contrário, não se pode interpretar a superação de todos os disjuntores da subestação, pois é necessário avaliar, na segunda etapa, como as correntes de falta se distribuem pelos ramos internos as subestações.

2.2.1.2 Análise detalhada

Avaliado o caso de uma possível superação na Análise Preliminar, os agentes responsáveis pela subestação executam a Análise Detalhada dos equipamentos. Os critérios adotados para a análise de superação de equipamentos na Análise Detalhada estão explicitados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Critérios adotados para análise de superação de equipamentos de alta tensão

	CRITÉRIO	DISJUNTOR	SECIONADOR	TC	BOBINA DE BLOQUEIO
1	Corrente de curto-circuito nominal simétrica	X	X	X	X
2	Crista da corrente de curto-circuito(Corrente dinâmica)	X	X	X	X
3	Corrente de carga nominal	X	X	X	X
4	Corrente de curto-circuito assimétrica(Relação X/R)	X		X	
5	Tensão de restabelecimento transitória(TRT)	X			

Fonte: Adaptado de (SUBMODULO 4.3)

A superação dos equipamentos internos às subestações é feita comparando-se os valores das características nominais dos equipamentos com as solicitações do sistema a eles relacionados, conforme a seguir discriminados (SUBMODULO 4.3):

- 1) corrente de curto-circuito nominal versus corrente de curto-circuito passante no equipamento, obtida por programa de cálculo de curto-circuito;
- 2) valor de crista da corrente suportável versus máxima crista da corrente de curto-circuito passante pelo equipamento;
- 3) corrente nominal do equipamento versus carregamento máximo que o equipamento é submetido na rede, obtida por programa de fluxo de potência;
- 4) relação X/R especificada para o disjuntor e o TC versus constante de tempo determinada para a barra da rede à qual os equipamentos estão conectados, obtida por programa de cálculo de curto-circuito;
- 5) TRT especificada para o disjuntor versus TRT determinada para a condição de falta terminal trifásica não aterrada do disjuntor analisado, obtida por programa de transitórios eletromagnéticos.

2.2.2 Modelos computacionais para o estudo de suportabilidade no SEP

As ferramentas computacionais são necessárias para informar as solicitações elétricas necessárias ao estudo de suportabilidade dos equipamentos. Em grande parte das concessionárias brasileiras as solicitações do sistema são obtidas através dos resultados dos programas Análise de Redes em Regime Permanente (ANAREDE) e Análise de Curto-Circuito (ANAFAS), ambos de propriedade do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) e utilizados para estudos de fluxo de carga e para estudos de curto-circuito, respectivamente. Para os estudos de TRT nos disjuntores, é comum a utilização de software de uso livre, como o Alternative Transients Program (ATP). (SUBMODULO 18.2)

Os softwares ANAREDE e ANAFAS consideram a modelagem barra-ramo da rede elétrica, portanto, as solicitações internas as subestações são realizadas separadamente pelos agentes responsáveis, demandando tempo e esforços adicionais.

2.3 DETECÇÃO DA SUPERAÇÃO DOS DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO

O disjuntor é o um dispositivo eletromecânico destinado à manobra e à proteção da rede elétrica. Sua principal função é a interrupção das correntes de falta em um curto intervalo de tempo, antes que os efeitos térmicos e/ou mecânicos das correntes danifiquem os equipamentos da região afetada pelas correntes (MAMEDE, 1994).

Para que o disjuntor desempenhe de maneira adequada suas funções, as solicitações no dispositivo não devem exceder suas características nominais. Porém, quando as características elétricas do sistema são alteradas, o disjuntor pode apresentar-se superado por corrente de carga e/ou de curto-circuito e/ou por tensão de estabelecimento transitória (TRT).

2.3.1 Processo de interrupção de corrente pelos disjuntores de alta tensão

O mecanismo do disjuntor opera normalmente (*status* fechado) conduzindo as correntes de carga por longos períodos ou realizando o isolamento (*status* aberto) entre as partes do sistema (D'AJUZ, A. 1985).

O disjuntor é capaz de alterar seu *status* em um curto intervalo de tempo tanto para condições normais de carga quanto em condições de faltas. A Figura 2.2 apresenta a interrupção da corrente de falta na câmara de extinção de um disjuntor Hexafluoreto de Enxofre (SF₆).

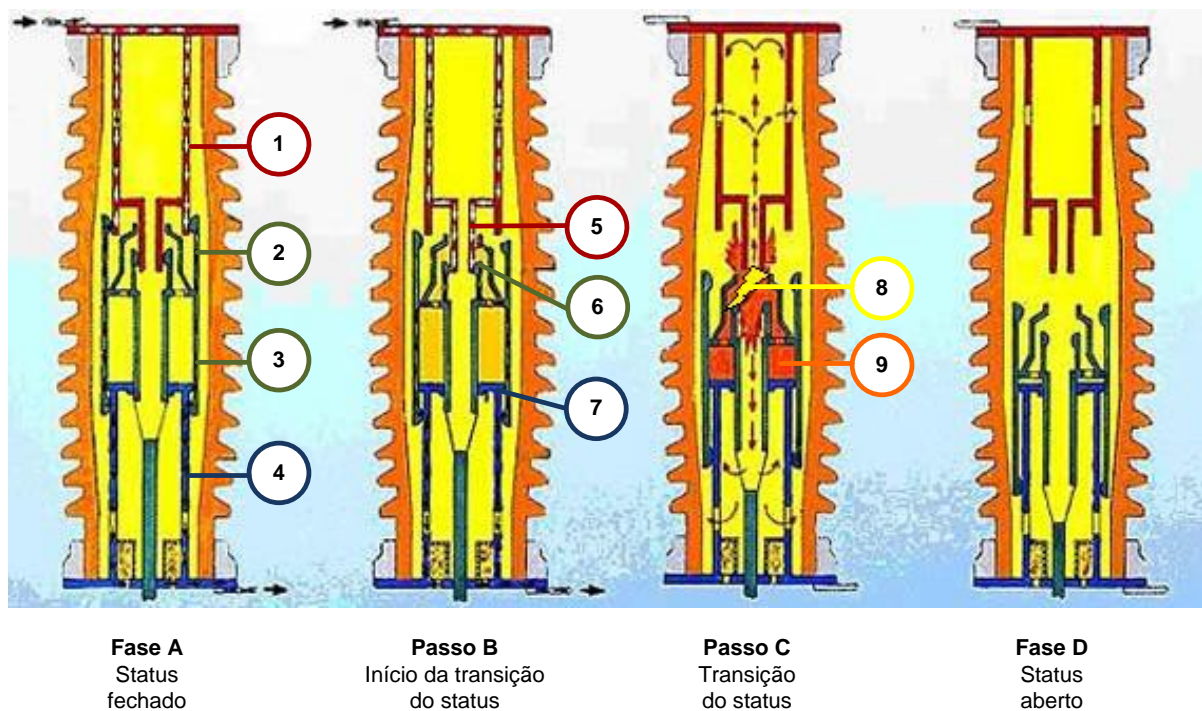


Figura 2.2 - Interior da câmara de extinção de um disjuntor a ar interrompendo uma falta
Fonte: Adaptado de (SINDER, 2007; Solon Manufacturing Co. Disponível em: <<http://www.solonmfg.com/controls/special/sf6.cfm>>. Acesso em: 01/12/2012)

A transição do *status* do disjuntor (fechado → aberto) para extinção da corrente de curto circuito (conforme a Figura 2.2) pode ser descrito nas seguintes fases (SINDER, 2007):

Fase A - Status fechado

O disjuntor encontra-se com o *status* fechado, conduzindo as correntes de carga e de falta pelos contatos principais (1) e (2), pelo cilindro móvel (3) e pelo suporte do contato móvel (4).

O disjuntor opera com o *status* fechado em condição de carga normal até que seja exigida a troca do status para o isolamento da falta.

Fase B - Início da transição do status (fechado -> aberto)

Nesta fase, inicia-se a transição do *status* do disjuntor, separando os contatos principais (1) e (2) alterando o percurso da corrente que passa a ser entre os contatos de arco (5) e (6).

Fase C - Transição do status

Após a separação mecânica dos contatos do disjuntor para interromper o curto-circuito, inicia-se o processo de extinção desse arco formado no interior do disjuntor. Separados mecanicamente os contatos de arco (5) e (6), uma corrente de alta intensidade permanece a fluir pelo arco elétrico (9) formado no interior das câmaras de extinção até que seu resfriamento seja efetivado. Para isso, a energia do meio extintor (8), produzida pelo deslocamento relativo entre o cilindro móvel (3) e o pistão (7), deve ser maior ou igual a energia do arco elétrico.

Nessa fase há o resfriamento da coluna do arco elétrico, a rápida perda de condutividade do arco elétrico (à medida que a corrente se anula), a interrupção da corrente de curto-circuito e o início da TRT.

Fase D - Status aberto

Extinguido o arco elétrico, os contatos se encontram abertos impedindo a passagem de corrente através do disjuntor.

2.3.2 Detecção da superação por corrente de carga

A detecção da superação por corrente de carga compara os valores das correntes de carga nominais dos disjuntores com os valores das correntes de carga através destes equipamentos obtidos pelos estudos de fluxo de potência (*Fase A*).

Os estudos de fluxo de potência são realizados para condições de emergências de futuras configurações obtidas pelos dados do PAR. As correntes de carga nas subestações do sistema, obtidas por programas de fluxo de potência convencionais (ANAREDE, por exemplo), são distribuídas pelas seções de barramentos das subestações para condições de saída de linha e de disjuntores. A

Figura 2.3 apresenta um exemplo para a distribuição da corrente de carga pelos barramentos internos de uma subestação de arranjo tipo disjuntor e meio.

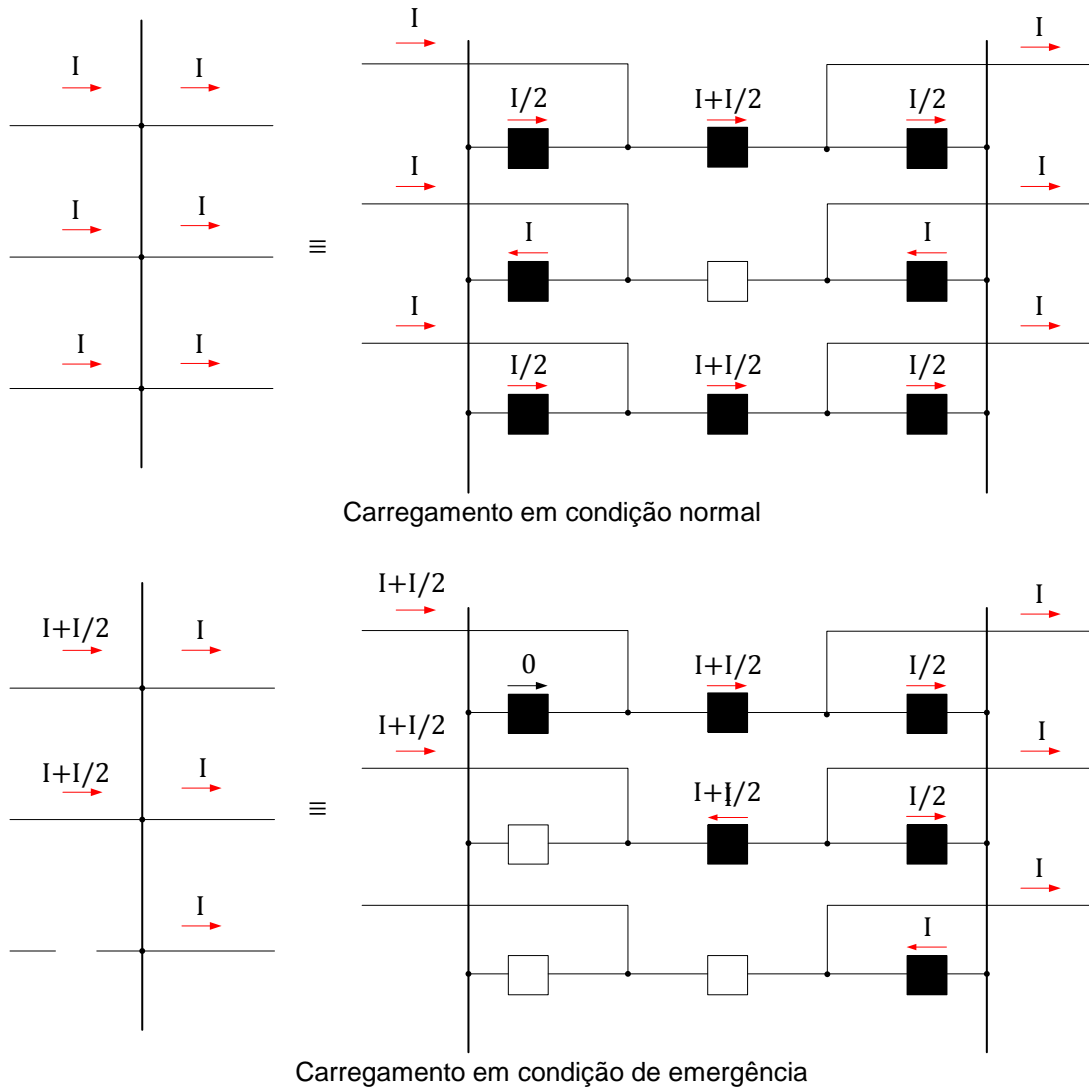


Figura 2.3 - Carregamento em condição normal e emergência
Fonte: Adaptado de (D'AJUZ, A. *et. al*, 1985)

O estudo de fluxo de potência é um critério essencial para a detecção de superação por corrente de carga quando a subestação sofre expansões ou quando esta operando em condição de emergência.

2.3.3 Detecção da superação por curto-circuito

A superação por corrente de curto-circuito é caracterizada pela ocorrência de correntes de curto-circuito simétrica, assimétrica e/ou de crista, com magnitudes superiores àquelas definidas como nominais dos equipamentos em análise para as condições de faltas trifásicas e fase-terra, em condições normais e de emergência.

Os estudos de curto-circuito para verificar a superação de capacidade dos disjuntores consideram as condições mais críticas e conservadoras da rede. Com o objetivo de se obter as correntes máximas de falta considera-se (SUBMÓDULO 23.3) a rede em regime subtransitário ($x''d$), operando com 100% da geração na configuração estabelecida para o horizonte de estudo do PAR, com todos os componentes em operação

Os programas para o cálculo de curto-circuito no sistema (ANAFAS, por exemplo) informam, para cada subestação do sistema, as correntes simétricas de curto-circuito e a relação X/R equivalente para as faltas trifásica e monofásica. Porém nenhuma informação é disponibilizada diretamente pelo programa quanto a distribuição das correntes de curto-circuito através dos disjuntores e demais equipamentos internos da subestação.

2.3.3.1 Corrente de curto-circuito nominal simétrica

O valor eficaz da corrente de curto-circuito simétrica define a característica térmica do disjuntor, ou seja, a corrente de curto-circuito simétrica nominal do disjuntor é especificada por um valor capaz de suportar o aquecimento dos contatos por efeito *Joule* e capaz de extinguir o arco elétrico (*Fase A, B e C*).

A detecção da superação por corrente de curto-circuito simétrica compara os valores das correntes de curto-circuito simétricas nominais dos disjuntores (I_{cn}) com os valores das correntes de curto-circuito simétricas (I_{cc}) calculadas para as faltas trifásica e fase-terra através destes equipamentos.

O disjuntor é caracterizado como superado por corrente de curto-circuito simétrica se atingir a relação expressa pela equação (2.1) abaixo

$$\frac{I_{cc}}{I_{cn}} \geq 1 \quad (2.1)$$

e considerado em estado de alerta se a relação atingir a equação (2.2).

$$0.9 \leq \frac{I_{cc}}{I_{cn}} \leq 1 \quad (2.2)$$

Os estudos de curto-circuito são realizados para condições de emergências de futuras configurações obtidas pelos dados do PAR. As correntes de curto-circuito simétricas nas subestações do sistema, obtidas pelos programas de curto-circuito convencionais (tais como ANAFAS), são distribuídas pelas seções de barramentos das subestações para a condição de curto nas barras das subestações.

A Figura 2.4 apresenta um exemplo hipotético para a distribuição da corrente de falta pelos disjuntores fechados de uma subestação de arranjo tipo disjuntor e meio.

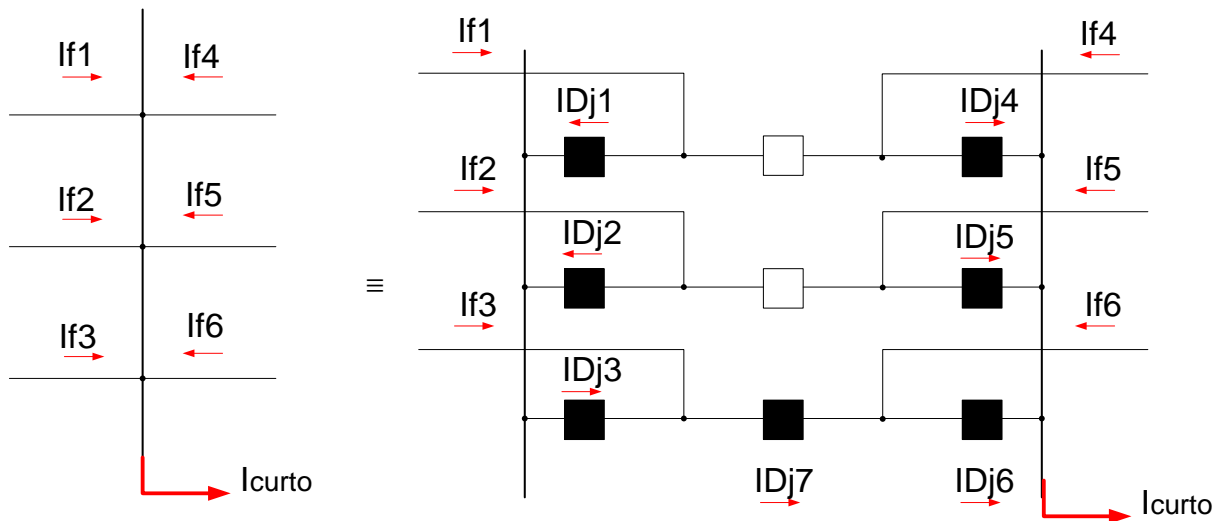


Figura 2.4 – Corrente de curto-circuito na subestação

Da Figura 2.4 tem-se que:

$$ID_{j6} = I_{f1} + I_{f2} + I_{f3} + I_{f6} \quad (2.3)$$

$$I_{CURTO} = I_{f1} + I_{f2} + I_{f3} + I_{f4} + I_{f5} + I_{f6} \quad (2.4)$$

Quando o nível da corrente de curto-circuito passante por um disjuntor atingir 100% da sua capacidade nominal, a análise de superação simétrica também

deve ser feita para a condição de *line-out*, conforme ilustrado na Figura 2.5 para a subestação da Figura 2.4.

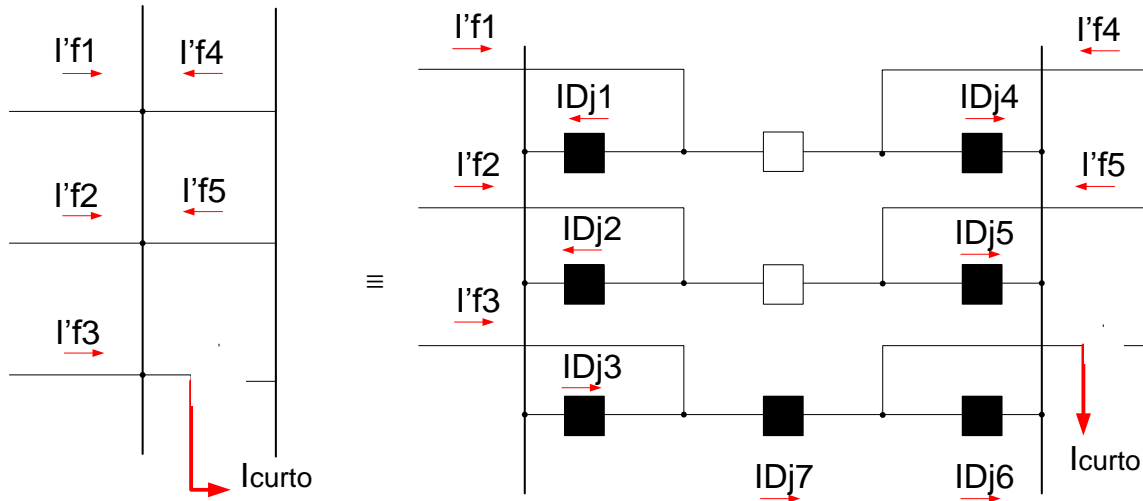


Figura 2.5 - Corrente de curto-circuito em condição de *line-out*

Da Figura 2.5 tem-se que:

$$IDJ_6 = 0 \quad (2.5)$$

$$I_{CURTO} = I'f_1 + I'f_2 + I'f_3 + I'f_4 + I'f_5 \quad (2.6)$$

2.3.3.2 Corrente de curto-circuito assimétrica – Relação X/R

O valor do pico máximo da corrente de curto-circuito assimétrica é responsável pelas características dinâmicas dos equipamentos da rede (*Fase C*).

A corrente total de curto-circuito assimétrica é representada pela equação (2.7) (SATO, 2005):

$$I_{\text{assim}} = 100 \cdot I_{\text{sim}} \cdot \left(1 + e^{-t/\tau}\right) \quad (2.7)$$

Em que t é o tempo contado a partir do início da falta (*Fase A*), I_{sim} é a corrente de curto-circuito simétrica e τ é a relação equivalente da rede vista pela subestação:

$$\tau = X/R \quad (2.8)$$

A relação X/R influencia na composição do decaimento da corrente de curto-circuito ao longo do tempo e quanto maior for essa relação, mais lento é o decaimento da corrente.

A capacidade de interrupção assimétrica do disjuntor é confrontada com a relação X/R entre seus terminais e com a amplitude da corrente de curto-circuito simétrica passante por ele, de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 2.1 simplificado na Tabela 2.2 por cinco critérios de superação assimétrica.

Tabela 2.2 - Critérios simplificados para identificação de superação de disjuntores pela relação X/R

CRITÉRIO	ASSIMETRIA	SIMETRIA
1	$X/R < 16.96$	$I_{cc} > 0.90 I_{cn}$
2	$16.96 < X/R < 22.62$	$I_{cc} > 0.85 I_{cn}$
3	$22.62 < X/R < 28.28$	$I_{cc} > 0.80 I_{cn}$
4	$28.28 < X/R < 45.24$	$I_{cc} > 0.70 I_{cn}$
5	$X/R > 45.24$	

O disjuntor é caracterizado como superado por assimetria quando a relação X/R equivalente do sistema e o valor da corrente de curto-circuito simétrica calculada (I_{cc}) corresponderem simultaneamente a assimetria e simetria dos critérios de da Tabela 2.2.

2.3.3.3 Crista da corrente de curto-circuito – Corrente dinâmica

Calculado os valores da corrente de curto-circuito simétrica através dos disjuntores das subestações, e de posse da relação X/R dos equipamentos, calcula-se a crista da corrente de curto-circuito pela seguinte equação (2.9) (SATO, 2005):

$$I_p = I_{cc} \cdot \sqrt{2} \cdot (1 + e^{-t_p/\tau}) \quad (2.9)$$

onde:

I_p : valor de crista da corrente de curto-circuito;

I_{cc} : valor eficaz da corrente de curto-circuito;

t_p : tempo de crista da corrente de curto-circuito;

τ : valor da constante de tempo do disjuntor.

O disjuntor é caracterizado superado por crista da corrente de curto-circuito quando:

$$I_p > I_{pn} \quad (2.10)$$

onde:

I_{pn} : valor nominal da crista da corrente de curto-circuito do disjuntor.

2.3.4 Detecção da superação por tensão de restabelecimento transitória

Quando se ultrapassam valores de suportabilidade dielétrica ou térmica do meio de extinção do arco elétrico se tem caracterizada a superação por TRT (Fase D). A superação de um disjuntor é considerada quando superado por amplitude ou por taxa de crescimento da tensão.

A capacidade de interrupção de faltas por um disjuntor caracteriza as condições mais severas para as quais, na ocorrência de um defeito, o equipamento tenha um desempenho satisfatório ao interromper o curto-circuito. O bom desempenho do disjuntor dependerá tanto da intensidade da corrente de falta como também da magnitude e taxa de crescimento da tensão de restabelecimento a ele aplicada em seguida a interrupção. Logo, para a análise da superação do disjuntor, deve-se considerar não só a corrente de curto-circuito como também a tensão de restabelecimento transitória.

Nas manobras com aberturas de disjuntores, devem ser respeitados os valores garantidos pelo fabricante e fornecidos pelo agente para as tensões de restabelecimento transitórias, as capacidades de interrupção referentes a cada tipo de manobra associada e o grau de assimetria da corrente de curto-circuito.

Para manobras de abertura de linhas de transmissão em vazio, os valores de tensão pré-abertura da linha devem ser previamente determinados para a condição de operação considerada. A ocorrência curtos-circuitos fase-terra, rejeição de carga com falta na linha, sobrefrequências ou outras condições de sistema relevantes devem ser levadas em conta na determinação da tensão pré-abertura a ser adotada nas simulações transitórias. Os valores da tensão fase-fase pré-manobra não devem ultrapassar os limites máximos admissíveis fornecidos pelos

agentes. Na falta destes, os valores indicados na Tabela 5 não devem ser ultrapassados.

A validação dos equivalentes e da própria rede representada com base na frequência fundamental deve ser realizada por comparação dos valores de correntes de curto-circuitos monofásico e trifásico obtidos no programa de transitórios com os resultados do programa de cálculo de curto-circuito. Os pontos de aplicação dos defeitos devem ser escolhidos de forma a abranger os barramentos de manobra e outros julgados relevantes.

2.4 MÉTODOS PARA EVITAR A SUPERAÇÃO POR CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO DOS DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO

Nos casos em que os níveis de curto-circuito superam as capacidades máximas dos disjuntores e/ou as capacidades de outros equipamentos das subestações, além dos problemas que estas correntes podem causar nos equipamentos diretamente envolvidos, podem ocorrer solicitações dinâmicas e térmicas nas linhas de transmissão, cabos e transformadores, podendo comprometer a integridade do sistema ou a redução da vida útil destes (FERREIRA, 2006).

Quando detectada a superação da capacidade nominal dos disjuntores por corrente de curto-circuito, algumas soluções devem ser tomadas para evitar ou adiar a troca dos dispositivos (D`AJUZ, 1985). Essas soluções são divididas em duas categorias: uma de carácter emergencial, que pode ser aplicada em um curto espaço de tempo, e outra que exige tempo para executar um estudo detalhado.

Nesta sub-seção, alguns métodos para redução da corrente de curto-circuito são brevemente descritos.

2.4.1 Soluções provisórias

As soluções provisórias são soluções temporárias que permitem que os equipamentos superados continuem operando até que as medidas definitivas sejam

adotadas (D'AJUZ, 1985; FERREIRA, 2006; FERNANDES, 2010; BARAN e DUARTE, 2010). Estas alternativas necessitam de modificações na rede e por isso geralmente causam restrições operativas no sistema o que pode resultar em perdas de flexibilidade nas operações da rede e na redução da confiabilidade.

2.4.1.1 Restrições operativas

São medidas simples e com baixo custo de implementação tais como:

- Seccionamento de Barras

Essa medida aumenta a impedância de sequência positiva, negativa e zero do circuito, possibilitando a minimização dos níveis das correntes de curto-circuito simétricas e assimétricas.

O seccionamento de um barramento em uma subestação deve ser realizado, preferencialmente, no vão do disjuntor de interligação para que o disjuntor possa ser utilizado nas seções do barramento seccionado, como ilustrado na Figura 2.6. As seções da barra seccionada não afetam o desempenho individual de cada uma delas, ou seja, caso haja um curto-circuito na seção A, a seção B não é afetada pela falta.



Figura 2.6 - Restrição operativa por seccionamento de barra

A operação com o barramento seccionado deve ser adotada quando possível, pois a distribuição das cargas entre as seções do barramento seccionado depende da configuração da subestação. A divisão não balanceada entre as seções

do barramento pode reduzir a confiabilidade, pois as tensões das seções podem ficar diferentes.

O seccionamento de barras pode ser realizado por chaves seccionadoras ou, como apresentado na subseção 2.4.2.3, por DLCCs (Figura 2.19). A opção de utilizar o DLCC para seccionar barramentos deve ser considerada quando a utilização de chaves seccionadoras resultarem em uma redução de confiabilidade inaceitável.

- Radialização de Circuitos

A radialização dos circuitos permite um aumento na impedância entre as fontes de contribuição reduzindo a corrente de curto-circuito, *by-passando* um circuito da barra superada (Figura 2.7).

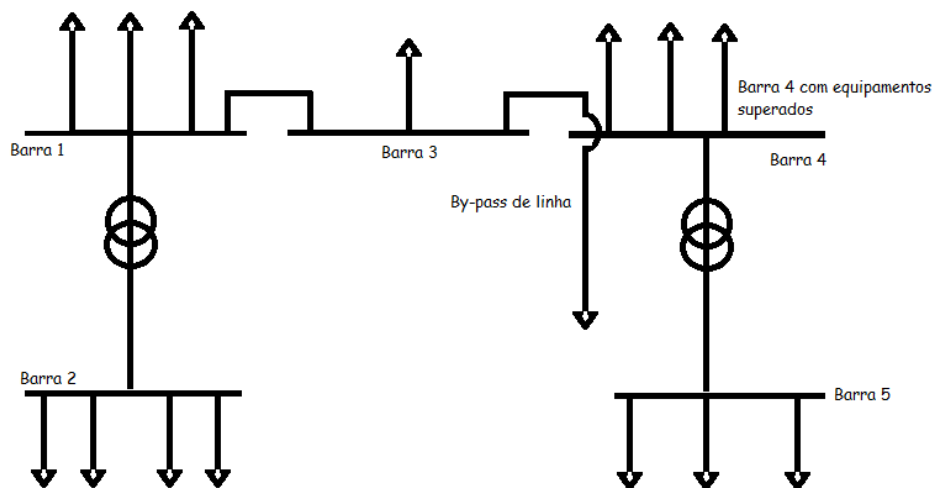


Figura 2.7 - Restrição operativa por radialização de circuitos

Como ocorre no seccionamento de barras, o *by-pass* das linhas também pode reduzir a confiabilidade do sistema além de reduzir a flexibilidade do mesmo.

- Desligamentos Sequenciais de Linhas de Transmissão

A sequência de abertura dos disjuntores opera fazendo com que o disjuntor superado atue somente após a abertura dos outros disjuntores dos terminais das linhas de transmissão. Dessa forma, a impedância de curto-circuito diminui e a operação do disjuntor superado se dá com um nível de curto-circuito inferior.

- Desligamentos de Compensadores Síncronos

Com o desligamento de compensadores síncronos da rede, anula-se a contribuição desses para a corrente de curto-circuito.

2.4.1.2 Modificações na rede

São operações que alteram a impedância total da rede.

- Alteração do Aterramento de Transformadores

Com a alteração da impedância do aterramento, altera-se a impedância de sequência zero limitando apenas as correntes de curto-circuito fase-terra e fase-fase-terra.

A alteração da sequência zero no sistema pode ser feita por retirada do aterramento de transformadores, introdução de impedâncias no neutro dos transformadores e/ou nos deltas do terciário.

- Novos Equipamentos

Ao instalar novos equipamentos, esses devem ter valores de reatância maiores que os dos equipamentos em uso.

2.4.2 Soluções definitivas

São soluções que requerem avaliações e estudos mais complexo da rede e um tempo superior para instalação.

2.4.2.1 Recapitação das instalações e substituição dos equipamentos

Neste caso, é feita a recapitação ou substituição de todos os equipamentos superados da subestação e realizada a avaliação da malha de terra e dos cabos de aterramento.

Para a realização dessas operações é necessário considerar, além do custo da recapitação ou da substituição dos equipamentos da subestação, o tempo necessário para a realização das obras já que para a troca dos equipamentos são necessários alguns desligamentos na subestação.

Dependendo da importância da subestação estudada, a troca de alguns equipamentos, como por exemplo, os disjuntores, apresentam alguns inconvenientes como um alto impacto financeiro, logístico e operacional.

2.4.2.2 Utilização de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito

Os DLCCs são dispositivos que tem como objetivo adiar ou evitar a substituição de equipamentos que estão com a capacidade de curto-circuito superada. Os DLCCs limitam as correntes de curto-circuito para que quando essas passem pelos equipamentos das instalações estejam com valores compatíveis com as características nominais dos equipamentos (AMON, 2001; MONTEIRO, 2005; FERREIRA, 2006; D'AJUZ, 2007; AMON, 2009, BARAN e DUARTE, 2010).

Muitas vezes, a implantação dos DLCCs como solução definitiva aparece como uma alternativa mais econômica do que a substituição ou recapitação das instalações superadas. Para sua utilização deve ser feito um estudo de custo-benefício para verificar a viabilidade da medida, além disso, existe a necessidade de estudos de fluxo de potência e de tensão de restabelecimento transitória para validar a instalação dos dispositivos.

Os DLCCs podem tanto interromper as correntes de curto-circuito quanto apenas limitá-las a valores compatíveis com os valores nominais dos disjuntores já instalados, deixando que estes efetivem a eliminação da falta. O comportamento dos DLCCs aparece na Figura 2.8. (LANES, 2006)

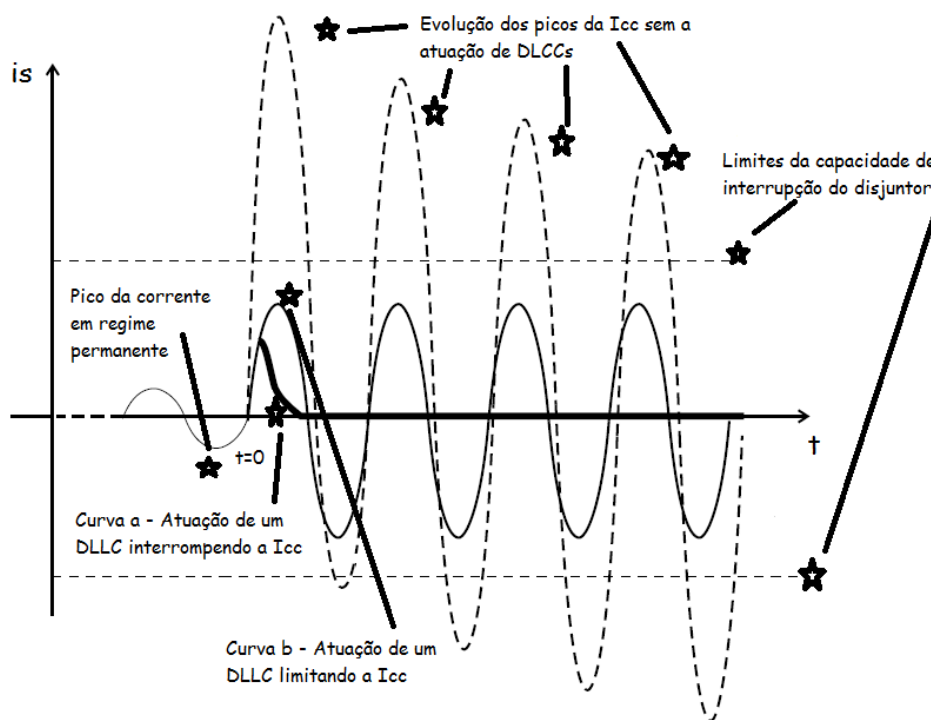


Figura 2.8 - Comportamento dos DLCCs em uma falta típica
 Fonte: Adaptado de (LANES, 2006).

Pela análise da Figura 2.8, pode-se observar o valor de pico de uma corrente em regime permanente e a evolução dos valores de pico para um curto-circuito iniciado em $t=0$, se nenhum disjuntor atuar. Essa corrente de falta pode atingir valores superiores à capacidade de interrupção do disjuntor.

A curva *a* apresenta a ação de um DLCC interrompendo a corrente de curto. Essa interrupção deve ser a mais rápida possível para que os valores de pico do curto não superem seu valor nominal. Disjuntores eletrônicos e dispositivos pirotécnicos são DLCCs que agem na interrupção da corrente de curto-circuito. A curva *b* apresenta a ação de um DLCC que atua apenas limitando a corrente de curto. A corrente de curto é limitada a um valor compatível ao disjuntor de proteção. Reatores com núcleo de ar (RLC), tecnologias FACTS (Flexible AC transmission system) como os capacitores sérios controlados por tiristor (TCSC - Thyristor-Controlled Series Capacitor), transformadores especiais como os controladores de potência entre fases (IPC - Interphase Power Controller) e os dispositivos supercondutores são DLCCs que agem apenas limitando a corrente de curto-circuito.

Existem diversas propostas de DLCCs na literatura, como é apresentado na Tabela 2.3. Estas topologias são baseadas em diversas tecnologias, algumas com

tempo de uso no mercado bastante avançado e outros em fase de pesquisa e desenvolvimento.

Tabela 2.3 - Principais DLCCs

DLCCS DISPONÍVEIS NO MERCADO COM AMPLA EXPERIÊNCIA DE USO	DLCCS DISPONÍVEIS NO MERCADO COM EXPERIÊNCIA DE USO AINDA LIMITADA	DLCCS EM FASE DE P&D
Reator com núcleo de ar (RLC)	Controladores de potência entre fases (IPC) Supercondutores média e alta tensão (SLC)	Disjuntores eletrônicos de abertura rápida
Dispositivo pirotécnico	Capacitores séries controlados por tiristor (TCSC)	Supercondutores alta tensão (SLC)

Algumas características básicas desejáveis para os DLCCs são:

- Impedância baixa ou nula durante a operação normal do sistema;
- Impedância alta sob condições de falta;
- Transição rápida do modo normal para o modo limitador;
- Recuperação rápida do modo normal depois da interrupção de uma falta;
- Baixas perdas;
- Compatibilidade com os esquemas de proteção existentes ou planejados;
- Alta confiabilidade durante longos períodos;
- Baixo impacto no meio ambiente;
- Não provocar deterioração no comportamento durante a vida útil;
- Não provocar danos à vida humana;
- Volume e pesos limitados;
- Baixo custo.

A seguir, descrevem-se alguns tipos de DLCCs (AMON, 2001; AMON, *et al.*, 2005; MONTEIRO, 2005; FERREIRA, 2006; D'AJUZ, 2007; AMON, 2009, BARAN e DUARTE, 2010):

- Reatores com Núcleo de Ar - RLC

O reator com núcleo de ar pode ser empregado no sistema elétrico como um reator limitador de corrente de curto-circuito (RLC) (Figura 2.9). Comparado com outras tecnologias de DLCCs, o RLC possui menor custo além de ser a tecnologia de limitador tradicionalmente mais utilizada nos sistemas de potência. O RLC é uma impedância com componentes resistiva e reativa (Figura 2.10). A limitação da

corrente de curto durante uma falta é consequência do acréscimo da impedância do RLC no equivalente do circuito que se deseja limitar.



Figura 2.9 - RLC na subestação Mogi das Cruzes 345 kV
Fonte: (D'AJUZ, 2007)

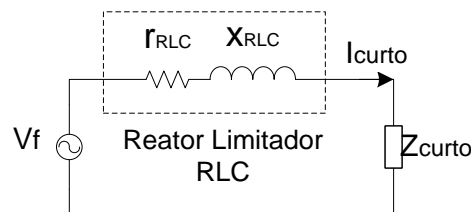


Figura 2.10 - Circuito com RLC como limitador de corrente de curto-circuito

Por ser uma impedância permanentemente na rede, o RLC provoca perdas por efeito Joule na resistência do RLC além de impactar na regulação de tensão e na estabilidade transitória do sistema. Esses problemas são amenizados em redes altamente malhadas. Além disso, os RLCs geram um campo eletromagnético intenso, e, portanto, exigem distâncias de segurança adequadas nas subestações, tornando inviável a instalação do dispositivo em SEs com pouco espaço físico.

No Brasil, os RLCs são utilizados em sistemas de 13,8 kV, nos serviços auxiliares das subestações, até sistemas de 500 kV. Algumas subestações que utilizam o reator com núcleo de ar para limitar as correntes de falta são:

- 13,8 kV: UHE Sobradinho e Subestação Irecê - ATE II e CHESF;
- 138 kV: Subestação de Jaguará e Angra - CEMIG e FURNAS;
- 345 kV: Subestação de Mogi das Cruzes - FURNAS;

- 500 kV: UHE de Tucuruí - ELETRONORTE.

-Dispositivos Pirotécnicos

Os dispositivos pirotécnicos estão entre as soluções para a limitação de correntes de curto-circuito. Eles interrompem correntes elevadas em tempos reduzidos (menos de $\frac{1}{4}$ de ciclo). Funcionam interrompendo o condutor em seu interior por meio de cargas explosivas e elementos fusíveis (Figura 2.11).

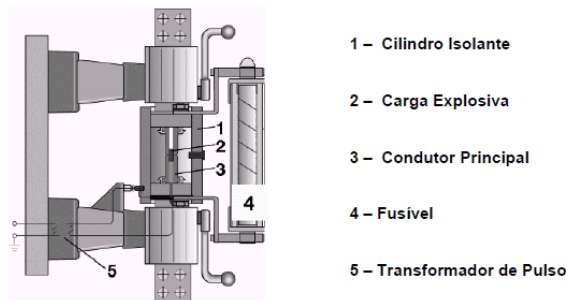


Figura 2.11 - Componentes do dispositivo pirotécnico
 Fonte: (MONTEIRO, 2005)

Este dispositivo é amplamente utilizado desde a década de 50, mas no Brasil só foi adotado a partir dos anos 90. Atualmente, diversas indústrias utilizam dispositivos pirotécnicos devido à superação de seus equipamentos.

Os dispositivos pirotécnicos são considerados dispositivos passivos por não possuírem resistência em regime permanente e não dissiparem energia elétrica. Ocupam espaço físico relativamente pequeno.

Uma desvantagem destes dispositivos se dá pelo fato de que, interrompido o defeito, as fontes de alimentação do curto são separadas do resto do circuito até que ocorra a substituição do fusível e da câmara do condutor principal.

Em regime normal, a corrente passa pelo condutor principal, onde estão instaladas cargas explosivas químicas. Em paralelo com este condutor está um fusível limitador. O circuito do fusível possui uma impedância superior à do condutor principal, sem a circulação da corrente em regime permanente. Transformadores de pulso associados aos TCs detectam a corrente de falta em sua rampa de subida disparando a carga química que parte o condutor gerando um arco elétrico nos pontos de ruptura. O arco desvia a corrente, já reduzida, para o fusível limitador que a extingue (Figura 2.12).

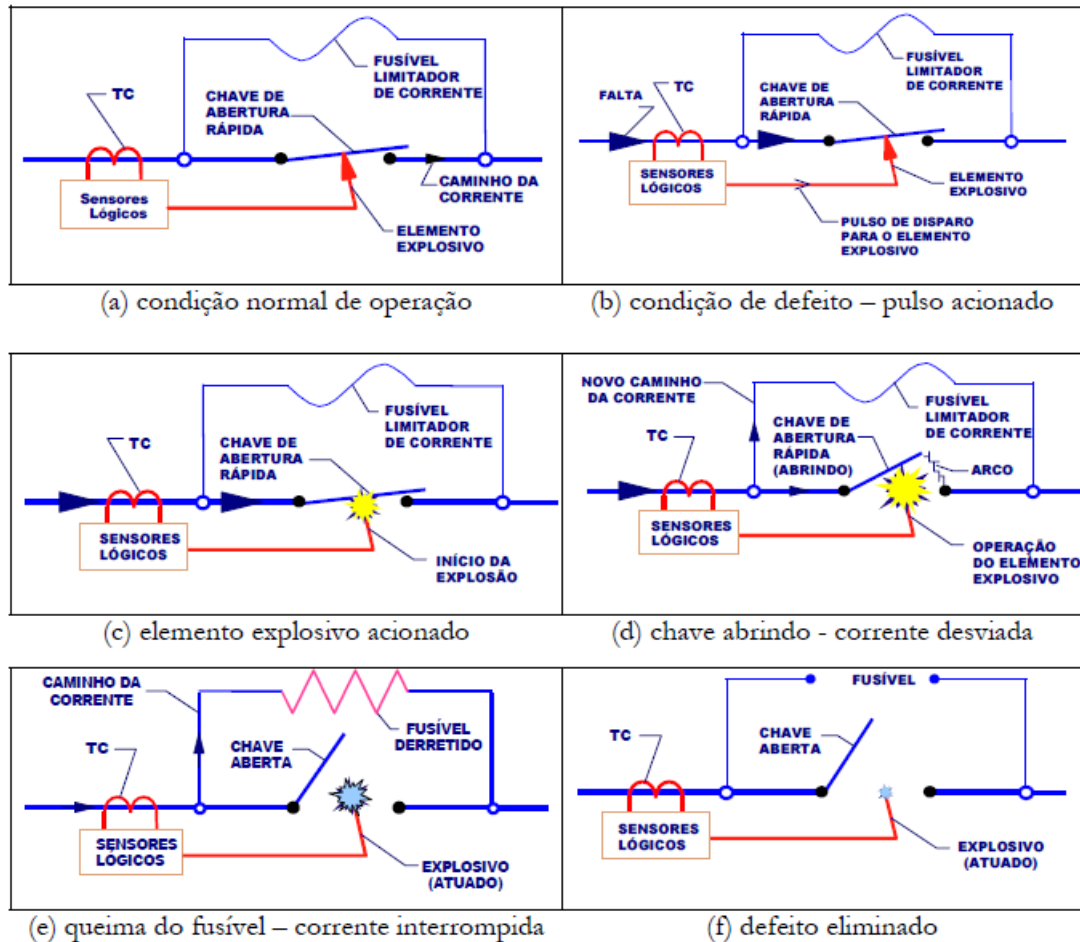


Figura 2.12 - Etapas de funcionamento do dispositivo pirotécnico
 Fonte: (MONTEIRO, 2005)

- Supercondutores Limitadores - SLC

Os dispositivos limitadores supercondutores (SLC) são novos no mercado. Várias pesquisas seguem mostrando diversos de seus benefícios, porém o custo da tecnologia é elevado. Os dispositivos supercondutores limitadores são condutores que apresentam resistência desprezível quando resfriados. A resistência é readquirida quase instantaneamente durante a falta, permanecendo alta até o desligamento do circuito ou redução da corrente ao valor nominal. Para evitar aquecimentos e tempo de resfriamentos elevados, a corrente de falta deve ser conduzida pelo supercondutor por poucos ciclos. (OLIVEIRA, 2005)

Existem três principais supercondutores limitadores:

Tipo Resistivo: Montado em série com o circuito a ser protegido (Figura 2.13).

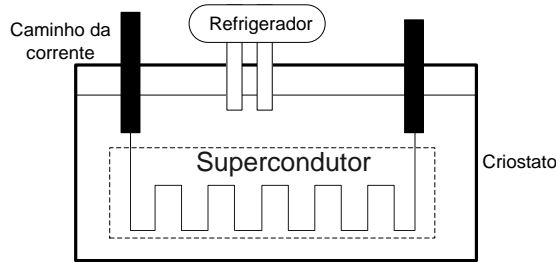


Figura 2.13 - SLCC tipo resistivo
Fonte: (D'ÁJUZ, 2007)

Tipo Indutivo ou Núcleo de Ferro Blindado: É basicamente um pequeno transformador acoplado magneticamente ao circuito a ser protegido (Figura 2.14).

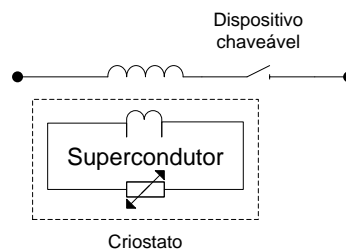


Figura 2.14 - SLCC tipo indutivo
Fonte: (D'ÁJUZ, 2007)

Tipo Ponte: O SLC tipo ponte é a combinação do tipo resistivo e indutivo. Utiliza diodos (ou tiristores) conectados a um enrolamento supercondutor por intermédio de uma indutância limitante L (Figura 2.15).

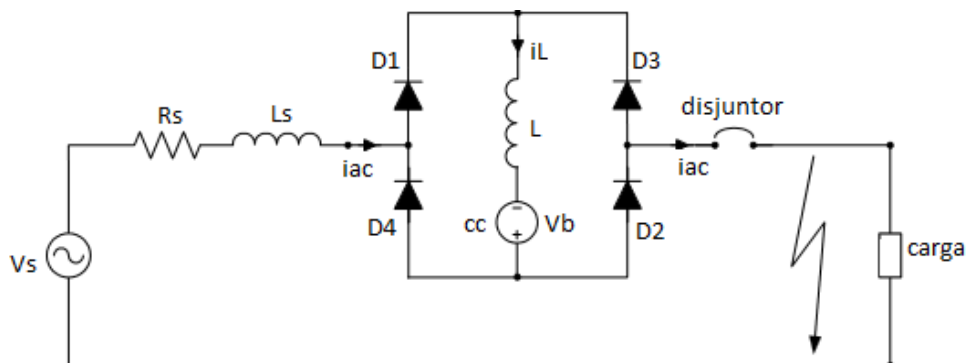


Figura 2.15 - Circuito com SLCC tipo ponte como limitador da corrente de curto-circuito
Fonte: Adaptado de (MONTEIRO, 2005)

- Capacitores Séries Controlados por Tiristor - TCSC

Os dispositivos FACTS, resultantes da expressão em inglês "Flexible AC Transmission Systems", são dispositivos que quando aplicados no sistema de

transmissão condicionam a energia elétrica. Os dispositivos baseados na tecnologia FACTS proporcionam um grande grau de flexibilidade na rede, com o fator motivador de que um dispositivo pode realizar múltiplas funções além de fazer com que o sistema elétrico opere com respostas mais rápidas (LANES, 2006). Porém, o custo e as exigências para operação e instalação destes dispositivos ainda são elevados.

Dentre as tecnologias FACTS o capacitor série controlado por tiristor, ou TCSC, do inglês "Thyristor Controlled Series Capacitor", é a que se destaca no campo da limitação de corrente de falta. Esta tecnologia é utilizada para o controle do fluxo de potência, amortecimento de oscilações e aumento da capacidade de transmissão, além de poder controlar rapidamente o aumento ou redução da impedância série das linhas de transmissão. A capacidade de ajustar a impedância pode ser usada para limitar a corrente de curto circuito durante uma falta no sistema.

O TCSC é um banco capacitor série em paralelo com um reator controlado por tiristores (TCR) e um pára-raios. A configuração do TCSC em série com a linha de transmissão, apresentada na Figura 2.16, permite o controle contínuo da impedância.

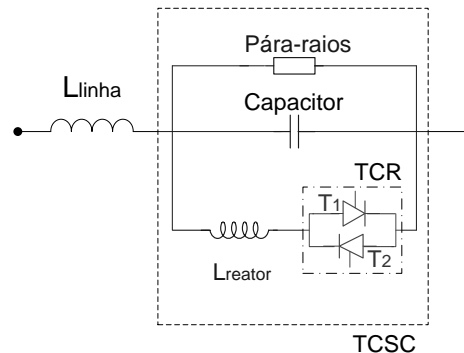


Figura 2.16 - Circuito equivalente do TCSC
Fonte: Adaptado de (MONTEIRO, 2005)

Devido ao custo elevado da tecnologia TCSC, o uso do dispositivo para limitar a corrente de curto-circuito na rede deve ser agregada a outra vantagem para o sistema. (GAMA, *et al.*, 1998)

No Brasil, existem TCSCs nas extremidades da interligação Norte-Sul, ou seja, nas subestações Imperatriz e Serra da Mesa, para amortecimento de oscilações de energia.

- Controladores de Potência entre Fases - IPC

A utilização dos dispositivos controladores de potência entre fases, ou IPCs, do inglês "Interphase Power Controller", tem o propósito de controlar potência ativa e reativa. Diversos estudos (KHORRAMI, *et al.*, 2010; MONTEIRO, 2005) apontam os IPCs como uma proposta promissora para limitar o nível das correntes de falta, principalmente quando as subestações superadas por curto-circuito tem pouco espaço físico disponível.

Os IPCs são conectados entre duas barras e possuem, no mínimo, dois ramos paralelos (Figura 2.17). Um dos ramos contém uma reatância indutiva e o outro uma reatância capacitiva, podendo cada um estar conectado com um elemento defasador. O elemento defasador pode ser obtido de três formas:

- Transformadores defasadores;
- Conexões de transformadores convencionais (defasamento fixo);
- Conexão entre fases diferentes de dois sistemas síncronos.

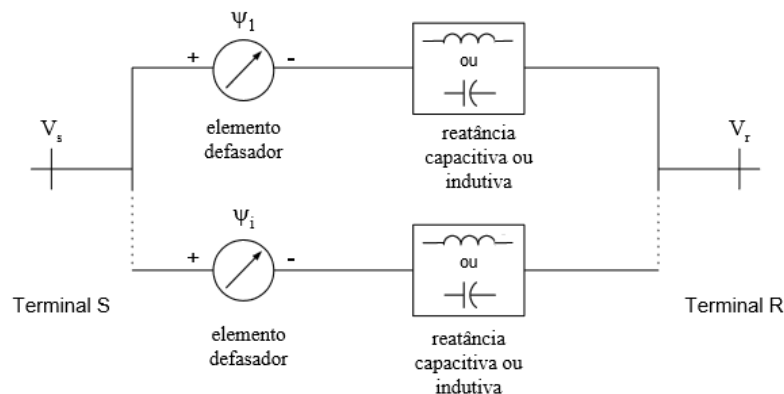


Figura 2.17 - Circuito equivalente genérico IPC
Fonte: Adaptado de (MONTEIRO, 2005)

-Disjuntores Eletrônicos de Abertura Rápida

São disjuntores construídos com chaves eletrônicas e que são capazes de atuar em 0,5 ciclo, ou seja, um terço do tempo dos disjuntores mais modernos, que atuam em 1,5 ciclos. Os disjuntores eletrônicos serviriam para seccionar uma barra ou abrir uma linha, diminuindo assim o nível de curto total e com isso liberando o disjuntor convencional para atuar. Vale ressaltar que chaves eletrônicas introduzem mais perdas no sistema que disjuntores convencionais e esta em fase de pesquisa.

2.4.2.3 Instalação dos dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito

Os DLCCs podem ser instalados seccionando um barramento, em série com os circuitos alimentadores ou em série com os circuitos de saída (FERREIRA, 2006). Dependendo da necessidade, analisa-se a melhor localização para a instalação dos DLCCs (Figura 2.18).

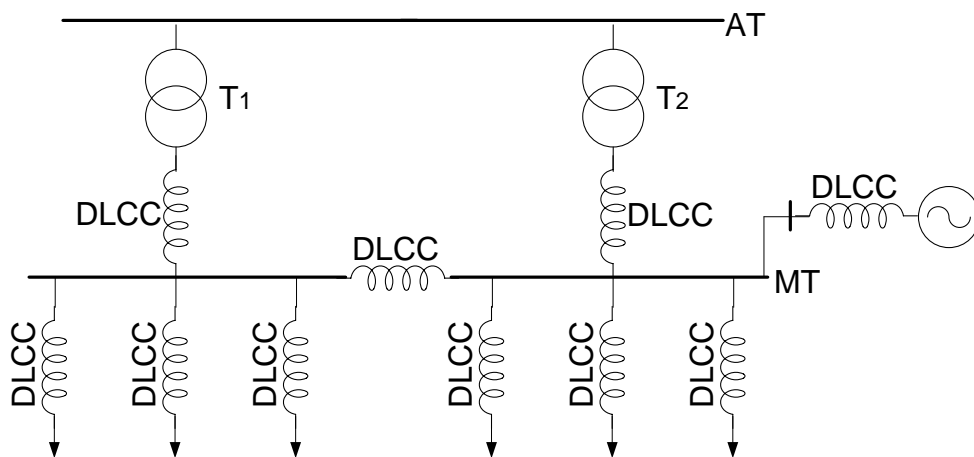


Figura 2.18 - Instalação dos DLCCs
Fonte: (BARAN e DUARTE, 2010)

- Instalação de DLCC Seccionando Barramentos

O DLCC seccionando um barramento restringe a contribuição que um subsistema acrescenta na corrente de curto-circuito total do sistema. O acoplamento entre as seções dos barramentos deve manter o equilíbrio de cargas para evitar perdas elevadas no sistema se uma corrente de alto valor passar pelo DLCC (Figura 2.19).

As vantagens da instalação do DLCC seccionando um barramento são:

- Ajuste dos carregamentos dos transformadores em paralelo;
- Não necessidade de desligamento dos transformadores após o desligamento do DLCC;
- União de barras afastadas sem que ocorra aumento na capacidade de suportar as faltas do sistema;
- Melhor uso da capacidade do transformador;
- A queda de tensão no limitador sustenta o nível de tensão da barra que não está em falta.

A desvantagem do DLCC seccionando um barramento é de não limitar individualmente as contribuições de cada circuito.

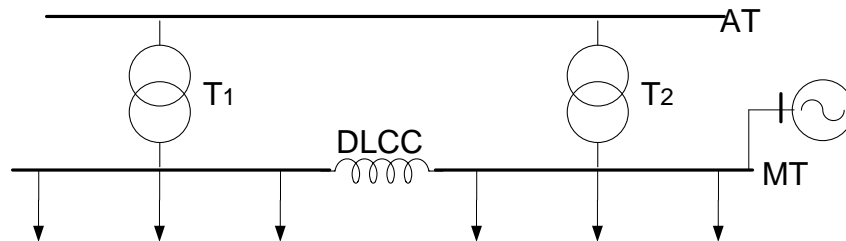


Figura 2.19 - DLCCs seccionando barramento
Fonte: (BARAN e DUARTE, 2010)

- Instalação de DLCC em Série com os Circuitos Alimentadores

O DLCC em série com os circuitos alimentadores restringe a contribuição do alimentador para curtos no sistema e limita a contribuição do sistema para curtos no alimentador (Figura 2.20).

O DLCC em série com os circuitos alimentadores tem a vantagem de limitar a contribuição individual do alimentador, porém as perdas totais podem ser elevadas se a contribuição individual do alimentador for elevada.

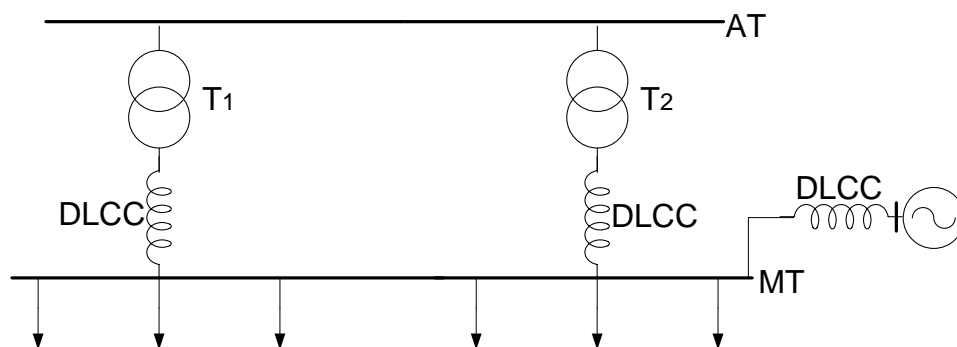


Figura 2.20 - DLCCs em série com os circuitos alimentadores
Fonte: (BARAN e DUARTE, 2010)

-Instalação de DLCC em Série com os Circuitos de Saída

O DLCC em série com o circuito de saída reduz a corrente de curto-circuito no alimentador em que está instalado (Figura 2.21).

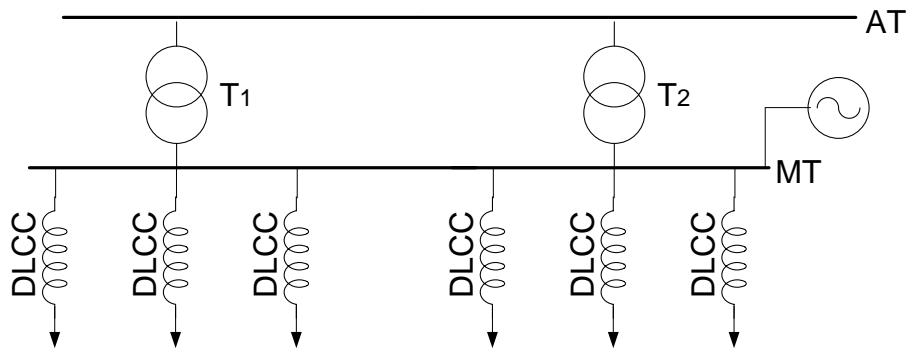


Figura 2.21 - DLCCs em série com os circuitos de saída
 Fonte: (BARAN e DUARTE, 2010)

As vantagens dos DLCCs em série com os circuitos de saída são:

- Proteção de equipamentos de difícil substituição;
- Perdas reduzidas em relação ao DLCC em série com os alimentadores e melhor regulação, já que a contribuição de cada alimentador é menor;
- Redução da queda de tensão na barra durante um curto-circuito, aumentando a estabilidade das cargas alimentadas pelos outros circuitos.

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Este capítulo teve por finalidade apresentar aspectos gerais para avaliação de superação de equipamentos internos às subestações, apresentando uma breve descrição sobre a metodologia e componentes levadas em consideração quando da análise dos curtos circuitos.

Apresentou também as ações comumente utilizadas para se contornar superação de equipamentos. Dentre as descritas, este trabalho utilizará a instalação dos DLCC's RLCs.

O próximo capítulo tem por objetivo apresentar a metodologia convencional (barra-ramo) para cálculo das corrente de falta trifásica e fase-terra que utiliza a matriz \dot{Z}_{Barra} a fim de ser possível a descrição da extensão da mesma para o nível de subestação e assim possibilitar o acesso direto às correntes de curto circulantes pelos equipamentos de manobra.

3 MÉTODO DA MATRIZ \dot{Z}_{Barra} PARA O CÁLCULO DE CURTO-CIRCUITOS NA MODELAGEM BARRA-RAMO DA REDE

3.1 CONCEITOS PRELIMINARES

Este capítulo tem como objetivo apresentar a formulação clássica (STEVENSON, 1976) para cálculo de curto-circuito trifásico e fase-terra pelo Método da Matriz \dot{Z}_{Barra} , considerando a modelagem convencional barra-ramo.

A análise do sistema sob condições de curto é muito importante no planejamento e na coordenação da proteção, pois permite a previsão das consequências das faltas, evitando problemas futuros. Por isso, sempre que há mudanças de capacidade geradora ou do sistema esses cálculos devem ser refeitos.

De maneira geral, o cálculo de curto-circuito tem como objetivos:

- Dimensionar os dispositivos de proteção e segurança, para que na ocorrência de uma falta, eles isolem o problema, evitando a propagação do dano;
- Determinar a capacidade de interrupção dos dispositivos de proteção, a partir do valor máximo de cc calculado nos diversos pontos do sistema;
- Prevenir os esforços térmicos e eletrodinâmicos nos elementos do sistema quando percorrido pela corrente de falta;
- Coordenar proteções, e especificar as correntes e tempos de disparo das mesmas;
- Analisar sobre e subtensões provocadas pelo cc;
- Estudar a estabilidade dinâmica do sistema.

3.2 COMPONENTES SIMÉTRICAS

Nos sistemas elétricos de potência, um curto-circuito acontece quando é rompido o isolamento entre duas ou três fases ou entre a isolação para a terra de uma ou mais fases. Isso pode ser causado, por exemplo, pela ionização do ar entre as fases, por uma descarga atmosférica, pela ação do vento, por sobtensões causadas por manobras ou rejeição de cargas.

Nas redes elétricas trifásicas, dependendo do número de fases que entram em contato entre si ou com a terra, os principais tipos de curtos-circuitos são (Figura 3.1):

- a) Trifásico (trifásico e trifásico-terra);
- b) Fase-Terra;
- c) Fase-Fase;
- d) Fase-Fase-Terra.

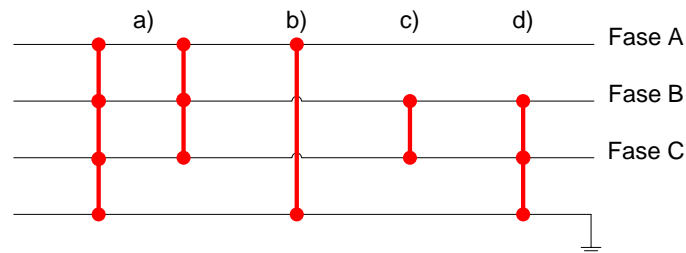


Figura 3.1 - Casos de curtos-circuitos nas redes trifásicas
Fonte: Adaptado de (SIEMENS, 1970).

Nas redes elétricas equilibradas o curto-circuito trifásico (a), também denominado como falta simétrica, comporta-se como uma carga simétrica sobre a rede, solicitando de modo idêntico os três condutores afetados que conduzem o mesmo valor de corrente de curto-circuito. Nessa situação, como em qualquer caso de carga simétrica

$$\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = \dot{I}_{neutro} = 0 \quad (3.1)$$

e o cálculo de curto-circuito pode ser realizado por meio de ferramentas convencionais de análise de circuitos trifásicos como: equivalentes, nós e malhas.

Os outros tipos de curto-circuito (b, c, d) são classificados como *faltas assimétricas*, pois se comportam como cargas assimétricas na rede, ou seja, geram um desbalanceamento entre as fases. Para os curtos assimétricos:

$$\dot{I}_{neutro} \neq 0 \quad (3.2)$$

No caso das *faltas assimétricas*, a solução para o problema de curto-circuito torna-se complexa, pois as faltas solicitam correntes de curto-circuito diferentes em cada uma das fases. Tradicionalmente, para a solução destes tipos de faltas, o sistema é decomposto em componentes simétricas para caracterizar o desbalanceamento.

da rede ocasionado pelas correntes de *falta assimétricas*, conforme Teorema de Fortescue.

Fortescue estabeleceu que um sistema de "n" fasores desequilibrados pode ser decomposto em "n" sistemas equilibrados, denominados de componentes simétricas do sistema original, supondo válido o princípio da superposição, ou seja, que os circuitos sejam lineares.

O Teorema de Fortescue consiste na decomposição dos elementos de tensão ou corrente das fases, em parcelas iguais, mas com ângulos de fase diferentes. Para sistemas trifásicos, as fases são decompostas em três sistemas de fasores balanceados (componentes simétricas) totalmente desacoplados: sequência positiva, negativa e zero.

Para representar as componentes simétricas utiliza-se o operador imaginário j e o rotacional \dot{a} :

$$j = 1 \angle 90^\circ \quad (3.3)$$

$$\dot{a} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = 1 \angle 120^\circ. \quad (3.4)$$

A sequência positiva ou direta (índice 1) é o conjunto de três fasores iguais em módulo, girando no mesmo sentido e velocidade síncrona do sistema original, defasados 120° entre si com a mesma sequência de fases dos fasores originais (Figura 3.2).

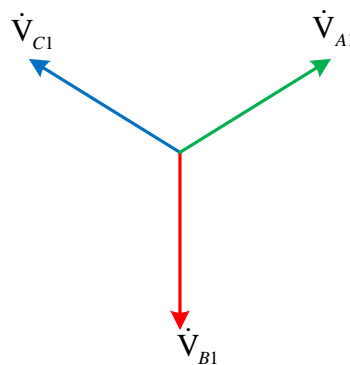


Figura 3.2 - Sequência positiva

Segundo a Figura 3.2:

$$\dot{V}_{A1} = \dot{V}_{A1} \quad (3.5)$$

$$\dot{V}_{B1} = \dot{V}_{A1} \cdot \dot{a}^2 \quad (3.6)$$

$$\dot{V}_{C1} = \dot{V}_{A1} \cdot \dot{a}. \quad (3.7)$$

A sequência negativa ou indireta (índice 2) é o conjunto de três fasores girando em uma direção contrária ao sistema original com as fases iguais em módulo, defasadas 120° entre si com sequência oposta à sequência de fases dos fasores originais (Figura 3.3).

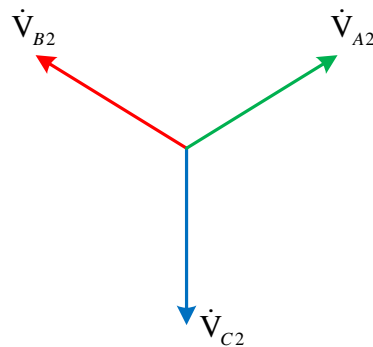


Figura 3.3 - Sequência negativa

Segundo a Figura 3.3:

$$\dot{V}_{A2} = \dot{V}_{A2} \quad (3.8)$$

$$\dot{V}_{B2} = \dot{V}_{A2} \cdot \dot{a} \quad (3.9)$$

$$\dot{V}_{C2} = \dot{V}_{A2} \cdot \dot{a}^2. \quad (3.10)$$

A sequência zero (índice 0) é o conjunto de três fasores gerados por um campo magnético estático pulsatório com fases iguais em módulo, defasados 0° entre si (em fase) (Figura 3.4).

Comumente associados ao fato de se envolver a terra em condições de desbalanço.

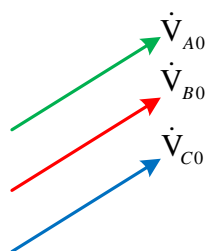


Figura 3.4 - Sequência zero

Segundo a Figura 3.4:

$$\dot{V}_{A0} = \dot{V}_{B0} = \dot{V}_{C0}. \quad (3.11)$$

O sistema trifásico assimétrico pode ser representado pela superposição dos sistemas trifásicos equilibrados de componentes simétricas (sequência positiva, negativa e zero). Para tanto valem as equações:

$$\begin{aligned} \dot{V}_A &= \dot{V}_{A1} + \dot{V}_{A2} + \dot{V}_{A0} \\ \dot{V}_B &= \dot{V}_{B1} + \dot{V}_{B2} + \dot{V}_{B0} \\ \dot{V}_C &= \dot{V}_{C1} + \dot{V}_{C2} + \dot{V}_{C0}. \end{aligned} \quad (3.12)$$

Tomando o fasor \dot{V}_A como referência, e utilizando as equações anteriores, as componentes de fase A, B, C são obtidas pela equação matricial

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_A \\ \dot{V}_B \\ \dot{V}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1\dot{a}^2 & \dot{a} & \\ 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_{A0} \\ \dot{V}_{A1} \\ \dot{V}_{A2} \end{bmatrix}. \quad (3.13)$$

Isolando as componentes simétricas da equação (3.13) tem-se a equação das componentes simétricas em função do sistema trifásico desbalanceado:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{A0} \\ \dot{V}_{A1} \\ \dot{V}_{A2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \\ 1\dot{a}^2 & \dot{a} & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_A \\ \dot{V}_B \\ \dot{V}_C \end{bmatrix}. \quad (3.14)$$

Sendo T a matriz de transformação de componentes simétricas

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1\dot{a}^2 & \dot{a} & \\ 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

e sua inversa T^{-1} como a matriz de transformação dos componentes de fase

$$T^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \\ 1\dot{a}^2 & \dot{a} & \end{bmatrix}. \quad (3.16)$$

as equações (3.13) e (3.14) podem ser reescritas de forma compacta

$$[\dot{V}^{ABC}] = T \cdot [\dot{V}^{012}] \quad (3.17)$$

$$[\dot{V}^{012}] = T^{-1} \cdot [\dot{V}^{ABC}] \quad (3.18)$$

onde o sobre-índice ABC denota o sistema original, e o sobre-índice 012 denota o sistema de sequência.

A mesma análise demonstrada com a tensão pode ser realizada com a corrente.

3.3 REPRESENTAÇÃO DOS COMPONENTES DO SISTEMA ELÉTRICO

Para a realização de estudos de curto-circuito, o primeiro ponto a ser observado são os modelos matemáticos que descrevem o comportamento físico de cada componente da rede quando em condição de falta e as relações decorrentes de suas interligações, para então realizar as simulações numéricas.

Para o cálculo das correntes de curto-circuito que causam desbalanceamento no sistema, é aplicada a teoria das componentes simétricas. Portanto, faz-se necessário o conhecimento dos componentes do sistema através de seus circuitos equivalentes expressos por impedâncias de seqüências positiva negativa e zero.

Os componentes usualmente considerados nos estudos de curto-circuito são os geradores síncronos, as linhas de transmissão e os transformadores (KINDERMANN, 2003).

3.3.1 Geradores síncronos

Em regime estático, o gerador síncrono fornece às cargas uma tensão estável, garantindo continuidade e estabilidade ao sistema. Na ocorrência do curto-circuito, o gerador síncrono alimenta as correntes de curto-circuito injetando correntes de valores elevados no sistema para compensar a queda de impedância vista por ele.

Devido às características eletromagnéticas e eletromecânicas dos geradores, a corrente de curto-circuito apresenta uma assimetria na forma de onda com relação ao eixo do tempo. Segundo (KINDERMANN, 2003), a variação da corrente de falta pode ser subdividida em três períodos, como indicado na Figura 3.5.

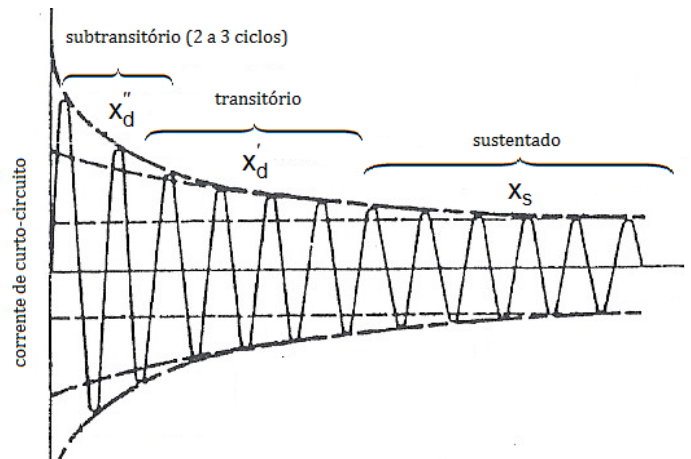


Figura 3.5 - Variação da corrente de curto-circuito e suas componentes

A corrente é máxima no instante inicial da falta, durante o período subtransitório, que tem menor duração e maior amortecimento. O período seguinte, período transitório, é caracterizado por um decaimento mais suave com duração de alguns ciclos até que se atinja o equilíbrio da corrente, caracterizando o período permanente.

A atenuação das correntes de curto-circuito é causada por que o fluxo no entreferro do gerador interfere no processo. Para representar o processo, é considerado um crescimento do valor do enrolamento interno do gerador: reatância subtransitória (x''_d), reatância transitória (x'_d) e reatância síncrona (x_s):

$$x''_d \leq x'_d \leq x_s. \quad (3.19)$$

As redes de sequência para o gerador síncrono aparecem na Figura 3.6. O gerador síncrono é um elemento ativo na sequência positiva e passivo nas sequências negativa e zero. Por ser um elemento ativo na sequência positiva o circuito equivalente de sequência positiva do gerador síncrono é representado por uma fonte de tensão ideal \dot{E}_{a1} em série com a reatância de sequência positiva x_1 .

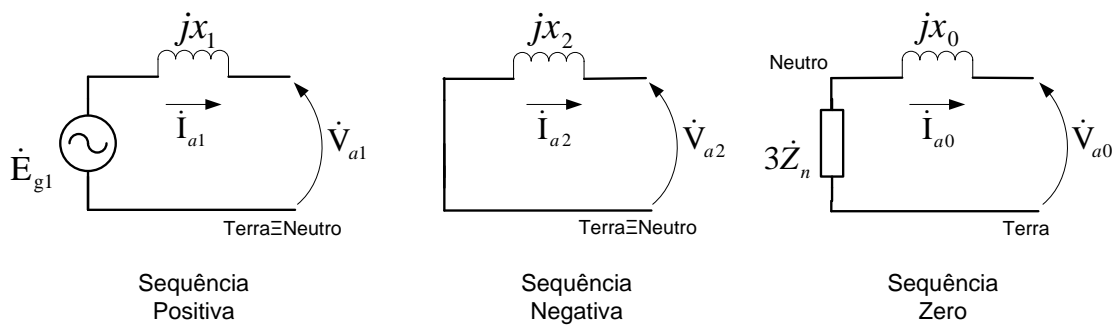


Figura 3.6 - Circuito equivalente por fase de seqüência positiva, negativa e zero para o gerador

As impedâncias internas dos geradores síncronos são representadas pelas reatâncias de seqüências positiva negativa e zero, respectivamente x_1 , x_2 e x_0 . A reatância de seqüência positiva x_1 possui o valor x''_d , x'_d ou x_s conforme o período que se deseja estudar.

Para que haja fluxo de corrente de seqüência zero é necessário o aterramento no neutro do gerador, representado pela impedância de aterramento z_N .

3.3.2 Linhas de transmissão

A linha de transmissão é um elemento passivo que conecta todo o sistema elétrico, desde a geração até os pontos de distribuição. Por possuir grande extensão e estar exposta a todos os tipos de riscos, sua modelagem é importante para os estudos de curto-circuito.

As linhas de transmissão são caracterizadas como limitadoras de corrente de curto-circuito por apresentarem um valor elevado de impedância, tornando-se mais indutiva conforme o aumento dos níveis de tensão.

O modelo da linha de transmissão normalmente utilizado nos cálculos de curto-circuito é o equivalente π . O modelo π consiste em uma impedância série com capacitores "shunt" nas suas extremidades, como apresentado na Figura 3.7.

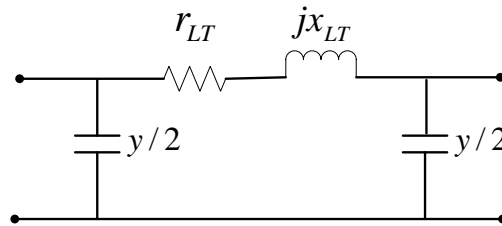


Figura 3.7 - Circuitos equivalentes por fase de seqüências positiva, negativa e zero para a linha de transmissão

Por ser um elemento passivo no sistema elétrico, suas impedâncias de seqüências positiva e negativa são idênticas.

$$\dot{z}_{1LT} = \dot{z}_{2LT} = r_{LT} + jx_{LT}. \quad (3.20)$$

O modelo de seqüência zero difere-se dos modelos de seqüências positiva e negativa apenas para os valores de impedância série \dot{z} e admitância para terra y . Isto porque como os fasores da corrente de seqüência zero estão em fase, a corrente de seqüência zero pode retornar por qualquer caminho que não seja formado pelos próprios condutores da linha (KINDERMANN, 2003). Desse modo, a impedância de seqüência zero depende do local do curto-circuito, da impedância equivalente da LT, cabo de cobertura e resistividade do solo. De um modo geral, o valor da impedância total de seqüência zero é

$$\dot{z}_{0LT} = 2 a 6\dot{z}_{1LT}. \quad (3.21)$$

3.3.3 Transformador

No sistema elétrico, os transformadores conectam equipamentos elétricos com diferentes tensões, reduzindo as perdas na transmissão já que possibilitam a transmissão de energia elétrica em altos níveis de tensão.

Para os estudos de curto-circuito, a corrente de magnetização do núcleo é desprezada e assim como a LT, o transformador comporta-se como um elemento passivo e limitador das correntes de curto-circuito durante as faltas.

Em geral, os transformadores são classificados quanto a: tipo, número de enrolamentos e ligação.

O circuito equivalente para as seqüências positiva e negativa do transformador tipo "Shell" e "Core" de dois enrolamentos é ilustrado na Figura 3.8. Este modelo que representa um transformador que atua na magnitude e no ângulo de fase da tensão da barra consiste basicamente de uma impedância e um transformador ideal com relação $1:\dot{t}_{km}$.

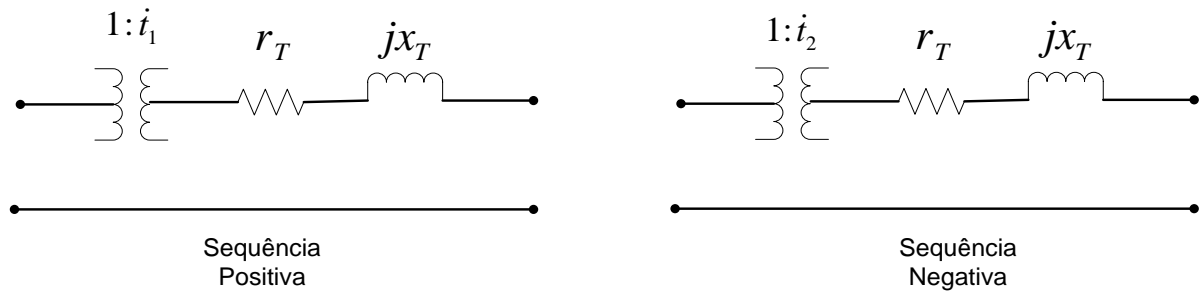


Figura 3.8 - Modelo de transformador tipo "shell" e "core" para as seqüências positiva e negativa

Da Figura 3.8, tem-se as equações abaixo:

$$\dot{t}_1 = a_{km} \cdot e^{j\varphi_{km}} \quad (3.22)$$

$$\dot{t}_2 = a_{km} \cdot e^{-j\varphi_{km}} \quad (3.23)$$

onde a_{km} , representa a relação entre as magnitudes de tensão entre o primário e o secundário do transformador e φ_{km} a defasagem angular entre elas.

As impedâncias séries para as seqüências positiva e negativa são iguais:

$$\dot{z}_1 = \dot{z}_2 = r_T + jx_T \quad (3.24)$$

As ligações internas dos enrolamentos e a forma como os transformadores trifásicos são conectados influenciam a relação de transformação ($1:\dot{t}_{km}$) das seqüências positivas e negativas.

No caso de transformadores com mesmo tipo de ligação interna (Y-Y e Δ - Δ), a relação de transformação \dot{t}_{km} é um número real que representa a variação de magnitude entre o primário e o secundário do transformador ($\dot{t}_1 = \dot{t}_2 = a_{km}$).

Para transformadores com conexão Y- Δ , a relação de transformação passa a ser representada por um número complexo, sendo que φ_{km} representa o defasamento angular entre as tensões e correntes de linha na conexão estrela e conexão delta. Os fasores de tensão e corrente de fase do lado de tensão mais alta

(AT) são considerados adiantados em 30° com relação ao lado de tensão mais baixa (BT) na sequência positiva e atrasados em 30° na sequência negativa.

A modelagem de transformadores em cálculo de curto-circuito usualmente despreza as resistências internas e a defasagem dos transformadores Y-Δ.

Quanto à impedância de sequência zero (x_0), deve-se observar que para existir corrente de sequência zero no primário deve existir caminho no secundário para circulação da mesma. A representação dos transformadores na sequência zero, considerando diferentes conexões, são apresentados na Figura 3.9 e na Figura 3.10 para os transformadores tipo "Shell" e "Core", respectivamente (KINDERMANN, 2003).

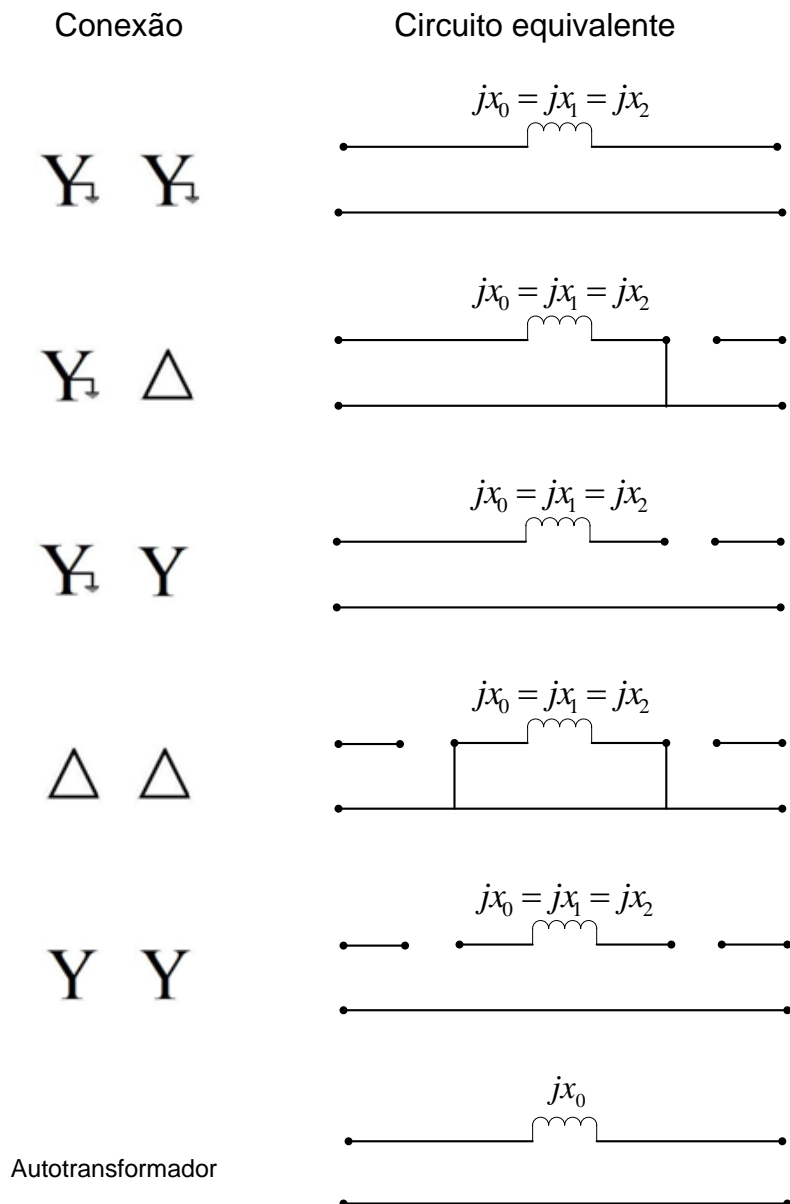


Figura 3.9 - Modelo de transformador tipo shell para a sequência zero

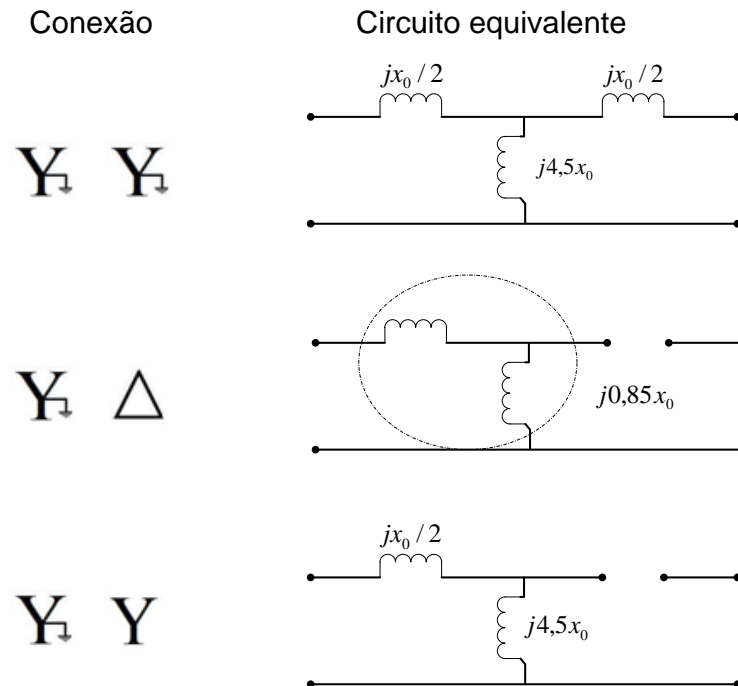


Figura 3.10 - Modelo de transformador tipo core para a sequência zero

3.4 MODELAGEM BARRA-RAMO DA REDE

A modelagem barra-ramo da rede elétrica consiste em um circuito representado por ramos interconectados por barras (Figura 3.11). Os ramos representam o circuito equivalente dos elementos do SEP (linhas de transmissão, transformadores e geradores) e as barras representam as subestações.

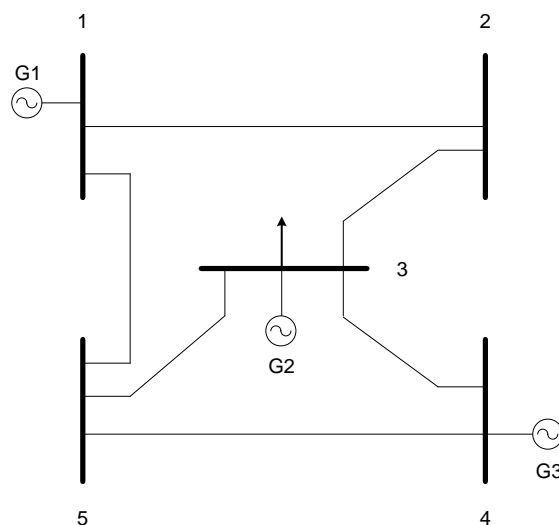


Figura 3.11 - Diagrama unifilar do sistema 5 barras
Fonte: Stevenson, 1976

Esta representação permite uma visualização clara e concisa da topologia da rede e disposição de cada elemento, representados pelos ramos, e suas interligações com as subestações, representadas pelas barras.

Para a simulação numérica da modelagem barra-ramo do sistema elétrico é necessário o conhecimento prévio dos status de chaves e disjuntores, para que, a partir dessas informações, seja determinada a topologia da rede elétrica. O configurador de redes é a ferramenta usualmente utilizada para esse fim.

3.4.1 Análise nodal da modelagem barra-ramo

A maioria das simulações numéricas para estudos no SEP em regime permanente são baseadas *na análise nodal* (NA) da modelagem barra-ramo da rede. Isto é possível, pois os elementos representados pelos ramos podem ser representados diretamente pela queda de tensão que a corrente produz entre seus terminais.

Assumindo a modelagem completa de um sistema equilibrado, a análise do sistema consiste em aplicar a *lei das correntes de kirchhoff* (LKT) a cada barra de uma fase, resultando em um conjunto de equações algébricas lineares, dadas matricialmente por:

$$\dot{I} = \dot{Y}_{barra} * \dot{V} \quad (3.25)$$

onde

\dot{I} : vetor de injeção de barra, de dimensão (nb x 1);

\dot{Y}_{barra} : matriz de admitâncias de barra, de dimensão (nb x nb);

\dot{V} : vetor de tensão de barra, de dimensão (nb x 1).

A solução do sistema é dada por:

$$\dot{V} = \dot{Z}_{barra} * \dot{I} \quad (3.26)$$

onde

\dot{Z}_{barra} : matriz de impedâncias de barra, de dimensão (nb x nb).

A matriz admitâncias (\dot{Y}_{barra}) descreve totalmente a interconexão elétrica dos componentes da modelagem barra-ramo da rede elétrica. As admitâncias da

diagonal principal \dot{Y}_{ii} são chamadas de *admitâncias próprias* de cada barra, e as outras admitâncias \dot{Y}_{ij} são as *admitâncias mútuas* das barras.

A matriz \dot{Y}_{barra} pode ser montada através de uma simples inspeção do sistema elétrico. A *admitância própria* é o somatório das admitâncias conectadas à barra referente ao índice i (\dot{Y}_{ii}), e a *admitância mútua* é o negativo das admitâncias entre as barras i e j (\dot{Y}_{ij}).

Para uma rede nb barras, as leis para montar a matriz \dot{Y}_{barra} são:

- Termos da diagonal principal: somatório das admitâncias dos elementos (como por exemplo: linhas, transformadores, elementos shunts e geradores) conectadas diretamente aos índices ii da matriz \dot{Y}_{barra} ;
- Termos fora da diagonal principal: admitâncias dos elementos (como por exemplo: linhas, transformadores, elementos shunts e geradores) entre as barras ij da matriz \dot{Y}_{barra} .

$$\begin{aligned}\dot{Y}_{ii} &= j b_i^{sh} + \sum_{m \in \Omega_i} (j b_{im}^{sh} + a_{im}^2 * \dot{y}_{im}) + \dot{y}_{Gi} \\ \dot{Y}_{ij} &= -a_{ij} * e^{-j \varphi_{ij}} * \dot{y}_{ij} \\ \dot{Y}_{ji} &= -a_{ij} * e^{j \varphi_{ij}} * \dot{y}_{ij}\end{aligned}\tag{3.27}$$

onde

\dot{Y}_{ii} : são os elementos da diagonal principal (sempre diferentes de zero);

\dot{Y}_{ij} e \dot{Y}_{ji} : são os elementos fora da diagonal da diagonal principal (nulos quando não há conexão entre as barras i e j);

a_{ij} : tap do transformador conectado entre as barras i e j ;

φ_{ij} : defasagem angular do transformador que conecta as barras i e j ;

\dot{y}_{ij} : admitância da linha que conecta as barras i e j ;

\dot{y}_{Gi} : admitância do gerador conectado a barra i .

Invertendo a \dot{Y}_{barra} matriz obtém-se a matriz \dot{Z}_{barra} , necessária para o cálculo de curto-circuito utilizando o método da matriz \dot{Z}_{barra} .

As tensões de barra são relacionadas às correntes de barra pela matriz \dot{Z}_{barra} , conforme a equação (3.26). As impedâncias da diagonal principal \dot{Z}_{ii} são chamadas de *impedâncias próprias* de cada barra, e as outras impedâncias \dot{Z}_{ij} são as *impedâncias de transferência* das barras.

As impedâncias próprias da matriz \dot{Z}_{barra} (\dot{Z}_{ii}) correspondem às impedâncias de Thevenin da barra i com relação ao restante do sistema. As impedâncias de transferência são os elementos fora da diagonal principal \dot{Z}_{ij} , e correspondem a impedância equivalente entre as barras i e j .

A matriz \dot{Z}_{barra} pode ser calculada invertendo-se a matriz que contém todas as admitâncias do sistema elétrico, a matriz \dot{Y}_{barra} .

$$\dot{Z}_{barra} = \dot{Y}_{barra}^{-1} \quad (3.28)$$

A fim de ilustrar, de forma simplificada, a matriz \dot{Y}_{barra} , a equação (3.29) mostra a matriz \dot{Y}_{barra} do sistema de 5 barras referente à rede elétrica da Figura 3.11, sem considerar os elementos shunts.

$$(3.29) \quad \begin{bmatrix} \dot{y}_{12} + \dot{y}_{15} + \dot{y}_{G1} & -\dot{y}_{12} & 0 & 0 & -\dot{y}_{15} \\ -\dot{y}_{12} & \dot{y}_{12} + \dot{y}_{23} & -\dot{y}_{23} & 0 & 0 \\ 0 & -\dot{y}_{23} & \dot{y}_{23} + \dot{y}_{34} + \dot{y}_{35} + \dot{y}_{G2} & -\dot{y}_{34} & -\dot{y}_{35} \\ 0 & 0 & -\dot{y}_{34} & \dot{y}_{34} + \dot{y}_{35} + \dot{y}_{45} + \dot{y}_{G3} & -\dot{y}_{45} \\ -\dot{y}_{15} & 0 & -\dot{y}_{35} & -\dot{y}_{45} & \dot{y}_{35} + \dot{y}_{45} + \dot{y}_{15} \end{bmatrix}$$

O sistema de equações referente à (3.25) é:

$$(3.30) \quad \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_3 \\ \dot{I}_4 \\ \dot{I}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{y}_{12} + \dot{y}_{15} + \dot{y}_{G1} & -\dot{y}_{12} & 0 & 0 & -\dot{y}_{15} \\ -\dot{y}_{12} & \dot{y}_{12} + \dot{y}_{23} & -\dot{y}_{23} & 0 & 0 \\ 0 & -\dot{y}_{23} & \dot{y}_{23} + \dot{y}_{34} + \dot{y}_{35} + \dot{y}_{G2} & -\dot{y}_{34} & -\dot{y}_{35} \\ 0 & 0 & -\dot{y}_{34} & \dot{y}_{34} + \dot{y}_{35} + \dot{y}_{45} + \dot{y}_{G3} & -\dot{y}_{45} \\ -\dot{y}_{15} & 0 & -\dot{y}_{35} & -\dot{y}_{45} & \dot{y}_{35} + \dot{y}_{45} + \dot{y}_{15} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \dot{V}_2 \\ \dot{V}_2 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix}$$

e o sistema de equações referente à (3.26) é:

$$(3.31) \quad \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \dot{V}_2 \\ \dot{V}_2 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{11} & \dot{Z}_{12} & \dot{Z}_{13} & \dot{Z}_{14} & \dot{Z}_{15} \\ \dot{Z}_{21} & \dot{Z}_{22} & \dot{Z}_{23} & \dot{Z}_{24} & \dot{Z}_{25} \\ \dot{Z}_{31} & \dot{Z}_{32} & \dot{Z}_{33} & \dot{Z}_{34} & \dot{Z}_{35} \\ \dot{Z}_{41} & \dot{Z}_{42} & \dot{Z}_{43} & \dot{Z}_{44} & \dot{Z}_{45} \\ \dot{Z}_{51} & \dot{Z}_{52} & \dot{Z}_{53} & \dot{Z}_{54} & \dot{Z}_{55} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_3 \\ \dot{I}_4 \\ \dot{I}_5 \end{bmatrix}$$

3.5 CÁLCULO DE CURTO-CIRCUITO PELO MÉTODO DA MATRIZ \dot{Z}_{barra}

As técnicas para a extração das informações contidas nas matrizes \dot{Z}_{barra} e \dot{Y}_{barra} para o cálculo matricial de curto-circuito trifásico e fase-terra são apresentadas nesta seção. O procedimento para o cálculo das correntes de curto-circuito injetadas pelas barras, das tensões nas barras vizinhas e da relação X/R do local de falta é baseado na matriz de impedâncias do sistema elétrico \dot{Z}_{barra} . O cálculo das contribuições das linhas vizinhas à barra de curto é feito a partir das tensões nodais das barras e dos parâmetros dos equipamentos entre as barras.

A

Figura 3.12 apresenta o fluxograma com os principais passos a serem seguidos para a formulação matricial do cálculo de curto-circuito na modelagem barra-ramo do sistema.

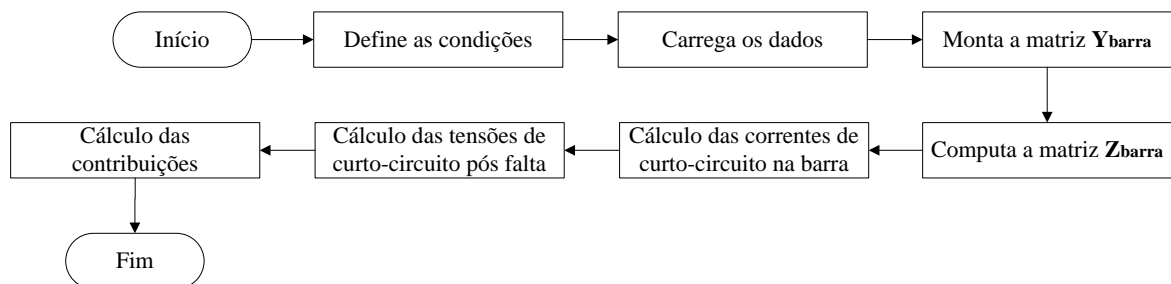


Figura 3.12 - Fluxograma principal do cálculo matricial de curto-circuito na modelagem barra-ramo a rede

Para estabelecer os procedimentos necessários para a formulação do cálculo de curto-circuito na modelagem barra-ramo do sistema elétrico, primeiramente, é necessário definir as condições de estudo que são: sistema a ser estudado, o tipo de curto-circuito (trifásico ou fase-terra) e as condições pré-falta. Os tipos de curto-circuito apresentados neste trabalho são os mais agressivos para rede elétrica: curtos sólidos trifásico e fase-terra. Geralmente as condições pré-falta são desprezadas, admitindo-se o sistema operando sem carga, com as tensões internas das máquinas e as tensões de todos os barramentos iguais a $j1 pu$.

Na segunda etapa são lidos e armazenados os dados da configuração do sistema elétrico a ser estudado, o tipo de curto-circuito e as condições pré-falta estabelecidas.

Em seguida, utilizando os dados da configuração do sistema e do tipo de curto, as matrizes \dot{Y}_{barra} para as seqüências são montadas e invertidas para computar as respectivas matrizes \dot{Z}_{barra} de seqüências.

Tem-se então a base de dados para o início do cálculo matricial das grandezas de curto-circuito que se dá com o cálculo da corrente de curto-circuito em uma barra, seguido da tensão pós falta em todas as barras e da contribuição de corrente em todas as linhas.

3.5.1 Cálculo de curto-circuito trifásico

O cálculo do curto-circuito trifásico é o mais simples, pois este é um curto-circuito equilibrado, só existindo a seqüência positiva para ser analisada. Então, é necessário determinar a matriz admitância e impedância apenas da seqüência positiva ($\dot{Y}_{barra}^{(1)}$ e $\dot{Z}_{barra}^{(1)}$).

Analisando o circuito monofásico da rede, a corrente de curto-circuito trifásico na barra k é obtida pela equação

$$\dot{i}_k^{f(1)} = \frac{\dot{V}_k^{pf}}{\dot{Z}_{kk}^{(1)}} \quad (3.32)$$

onde

$\dot{i}_k^{f(1)}$: corrente de falta de seqüência positiva na barra k , na fase A;

\dot{V}_k^{pf} : fasor tensão na barra k antes da ocorrência da falta;

$\dot{Z}_{kk}^{(1)}$: elemento k - k da matriz $\dot{Z}_{barra}^{(1)}$.

Para a análise do curto-circuito trifásico na barra k de um sistema modelado tradicionalmente (barra-ramo) com nb barras, a única barra com injeção de corrente não nula é a barra curto-circuitada k ($\dot{i}_k^{f(1)}$). Sendo assim, o vetor de injeções de corrente do sistema é dado pela equação 3.33.

$$\dot{\mathbf{i}}^{f(1)} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ -\dot{I}_k^{f(1)} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

onde

$\dot{\mathbf{i}}^{f(1)}$: vetor de injeção de corrente de falta de seqüência positiva.

A equação matricial que relaciona as quedas de tensão em todas as barras do sistema oriundas da falta trifásica na barra k , utilizando a matriz $\dot{\mathbf{Z}}_{barra}$ é

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{Z}}_{1,1}^{(1)} & \dot{\mathbf{Z}}_{1,n}^{(1)} & \dots & \dot{\mathbf{Z}}_{1,k}^{(1)} & \dot{\mathbf{Z}}_{1,nb}^{(1)} \\ \dot{\mathbf{Z}}_{n,1}^{(1)} & & & \dot{\mathbf{Z}}_{n,k}^{(1)} & \\ \vdots & & & \vdots & \vdots \\ \dot{\mathbf{Z}}_{k,1}^{(1)} & & \ddots & \dot{\mathbf{Z}}_{k,k}^{(1)} & \\ \dot{\mathbf{Z}}_{nb,1}^{(1)} & \dots & \dot{\mathbf{Z}}_{nb,k}^{(1)} & \dot{\mathbf{Z}}_{nb,nb}^{(1)} & \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ -\dot{\mathbf{i}}_k^{f(1)} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{V}}_1^{f(1)} \\ \dot{\mathbf{V}}_n^{f(1)} \\ \vdots \\ \dot{\mathbf{V}}_k^{f(1)} \\ \dot{\mathbf{V}}_{nb}^{f(1)} \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

Sobrepondo a tensão pré-falta, o vetor de tensão de falta trifásica é:

$$\dot{\mathbf{V}}^{f(1)} = \dot{\mathbf{V}}^{pf} + \dot{\mathbf{Z}}_{barra}^{(1)} \cdot \dot{\mathbf{i}}^{f(1)} \quad (3.35)$$

onde

$\dot{\mathbf{V}}^{f(1)}$: vetor de tensão de barra durante a falta de seqüência positiva, de dimensão (nb x 1);

$\dot{\mathbf{V}}^{pf}$: vetor de tensão de barra antes da ocorrência da falta, de dimensão (nb x 1);

$\dot{\mathbf{i}}^{f(1)}$: vetor de injeção de corrente de falta de seqüência positiva, de dimensão (nb x 1).

A corrente de falta $\dot{I}_{im}^{f(1)}$ de seqüência positiva que percorre uma linha entre as barras i e m na direção i - m é calculada por:

$$\dot{I}_{im}^{f(1)} = \dot{y}_{im} \cdot (\dot{V}_i^{f(1)} - \dot{V}_m^{f(1)}) + j \cdot b_{im}^s \cdot \dot{V}_i^{f(1)} \quad (3.36)$$

onde

$\dot{I}_{im}^{f(1)}$: corrente total que percorre elemento entre as barras i e m , na direção i - m ;

\dot{y}_{im} : admitância série da linha i - m ;

b_{im}^s : susceptância "shunt" da linha i - m .

3.5.2 Cálculo de curto-circuito fase-terra

Para o desenvolvimento das equações será suposto que o curto-circuito fase-terra ocorreu na fase A.

Primeiramente, é necessária a determinação das matrizes admitâncias de barra para as seqüências positiva, negativa e zero (respectivamente $\dot{Y}_{\text{barra}}^{(1)}$, $\dot{Y}_{\text{barra}}^{(2)}$ e $\dot{Y}_{\text{barra}}^{(0)}$). Então através da inversão dessas matrizes, obtêm-se as matrizes impedâncias para cada uma das seqüências, positiva, negativa e zero (respectivamente $\dot{Z}_{\text{barra}}^{(1)}$, $\dot{Z}_{\text{barra}}^{(2)}$ e $\dot{Z}_{\text{barra}}^{(0)}$).

A partir desses dados as correntes de seqüência e as correntes totais nas fases que aparecem no sistema elétrico durante o curto-circuito fase-terra são calculadas através das equações

$$\dot{I}_{Ak}^{f(1)} = \dot{I}_{Ak}^{f(2)} = \dot{I}_{Ak}^{f(0)} = \frac{\dot{V}_{Ak}^{pf}}{\dot{Z}_{kk}^{(1)} + \dot{Z}_{kk}^{(2)} + \dot{Z}_{kk}^{(0)}} \quad (3.37)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{Ak}^f \\ \dot{I}_{Bk}^f \\ \dot{I}_{Ck}^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \dot{I}_{Ak}^{(0)} \\ \dot{I}_{Ak}^{(1)} \\ \dot{I}_{Ak}^{(2)} \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

onde

$\dot{I}_{Ak}^{f(1)}$: corrente de falta de seqüência positiva na barra k, na fase A;

$\dot{I}_{Ak}^{f(2)}$: corrente de falta de seqüência negativa na barra k, na fase A;

$\dot{I}_{Ak}^{f(0)}$: corrente de falta de seqüência zero na barra k, na fase A;

\dot{I}_{Ak}^f : corrente de falta total na barra k na fase A;

\dot{I}_{Bk}^f : corrente de falta total na barra k na fase B;

\dot{I}_{Ck}^f : corrente de falta total na barra k na fase B;

\dot{V}_{Ak}^{pf} : fasor tensão na barra k antes da ocorrência da falta;

$\dot{Z}_{kk}^{(1)}$: elemento k-k da matriz $\dot{Z}_{\text{barra}}^{(1)}$;

$\dot{Z}_{kk}^{(2)}$: elemento k-k da matriz $\dot{Z}_{\text{barra}}^{(2)}$;

$\dot{Z}_{kk}^{(0)}$: elemento k-k da matriz $\dot{Z}_{\text{barra}}^{(0)}$.

Assumindo que todas as tensões pré-falta são iguais à tensão pré-falta na barra de falta k , as tensões de seqüência e totais que aparecem no sistema elétrico durante o curto-circuito fase-terra são calculadas através das equações:

$$\dot{V}_{A_n}^{f(1)} = \dot{V}_{A_n}^{pf} - \dot{Z}_{nk}^{(1)} \cdot \dot{I}_{A_k}^{f(1)} \quad (3.39)$$

$$\dot{V}_{A_n}^{f(2)} = -\dot{Z}_{nk}^{(2)} \cdot \dot{I}_{A_k}^{f(1)} \quad (3.40)$$

$$\dot{V}_{A_n}^{f(0)} = -\dot{Z}_{nk}^{(0)} \cdot \dot{I}_{A_k}^{f(1)} \quad (3.41)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{A_n}^f \\ \dot{V}_{B_n}^f \\ \dot{V}_{C_n}^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \dot{V}_{A_n}^{f(0)} \\ \dot{V}_{A_n}^{f(1)} \\ \dot{V}_{A_n}^{f(2)} \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

onde

$\dot{V}_{A_n}^{f(1)}$: tensão na fase A de seqüência positiva na barra genérica n (durante a ocorrência da falta na barra k);

$\dot{V}_{A_n}^{f(2)}$: tensão na fase A de seqüência negativa na barra genérica n (durante a ocorrência da falta na barra k);

$\dot{V}_{A_n}^{f(0)}$: tensão na fase A de seqüência zero na barra genérica n (durante a ocorrência da falta na barra k);

$\dot{V}_{A_n}^f$: tensão na fase A total na barra genérica n (durante a ocorrência da falta na barra k);

$\dot{V}_{B_n}^f$: tensão na fase B total na barra genérica n (durante a ocorrência da falta na barra k);

$\dot{V}_{C_n}^f$: tensão na fase C total na barra genérica n (durante a ocorrência da falta na barra k);

$\dot{Z}_{nk}^{(1)}$: elemento n - k da matriz $\dot{Z}_{barra}^{(1)}$;

$\dot{Z}_{nk}^{(2)}$: elemento n - k da matriz $\dot{Z}_{barra}^{(2)}$;

$\dot{Z}_{nk}^{(0)}$: elemento n - k da matriz $\dot{Z}_{barra}^{(0)}$.

As correntes de seqüência e totais através dos circuitos entre as barras i e m , na direção i - m , são:

$$\dot{I}_{A_{im}}^{f(1)} = \dot{y}_{im}^{(1)} \cdot (\dot{V}_{A_i}^{f(1)} - \dot{V}_{A_m}^{f(1)}) + j \cdot b_{km}^{sh} \cdot \dot{V}_{A_i}^{f(1)} \quad (3.43)$$

$$i l_{Aim}^{f(2)} = \dot{y}_{im}^{(2)} \cdot (\dot{V}_{Ai}^{f(2)} - \dot{V}_{Am}^{f(2)}) + j \cdot b_{km}^{sh} \cdot \dot{V}_{Ai}^{f(2)} \quad (3.44)$$

$$i l_{Aim}^{f(0)} = \dot{y}_{im}^{(0)} \cdot (\dot{V}_{Ai}^{f(0)} - \dot{V}_{Am}^{f(0)}) + j \cdot b_{km}^{sh} \cdot \dot{V}_{Ai}^{f(0)} \quad (3.45)$$

$$\begin{bmatrix} i l_{Aim}^f \\ i l_{Bim}^f \\ i l_{Cim}^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i l_{Aim}^{f(0)} \\ i l_{Aim}^{f(1)} \\ i l_{Aim}^{f(2)} \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Este capítulo teve por objetivo apresentar a formulação clássica para cálculo de faltas trifásicas e fase-terra em uma rede elétrica. Esta formulação básica será estendida no próximo capítulo para que os disjuntores possam nela ser representados explicitamente.

4 CÁLCULO DE CURTO-CIRCUITO NO NÍVEL DE SEÇÃO DE BARRAS

4.1 CONCEITOS PRELIMINARES

Este capítulo descreve a metodologia proposta neste trabalho para possibilitar a formulação matemática de curto-circuito no nível de seção de barras. A abordagem baseia-se na representação explícita de ramos chaveáveis de impedância nula, utilizando a metodologia da análise nodal modificada (HO *et al.*, 1975) e a representação dos disjuntores conforme (LOURENÇO *et al.*, 2010).

4.2 MODELAGEM NO NÍVEL DE SEÇÃO DE BARRAS

A modelagem no nível de seção de barras é uma representação bem mais detalhada do que a modelagem barra-ramo, uma vez que permite a representação explícita dos arranjos e topologias das subestações. Para exemplificar a diferença entre as duas modelagens, a Figura 4.1 ilustra o diagrama unifilar do sistema original 5 barras para a modelagem barra-ramo (a) e para a modelagem no nível de seção da barra 3 (b).

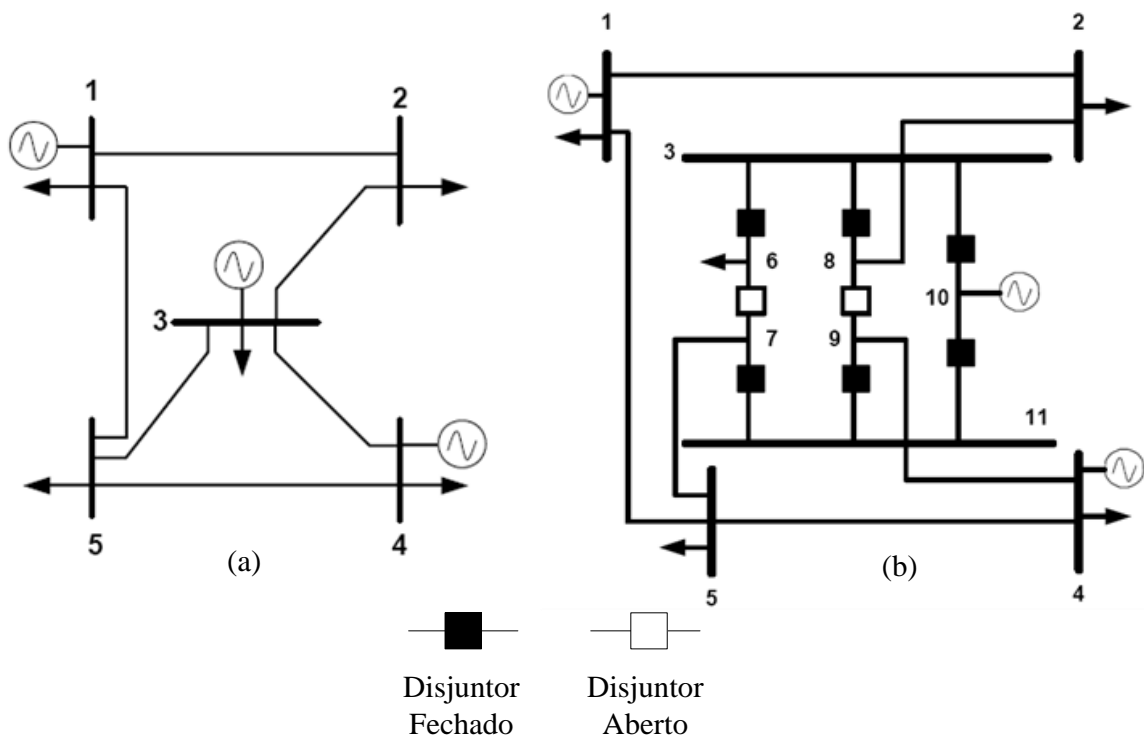


Figura 4.1 - Diagrama unifilar do sistema 5 barras: (a) modelagem barra-ramo (b) modelagem no nível de seção de barras

A modelagem no nível de seção de barras possui as mesmas características da modelagem convencional barra-ramo, porém, por representar os arranjos das subestações, ela viabiliza estudos que necessitam de informações referentes aos nós e aos ramos internos às subestações. Para estudos de curto-circuito, esta representação possibilita a obtenção direta das contribuições nas chaves seccionadoras e disjuntores internos às subestações. Assim, para a análise de faltas, são suficientes as informações dos ramos chaveáveis em operação, ou seja, fechados.

A representação convencional dos ramos chaveáveis para a formulação convencional de cálculo de curto-circuito, que consiste na aplicação da *análise nodal* (NA), gera problemas numéricos para a solução do problema, já que essas abordagens utilizam valores atípicos de impedância (valores significativamente baixos) para representar os disjuntores em operação.

Para contornar essa situação, propõe-se nesse trabalho adotar o método da *análise nodal modificado* (ANM), que é capaz de processar rede modeladas no nível de seção de barras, conforme descrito nas próximas seções.

4.3 MÉTODO DA ANÁLISE NODAL MODIFICADO PARA REDES MODELADAS NO NÍVEL DE SEÇÃO DE BARRAS

A simulação numérica do sistema elétrico está diretamente relacionada com a modelagem da rede. As equações que representam a configuração da rede têm de ser formuladas de uma maneira simples e abrangente, para que então o sistema de equações seja resolvido.

A análise nodal descreve a modelagem barra-ramo da rede elétrica de modo que o vetor das incógnitas $\dot{\mathbf{V}}$ contenha apenas as tensões de barra da rede \dot{V} . Generalizando, a NA admite a simulação numérica de redes com elementos representados por ramos convencionais (Figura 4.2).

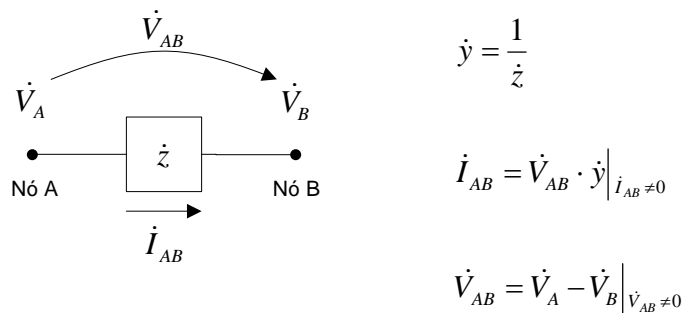


Figura 4.2 - Representação de ramos convencionais

Os ramos convencionais podem ser representados pela queda de tensão que a corrente passante produz. Elementos que possuem impedância atípica necessitam de um tratamento especial para contornar os problemas numéricos da representação explícita de suas impedâncias, que não podem ser descritos pela relação direta das correntes e quedas de tensão entre seus terminais.

A fim de completar o modelo de rede no nível de seção de barras, é necessário o conhecimento da topologia das subestações incorporando a representação dos disjuntores. Os disjuntores são considerados como ramos de impedância atípica, pois uma vez abertos possuem impedância infinita e fechados possuem impedância nula (Figura 4.3)

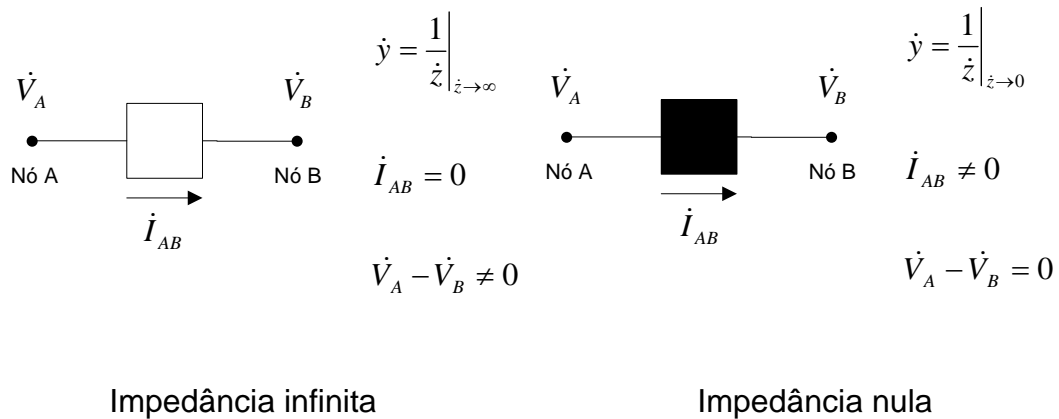


Figura 4.3 - Representação dos disjuntores

A formulação do método da *análise nodal modificado* (ANM) é uma extensão do método de NA que aplica a LKT em todas as barras da rede. Essa extensão inclui as correntes através dos disjuntores como novas variáveis do vetor de incógnitas, antes restrito as tensões de barra \dot{V} . Assim, as incógnitas da ANM são às tensões das barras da rede e as correntes através dos disjuntores, o que garante que as impedâncias atípicas dos dispositivos não apareçam na formulação do problema, já que as correntes através desses dispositivos passam ser escritas diretamente em função das novas variáveis.

Além da definição das correntes como novas variáveis, as equações lineares que representam o status dos dispositivos devem ser incluídas como equações de igualdade do problema, possibilitando, assim, a determinação de um conjunto solúvel de equações não redundantes. Sendo A e B duas barras de um determinado sistema entre as quais existe um disjuntor (Figura 4.3), a equação linear incluída no conjunto de equações de igualdade para o disjuntor fechado é:

$$\dot{V}_A - \dot{V}_B = 0 \quad (4.1)$$

e para o disjuntor aberto:

$$\dot{I}_{AB} = 0 \quad (4.2)$$

Exemplo Ilustrativo:

Considere o circuito ilustrado na Figura 4.4 que possui, além de ramos convencionais representados por suas respectivas admitâncias, um disjuntor fechado.

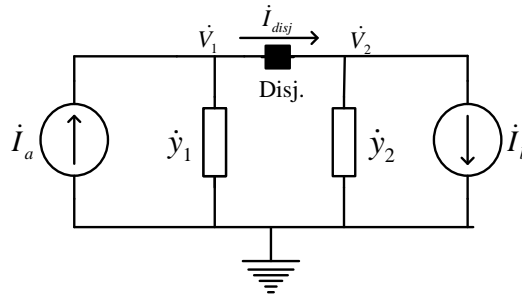


Figura 4.4 - Circuito elétrico com ramo de impedância nula

Para permitir que o dispositivo seja modelado explicitamente e, ao mesmo tempo evitar o uso de valores atípicos de admitância, a corrente através do disjuntor \dot{I}_{disj} é incluída como uma variável do problema. Assim, aplicando a Lei das Correntes aos nós 1 e 2, tem-se que:

$$\dot{V}_1 * \dot{y}_1 + \dot{I}_{disj} = \dot{I}_a \quad (4.3)$$

$$\dot{V}_2 * \dot{y}_2 - \dot{I}_{disj} = -\dot{I}_b \quad (4.4)$$

onde \dot{V}_1 , \dot{V}_2 e \dot{I}_{disj} são as incógnitas do sistema e \dot{y}_1 e \dot{y}_2 são as admitâncias dos ramos convencionais.

Além disso, a diferença de potencial nula entre os nós terminais do disjuntor é incluída como uma nova equação, ou seja:

$$\dot{V}_1 - \dot{V}_2 = 0 \quad (4.5)$$

O conjunto de equações lineares a ser resolvido é formado pelas Equações (4.3 a 4.5), onde se verifica a inclusão do fasor da corrente através do disjuntor, \dot{I}_{disj} , como nova variável do problema juntamente com as tensões complexas nodais \dot{V}_1 e \dot{V}_2 .

Este conjunto é representado na forma matricial por:

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_1 & 0 & 1 \\ 0 & \dot{y}_2 & -1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \dot{I}_{disj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ -\dot{I}_b \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

A Equação (4.6) podem ser reescritas como:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{Y}}_{barra} & \mathbf{T} \\ \mathbf{T}^T & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{V}} \\ \dot{\mathbf{i}}_{disj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{i}} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

onde \dot{I} é vetor das correntes injetadas, \dot{V} é vetor das tensões nas barras, \dot{I}_{disj} é o vetor da corrente através do disjuntor, T é matriz de incidência barras-disjuntores e \dot{Y}_{barra} é a matriz de admitâncias dos ramos convencionais.

A equação (4.7) é a formulação matricial da ANM utilizada para incluir ramos de impedância nula. Expandindo a equação (4.7) em termos genéricos para uma rede nb barras e $ndisj$ disjuntores fechados, o resultado é uma equação na forma:

$$\begin{bmatrix} \dot{Y}_{barra} & T \\ T^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V} \\ \dot{I}_{disj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I} \\ \mathbf{V0}_{disj} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

onde

\dot{I} : vetor de correntes injetadas de barra \dot{I} , de dimensão $(nb \times 1)$;

$\mathbf{V0}_{disj}$: vetor nulo que representa a diferença de potencial nula entre os nós dos disjuntores, de dimensão $(ndisj \times 1)$;

\dot{V} : vetor de tensão de barra \dot{V} , de dimensão $(nb \times 1)$;

\dot{I}_{disj} : vetor das correntes circulantes pelos disjuntores fechados, de dimensão $(ndisj \times 1)$,

T : matriz de incidência barras-disjuntores, de dimensão $(nb \times ndisj)$, que indica o sentido da corrente com relação às barras terminais dos disjuntores fechados;

$\mathbf{0}$: matriz nula, de dimensão $(ndisj \times ndisj)$;

\dot{Y}_{barra} : matriz de admitância de barra, com a representação das admitâncias convencionais, de dimensão $(nb \times nb)$.

As matrizes e os vetores da equação (4.8) podem ser re-definidos de forma compacta como:

$$\dot{Y}_{mod} \cdot \dot{V}_{mod} = \dot{I}_{mod} \quad (4.9)$$

onde

\dot{Y}_{mod} : matriz de admitâncias modificada, de dimensão $(nb+ndisj \times nb+ndisj)$, composta pela matriz admitância nodal \dot{Y}_{barra} , pela matriz de incidência T e pela matriz de zeros $\mathbf{0}$:

$$\dot{Y}_{mod} = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{barra} & T \\ T^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$\dot{\mathbf{I}}_{mod}$: vetor de dimensão $(nb+ndisj \times 1)$, formado pela justaposição do vetor das injeções de corrente nas barras $\dot{\mathbf{I}}$ e do vetor nulo que representa a diferença de potencial nula entre os nós do disjuntor fechado $\mathbf{V}\mathbf{0}_{disj}$:

$$\dot{\mathbf{I}}_{mod} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}} \\ \mathbf{V}\mathbf{0}_{disj} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

$\dot{\mathbf{V}}_{mod}$: vetor de dimensão $(nb+ndisj \times 1)$, formado pela justaposição do vetor das tensões nodais $\dot{\mathbf{V}}$ das correntes circulantes pelos disjuntores fechados $\dot{\mathbf{I}}_{disj}$:

$$\dot{\mathbf{V}}_{mod} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{V}} \\ \dot{\mathbf{I}}_{disj} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Isolando o vetor das incógnitas $\dot{\mathbf{V}}_{mod}$ da equação (4.9), a solução para o problema é:

$$\dot{\mathbf{V}}_{mod} = \dot{\mathbf{Z}}_{mod} \cdot \dot{\mathbf{I}}_{mod} \quad (4.13)$$

onde:

$\dot{\mathbf{Z}}_{mod}$: matriz de impedâncias modificada, de dimensão $(nb+ndisj \times nb+ndisj)$

Esta análise pode ser usada para os cálculos de curto-circuito através de disjuntores fechados internos as subestações, e será aplicada nas próximas seções.

4.4 CÁLCULO DE CURTO-CIRCUITO PELO MÉTODO DA MATRIZ $\dot{\mathbf{Z}}_{mod}$

A proposta do trabalho, para o cálculo de curto-circuito em redes modeladas no nível de seção de barras pelo método da matriz $\dot{\mathbf{Z}}_{mod}$, permite a extensão do método da matriz $\dot{\mathbf{Z}}_{barra}$ para a modelagem barra-ramo, que não calcula as grandezas internas às subestações. Com base na fundamentação teórica do Capítulo 3 e dos conceitos definidos para a inclusão dos disjuntores na modelagem da rede pela ANM, pode ser desenvolvido o cálculo de curto-circuito em redes modeladas no nível de seção de barras pelo método da matriz $\dot{\mathbf{Z}}_{mod}$.

A sub-seção 3.5 do trabalho demonstra conceitos necessários para o cálculo de curto-circuito trifásico e fase-terra convencional (modelagem barra-ramo), facilitando a identificação das alterações necessárias para compor a formulação dos cálculos através da modelagem no nível de seção de barras.

As técnicas para a extração das informações contidas nas matrizes $\dot{\mathbf{Z}}_{\text{mod}}$ e $\dot{\mathbf{Y}}_{\text{mod}}$ para o cálculo matricial de curto-circuito trifásico e fase terra são apresentadas na sequência.

4.4.1 Cálculo de curto-circuito trifásico estendido

Para o cálculo de curto-circuito trifásico somente a sequência positiva é analisada. Então, é necessário determinar a matriz admitância e impedância apenas da sequência positiva ($\dot{\mathbf{Y}}_{\text{mod}}^{(1)}$ e $\dot{\mathbf{Z}}_{\text{mod}}^{(1)}$).

A corrente de sequência positiva para fase A e as correntes totais nas fases que aparecem no sistema elétrico durante o curto-circuito trifásico na barra k são calculadas através das equações

$$i_{\text{mod } Ak}^{f(1)} = \frac{\dot{V}_{\text{mod } Ak}^{pf}}{\dot{Z}_{\text{mod } kk}^{(1)}} \quad (4.14)$$

$$\begin{bmatrix} i_{Ak}^f \\ i_{Bk}^f \\ i_{Ck}^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ i_{\text{mod } Ak}^{f(1)} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Assumindo que todas as tensões pré-falta são iguais à tensão pré-falta na barra de falta, sendo $n = 1, \dots, nb$, as tensões de sequência positiva nas nb barras do sistema elétrico durante o curto-circuito fase-terra são calculadas através das equações:

$$\dot{V}_{\text{mod } An}^{f(1)} = \dot{V}_{\text{mod } An}^{pf} - \dot{Z}_{\text{mod } nk}^{(1)} \cdot i_{\text{mod } Ak}^{f(1)} \quad (4.16)$$

As tensões de falta total nas barras são:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{An}^f \\ \dot{V}_{Bn}^f \\ \dot{V}_{Cn}^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{V}_{\text{mod } An}^{f(1)} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Sendo $n = 1, \dots, ndisj$, a corrente de contribuição de sequência positiva ($i_{\text{disjA } w}^{f(1)}$) no disjuntor w é:

$$\dot{i}_{disjA_w}^{f(1)} = \dot{V}_{mod An}^{pf} - \dot{Z}_{mod nk}^{(1)} \cdot \dot{i}_{mod Ak}^{f(1)} \quad (4.18)$$

onde $n = (nb + 1), \dots, (nb + ndisj)$.

As correntes de contribuição nos disjuntores para as fases são:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{disjA_w}^f \\ \dot{i}_{disjB_w}^f \\ \dot{i}_{disjC_w}^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{i}_{disjA_w}^{f(1)} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

4.4.2 Cálculo de curto-circuito fase-terra estendido

Para aplicar a metodologia proposta no trabalho, as matrizes de admitância modificadas $\dot{Y}_{mod}^{(1)}$, $\dot{Y}_{mod}^{(2)}$ e $\dot{Y}_{mod}^{(0)}$, e as correspondentes matrizes de impedância $\dot{Z}_{mod}^{(1)}$, $\dot{Z}_{mod}^{(2)}$ e $\dot{Z}_{mod}^{(0)}$ devem ser determinadas.

As correntes de sequência e as correntes totais nas fases que aparecem no sistema elétrico durante o curto-circuito fase A terra na barra k são calculadas através das equações abaixo:

$$\dot{i}_{mod Ak}^{f(1)} = \dot{i}_{mod Ak}^{f(2)} = \dot{i}_{mod Ak}^{f(0)} = \frac{\dot{V}_{mod Ak}^{pf}}{\dot{Z}_{mod kk}^{(1)} + \dot{Z}_{mod kk}^{(2)} + \dot{Z}_{mod kk}^{(0)}} \quad (3.40)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{Ak}^f \\ \dot{i}_{Bk}^f \\ \dot{i}_{Ck}^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \dot{i}_{mod Ak}^{(0)} \\ \dot{i}_{mod Ak}^{(1)} \\ \dot{i}_{mod Ak}^{(2)} \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

Assumindo que todas as tensões pré-falta são iguais à tensão pré-falta na barra de falta, sendo $n = 1, \dots, nb$, as tensões de sequência nas nb barras do sistema elétrico durante o curto-circuito fase-terra são calculadas através das equações:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{mod An}^{f(1)} &= \dot{V}_{mod An}^{pf} - \dot{Z}_{mod nk}^{(1)} \cdot \dot{i}_{mod Ak}^{f(1)} \\ \dot{V}_{mod An}^{f(2)} &= -\dot{Z}_{mod nk}^{(2)} \cdot \dot{i}_{mod Ak}^{f(2)} \\ \dot{V}_{mod An}^{f(0)} &= -\dot{Z}_{mod nk}^{(0)} \cdot \dot{i}_{mod Ak}^{f(0)} \end{aligned} \quad (3.42)$$

As tensões de falta total nas barras são:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{An}^f \\ \dot{V}_{Bn}^f \\ \dot{V}_{Cn}^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \dot{V}_{mod An}^{f(0)} \\ \dot{V}_{mod An}^{f(1)} \\ \dot{V}_{mod An}^{f(2)} \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

Sendo $n = 1, \dots, ndisj$, as correntes de contribuição de sequências positiva, negativa e zero ($\dot{I}_{disjA_w}^{f(1)}$, $\dot{I}_{disjA_w}^{f(2)}$ e $\dot{I}_{disjA_w}^{f(0)}$) no disjuntor w são:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{disjA_w}^{f(1)} &= \dot{V}_{mod An}^{pf} - \dot{Z}_{mod nk}^{(1)} \cdot \dot{I}_{mod Ak}^{f(1)} \\ \dot{I}_{disjA_w}^{f(2)} &= -\dot{Z}_{mod nk}^{(2)} \cdot \dot{I}_{mod Ak}^{f(2)} \\ \dot{I}_{disjA_w}^{f(0)} &= -\dot{Z}_{mod nk}^{(0)} \cdot \dot{I}_{mod Ak}^{f(0)} \end{aligned} \quad (3.44)$$

onde $n = (nb + 1), \dots, (nb + ndisj)$.

As correntes totais de contribuição nos disjuntores para as fases são:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{disjA_w}^f \\ \dot{I}_{disjB_w}^f \\ \dot{I}_{disjC_w}^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \dot{I}_{disjAw}^{f(0)} \\ \dot{I}_{disjAw}^{f(1)} \\ \dot{I}_{disjAw}^{f(2)} \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Este capítulo teve por objetivo apresentar a formulação estendida para cálculo de faltas trifásicas e fase-terra em uma rede elétrica cujas subestações possuam seus disjuntores representados explicitamente, de modo a obter diretamente os valores das faltas que circulam pelos mesmos.

A seguir, será apresentado a formulação matemática do problema de otimização que tem por objetivo a alocação de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito, a qual utiliza a representação no nível de seção de barras, descrita neste capítulo.

5 METODOLOGIA PARA ALOCAÇÃO DE LIMITADORES DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

5.1 CONCEITOS PRELIMINARES

O emprego de dispositivos limitadores de curto-circuito (DLCCs) no sistema de transmissão é uma maneira eficaz de moderar as correntes de falta e pode resultar em uma considerável economia quando comparado com os investimentos para readequação de disjuntores superados. Contudo, as complexidades do sistema de transmissão e a variedade de limitadores disponíveis no mercado somadas à suas características técnicas e operacionais exigem análises combinatórias complexas para a escolha de uma solução viável (tanto econômica quanto técnica) do problema de superação por corrente de curto-circuito, principalmente quando mais de uma subestação encontra-se com disjuntores superados.

Este capítulo propõe um algoritmo computacional que simplifica a solução do problema de superação por corrente de curto-circuito dos disjuntores nas subestações do sistema de transmissão através da busca de objetivos combinados. Baseando-se nos conceitos da evolução genética, o algoritmo utiliza a técnica dos algoritmos genéticos multiobjetivos (AGMs) para determinar um conjunto de soluções com os parâmetros dos DLCCs e os melhores locais para alocação.

As soluções limitam as correntes de falta a valores suportáveis pelos disjuntores superados, e justificam a alocação considerando restrições quanto aos níveis das correntes de curto-circuito através dos disjuntores, ao número e custo de investimento dos limitadores instalados.

Para a avaliação das soluções, o algoritmo é combinado com o método de cálculo de curto-circuito no nível de seção de barras, descrito no Capítulo 4, que calcula a corrente de curto-circuito passante pelo disjuntor superado, limitando a análise apenas dos disjuntores superados.

5.2 ESTRUTURA DA METODOLOGIA

A Figura 5.1 apresenta a estrutura geral da metodologia desenvolvida.

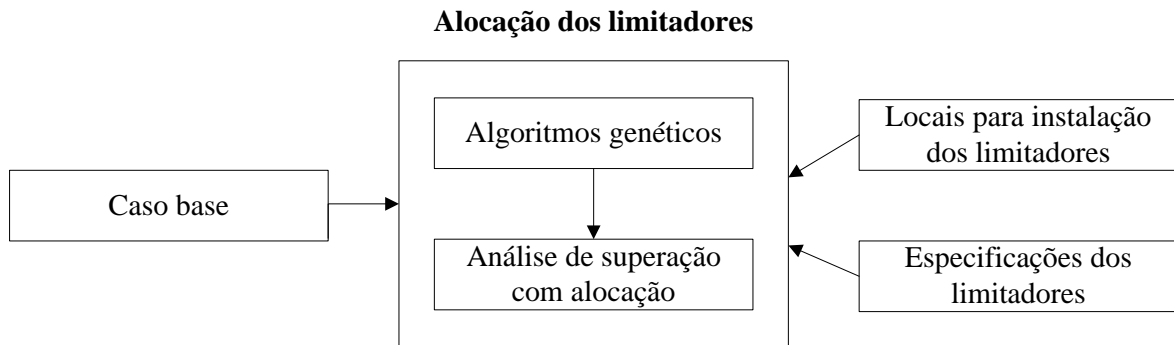


Figura 5.1 – Estrutura geral da metodologia

Para a *alocação de limitadores* em um dado sistema são necessários os dados do caso base, os locais possíveis para a instalação dos limitadores, assim como as especificações dos limitadores.

De posse desses dados, inicia-se o processo para solucionar o problema que conta com a utilização dos AGMs em conjunto com um programa para *análise de superação com alocação*. Os AGMs criam possíveis soluções, com o local de instalação e valor dos limitadores. A *análise detalhada com alocação* simula o curto-circuito pelo método da matriz \dot{Z}_{mod} em todas as barras do sistema e analisa as correntes de falta passantes pelos disjuntores e injetadas nos restantes das subestações modeladas como barras (subestações-barra).

A seguir são apresentadas as premissas utilizadas na metodologia.

5.3 PREMISSAS

Ao iniciar a metodologia faz-se necessário definir as premissas básicas relativas ao caso base, aos critérios para análise de superação e aos limitadores.

5.3.1 Caso base

O estudo tem início com a *análise preliminar* do sistema indicando as barras com problema de superação. Com o conhecimento da máxima capacidade de interrupção das subestações, a análise é realizada na modelagem barra-ramo da rede seguindo os critérios do fluxograma apresentado na Figura 2.1.

Na *análise preliminar* a capacidade máxima de interrupção das subestações é igual a capacidade nominal do disjuntor com menor capacidade de interrupção. A relação X/R de cada subestação é o equivalente de Thevénin.

Da topologia da subestação e da capacidade nominal dos disjuntores internos à subestação indicada, os agentes responsáveis efetuam a *análise detalhada* na modelagem no nível de seção das barras indicadas. Calculado os níveis de curto-circuito passantes pelos disjuntores e a relação X/R de seus terminais, a detecção da superação dos disjuntores segue os critérios explorados na a seguir.

Para o sistema original n barras nl linhas, modelado no nível de seção de barras com nb barras nl linhas e $ndisj$ disjuntores, as informações do caso base que servem de referência durante o processo de alocação são:

a. Dados das subestações-barras:

nsb : número de subestações modeladas como barras no sistema;

Icn_{SB} : vetor com as capacidades de interrupção das subestações-barra, de dimensão $(1 \times nsb)$;

$Icc3\emptyset_{SB}$: vetor com as injeções de corrente de curto-circuito simétrica trifásica nas subestações-barra, de dimensão $(1 \times nsb)$;

$Icc\emptyset T_{SB}$: vetor com as injeções de corrente de curto-circuito simétrica fase-terra nas subestações-barra, de dimensão $(1 \times nsb)$;

$X/R\ 3\emptyset_{SB}$: vetor com as constantes de tempo trifásicas das subestações-barra, de dimensão $(1 \times nsb)$;

$X/R\ \emptyset T_{SB}$: vetor com as constantes de tempo fase-terra das subestações-barra, de dimensão $(1 \times nsb)$.

b. Dados das subestações modeladas no nível de seção de barras:

nsm : número de subestações modeladas;

nsn : número de barras internas as subestações modeladas;

$ndisj$: número de disjuntores fechados;

Icn_{disj} : vetor com as capacidades nominais de interrupção dos disjuntores, de dimensão $(1 \times ndisj)$;

$Icom3\emptyset_{disj}$: vetor com as contribuições das correntes de curto-circuito simétricas trifásicas calculadas para todas as barras internas, de dimensão $(1 \times ndisj \cdot nsn)$;

$Icom\emptyset T_{disj}$: vetor com as contribuições das correntes de curto-circuito simétricas fase-terra calculadas para todas as barras internas, de dimensão $(1 \times ndisj \cdot nsn)$;

$X/R\ 3\emptyset_{disj}$: vetor com as constantes de tempo trifásicas dos disjuntores fechados, de dimensão $(1 \times ndisj)$;

$X/R\ \emptyset T_{disj}$: vetor com as constantes de tempo fase-terra dos disjuntores fechados, de dimensão $(1 \times ndisj)$.

5.3.2 Análises de superação

Para a análise de superação consideram-se as situações mais conservadoras na simulação de curto-circuito:

- curto-circuito sólido trifásico e fase-terra nas barras da modelagem barra-ramo do sistema e nos nós internos das subestações modeladas para a rede modelada no nível de seção de barras;
- a rede operando com todos os seus componentes, sem carregamento pré-falta e as tensões de todas as barras e nós internos das subestações (seções de barras) iguais a $j*1$ pu.

Os estudos de curto-circuito relacionados à análise de superação dos disjuntores calculam os níveis da corrente de curto-circuito simétrica e da relação X/R , para o curto-circuito sólido trifásico e fase-terra em todos os disjuntores modelados.

Para saber se a corrente de curto-circuito que passa pelos disjuntores supera ou não a capacidade nominal do mesmo, a rede é modelada no nível de seção de barras da subestação superada. Assim são computadas as relações X/R

dos terminais dos disjuntores e as correntes de contribuição passantes quando aplicado o curto-circuito na rede e nas barras internas às subestações.

Com o conhecimento da máxima capacidade de interrupção das subestações e dos disjuntores, a análise é realizada para os seguintes critérios:

- capacidade de interrupção simétrica;
- assimetria na capacidade de interrupção.

5.3.2.1 Capacidade de interrupção simétrica

A superação por simetria é determinada pela porcentagem da capacidade nominal (% da capacidade nominal) que é dada pela relação entre a corrente de curto simétrica calculada (I_{cc_i}) através do disjuntor e capacidade de interrupção nominal do disjuntor (I_{cn_i}), conforme a equação 5.1.

$$\% \text{ da capacidade nominal} = \frac{I_{cc_i}}{I_{cn_i}} \quad (5.1)$$

Se a porcentagem da capacidade nominal for igual ou superior a 0.9, o disjuntor é considerado superado. Caso contrário, se a relação for inferior a 0.9 o disjuntor não é considerado superado.

5.3.2.2 Assimetria na capacidade de interrupção

A superação por assimetria é determinada pela relação X/R equivalente entre os terminais do disjuntor e pela amplitude da corrente de curto-circuito simétrica passante. A detecção da superação por assimetria ocorre de acordo com a Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Critérios de superação por assimetria adotados para os disjuntores

CRITÉRIO	ASSIMETRIA	SIMETRIA
1	$X_i/R_i < 16.96$	$I_{cc_i} > 0.90 \cdot I_{cn_i}$
2	$16.96 < X_i/R_i < 22.62$	$I_{cc_i} > 0.85 \cdot I_{cn_i}$
3	$22.62 < X_i/R_i < 28.28$	$I_{cc_i} > 0.80 \cdot I_{cn_i}$
4	$28.28 < X_i/R_i$	$I_{cc_i} > 0.70 \cdot I_{cn_i}$
5	$X_i/R_i > 45.24$	

onde:

X_i/R_i : constante de tempo nos terminais do disjuntor i ;

I_{cc_i} : contribuição da corrente de curto-circuito simétrica através do disjuntor i ;

I_{cn_i} : corrente de curto-circuito simétrica nominal do disjuntor i .

5.3.3 Limitadores de corrente de curto-circuito

O limitador escolhido é o RLC por ser um DLCC utilizado com frequência no sistema elétrico.

Para minimizar o campo de busca e melhorar a otimização do problema, a definição dos locais candidatos para a instalação dos RLCs utiliza a técnica de sensibilidade apresentada por TENG e JEN (2006) que ordena os circuitos série mais sensíveis para a minimização das correntes de curto-circuito nas subestações superadas.

A análise de sensibilidade utilizada na dissertação determina como locais candidatos à alocação dos limitadores os circuitos mais sensíveis á minimização das correntes de curto-circuito nos disjuntores superados.

A relação de sensibilidade ΔI_{cc}^p das correntes de falta através dos disjuntores superados ($ndisj_sup$) antes e depois da alocação de uma reatância igual a 1 pu em todos os l locais do sistema é calculada pelas equações abaixo:

$$\Delta I_{cc}^p = [\Delta I_{c_i}^p \quad \Delta I_{c_{(i+1)}}^p \quad \dots \quad \Delta I_{c_{(ndisj_sup-1)}}^p \quad \Delta I_{c_{(ndisj_sup)}}^p]^T \quad (5.2)$$

sendo que

$$\begin{aligned} \Delta I_{c_i}^p &= I_{cc_i} - I_{cc_i}^p \\ p &= 1, \dots, l \end{aligned} \quad (5.3)$$

onde:

ΔI_{cc}^p : vetor relação de sensibilidade das correntes de curto passantes pelos disjuntores superados quando alocado uma impedância no local p , de dimensão $(1 \times ndisj_sup)$;

$\Delta I_{cc_i}^p$: variação da corrente de curto-circuito no disjuntor i quando alocado uma reatância no local p ;

I_{cc_i} : corrente de curto-circuito passante pelo disjuntor i antes da alocação;

$I_{cc_i}^p$: corrente de curto-circuito passante pelo disjuntor i quando alocado o DLCC no local p .

Para cada local p de todos os l locais disponíveis no sistema para a alocação dos RLCs é calculado a variação do nível de curto-circuito através dos $ndisj_sup$ disjuntores superados.

A equação (5.4) classifica em ordem crescente os locais mais significativos ($nlocais$) para variação da corrente de curto através de cada disjuntor i superado:

$$S_i = [s_i(1) \quad \dots \quad s_i(nAS - 1) \quad s_i(nAS)]^T \quad (5.4)$$

onde:

S_i : vetor em ordem crescente de sensibilidade dos locais mais influentes na redução do nível de curto-circuito passante pelo disjuntor i , de dimensão $(nlocais \times 1)$;

nAS : número de limitadores linhas candidatas à alocação de RLCs;

$s_i(1)$: local mais sensível para a redução da corrente de curto-circuito no disjuntor i ;

$s_i(l)$: local menos sensível para a redução da corrente de curto-circuito no disjuntor i .

Para cada disjuntor i superado são classificados os m locais mais influentes na redução da corrente de curto-circuito. Os locais candidatos para a instalação dos limitadores são então organizados em um novo vetor $locais_{candidatos}$, concatenando todos os m locais mais sensíveis a minimização da corrente de curto, classificados nos $ndisj_sup$ vetores S_i .

5.4 ALGORITMO PARA SIMULAÇÃO DA METODOLOGIA

A Figura 5.2 apresenta um fluxograma geral da metodologia para a alocação dos RLCs, que tem como objetivo solucionar o caso de superação das capacidades nominais de curto-circuito dos disjuntores. O algoritmo busca uma solução indicando a melhor localização para instalação e o dimensionamento do limitador.

Inicialmente é necessário definir as condições para o estudo do caso. Após o carregamento dos dados, faz-se a análise preliminar do sistema para indicar as subestações com possibilidade de disjuntores superados. Então, carregam-se os dados para modelagem no nível de seção das subestações indicadas como superadas na análise anterior e executa-se a análise detalhada do sistema, verificando o estado atual dos disjuntores internos destas subestações que servirão como caso base para solução.

O próximo passo é escolher a localização dos circuitos série candidatos a solução do problema. Concluídas essas etapas, tem-se o início do processo iterativo para alocação dos limitadores ($N=1$).

O processo iterativo é iniciado com a criação da população inicial. Em seguida, a população é decodificada fornecendo uma solução com a localização e o dimensionamento dos limitadores, que é analisada em uma memória previamente disponível.

Caso a solução tenha sido testada anteriormente, recupera-se a população e o valor da função objetivo (FO) armazenada na memória. Caso contrário, atualizam-se os dados do sistema com a inserção dos parâmetros decodificados e a execução de uma nova análise detalhada de superação com a alocação dos limitadores. Com os resultados da análise detalhada, calcula-se a FO e salva a população decodificada com seu valor da FO .

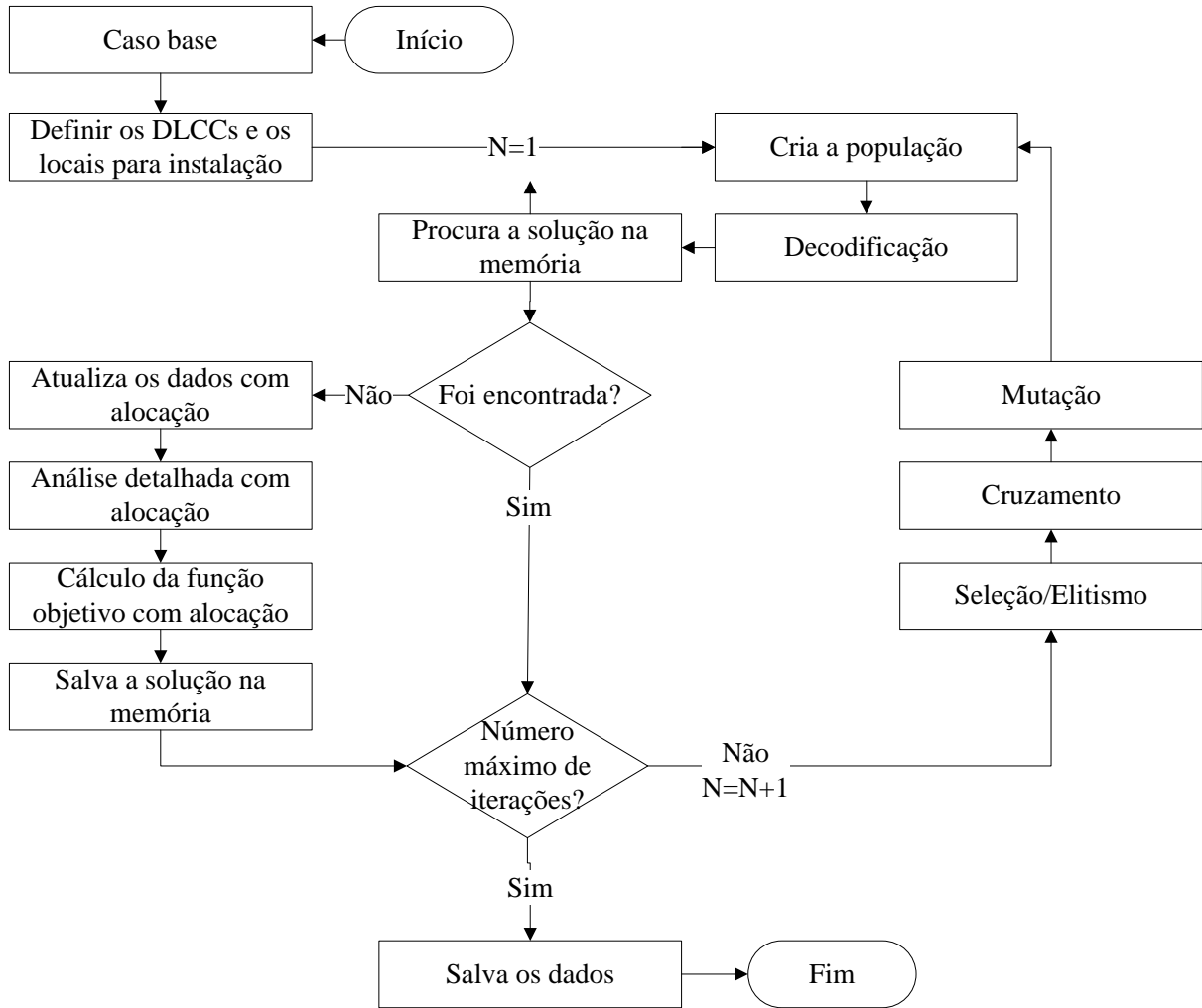


Figura 5.2 - Fluxograma da metodologia para alocação

Logo após, verifica-se se algum critério de convergência foi atingido para a solução analisada. Caso a solução não tenha convergido, chamam-se os AGMs, que através dos operadores genéticos de seleção e elitismo, cruzamento e mutação, criam uma nova geração de população para ser avaliada. Por outro lado, em caso de convergência, os resultados com a melhor solução são salvos e apresentados.

A seguir serão apresentados os detalhamentos para a simulação apresentada.

5.5 FUNÇÃO OBJETIVO

O problema da alocação dos limitadores busca a localização e o dimensionamento dos equipamentos a serem instalados para eliminar o problema de superação e minimizar os níveis de corrente de curto-circuito passante pelos disjuntores superados. Além disso, devido ao alto custo e ao impacto dos limitadores na rede, deve-se minimizar o número de DLCCs instalados e considerar o custo mínimo de compra desses equipamentos.

A função objetivo (FO) indica dentre as soluções encontradas qual é a melhor que solucione a superação dos disjuntores, apresentando o menor número de DLCCs instalados, com menores custos, reduzindo os níveis correntes de curtos-circuitos nas subestações do sistema. Cada solução encontrada recebe um valor atribuído pela FO . Se a solução encontrada não eliminar todas as superações dos disjuntores, está será descartada. Caso a solução elimine as superações serão admitidas as soluções que reduziram significativamente os níveis de curto-circuito do sistema em geral com custo e número de DLCCs alocados mínimos.

A FO a ser minimizada durante o processo de alocação e dimensionamento dos limitadores contempla os critérios apresentados na equação 5.5:

$$FO = [f_1, f_2, f_3, f_4] \quad (5.5)$$

onde:

FO : função objetivo a ser minimizada;

f_1 : violação do critério de suportabilidade;

f_2 : custo da instalação do DLCC;

f_3 : número de DLCCs instalados;

f_4 : variação dos níveis de curto-circuito no sistema;

Cada solução fornecida pelo AGM recebe um valor atribuído pela FO . Se a solução encontrada não eliminar todas as superações dos disjuntores (f_1), está será descartada. Caso a solução elimine as superações serão admitidas as soluções que reduziram significativamente os níveis de curto-circuito nos disjuntores (f_4) com custo (f_2) e número (f_3) de RLCs mínimos.

A seguir é feita a descrição de cada função que compõe a FO .

5.5.1 Violação do critério de suportabilidade

A função f_1 da FO coloca em desvantagem a permanência da solução candidata que possui superação no processo da busca de otimização, ou seja, caso a solução analisada não resolva o problema da superação dos disjuntores, as chances de o indivíduo ser descartado no processo de evolução dos AGMs aumenta.

Sendo assim, a função f_1 de uma solução candidata é definida pela soma de fatores de penalidade (k_{sup_i}) atribuídos para cada disjuntor i (equação 5.6).

$$f_1 = \sum_{i=1}^{ndisj} k_{sup_i} \quad (5.6)$$

onde:

$ndisj$: número de disjuntores modelados.

Como o problema busca a solução da superação dos disjuntores, considera-se uma penalidade alta para os indivíduos que não solucionam o problema e uma penalidade nula para os indivíduos que solucionam o problema.

Os valores de k_{sup_i} são estipulados para todos os disjuntores modelados de acordo com a Tabela 5.2. (FERREIRA, 2006)

Tabela 5.2 – Valor de k_{sup_i} para FO caso a solução não solucione o problema de superação

CRITÉRIO	ASSIMETRIA	SIMETRIA	k_{sup_i}
1	$X_i/R_i < 16,96$	$Icc_i > 90\% \cdot Icn_i$	10^3
2	$16,96 \leq X_i/R_i < 22,62$	$Icc_i > 85\% \cdot Icn_i$	10^3
3	$22,62 \leq X_i/R_i < 28,28$	$Icc_i > 80\% \cdot Icn_i$	10^3
4	$28,28 \leq X_i/R_i$	$Icc_i > 70\% \cdot Icn_i$	10^3
5	$X_i/R_i \geq 45,24$		10^3
6		$Icc_i > 90\% \cdot Icn_i$	10^3

onde:

X_i/R_i : constante de tempo nos terminais do disjuntor i ;

Icc_i : contribuição da corrente de curto-circuito simétrica através do disjuntor i ;

Icn_i : corrente de curto-circuito simétrica nominal do disjuntor i .

Se nenhum critério da tabela for alcançado para o disjuntor i analisado, é atribuído a ele um fator de penalidade nulo: $k_{sup_i} = 0$.

5.5.2 Custo da instalação dos DLCCs;

A parcela f_2 da FO propõe que a solução para o problema tenha o menor custo associado a compra dos limitadores. A função custo é definida pela equação 5.7:

$$f_2 = \sum_{f=1}^{nDLC} CS(f) \quad (5.7)$$

onde:

$CS(f)$: custo de compra do DLCC para a solução f candidata.

Os custos dos RLCs são obtidos pelos fabricantes e variam, dentre outras características, de acordo com as características nominais de tensão de operação e dimensionamento (Ω).

5.5.3 Número de DLCCs instalados

A função f_3 da FO minimiza o número de DLCCs alocados. A f_3 é definida por:

$$f_3 = ndlc \quad (5.8)$$

onde:

$ndlc$: número de limitadores oferecidos pela solução.

5.5.4 Variação dos níveis de curto-circuito no sistema

A solução para o problema deve também interferir na redução do nível de curto-circuito. Quanto maior a redução do nível de curto-circuito nos disjuntores, melhor será esta solução perante as demais. A função f_4 é então definida como:

$$f_4 = \sum_{i=1}^{ndisj} (I3\emptyset_i + I\emptyset T_i) \quad (5.9)$$

onde:

$I3\emptyset_i$: contribuição da corrente de curto-circuito simétrica trifásica através do disjuntor i ;

$I\emptyset T_i$: contribuição da corrente de curto-circuito simétrica fase-terra através do disjuntor i .

5.6 FUNÇÃO MULTIOBJETIVO

A função objetivo FO , utilizada para solucionar o problema de superação dos disjuntores, considera a minimização de múltiplos objetivos com diferentes grandezas.

A otimalidade das funções multiobjetivos são caracterizadas pela existência de um subconjunto de soluções “ótimas”, conhecidas por soluções não-dominadas ou Pareto-relevantes. Nesse conjunto de soluções não-dominadas da função multiobjetivo, nenhuma solução é melhor do que outra, já que a melhoria de uma variável em uma função degrada pelo menos uma das outras variáveis.

O conceito do conjunto de soluções Pareto-relevantes é utilizado pelo AGM para limitar as soluções candidatas processo de otimização de funções multiobjetivos.

Para a avaliação das soluções Pareto-relevantes obtidas pelo AGM, a função multiobjetivo é modelada como um único objetivo pelo Método do Critério Global (MCG). Como as grandezas das funções são diferentes, os objetivos são normalizados a uma faixa limitada pelos valores máximos e mínimos de cada objetivo (WESTPHAL, 2006). Assim, a função de avaliação objetivo FO é formulada conforme a equação 5.10:

$$\min \left[f_1 + w_2 \cdot \frac{f_2 - f_2^{\min}}{f_2^{\max} - f_2^{\min}} + w_3 \cdot \frac{f_3 - f_3^{\min}}{f_3^{\max} - f_3^{\min}} + w_4 \cdot \frac{f_4 - f_4^{\min}}{f_4^{\max} - f_4^{\min}} \right] \quad (5.10)$$

onde:

f_1 : violação do critério de suportabilidade;

f_2 : custo da instalação do DLCC;

- f_3 : número de DLCCs instalados;
 f_4 : variação dos níveis de curto-circuito no sistema;
 w_2 : índice de ponderação da função f_2 ;
 w_3 : índice de ponderação da função f_3 ;
 w_4 : índice de ponderação da função f_4 ;
 f_2^{min} : valor mínimo para o custo da instalação do DLCC;
 f_3^{min} : valor mínimo para o número de DLCCs instalados;
 f_4^{min} : valor mínimo para a variação dos níveis de curto-circuito no sistema;
 $f_2^{máx}$: maior custo de compra de DLCCs;
 $f_3^{máx}$: maior número de DLCCs instalados.
 $f_4^{máx}$: maior variação dos níveis de curto-circuito.

São considerados como valores máximos e mínimos das funções objetivos os valores limites das soluções de Pareto disponibilizadas pelo AGM.

5.7 CODIFICAÇÃO DO INDIVÍDUO

A codificação dos indivíduos é uma das chaves para o sucesso na busca da solução ótima, ou aproximadamente ótima, pelos AGMs. Um indivíduo mal codificado exige dos AGMs um número maior de gerações para obter uma boa solução.

O número de indivíduos para cada população é igual ao número máximo de limitadores indicado no início do programa ($nDLC$). Os indivíduos da população são as possibilidades de alocação do DLCC. Para cada DLCC criam-se $(1 + nbits_local + 3)bits$ no cromossomo conforme a Figura 5.3.

Codificação do indivíduo		
Aloca RLC?	Posição do vetor de locais candidatos	Reatância do RLC
<i>1 bit</i>	<i>nbits_local</i>	<i>3 bits</i>

Figura 5.3 – Codificação geral de um indivíduo

Os indivíduos são codificados em sequência binária e a codificação geral para cada DLCC alocado é dividida em três partes. A primeira que informa se é instalado ou não o DLCC. A segunda parte informa o local para alocação, e a terceira parte é destinada ao valor da impedância do limitador.

O primeiro gene do indivíduo é formado por um único bit. Sua codificação é simples: se o bit for 0, nenhum limitador é alocado e não é necessário decodificar as outras partes do indivíduo, pulando então para o próximo da população. Se o bit for 1, é considerado um limitador e portanto, é necessário a decodificação dos outros genes do indivíduo que informam o local e a reatância do limitador.

O segundo gene do indivíduo, que informa a posição do DLCC, é formado por uma sequência binária de $nbits_locais$ que, convertido para decimal mais uma unidade, aponta uma posição no vetor dos $locais_{candidatos}$ que possui os $nlocais$ candidatos a alocação. O número de $bits$ para o segundo gene, ou seja, para a representação da posição dos locais candidatos, é obtido conforme a equação 5.11.

$$nlocais = 2^{nbits_local} - 1 \quad (5.11)$$

onde

$nlocais$: número de locais possíveis para instalação dos DLCCs;

$nbits_local$: número de $bits$ para representação do gene com a informação dos locais.

O terceiro gene que determina as o local reatâncias dos DLCCs, é formado por uma sequência binária, $nbits_reatância$, que convertido para decimal mais uma unidade, aponta uma posição no vetor dos $reatâncias$ do DLCC analisado. A definição do número de $bits$ para o terceiro é obtida pela equação a seguir.

$$nreatância = 2^{nbits_reatância} - 1 \quad (5.12)$$

onde

$nreatância$: número das reatâncias disponibilizadas pelo DLCC;

$nbits_reatância$: número de bits para representação do gene com a informação dos locais.

Se o segundo ou o terceiro gene apresentar uma sequência binária que decodificada não imprime uma posição no vetor $locais_{candidatos}$ ou uma reatância no vetor $reatâncias$, o indivíduo é descartado, seguindo para o próximo indivíduo.

Ressalta-se que para um número máximo de DLCCs, $nDLC$, o cromossomo gerado em cada interação com a solução do problema tem $(nDLC \cdot (1 \text{ bit} + nbits_local + nbits_reatância)) \text{ bits}$.

No algoritmo foram criadas rotinas para excluir alocações repetidas em um mesmo local no cromossomo analisado.

5.8 MEMÓRIA

A memória tem como finalidade acelerar o processo de convergência dos AGMs. A memória analisa se a solução dada pelo cromossomo decodificado já foi analisada. Caso a solução já tenha sido analisada, exclui-se e parte-se para o próximo cromossomo, caso contrário memoriza-se a solução com os valores da FO multiobjetivo calculada. A rotina de memorização evita a repetição dos cálculos, que resultaria em um esforço computacional redundante. Além disso, o operador genético de elitismo abona melhores indivíduos para as próximas gerações, mantendo a população suficientemente diversificada para que o conjunto de ótimos adotados não seja local. (SZUVOVIVSKI, 2008)

5.9 PARÂMETROS DOS AG

As opções para os parâmetros usados para os operadores genéticos na metodologia desenvolvida são mostrados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Parâmetros dos AGs

CARACTERÍSTICA	PARÂMETRO	CONFIGURADO
Indivíduo	Codificação	Binária
	Número de <i>bits</i>	$1 + nbits_local + nbits_reatância$
População	Tamanho	100 indivíduos
	Inicial	Aleatória
Seleção	Elitismo	2 indivíduos
	Método	Roleta
Cruzamento	Tipo	Disperso
	Taxa	80%
Mutação	Tipo	Uniforme
	Taxa	10%
Parada	Critério	300 gerações

5.10 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Esse capítulo teve como objetivo apresentar a formulação matemática do problema de alocação dos limitadores em sistemas de transmissão.

O limitador escolhido foi o RLC devido as características consolidadas, mas o algoritmo permite ser alterado para considerar outras tecnologias.

Diferentemente das outras formulações que avaliam as subestações com disjuntores superados simulando o curto-circuito na modelagem barra-ramo da rede, essa metodologia possibilita a análise detalhada dos disjuntores internos às subestações pela modelagem no nível de seção da barra da subestação. A utilização do cálculo de curto-circuito pelo método da matriz \dot{Z}_{mod} possibilita rapidez e agilidade para os agentes responsáveis das subestações caracterizadas como superadas, pois além de avaliar a superação dos disjuntores por corrente de curto-circuito simétrica e assimétrica, os resultados do cálculo de curto-circuito possibilitam avaliar todos os equipamentos internos às subestações, tanto para a análise de superação quanto para a avaliação dos ajustes de proteção.

Outro diferencial está no tempo para solucionar o problema através de uma memória com as soluções já avaliadas e com a técnica da análise de sensibilidade das barras afetadas pela alocação dos DLCCs nos circuitos série.

No próximo capítulo serão apresentados os resultados para os sistemas de 5 barras (STEVENSON, 1986) e o sistema equivalente da rede elétrica do estado do Paraná 291 barras.

6 ANÁLISES E RESULTADOS

6.1 CONCEITOS PRELIMINARES

A seguir serão mostrados os resultados fornecidos pela metodologia proposta para solução da superação dos disjuntores internos às subestações, utilizando os sistemas originais de barra-ramo de 5 barras (STEVENSON, 1986) e de 291 barras, que é o equivalente da rede elétrica do estado do Paraná (ROSAS *et al.*, 2010).

Os resultados são fornecidos levando-se em consideração a modelagem no nível de subestação. As rotinas do programa foram desenvolvidas utilizando a ferramenta computacional Matlab 2010a. As simulações foram realizadas em um Notebook Positivo com processador Intel Core I3 de 2.27 GHz com 4 GB de memória RAM e sistema operacional 32 bits, tendo o Microsoft Windows 2007 como sistema operacional.

6.2 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os testes foram realizados com o intuito de solucionar os sistemas com disjuntores superados por corrente de curto-circuito simétrica e assimétrica (relação X/R). A solução para a superação simétrica e assimétrica e a variação das correntes de curto trifásicas e fase-terra foram consideradas apenas nas subestações com disjuntores superados.

O objetivo dos testes é avaliar as soluções encontradas pelo AGM para a solução da superação dos disjuntores que visam a (i) minimização do custo e do (ii) número de limitadores e a (iii) variação das correntes de contribuição através dos disjuntores superados.

Quanto às opções relativas aos dispositivos limitadores, foi considerado o uso do DLCC reator com núcleo de ar, também conhecido como reator limitador de corrente (RLC). Os valores dos RLCs utilizados são aproximados em unidades

monetárias (UM) para as reatâncias de 5 Ω a 30 Ω , conforme apresentados na Tabela 6.1 (FERREIRA, 2006; BARAN e DUARTE, 2010).

Tabela 6.1 - Custos dos RLCs

REATÂNCIA RLC(Ω)	CUSTO DO REATOR LIMITADOR UNIDADES MONETÁRIAS (UM)					
	765 kV	500 kV	345 kV	230 kV	138 kV	69 kV
5	31,4	26,2	21,8	16,8	12,0	10,0
10	37,7	31,4	26,2	20,2	14,4	12,0
12	40,3	33,5	28,0	21,5	15,4	12,8
15	44,0	36,7	30,6	23,5	16,8	14,0
18	47,8	39,8	33,2	25,5	18,2	15,2
20	50,3	41,9	34,9	26,9	19,2	16,0
25	56,6	47,2	39,3	30,2	21,6	18,0
30	62,9	52,4	43,7	33,6	24,0	20,0

Como observado na Tabela 6.1, são consideradas 8 valores de reatâncias para o RLC ($n_{reatância} = 8$). Esses valores de reatâncias são codificados em forma binária de acordo com a Tabela 6.1, sendo necessários 3 *bits* para a representação das reatâncias ($n_{bits_reatância}=3$) na solução do problema.

Tabela 6.2 – Representação binária das reatâncias do RLC

REATÂNCIA RLC(Ω)	5	10	12	15	18	20	25	30
SEQUÊNCIA BINÁRIA	000	001	010	011	100	101	110	111

Para a realização dos testes foram considerados os parâmetros dos AGMs apresentados na Tabela 5.3 do capítulo anterior.

Na análise de curto-circuito foi considerado a conexão $Y_{\neq} - Y_{\neq}$ dos transformadores. Os geradores são considerados Y_{\neq} com impedância de aterramento. As reatâncias de sequência positiva, negativa e zero dos circuitos são iguais ($x_1=x_2=x_0$).

6.3 SISTEMA TESTE ORIGINAL 5 BARRAS

O sistema teste 5 barras ($nb=5$) é representado pelo modelo barra-ramo de um circuito definido com 3 barras de geração e 6 linhas de transmissão, conforme

representando na Figura 6.1. Para esse sistema foi considerado que as linhas 1 e 6 são de 13,8 kV, e as linhas 2, 3, 4 e 5 são de 69 kV.

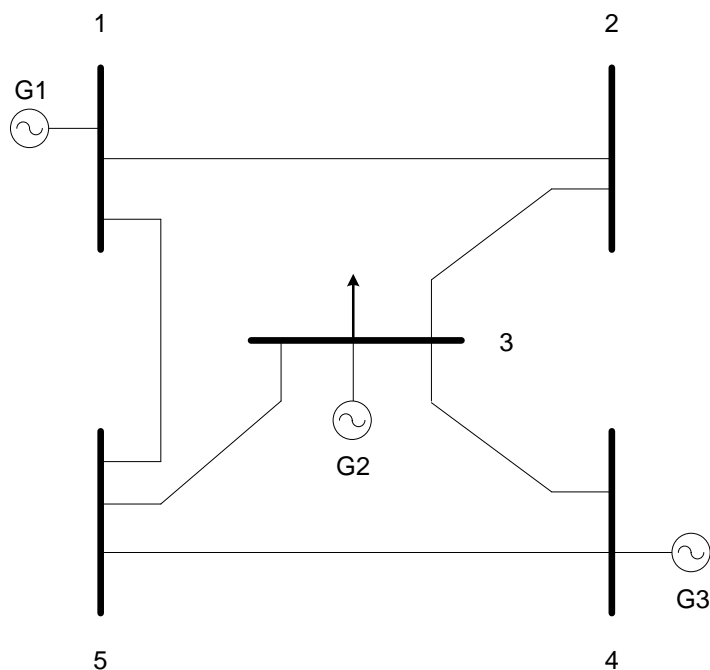


Figura 6.1 – Sistema teste original 5 barras – modelagem barra-ramo

A subestação indicada pela barra 3 (69 kV) foi escolhida para ser representada no nível de seção de barras, modelando a subestação e os disjuntores em operação, conforme ilustra a Figura 6.2. A subestação 3 do sistema barra-ramo apresenta um arranjo em disjuntor e meio e a representação detalhada dessa subestação implica no aumento do número de barras/nós. Dessa forma, o sistema resultante para a definição do caso base passa a ser composto por 11 barras/nós ($nb=11$) e por 6 disjuntores fechados ($ndisj=6$).

Os dados das linhas e geradores do sistema barra-ramo 5 barras e o seu equivalente 11 barras modelado no nível de seção de barras são apresentados no Apêndice A.

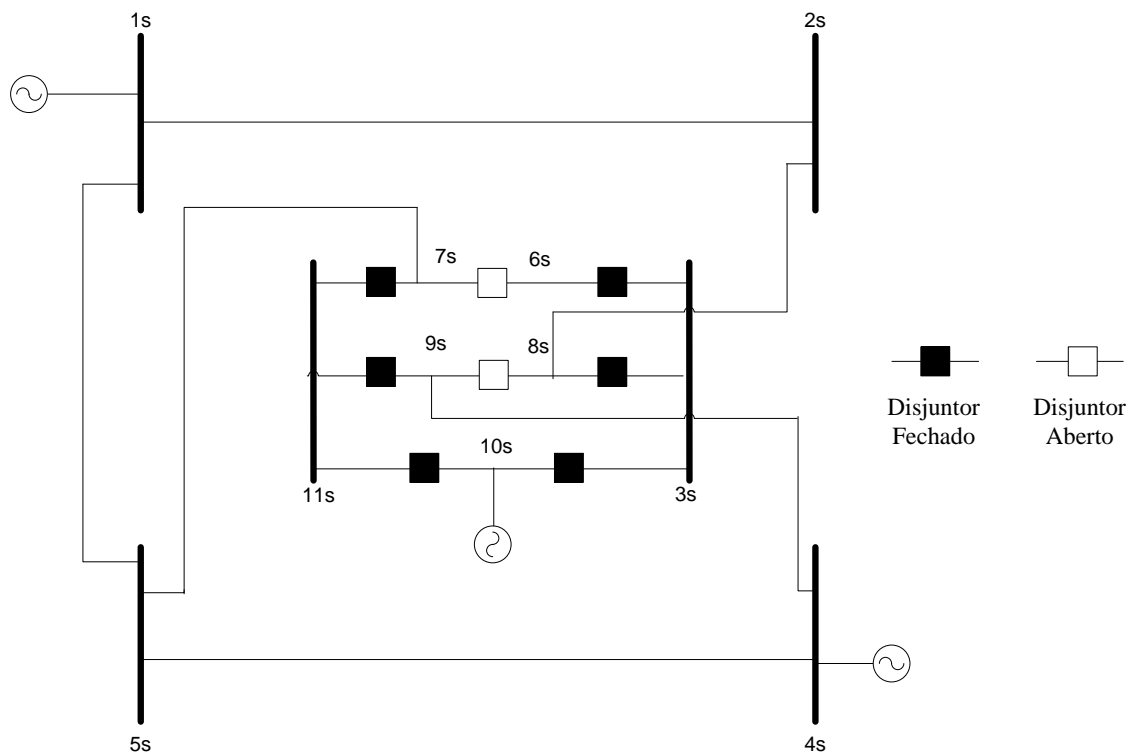


Figura 6.2 – Sistema resultante 11 barras – barra 3 modelada no nível de seção de barras

Com o objetivo de validar a implementação da formulação matemática para o cálculo de curto-circuito no nível de seção de barras, foi aplicado um curto-circuito trifásico na barra 1 do sistema de 5 barras, considerado que o sistema opera em vazio com perfil plano de tensão igual a $j1$ pu antes da ocorrência da falta.

A Figura 6.3 apresenta o diagrama unifilar correspondente ao modelo barra-ramo do sistema de 5 barras e as correntes e tensões (valores em pu) de curto-circuito trifásico obtidas pelo método da matriz \hat{Z}_{mod} . O módulo da corrente total de curto-circuito trifásico é igual a 14,68 pu.

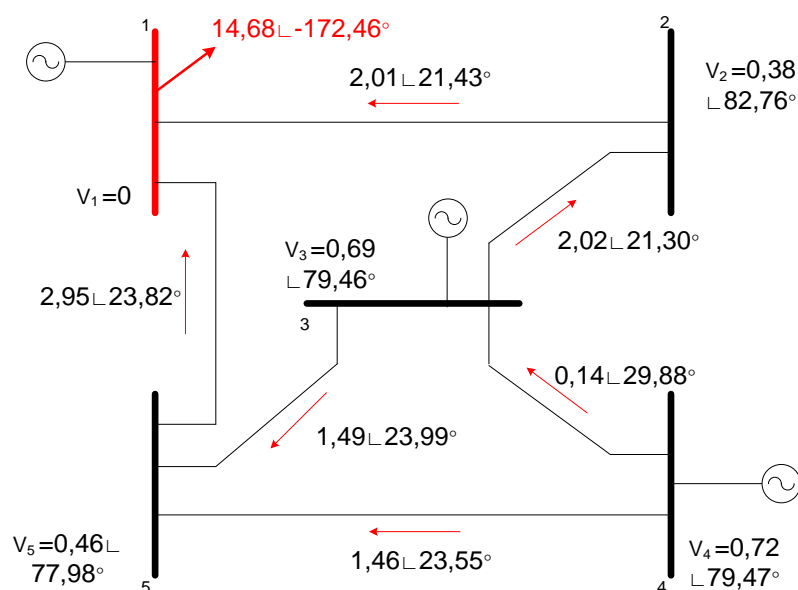


Figura 6.3 – Sistema de 5 barras –falta trifásica na barra 1

Os valores das correntes e tensões (em pu) para o curto-circuito trifásico estendido na barra 1 para a modelagem no nível de subestação (Figura 6.2) estão apresentados na Figura 6.4.

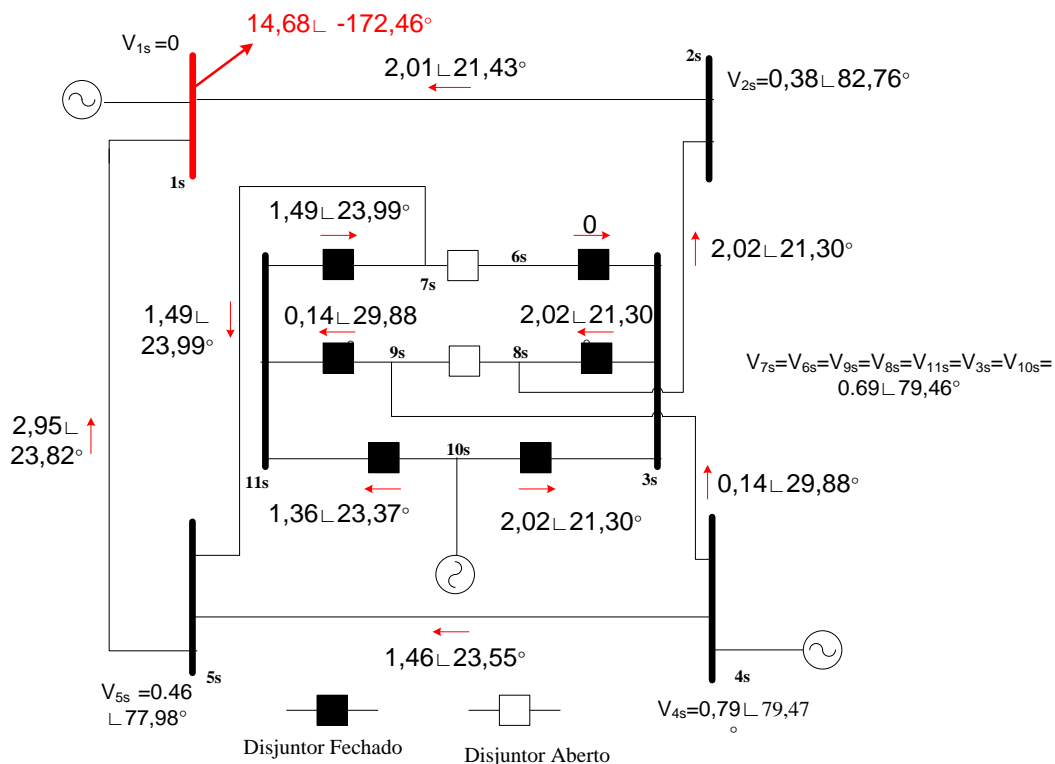


Figura 6.4 – Sistema de 11 barras –falta trifásica na barra 1

Comparando os resultados das Figuras 6.3 e 6.4, observa-se que tanto o modelo barra-ramo quanto o de seção de barras apresentam valores das correntes e tensões de curto-circuito trifásico idênticos, com o adicional dos valores das correntes de falta que circulam pelos disjuntores fechados disponíveis no vetor \dot{V}_{mod} e obtidos com a solução do problema de cálculo de curto-circuito trifásico estendido.

A Tabela 6.3 apresenta os valores de correntes de curto-circuito que circulam através dos ramos convencionais incidentes à barra 3 e através dos disjuntores representados no modelo da rede. Por exemplo, a corrente que circula pelo ramo convencional (3-5) da modelagem barra-ramo é igual ao que circula pelo equivalente ramo (5s-7s) da modelagem seção de barra. Estes resultados comprovam a consistência obtida pela representação dos ramos chaveáveis.

Tabela 6.3 – Resultados para o Sistema 5 barras

RAMO CONVENCIONAL		RAMO CHAVEÁVEL		CORRENTE (PU)
DE	PARA	DE	PARA	
3	5	7s	5s	1,49L 23,99°
3	2	3s	8s	2,02L 21,30°
4	3	9s	11s	0,72L 29,88°
-	-	10s	3s	2,02L 21,30°
-	-	10s	11s	1,46L 23,55°

Segundo as Figuras 6.3 e 6.4, observam-se também, a igualdade entre as magnitudes das tensões nodais nas barras das duas metodologias e a diferença de potencial nula nas seções de barras que conectam os disjuntores fechados no modelo de seção de barras.

Verifica-se que o método da matriz \dot{Z}_{mod} apresentado para o cálculo de curto-circuito trifásico satisfaz as equações de Kirchoff, e é válido para a obtenção direta das correntes e tensões de curto nos disjuntores internos as subestações.

Caso base

A análise preliminar do sistema 5 barras resulta nos valores de curto listados na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Análise preliminar para o caso base do sistema 5 barras

SE`S	MÓDULO DA CORRENTE DE CURTO (PU)	RELAÇÃO X/R (PU)	CAPACIDADE DAS SE`S (PU)	% DA CAPACIDADE NOMINAL (PU)
1	14,68	7,55	20	0,73
2	8,01	2,41	20	0,40
3	16,74	7,55	16,5	1,01
4	11,64	4,05	20	0,58
5	10,88	2,85	20	0,54

Os resultados da análise preliminar são idênticos para os valores de curto trifásico e fase-terra e indicam a superação de curto-circuito simétrica e assimétrica (caso 1 da Tabela 5.2) do arranjo da subestação representada pela barra 3. Para a falta trifásica ou fase-terra na barra 3, as contribuições das correntes de curto-circuito no sistema teste barra-ramo para a fase A são apresentadas na Figura 6.5.

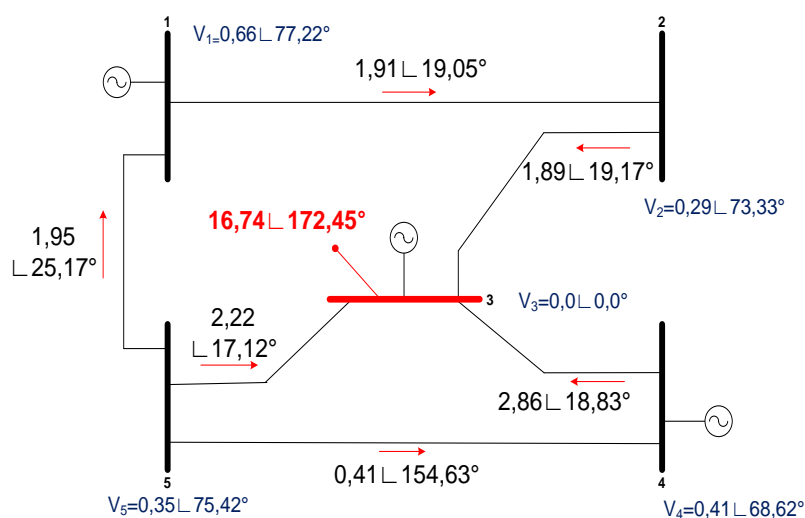


Figura 6.5 - Contribuições das correntes de curto-circuito simétricas para uma falta na barra 3 do sistema teste 5 barras

A Tabela 6.5 apresenta o módulo da corrente de curto, a relação X/R , a capacidade, a porcentagem da capacidade nominal e o caso de superação dos disjuntores após a análise detalhada dos disjuntores da subestação 3, modelados no sistema equivalente 11 barras. A Tabela 6.5, que configura o caso base a ser solucionado, detalha a condição de superação dos disjuntores superados 3, 4 e 5. A Figura 6.6 mostra como o sistema se comporta para o pior caso de superação que é para o disjuntor 3 quando simulado um curto-circuito trifásico ou monofásico na barra 6 do sistema 11 barras.

Tabela 6.5 – Caso base de superação para os disjuntores da subestação 3 – sistema 11 barras

CURTO	DISJUNTOR	MÓDULO DAS CORRENTES DE CURTO	RELAÇÃO X/R	CAPACIDADE NOMINAL DOS DISJUNTORES	% DA CAPACIDADE NOMINAL	SUPERAÇÃO
3s	5	14,90	7,55	16.5	0,90	@ & -1
6s	3	16,74	7,55	16,5	1,01	! & -1
6s	5	14,90	7,55	16.5	0,90	@ & -1
8s	4	14,90	7,55	16.5	0,90	@ & -1
8s	5	14,90	7,55	16.5	0,90	@ & -1

LEGENDA: ! (disjuntor superado por corrente de curto-circuito simétrica), @ (disjuntor em estado de alerta para superação), & - (superação assimétrica – caso de superação)

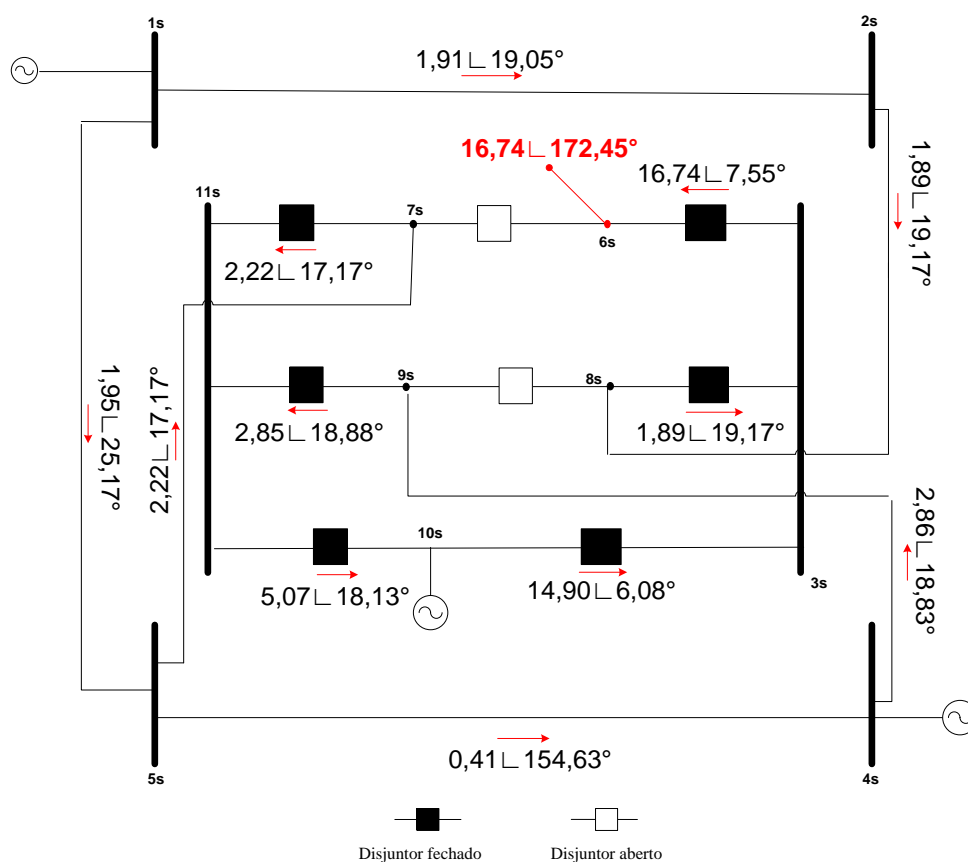


Figura 6.6 – Contribuições das correntes de curto para a falta na barra 6 do sistema sem alocação - sistema 11 barras

Para solucionar a superação dos disjuntores, foi considerada a alocação dos RLCs em série com todas os circuitos. Foram feitos testes para um número máximo de 5 limitadores ($nDLC = 5$).

Para este sistema foram feitos dois testes, de acordo com a Tabela 6.6.

Tabela 6.6 – Testes realizados para os disjuntores superados - Sistema 11 barras

TESTE	CONSIDERADO CUSTO (f_2)	CONSIDERADO A MINIMIZAÇÃO DO NÚMERO DE RLC (f_3)	CONSIDERADO A MINIMIZAÇÃO DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO (f_4)
1	Sim	Sim	Não
2	Não	Sim	Sim
6	Sim	Sim	Sim

Teste 1

Para o *Teste 1* foi considerada a minimização dos custos e do número de limitadores para solucionar o problema de superação dos disjuntores listados na Tabela 6.5. A solução encontrada pelo algoritmo está apresentada na Tabela 6.7. Os valores das funções resultantes da solução estão na Tabela 6.8.

Tabela 6.7– Solução do *Teste 1* - Sistema 11 barras

LINHA	IMPEDÂNCIA (Ω)	CUSTO (UM)
9	10	14
10	15	12

Tabela 6.8 – Funções objetivos do *Teste 1* - Sistema 11 barras

CUSTO (f_2)	NÚMERO DE RLC (f_3)	MINIMIZAÇÃO DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO (f_4)
26	2	21,70

A solução indica a alocação de dois RLCs em série com as linhas 9 e 10, com impedâncias de 15Ω e 10Ω respectivamente. Esta solução elimina o problema de superação dos disjuntores por correntes de curto-circuito simétrica e assimétrica tanto para a falta trifásica como para a falta fase-terra.

Da Tabela 6.9, pode-se comparar os níveis de redução da relação X/R e das correntes dos disjuntores superados no caso base.

Tabela 6.9– Resultados do *Teste 1* - Sistema 11 barras

BARRA EM CURTO	DE	PARA	SEM ALOCAÇÃO			COM ALOCAÇÃO		
			MÓDULO DAS CORRENTES	RELAÇÃO X/R	% DA CAPACIDADE NOMINAL	MÓDULO DAS CORRENTES	RELAÇÃO X/R	% DA CAPACIDADE NOMINAL
3s	3s	10s	14,90	7,55	0,90	12,94	11,46	0,77
6s	3s	6s	16,74	7,55	1,01	14,84	11,46	0,89
6s	3s	10s	14,90	7,55	0,90	12,94	11,46	0,77
8s	3s	8s	14,90	7,55	0,90	12,94	11,46	0,77
8s	3s	10s	14,90	7,55	0,90	12,94	11,46	0,77

A solução para o *Teste 1* do sistema 11 barras tem como resultado da análise de suportabilidade a porcentagem da capacidade nominal dos disjuntores inferiores ao caso base. Observando o pior caso de superação, que sem a alocação tinha a % da capacidade nominal igual a 1,01, com a alocação passou a ser 0,89%, ou seja, uma redução de aproximadamente 10% da capacidade nominal, resultantes da limitação de quase 2 pu do módulo da corrente de curto. Também é resultado da solução a elevação da relação X/R equivalente dos disjuntores em 51,8%.

A Figura 6.7 mostra como o sistema se comporta quando aplicado um curto na seção de barra 6s.

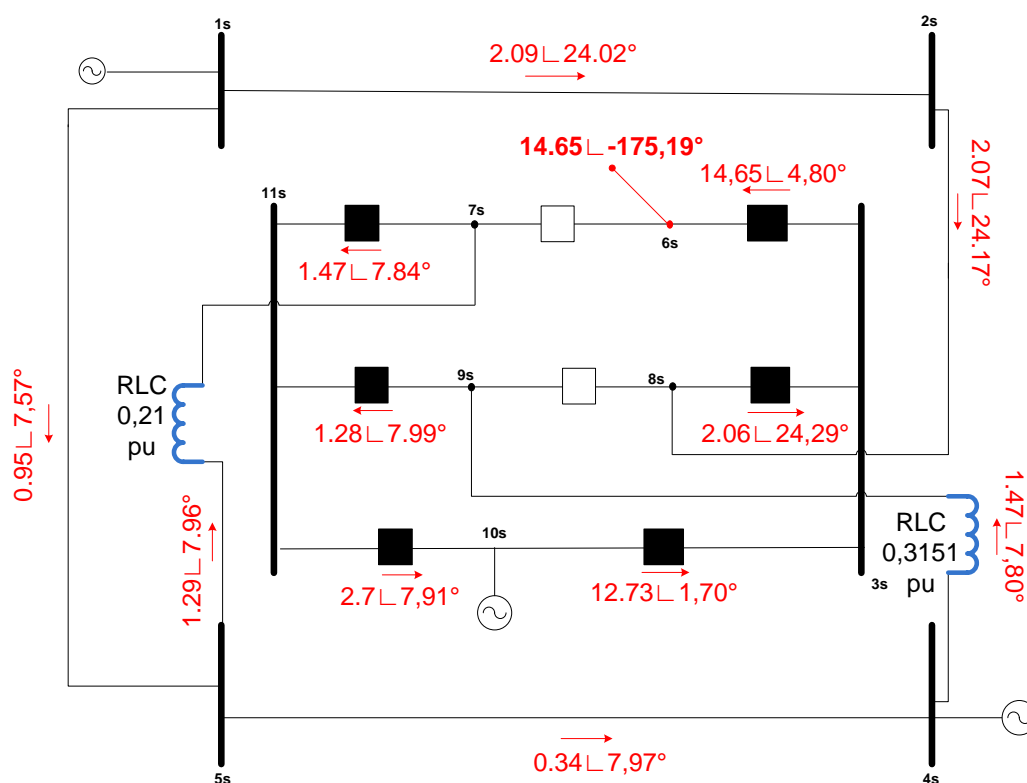


Figura 6.7 – Sistema 11 barras - *Teste 1* - Contribuições para a falta na seção de barra 6s

Teste 2

Para o *Teste 2* foi considerada a minimização das correntes de curto e do número de limitadores para solucionar o problema de superação dos disjuntores listados na Tabela 6.5. As 3 soluções encontradas para o teste estão apresentadas na Tabela 6.10. A Tabela 6.11 mostra os valores das funções resultantes de cada solução.

Tabela 6.10– Soluções do *Teste 2* - Sistema 11 barras

SOLUÇÃO	LINHA	IMPEDÂNCIA (Ω)	CUSTO (UM)
1	9	30	20
	10	30	20
2	2	18	15,2
	9	30	20
	10	30	20
3	2	18	15,2
	9	30	20
	10	30	20
	11	30	20

Tabela 6.11 – Funções objetivos do *Teste 2* - Sistema 11 barras

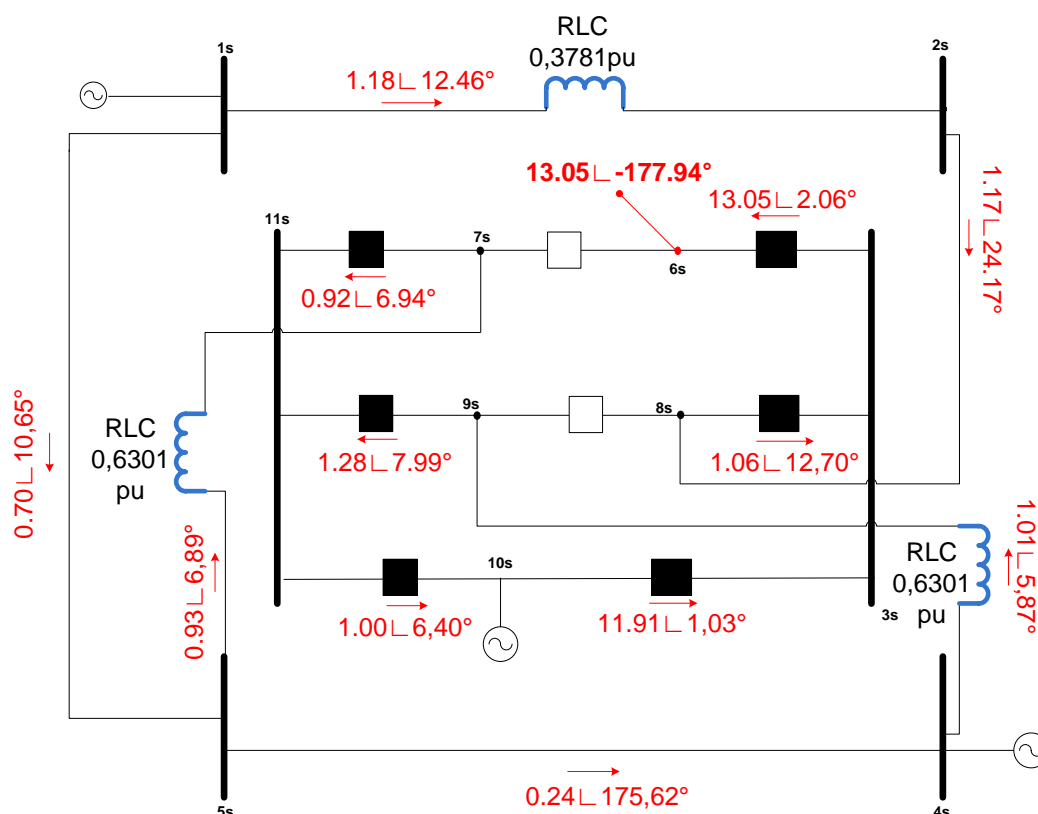
SOLUÇÃO	CUSTO (f_2)	NÚMERO DE RLC (f_3)	NÍVEL DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO (f_4)
1	40	2	19.77
2	55.20	3	18.08
3	75.20	4	18.04

A avaliação das soluções Pareto-relevantes obtidas pelo AGM e listadas nas Tabelas 6.10 e 6.11 pelo Método do Critério Global (equação (5.10)), a solução escolhida como "ótima" é a função 2. Considerando as colunas da Tabela 6.11, referentes as funções minimizadas no teste (f_3 e f_4), para uma maior quantidade de RLCs, maior a minimização do nível da corrente de curto-circuito. Por outro lado, comparando as soluções 2 e 3 apresentadas na tabela, a solução 2 considera a inserção de 3 RLCs em série com os circuitos das linhas 2, 9 e 10, minimizando o somatório do nível das correntes de falta trifásica e fase-terra dos disjuntores num total de 18,08%, resultado muito parecido com a solução 3, que considera a alocação de um RLC a mais no sistema. Com relação a solução 1, o nível de curto-circuito resultante da solução 2 é menor, porém, para a variação da função f_4 deve ser instalado um RLC a mais no sistema.

A Tabela 6.12, comparar os níveis de redução da relação X/R e das correntes dos disjuntores superados no caso base com a solução 2. A Figura 6.8 mostra como o sistema se comporta quando aplicado uma falta na seção de barra 6s do sistema 11 barras solucionado pelo caso 2.

Tabela 6.12– Resultados do *Teste 2 - Solução 2 - Sistema 11 barras*

BARRA EM CURTO	DE	PARA	SEM ALOCAÇÃO			COM ALOCAÇÃO		
			MÓDULO DAS CORRENTES	RELAÇÃO X/R	% DA CAPACIDADE NOMINAL	MÓDULO DAS CORRENTES	RELAÇÃO X/R	% DA CAPACIDADE NOMINAL
3	3	10	14,90	7,55	0,90	11,91	27,77	0,70
6	3	6	16,74	7,55	1,01	13,05	27,77	0,76
6	3	10	14,90	7,55	0,90	11,91	27,77	0,70
8	3	8	14,90	7,55	0,90	11,91	27,77	0,70
8	3	10	14,90	7,55	0,90	11,91	27,77	0,70

Figura 6.8 – Sistema 11 barras - *Teste 2 - Solução 2 - Contribuições para a falta na seção de barra 6*

A solução 2 para o *Teste 2* do sistema 11 barras, assim como no *Teste 1*, tem como resultado da análise de suportabilidade a porcentagem da capacidade nominal dos disjuntores inferiores ao caso base. Para o pior caso de superação, a % da capacidade nominal passou a ser igual a 0,76. O módulo da corrente de curto é limitado em mais de 3 pu. A relação X/R equivalente de cada um dos disjuntores corresponde a 267,81% da relação X/R do caso base.

Teste 3

Para o Teste 3 foi considerado a minimização do custo, das correntes de curto e do número de limitadores para solucionar o caso base da Tabela 6.5. Os valores das 27 soluções de Pareto obtidas pelo algoritmo multiobjetivo são apresentadas na Tabela 6.13 e na Tabela 6.14.

A minimização do nível das correntes de curto-circuito (f_2) das soluções 6, 7, 8, 9, 12 e 14 em destaque nas Tabelas 6.13 e 6.14 variam entre os valores 18,01 e 18,06, enquanto que o valor dos custos totais de compra dos RLCs (f_4) para as soluções variam entre os valores 68 e 90,80, indicando a instalação de 4 e 5 RLCs no sistema 11 barras. Isto significa que um maior número de limitadores alocados no sistema não significa grandes variações de corrente de falta através dos disjuntores, e sim um maior custo.

O conjunto de soluções fornecido pelo algoritmo proposto para o problema de alocação de RLCs está ilustrado na Figura 6.9.

Tabela 6.13– Soluções do Teste 3 - Sistema 11 barras

SOLUÇÃO	LINHA	IMPEDÂNCIA (Ω)	CUSTO (UM)
1	10	30	20,00
	9	30	20,00
2	9	10	12,00
	10	15	14,00
3	10	30	20,00
	9	25	18,00
4	10	20	16,00
	9	15	14,00
	2	12	12,80
5	10	30	20,00
	9	30	20,00
	2	10	12,00
6	10	30	20,00
	2	15	14,00
	9	30	20,00
	1	15	16,80
7	11	20	16,00
	2	18	15,20
	10	30	20,00
	9	30	20,00
8	11	12	12,80
	10	30	20,00
	2	15	14,00
	9	30	20,00
9	1	15	16,80
	11	30	20,00
	10	30	20,00

	2	15	14,00
	9	30	20,00
	1	15	16,80
	11	10	12,00
10	9	25	18,00
	2	15	14,00
	10	20	16,00
11	10	20	16,00
	9	18	15,20
	2	15	14,00
12	10	30	20,00
	2	18	15,20
	9	30	20,00
	11	15	14,00
13	10	20	16,00
	9	18	15,20
14	10	30	20,00
	9	30	20,00
	12	12	15,40
	2	18	15,20
15	10	30	20,00
	9	25	18,00
	2	18	15,20
16	10	25	18,00
	9	15	14,00
	2	10	12,00
17	10	20	16,00
	9	15	14,00
18	9	15	14,00
	10	15	14,00
19	10	30	20,00
	9	25	18,00
	2	10	12,00
20	10	25	18,00
	9	25	18,00
21	10	20	16,00
	9	20	16,00
	2	15	14,00
22	9	12	12,80
	10	20	16,00
23	9	18	15,20
	10	15	14,00
24	9	30	20,00
	10	30	20,00
	2	18	15,20
25	2	20	16,00
	10	30	20,00
	9	25	18,00
26	10	20	16,00
	9	20	16,00
27	10	25	18,00
	9	18	15,20

Tabela 6.14 – Funções objetivos do Teste 3 - Sistema 11 barras

SOLUÇÃO	CUSTO (f_2)	NÚMERO DE RLC (f_3)	NÍVEL DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO (f_4)
1	40,00	2	19,77
2	26,00	2	21,70
3	38,00	2	19,95
4	42,80	3	19,71
5	52,00	3	18,61
6	86,80	5	18,01
7	68,00	4	18,06
8	90,80	5	18,01
9	82,80	5	18,02
10	48,00	3	18,96
11	45,20	3	19,31
12	69,20	4	18,06
13	31,20	2	20,77
14	70,60	4	18,03
15	53,20	3	18,27
16	44,00	3	19,58
17	30,00	2	20,95
18	28,00	2	21,31
19	50,00	3	18,80
20	36,00	2	20,16
21	46,00	3	19,20
22	28,80	2	21,17
23	29,20	2	21,14
24	55,20	3	18,08
25	54,00	3	18,17
26	32,00	2	20,66
27	33,20	2	20,49

Considerando os limites inferiores e superiores das soluções 2 e 24, a solução proposta pelo Método do Critério Global, é a solução 27, em destaque na Figura 6.9, que será analisada na Tabela 6.15. A Figura 6.13 o comportamento do sistema para um curto na seção de barra 6s.

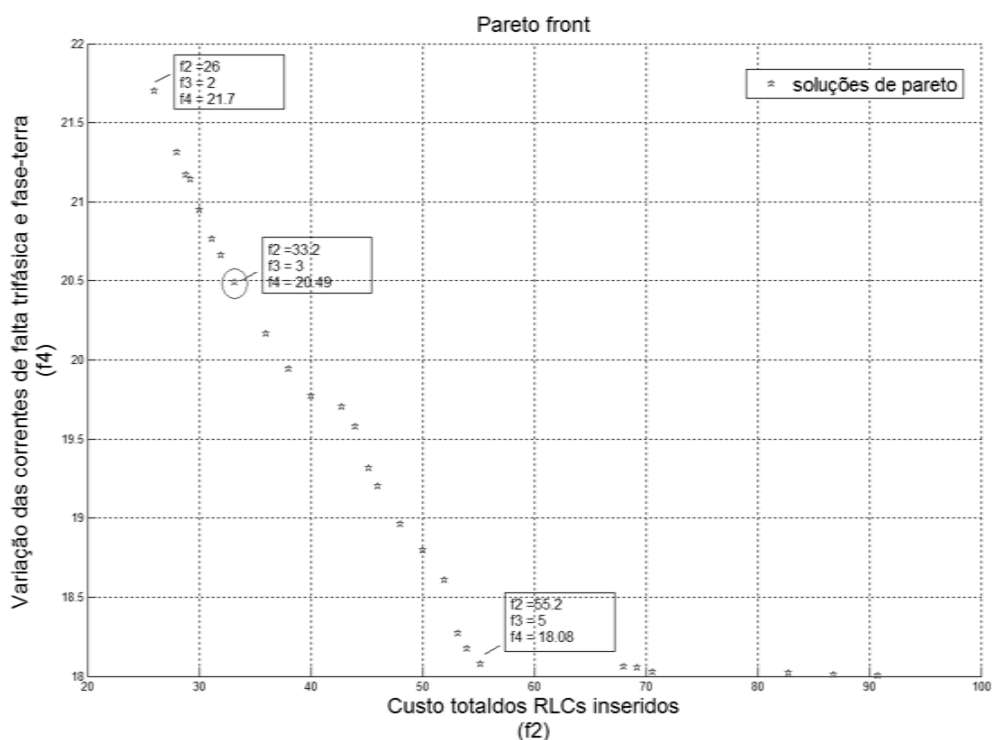


Figura 6.9 – Sistema 11 barras - Teste 3 - Fronteira de Pareto

Tabela 6.15– Resultados do Teste 3 - Solução 27 - Sistema 11 barras

BARRA EM CURTO	DE	PARA	SEM ALOCAÇÃO			COM ALOCAÇÃO		
			MÓDULO DAS CORRENTES	RELAÇÃO X/R	% DA CAPACIDADE NOMINAL	MÓDULO DAS CORRENTES	RELAÇÃO X/R	% DA CAPACIDADE NOMINAL
3	3	10	14,90	7,55	0,90	12,27	12,59	0,74
6	3	6	16,74	7,55	1,01	14,22	12,59	0,86
6	3	10	14,90	7,55	0,90	12,27	12,59	0,74
8	3	8	14,90	7,55	0,90	12,27	12,59	0,74
8	3	10	14,90	7,55	0,90	12,27	12,59	0,74

Comparando a solução 27 do Teste 3 com o caso base, a solução diminuiu o nível da corrente de curto-circuito, tanto trifásica quanto fase-terra, justificando a redução da % da capacidade nominal e a elevação da relação X/R equivalente de todos os disjuntores devido a alocação das reatâncias nas linhas 9 e 10.

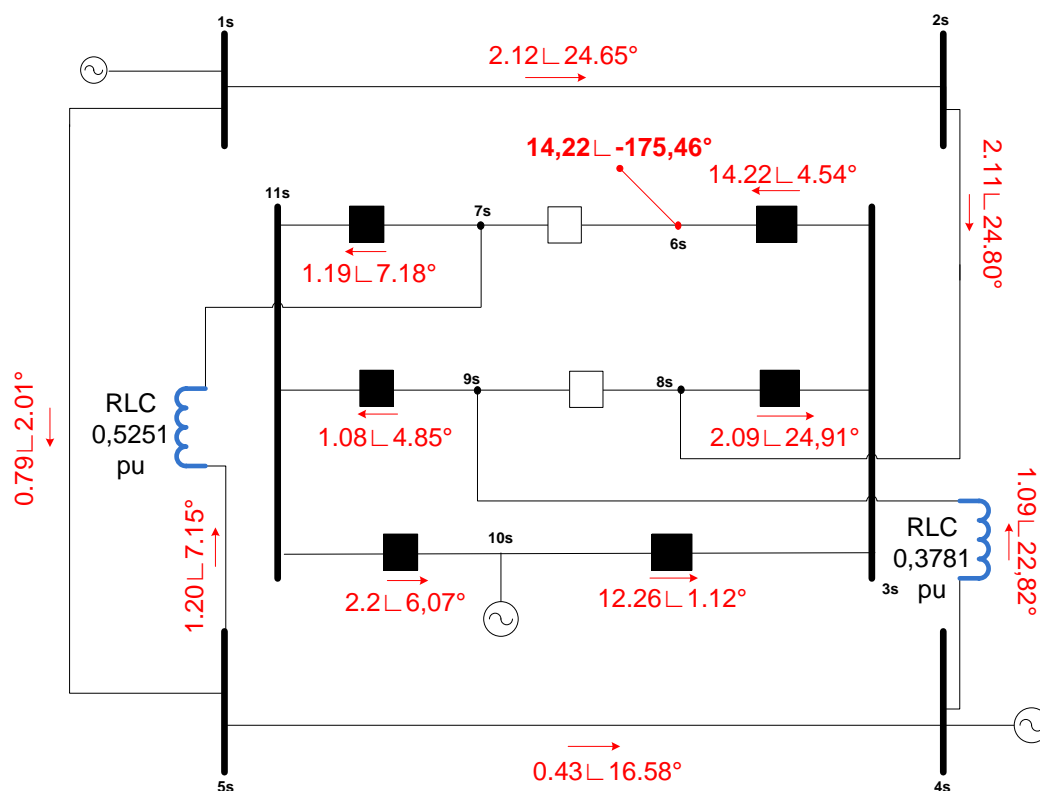


Figura 6.10 – Sistema 11 barras - *Teste 3 - Solução 27 - Contribuições para a falta na seção de barra 6s*

6.4 SISTEMA TESTE ORIGINAL 291 BARRAS

O sistema teste 291 barras ($nb=291$) é a modelagem barra-ramo do sistema real de 291 barras referente a concessionária COPEL do estado do Paraná, cujos dados podem ser obtidos em (ONS, 2011). A Figura 6.11 apresenta parte da modelagem barra-ramo do sistema de 291 barras. A subestação (SE) de Bateias de 525 kV, representada pela barra 895 da Figura 6.11, foi escolhida para apresentar parte da modelagem barra-ramo do sistema de 291 barras. O sistema resultante é composto por 296 barras/nós ($nb=296$) e os status dos 4 disjuntores fechados ($ndisj=4$) configuram o barramento da SE em *bus-split*, como ilustra a Figura 6.12.

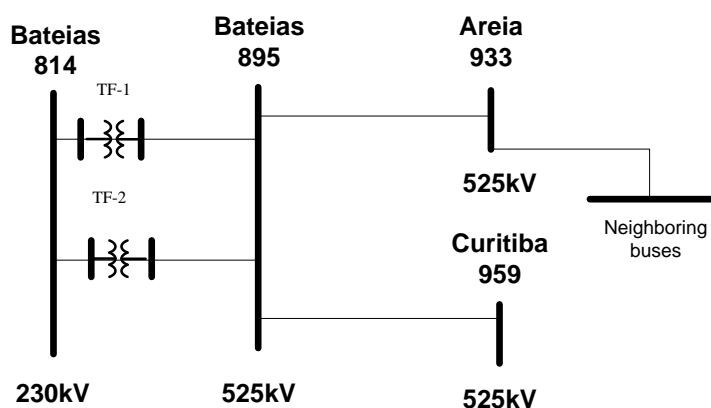


Figura 6.11 – Sistema teste original 291 barras – modelagem barra-ramo

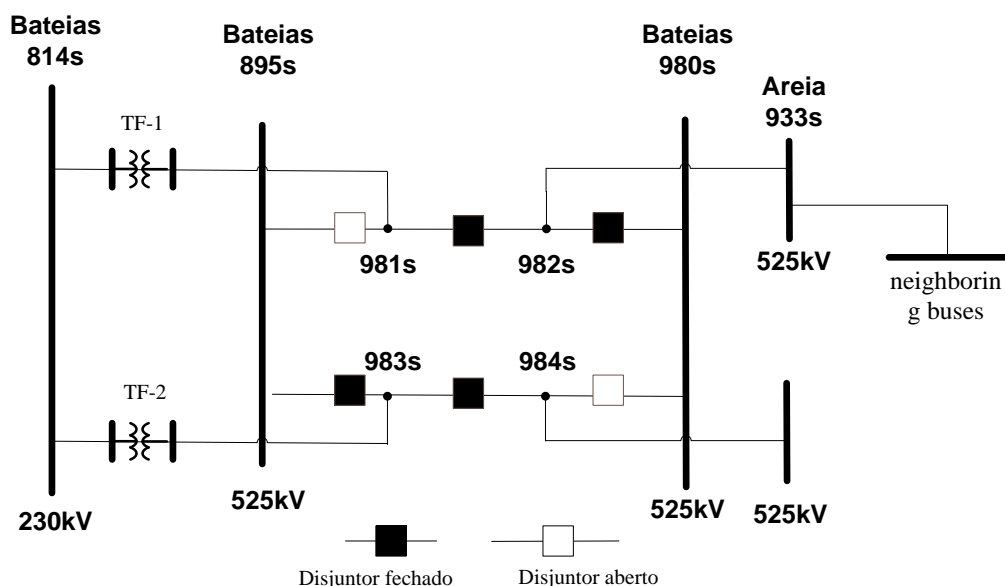


Figura 6.12 – Sistema equivalente 296 barras – SE Bateias 525kV modelada no nível de seção de barras

Nas Figura 6.13 e Figura 6.14 estão apresentados os valores de correntes e tensões (pu) decorrente de uma falta fase-terra aplicada na subestação de Areia (barra 116 na modelagem barra-ramo e barra 117s na modelagem no nível de subestação), os quais foram obtidos segundo a modelagem barra ramo e no nível de seção de barras, respectivamente, considerado que o sistema opera em vazio com perfil plano de tensão igual a $j1$ pu antes da ocorrência da falta.

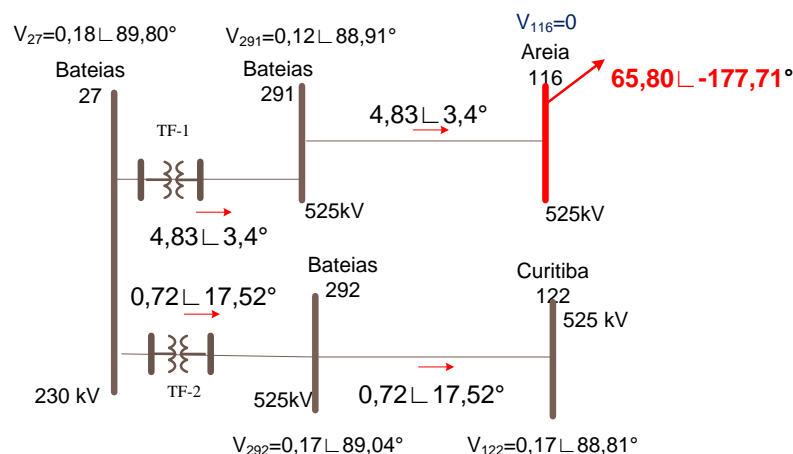


Figura 6.13 – Sistema 291 barras – falta fase-terra na barra 116

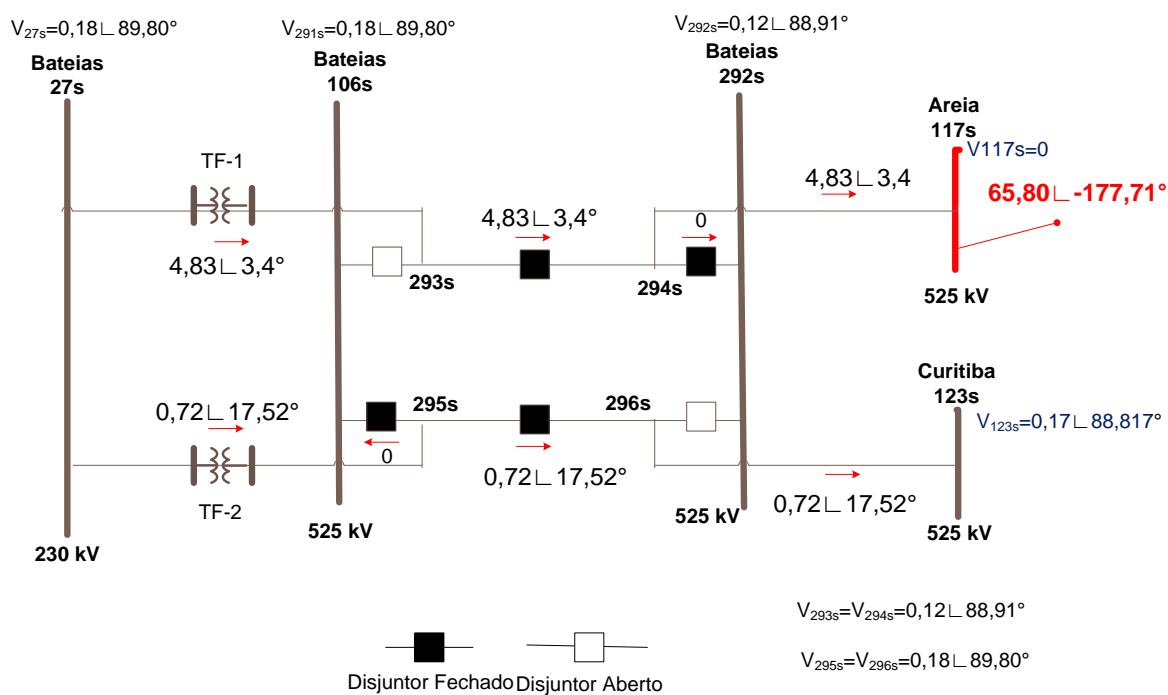


Figura 6.14 - Sistema 291 barras – falta fase-terra na seção de barra 117s

A Tabela 6.21 apresenta os valores de correntes de curto-circuito que circulam por alguns dos ramos da Figura 6.13 e Figura 6.14. Por exemplo, a corrente que circula pelo ramo convencional (291-116) da modelagem barra-ramo é igual ao que circula pelo equivalente ramo (294s-117s) da modelagem seção de barra. Estes resultados comprovam a consistência obtida pela representação dos ramos chaveáveis.

Tabela 6.16 – Resultados para o Sistema 291 barras

RAMO CONVENCIONAL		RAMO CHAVEÁVEL		CORRENTE (PU)
DE	PARA	DE	PARA	
291	116	293s	294s	4,8278L 3,4°
292	122	295s	296s	0,7175L 17,52°

Caso base

A Tabela 6.22 mostra a análise preliminar de superação do sistema 291 barras para a subestação de Bateias 525 kV, SE's 291 e 292 da Figura 6.13. Considera os resultados da análise preliminar são idênticos para os valores de curto trifásico e fase-terra e indicam casos de superação simétrica e assimétrica para as falta trifásica e fase-terra.

Tabela 6.17 – Análise preliminar para o caso base do sistema 291 barras

SE'S	% DA CAPACIDADE MÁXIMA NOMINAL	RELAÇÃO X/R (PU)	SUPERAÇÃO
291	17,74	0,98	@ &-2
292	17,14	1,08	!&-2

LEGENDA: ! (disjuntor superado por corrente de curto-circuito simétrica), @ (disjuntor em estado de alerta para superação), & - (superação assimétrica – caso de superação)

A Tabela 6.18 apresenta o módulo da corrente de curto, a relação X/R a capacidade e a porcentagem da capacidade nominal para os disjuntores da SE de Bateias 525 kV superados.

Tabela 6.18 – Caso base de superação para os disjuntores da subestação de bateias 525Kv

CURTO	DISJUNTOR	MÓDULO DAS CORRENTES DE CURTO	RELAÇÃO X/R	CAPACIDADE NOMINAL DOS DISJUNTORES	% DA CAPACIDADE NOMINAL	SUPERAÇÃO
106	5	43,09	17,14	40	1,08	! & -1
292	3	39,29	17,74	40	0,98	@& -1

LEGENDA: ! (disjuntor superado por corrente de curto-circuito simétrica), @ (disjuntor em estado de alerta para superação), & - (superação assimétrica – caso de superação)

A Figura 6.15 mostra como o sistema se comporta para a falta na barra 106.

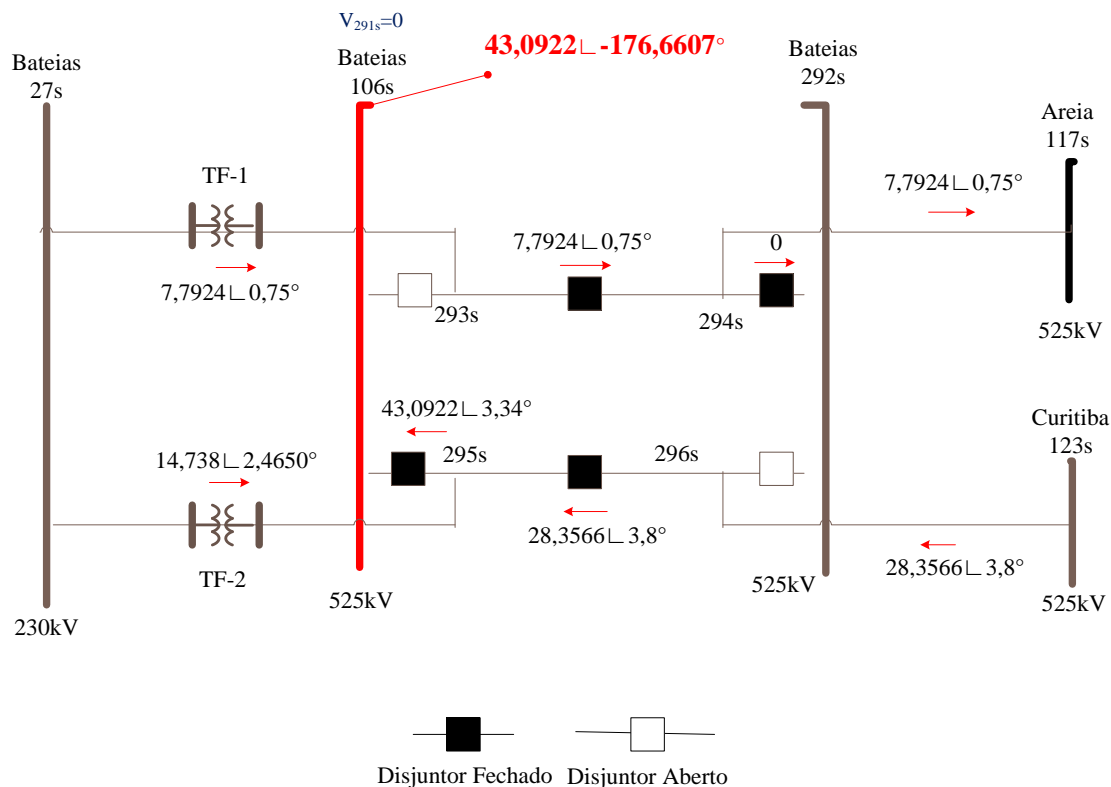


Figura 6.15 --Contribuições das correntes de curto para a falta na seção de barra 106s do sistema sem alocação

Para solucionar a superação dos disjuntores, foi considerada a alocação dos RLCs em série com todas as linhas. Foram feitos testes para um número máximo de 7 limitadores ($nDLC = 7$).

Os testes para este sistema são apresentados na Tabela 6.25.

Tabela 6.19 – Testes realizados para os disjuntores superados da SE Bateias

TESTE	CONSIDERADO CUSTO (f_2)	CONSIDERADO A MINIMIZAÇÃO DO NÚMERO DE RLC (f_3)	CONSIDERADO MINIMIZAÇÃO DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO (f_4)
1	Sim	Sim	Não
2	Não	Sim	Sim
3	Sim	Sim	Sim

Para simular o sistema 291 barras foi utilizada a análise de sensibilidade para limitar os locais para a alocação dos RLCs. A solução para a análise de sensibilidade, considerando as 10 linhas mais sensíveis à alocação, esta tabelada na Tabela 6.27.

Tabela 6.20– Resultado da análise de sensibilidade

DISJUNTOR DE 293 PARA 294				DISJUNTOR DE 294 PARA 292				DISJUNTOR DE 106 PARA 295				DISJUNTOR DE 295 PARA 296			
ΔI_{ci}^l	DE	PARA	<i>l</i>	ΔI_{ci}^l	DE	PARA	<i>l</i>	ΔI_{ci}^l	DE	PARA	<i>l</i>	ΔI_{ci}^l	DE	PARA	<i>l</i>
56.61	27	293	22	14.44	27	293	22	15.35	296	123	211	65.27	296	123	211
29.49	294	117	218	12.62	294	117	218	5.73	117	123	220	22.35	27	293	22
16.26	27	295	23	4.38	117	68	137	5.60	27	295	23	18.95	27	295	23
10.75	117	68	137	1.70	68	134	138	4.70	117	68	137	17.18	117	123	220
4.23	68	134	138	1.63	134	108	215	3.00	294	117	218	10.97	117	68	137
3.97	134	108	215	1.61	296	123	211	3.00	27	293	22	5.25	18	26	16
3.71	16	38	67	1.61	27	295	23	2.39	18	26	16	5.25	19	26	17
3.11	17	38	68	1.54	16	37	67	2.39	19	26	17	5.22	123	119	228
2.60	68	24	135	1.53	18	26	16	1.81	68	134	138	5.22	122	119	233
2.51	18	26	16	1.53	19	26	17	1.78	123	119	228	5.22	117	122	219

LEGENDA: ΔI_{ci}^l é a variação da corrente de curto-circuito no disjuntor *i* quando alocado uma reatância na linha *l*

Dessa análise, a Tabela 6.21 apresenta as linhas selecionadas para alocação dos RLCs.

Tabela 6.21– Locais para instalação dos RLCs

LINHAS RESULTANTES DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE															
16	17	22	23	67	68	135	137	138	211	215	218	219	220	228	233

Teste 1

Para o *Teste 1*, foi considerada a minimização do custo total e do número de limitadores para solucionar o problema de superação dos disjuntores listados na Tabela 6.18. A solução encontrada pelo algoritmo está apresentada na Tabela 6.22.

Tabela 6.22– Solução do *Teste 1* - Sistema 296 barras

LINHA	IMPEDÂNCIA (Ω)	CUSTO (UM)
22	15	15
23	15	30
211	15	30
218	10	25

Esta solução elimina o problema de superação por corrente de curto-circuito simétrica e assimétrica dos dois disjuntores apontados no caso base. O valor da função objetivo relativo ao custo da implantação dos quatro limitadores em linhas 525kV é de 188,7 UM, conforme apresentado na Tabela 6.23.

Tabela 6.23 – Funções objetivos do *Teste 1* - Sistema 296 barras

CUSTO (f_2)	NÚMERO DE RLC (f_3)	NÍVEL DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO (f_4)
188.7	4	3.39

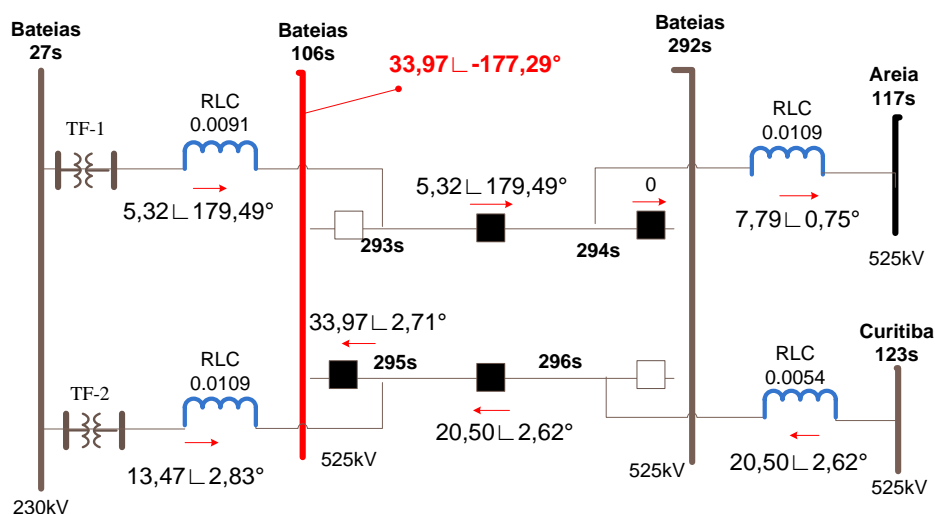
Os níveis de redução da relação X/R e das correntes dos disjuntores superados no caso base são apresentados para comparação na Tabela 6.24.

Tabela 6.24– Resultados do *Teste 1*- Sistema 296 barras

CURTO	DISJ	SEM ALOCAÇÃO			COM ALOCAÇÃO		
		MÓDULO DAS CORRENTES DE CURTO	RELAÇÃO X/R	% DA CAPACIDADE NOMINAL	MÓDULO DAS CORRENTES DE CURTO	RELAÇÃO X/R	% DA CAPACIDADE NOMINAL
106s	408	43.09	17.14	1.08	33.99	21.22	0.85
292s	407	39.29	17.74	0.98	33.88	19.40	0.85

A solução do algoritmo eleva a relação X/R equivalente dos disjuntores e resolve o problema de superação simétrica e assimetria dos disjuntores reduzindo o módulo da corrente de falta nos disjuntores superados.

A Figura 6.16 mostra o comportamento do curto aplicado na seção de barra 106s da modelagem no nível de subestação (Figura 6.12) após a alocação resultante do *Teste 1*. As reatâncias dos RLCs são representadas em pu.

Figura 6.16 – Sistema 296 barras - *Teste 1* - Contribuições para a falta na seção de barra 106s

Teste 2

Para o *Teste 2* foi considerada a minimização das correntes de curto trifásica e fase-terra através dos disjuntores superados no caso base (Tabela 6.18) e do número de limitadores para a solução do problema apontado. As soluções estão apresentadas na Tabela 6.25. A Tabela 6.26 mostra os valores das funções para as soluções do teste.

Tabela 6.25– Soluções do *Teste 2* - Sistema 296 barras

SOLUÇÃO	LINHA	IMPEDÂNCIA (Ω)	CUSTO (UM)
1	22	30	52,4
	23	30	52,4
	211	30	52,4
	218	30	52,4
2	22	30	52,4
	23	30	52,4
	137	30	52,4
	211	30	52,4
	218	30	52,4
3	22	30	52,4
	23	30	52,4
	137	30	52,4
	211	30	52,4
	218	30	52,4
	220	30	52,4
4	22	30	52,4
	23	30	52,4
	137	30	52,4
	211	30	52,4
	215	30	52,4
	218	30	52,4
	3	22	30

Tabela 6.26 – Funções objetivos do *Teste 2* - Sistema 296 barras

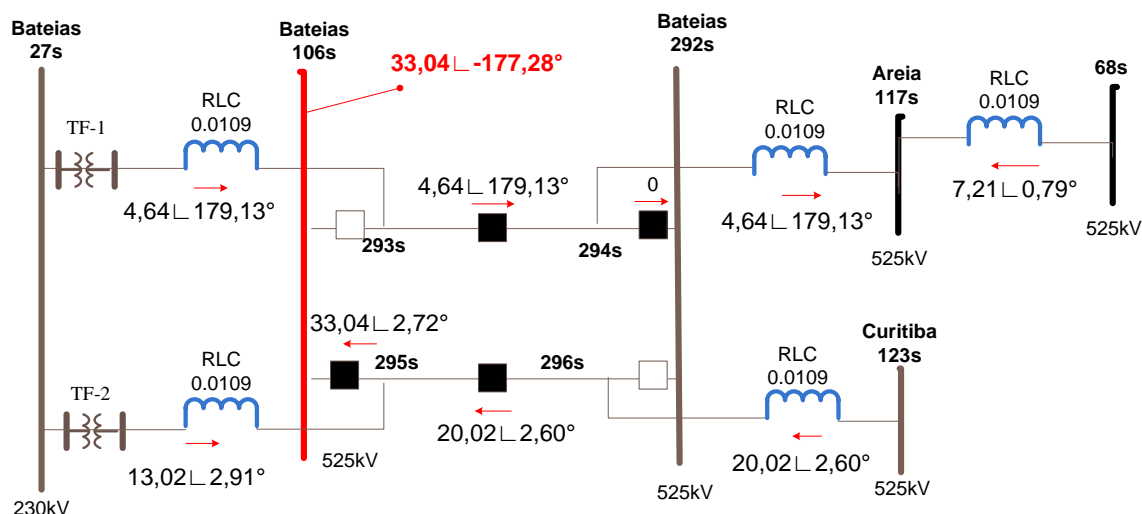
SOLUÇÃO	CUSTO (f_2)	NÚMERO DE RLC (f_3)	NÍVEL DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO (f_4)
1	209,6	4	3,285
2	262	5	3,206
3	314,4	6	3,163
4	366,8	7	3,152

A Tabela 6.27, compara os níveis dos módulos das correntes, relações X/R e porcentagem da capacidade nominal dos disjuntores superados no caso base com a solução "ótima" sugerida pelo Método do Critério Global (equação (5.10)), que é a solução 2.

Tabela 6.27– Resultados do *Teste 2* - Sistema 296 barras

CURTO	DISJ	SEM ALOCAÇÃO			COM ALOCAÇÃO		
		MÓDULO DAS CORRENTES DE CURTO	RELAÇÃO X/R	% DA CAPACIDADE NOMINAL	MÓDULO DAS CORRENTES DE CURTO	RELAÇÃO X/R	% DA CAPACIDADE NOMINAL
106s	408	43.09	17.14	1.08	33.04	21.03	0.83
292s	407	39.29	17.74	0.98	31.09	20.63	0.78

A Tabela 6.27 mostra que o caso de superação mais afetado pela solução 2 é o do disjuntor 408, que apresenta superação por simetria e assimetria, com a porcentagem de capacidade nominal 23,15% inferior ao caso base. No caso do disjuntor 407, que apresenta superação apenas por corrente de curto assimétrica, a porcentagem diminuiu 20,41%. A solução 2, apresentada na Tabela 6.27, tem a relação X/R equivalente dos disjuntores elevada em 22,69% para o caso de superação do disjuntor 408, e 16,29% para a superação do disjuntor 407. O módulo da corrente de curto para o primeiro caso é de 10,05 pu inferior ao módulo do caso base, e para o segundo caso, o módulo diminuiu 8,20 pu.

Figura 6.17 – Sistema 296 barras - *Teste 2* - Contribuições para a falta na seção de barra 116s

Teste 3

Para o *Teste 3* foi considerado a minimização do custo total de compra dos RLCs, das correntes de curto através dos disjuntores em superação e do número de limitadores. O conjunto de soluções fornecido pelo AGM está ilustrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

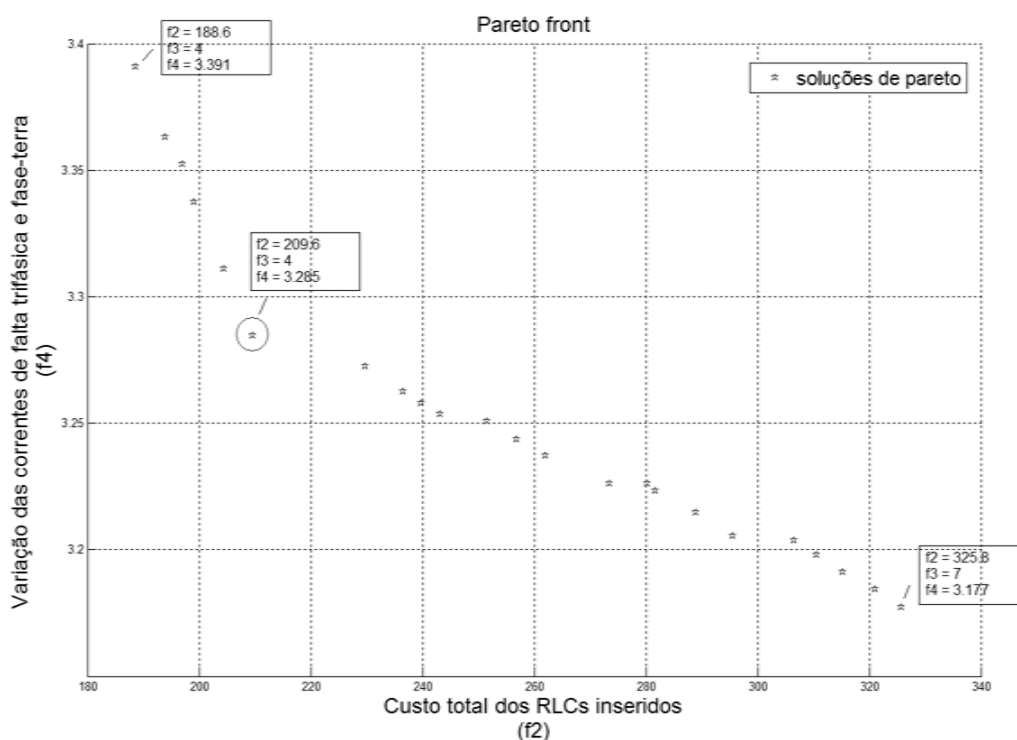


Figura 6.18 – Sistema 296 barras - Teste 3 - Fronteira de Pareto

Considerando os limites inferiores e superiores das funções f_2 , f_3 e f_4 igual aos valores apontados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, o Método do Critério Global propõe a solução destacada na mesma figura e apresentada na Tabela 6.30.

Tabela 6.28– Soluções do Teste 3 - Sistema 296 barras

	22	30	52,4
Método do	23	30	52,4
Critério Global	211	30	52,4
	218	30	52,4

Os valores das funções relativas a solução "ótima" proposta pelo Método do Critério Global estão na Tabela 6.29.

Tabela 6.29 – Funções objetivos do Teste 3 - Sistema 296 barras

SOLUÇÃO	CUSTO (f_2)	NÚMERO DE RLC (f_3)	NÍVEL DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO (f_4)
1	209.6	4	3,285

A Tabela 6.30 mostra os valores de curto da solução proposta para comparar com o caso base. A Figura 6.19 estampa as contribuições de curto no sistema para a falta na seção de barra 106s.

Tabela 6.30– Resultados do *Teste 3 - Solução 27 - Sistema 296 barras*

CURTO	DISJ	SEM ALOCAÇÃO			COM ALOCAÇÃO		
		MÓDULO DAS CORRENTES DE CURTO	RELAÇÃO X/R	% DA CAPACIDADE NOMINAL	MÓDULO DAS CORRENTES DE CURTO	RELAÇÃO X/R	% DA CAPACIDADE NOMINAL
106	408	43.09	17.14	1.08	33.80	21.05	0.84
292	407	39.29	17.74	0.98	31.89	20.62	0.80

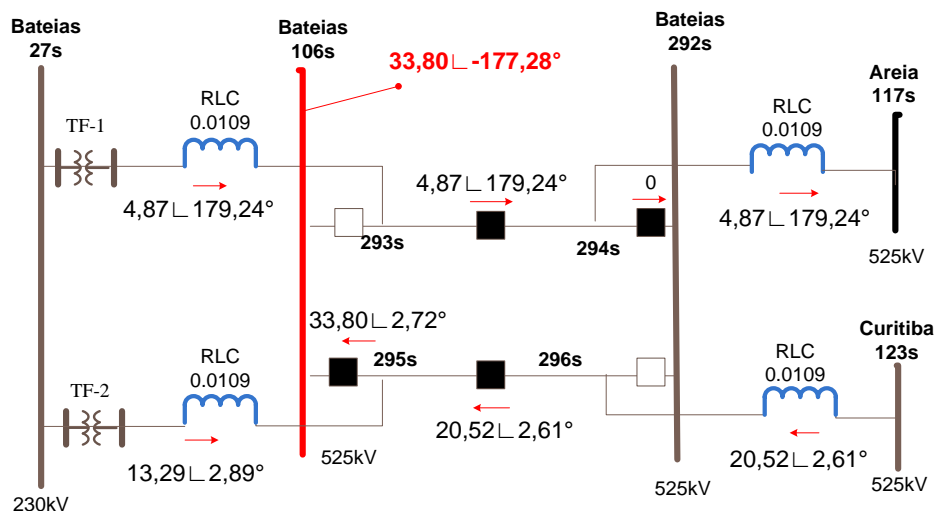


Figura 6.19 – Sistema 296 barras - *Teste 3 - Solução MCG - Contribuições para a falta na seção de barra 106s*

Todas as soluções apresentadas pelo algoritmo resolvem os problemas de superações dos dois disjuntores do caso base. A solução MCG afeta mais o caso de superação do disjuntor 408, com a porcentagem de capacidade nominal 22,22% inferior ao caso base. No caso do disjuntor 407, a porcentagem diminuiu 18,37%. Com a alocação dos RLCs proposta, a relação X/R equivalente dos disjuntores é 22,63% superior ao caso base de superação do disjuntor 408, e 16,23% para a superação do disjuntor 407. O módulo da corrente de curto com a alocação é 9,3 pu inferior ao módulo do caso base para a superação do disjuntor 408, 7,4 pu para a superação do disjuntor 407.

6.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A metodologia proposta soluciona os problemas dos disjuntores superados por corrente de curto-circuito simétrica e assimétrica. Os DLCCs limitaram as correntes de curto-circuito circulantes pelos disjuntores superados e também alteraram as relações X/R nos terminais dos equipamentos. Os resultados obtidos para os sistemas testes são semelhantes quando comparados os objetivos requeridos.

Cada teste foi simulado 10 vezes. e os resultados encontrados para as simulações foram iguais.

A Tabela 6.31 apresenta os circuitos séries (linhas) propostos pelo algoritmo nos testes 1, 2 e 3 para alocação dos RLCs do sistema equivalente 11 barras e a Tabela 6.32 apresenta a alocação para o sistema equivalente 296 barras.

Tabela 6.31– Soluções dos testes 1, 2 e 3 - Sistema 11 barras

TESTE	LINHA	IMPEDÂNCIA (Ω)	CUSTO (UM)
1	9	10	14
	10	15	12
2	2	18	15,2
	9	30	20
	10	30	20
3	9	10	14
	10	15	12

Tabela 6.32– Soluções dos testes 1,2 e 3 para o sistema 296 barras

TESTE	LINHA	IMPEDÂNCIA (Ω)	CUSTO (UM)
1	22	15	15
	23	15	30
	211	15	30
	218	10	25
2	22	30	52,4
	23	30	52,4
	137	30	52,4
	211	30	52,4
	218	30	52,4
3	22	30	52,4
	23	30	52,4
	211	30	52,4
	218	30	52,4

Todos os testes, para ambos os sistemas, apresentaram-se coerentes aos objetivos requeridos.

O teste 1 tem o objetivo de minimizar o custo e o número de RLCs para solucionar o problema dos disjuntores superados. O teste 2 objetiva a minimização do número de RLCs para solucionar o problema de superação e a minimização das correntes de falta através dos disjuntores. O objetivo do teste 3 é a minimização do número e custo dos RLCs para solucionar os casos de superação e a minimização das correntes de falta nos disjuntores superados.

O sistema 11 barras, com 5 casos de disjuntores superados minimizou o módulo das correntes de falta através dos disjuntores conforme a Tabela 6.33. A menor variação é resultado da alocação proposta pelo teste 1, e a maior variação é proposta pela solução do teste 2. O mesmo ocorre para o sistema 296 barras, com dois casos de superação, conforme a Tabela 6.34.

Tabela 6.33– Módulo das correntes do caso base e dos testes 1, 2 e 3 - Sistema 11 barras

CURTO	DE	PARA	MÓDULO DAS CORRENTES			
			CASO BASE	TESTE 1	TESTE 2	TESTE 3
3	3	10	14.90	12.94	11.91	12.27
6	3	6	16.74	14.84	13.05	14.22
6	3	10	14.90	12.94	11.91	12.27
8	3	8	14.90	12.94	11.91	12.27
8	3	10	14.90	12.94	11.91	12.27

Tabela 6.34– Módulo das correntes do caso base e dos testes 1, 2 e 3 - Sistema 296 barras

CURTO	DE PARA	MÓDULO DAS CORRENTES			
		CASO BASE	TESTE 1	TESTE 2	TESTE 3
106	408	43.09	33.99	33.04	33.80
292	407	39.29	33.88	31.09	31.89

A maior variação da relação X/R equivalente entre os terminais dos disjuntores (Tabela 6.35) ocorre no teste 2 do sistema 11 barras para todos os disjuntores. Neste caso, a solução propõe maior número de RLCs (3 unidades) e com dimensões superiores quando comparada as soluções dos outros testes. Isto explica a maior variação do módulo de corrente de falta para o teste 2 na Tabela 6.33.

Tabela 6.35– Relação X/R do caso base e dos testes 1, 2 e 3 - Sistema 11 barras

CURTO	DE	PARA	RELAÇÃO X/R			
			CASO BASE	TESTE 1	TESTE 2	TESTE 3
3	3	10	7,55	11,46	27,77	12,59
6	3	6	7,55	11,46	27,77	12,59
6	3	10	7,55	11,46	27,77	12,59
8	3	8	7,55	11,46	27,77	12,59
8	3	10	7,55	11,46	27,77	12,59

A variação da relação X/R equivalente dos terminais dos disjuntores em superação do sistema 296 barras, apresentadas na Tabela 6.36, varia conforme o teste. Isto ocorre por causa da configuração da subestação Bateias 525kV.

Tabela 6.36– Relação X/R do caso base e dos testes 1, 2 e 3 - Sistema 296 barras

CURTO	DE PARA	RELAÇÃO X/R			
		CASO BASE	TESTE 1	TESTE 2	TESTE 3
106	408	17.14	21.22	21.03	21.05
292	407	17.74	19.40	20.63	20.62

Os resultados para a porcentagem da capacidade nominal são apresentados na Tabela 6.37, para o sistema 11 barras, e na Tabela 6.38, para o sistema 296 barras.

Tabela 6.37– Porcentagem da capacidade nominal do caso base e dos testes 1, 2 e 3 - Sistema 11 barras

CURTO	DE	PARA	% DA CAPACIDADE NOMINAL			
			CASO BASE	TESTE 1	TESTE 2	TESTE 3
3	3	10	0,90	0,77	0,70	0,74
6	3	6	1,01	0,89	0,76	0,86
6	3	10	0,90	0,77	0,70	0,74
8	3	8	0,90	0,77	0,70	0,74
8	3	10	0,90	0,77	0,70	0,74

Tabela 6.38– Porcentagem da capacidade nominal do caso base e dos testes 1, 2 e 3 - Sistema 296 barras

CURTO	DE PARA	% DA CAPACIDADE NOMINAL			
		CASO BASE	TESTE 1	TESTE 2	TESTE 3
106	408	1.08	0.85	0.83	0.84
292	407	0.98	0.85	0.78	0.80

O resumo dos valores dos objetivos resultantes para todos os testes e a média de tempo de execução do algoritmo proposto para as simulações estão apresentados na Tabela 6.39, para o sistema 11 barras, e na Tabela 6.40, para o sistema 296 barras.

Tabela 6.39 – Desempenho da metodologia - Sistema 11 barras

RESULTADOS	TESTE 1	TESTE 2	TESTE 3
Tempo total de simulação	4mim	4mim	00h11.86mim
Número máximo de RLC	5	5	5
Violação de superação (f_1)	0	0	0
custo (f_2)	26	55.2	33.2
número de RLC (f_3)	2	3	2
número de RLC (f_4)	21.70	18.08	20.49

Tabela 6.40 – Desempenho da metodologia - Sistema 296 barras

RESULTADOS	TESTE 1	TESTE 2	TESTE 3
Tempo total de simulação	27mim	33mim	35mim
Número máximo de RLC	7	7	7
Violação de superação (f_1)	0	0	0
custo (f_2)	188.7	262	209.6
número de RLC (f_3)	4	5	4
número de RLC (f_4)	3.39	3,206	3,285

Com relação a obtenção da matriz Z para o cálculo de curto-circuito, a Tabela 6.41 mostra que para obtenção da matriz \dot{Z}_{mod} o esforço computacional é muito pequeno quando comparado com a obtenção da matriz \dot{Z}_{barra} . O tempo computacional fornecido na tabela considera a obtenção da matriz Z (resultante da inversão da matriz Y) desde a formação da matriz Y .

Tabela 6.41 – Esforço computacional para obtenção da matriz Z

SISTEMA	MODELAGEM DO SISTEMA	TEMPO TOTAL DE SIMULAÇÃO
5 barras	barra-ramo	0.005 segundos
11 barras	no nível de SE	0.010 segundos
291 barras	barra-ramo	0.131 segundos
296 barras	no nível de SE	0.139 segundos

6.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Os resultados obtidos da metodologia apresentam-se satisfatórios para o objeto em estudo, que é a otimização da alocação de RLCs visando solucionar o

problema de superação de corrente de curto-circuito simétrica e assimétrica dos disjuntores internos às subestações.

Porém, a metodologia apresentada no trabalho não tem o objetivo de apontar a melhor solução entre todas as soluções apresentadas e comparadas, pois cabe aos agentes das subestações, por intermédio do ONS, avaliar a viabilidade técnica e econômica das soluções encontradas.

A metodologia também não considera as superações por corrente de carga, nem por TRT, além de não considerar os efeito da reatância permanente do RLC no sistema após a alocação dos RLCs.

7 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o método da matriz \hat{Z}_{mod} para o cálculo de curto-circuito no nível de subestação e explorou sua eficiência através de uma aplicação prática, que é a solução de superação por corrente de curto-circuito dos disjuntores internos as subestações.

A solução para calcular de forma direta o valor das correntes de curto através dos disjuntores internos às subestações pode ser facilmente implementável em softwares especializados, como o ANAFAS. A utilização do cálculo de curto-circuito pelo método da matriz \hat{Z}_{mod} possibilita rapidez e agilidade para os agentes responsáveis das subestações caracterizadas como superadas, pois além de avaliar a superação dos disjuntores por corrente de curto-circuito simétrica e assimétrica, os resultados do cálculo de curto-circuito possibilitam avaliar todos os equipamentos de impedância atípica internos às subestações, tanto para a análise de superação quanto para a avaliação dos ajustes de proteção.

Além disto, foi formulado um problema de otimização para alocação de dispositivos limitadores de correntes de falta resolvido pela técnica de AGM incorporado à formulação estendida para cálculo de curto-circuito no nível de subestação. Os resultados numéricos apresentados pelos sistemas de 5 e 291 barras mostraram a eficiência das metodologias propostas. Assim, a utilização deste trabalho permite que os analistas obtenham uma localização adequada para a instalação dos limitadores com um custo reduzido de modo a contornar os problemas de superações dos disjuntores.

Seguindo a tendência deste trabalho, sugerem-se como trabalhos futuros:

- ampliar a análise de cálculo de curto-circuito para diferentes tipos e condições de falta;
- incorporar outras tecnologias de DLCCs ao algoritmo de alocação;
- incorporar estudo de fluxo de carga estendido a fim de analisar impacto dos DLCCs em regime permanente;
- avaliar a superação por TRT dos disjuntores

aplicar outras técnicas de inteligência artificial para solução do problema de otimização.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALSAÇ. O.; VEMPATI. N.; STOTT. B.; MONTICELLI. A. Generalized state estimation. *IEEE Trans. on Power Systems*. v. 13. n. 3. p. 1069–1075. Aug 1998.

AMON. F. J. Limitação de Curto Circuito: Experiência de Furnas e Análise de Novas Tecnologias Existentes e em Desenvolvimento cada vez mais necessárias para viabilizar a conexão de novos produtores independentes à rede básica. In: *IX ERLAC – Foz do Iguaçu*. Brasil. maio de 2001.

AMON. F. J.; FERNANDEZ. P. C.; ROSE. E. H.; D'AJUZ. A.; CASTANHEIRA. A. Brazilian Successful Experience in the Usage of Current Limiting Reactors for Short-Circuit Limitation. *International Conference on Power Systems Transients (IPST'05)*. p. 215–220. Montreal. Junho. 2005.

BARAN. A.; DUARTE. I. *Alocação de Limintadores de Corrente de Curto-Circuíto via Algoritmos Genéticos*. 2010. Trabalho de Graduação (Disciplina Tema Final) – Curso de Engenharia Elétrica. Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2010.

CLEMENTS. K. A.; COSTA. A. S. Topology error identification using normalized Lagrange multipliers. *IEEE Transactions Power Systems*. v. 13. n. 2. p. 347–353. May 1998.

D'AJUZ. A. Limitação de Curto-Circuito em Sistemas de Potência. *IEEE Power Engineering Society*. Brasilia. 2007.

D'AJUZ. A.; et al.. *Equipamentos Elétricos - Especificação e Aplicação em Subestações de Alta Tensão*. UFF. FURNAS. 1985.

EXPOSITO. A. G.; DE LA VILLA JAEN. A. Reduced substation models for generalized state estimation. *IEEE Trans. on Power Systems*. v. 16. n. 4. p. 839–846. Nov 2001.

FERNANDES. T. S. P. Medidas Corretivas. Disponível em: < <http://www.eletrica.ufpr.br/thelma/Medidas%20Corretivas.pdf> >. Acesso em: 17 maio 2010.

FERREIRA. C. S. *Alocação Ótima de Dispositivos Limitadores de Corrente de Curto-Circuito em Redes de Energia Elétrica Utilizando Algoritmos Genéticos*. 2006.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2006.

FERREIRA. C. S.; BORGES. C. L. T. Solução do problema de superação de disjuntores pela alocação ótima de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito utilizando algoritmos genéticos. *Sba Controle & Automação*. v.18. n.4.. p. 501-512. Dec. 2007.

GAMA. C.; LEONI. R. L.; GRIBEL. J.; FRAGA. R.; EIRAS. M. J.; PING. W.; RICARDO. A.; CAVALCANTI. J. TENÓRIO. R. Brazilian North South Interconnection - Application of Thyristor Controlled Series Compensation to Damp Inter-Area Oscillation Mode. *Cigré*, 1998. 21. rue d'Artois. F-75008 Paris

HO. C. W.; RUEHLI. A. E.; BRENNAN. P. A. The modified nodal approach to network analysis. *IEEE Trans. on Circuits and Systems*. v. 22. n. 6. p. 504 - 509. Jun 1975.

KHORRAMI. M.; NADERI . M. S.; NEJAI. N. K. Using Interphase Power Controller to Control the Short Circuit Level in Transmission Power Network. *POWERCON International Conference on Power System Technology*. p. 24 - 28. Oct. 2010.

KINDERMANN. G. *Curto-Circuito*. 3^a Edição do autor. Florianópolis: UFSC-EEL-LABPLAN. (email do autor: gerald@labplan.ufsc.br). 2003.

LANES. M. M. *Limitador Eletrônico de Corrente de Curto-Circuito baseado em Circuito Ressonante controlado por Dispositivos Semicondutores de Potência*. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Juiz de Fora. 2006.

LOURENÇO. E. M.; SILVA. N. S.; SIMÕES COSTA. A. J. A. Fast Decoupled Steady-State Solution for Power Networks Modeled at the Bus Section Level. *IEEE Bucharest Power Tech*. Jun. 2009.

LOURENÇO. E. M.; SIMÕES COSTA. A. J. A.; CLEMENTS. K. A.; CERNEV. R. A. Topology error identification method directly based on collinearity tests. *IEEE Trans. on Power Systems*. v. 21. n. 4. p. 1920-1929. Nov 2006.

LOURENÇO. E. M.; SIMÕES COSTA. A.; RIBEIRO JR. R. Steady-state solution for power networks modeled at bus section level. *IEEE Transactions Power Systems*. v. 25. n. 1. pp. 10-20. Feb 2010.

MAHSEREDJIAN. J.; ALVARADO. F. Creating an Electromagnetic Transients Program in MATLAB: MatEMTP. *IEEE Transactions on Power Delivery*. v. 12. n. 1. p. 380-388. Jan 1997.

MAMED FILHO. J. *Manual de equipamentos elétricos*. Volume 1. 2ª ed.. Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos Editora. 1994.

MONTEIRO. A. M.. *Um Estudo de Dispositivos Limitadores de Corrente de Curto-circuito com Ênfase no IPC (Interphase Power Controller)*. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2005.

MONTICELLI. A. The impact of modeling short circuits branches in state estimation. *IEEE Trans. on Power Systems*. v. 8. n. 1. p. 364-370. Feb 1993.

MONTICELLI. A.; GARCIA. A. Modeling zero impedance branches in power system state estimation. *IEEE Trans. on Power Systems*. v. 6. n. 4. p. 1561-1570. Nov 1991.

OLIVEIRA. F. D. C. *Limitador de Corrente de Falta Supercondutor*. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Espírito Santo. 2005.

ONS. *Submódulo 4.3. Metodologia para elaboração das propostas de ampliações e reforços*. Disponível em: <<http://www.ons.org.br>>. Acesso em: 10/10/2011.

ONS. *Submódulo 11.3. Estudos de curto-circuito*. Disponível em: <<http://www.ons.org.br>>. Acesso em: 10/10/2011.

ONS. *Submódulo 18.2. Relação dos sistemas e modelos computacionais*. Disponível em: <<http://www.ons.org.br>>. Acesso em: 10/10/2011.

RIBEIRO JR.. R. *Fluxo de Potência na Rede Modelada no Nível de Seção de Barras*. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2005.

ROSAS. G. B.; LOURENÇO. E. M.; FERNANDES. T. S. P. Modelagem de ramos de impedância nula no problema de fluxo de potência ótimo. *Controle & Automação* (Impresso). 2012.

ROSAS. G. B. *Modelagem de Redes no Nível de Subestação para Estudos de Fluxo de Potência Ótimo*. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2008.

SATO. F. *Corrente assimétrica de curto-circuito*. Disponível em: <<http://www.dsee.fee.unicamp.br/~sato/assimetria.pdf>>. Acesso em: 10/09/2011.

SINDER. D. *Métodos de Cálculo da Tensão de Restabelecimento Transitória para Análise da Superação de Disjuntores de Alta Tensão*. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2007.

STEVENSON. W. D. *Elements of Power System Analysis*. McGraw-Hill 1976.

SOLON. *Solon Manufacturing Co.* Disponível em: <<http://www.solonmfg.com/controls/special/sf6.cfm>>. Acesso em: 01/12/2012.

SZUVOVIVSKI. I.; 2008. *Alocação simultânea de bancos de capacitores e reguladores de tensão em sistemas de distribuição usando Algoritmos Genéticos e Fluxo de Potência Ótimo*. Curitiba. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Paraná.

TENG. J. H.; LU. C. N. . 2007. Optimum Fault Current Limiter Placement. *Intelligent Systems Applications to Power Systems*. p. 1-6.

WESTPHAL. H.. *Algoritmo genético aplicado à otimização multiobjetivo em redes de distribuição de petróleo e derivados*. 2006. Curitiba. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2006.

APÊNDICE A - SISTEMA ORIGINAL 5 BARRAS

A.1 - SISTEMA BARRA-RAMO 5 BARRAS

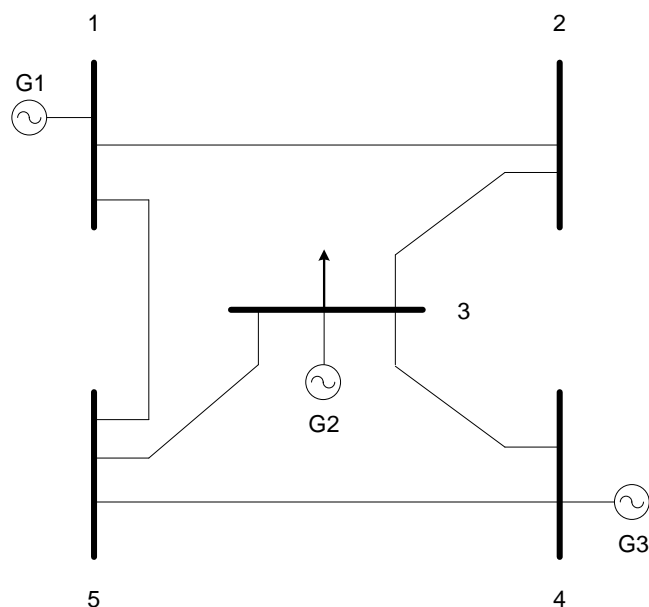


Figura A.1 – Sistema teste original 5 barras – modelagem barra-ramo

Tabela A.1 - Dados das linhas para o sistema 5 barras

RAMO	DE	PARA	R (PU)	X1=X2=X0 (PU)	BL (PU)	NÍVEL DE TENSÃO (KV)
1	1	2	0.092	0.168	0.030	138
2	2	3	0.091	0.126	0.020	69
3	3	4	0.093	0.110	0.015	69
4	3	5	0.084	0.136	0.012	69
5	5	4	0.093	0.152	0.011	69
6	5	1	0.091	0.126	0.010	138

Tabela A.2 - Dados das barras para o sistema 5 barras

BARRA	XG1=XG2=XG0 (PU)	XGN (PU)
1	0.100	0.000
3	0.100	0.000
4	0.200	0.000

A.2 - SISTEMA 11 BARRAS – MODELAGEM NO NÍVEL DE SUBESTAÇÃO

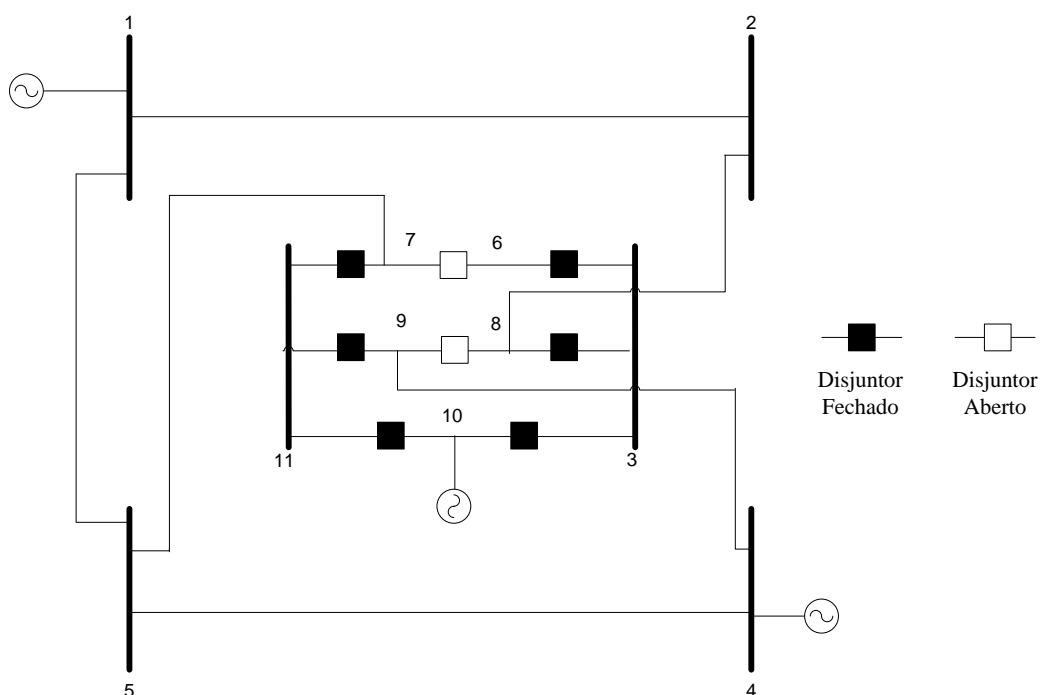


Figura A.2 – Sistema 11 barras – nível de seção de barras

Tabela A.3 - Dados das linhas para o sistema 11 barras

RAMO	DE	PARA	R (PU)	$X1=X2=X0$ (PU)	BL (PU)	NÍVEL DE TENSÃO (KV)
1	1s	2s	0.092	0.168	0.030	138
2	2s	8s	0.091	0.126	0.020	69
3	3s	6s	0.000	0.000	0.000	69
4	3s	8s	0.000	0.000	0.000	69
5	3s	10s	0.000	0.000	0.000	69
6	10s	11s	0.000	0.000	0.000	69
7	7s	11s	0.000	0.000	0.000	69
8	9s	11s	0.000	0.000	0.000	69
9	9s	4s	0.093	0.110	0.015	69
10	7s	5s	0.084	0.136	0.012	69
11	5s	4s	0.093	0.152	0.011	69
12	5s	1s	0.091	0.126	0.010	138

Tabela A.4 - Dados das barras para o sistema 11 barras

BARRA	$XG1=XG2=XG0$ (PU)	XGN (PU)
1s	0.100	0.000
4s	0.200	0.000
10s	0.100	0.000

APÊNDICE B - SISTEMA ORIGINAL 291 BARRAS

B.1 - SISTEMA BARRA-RAMO 291 BARRAS

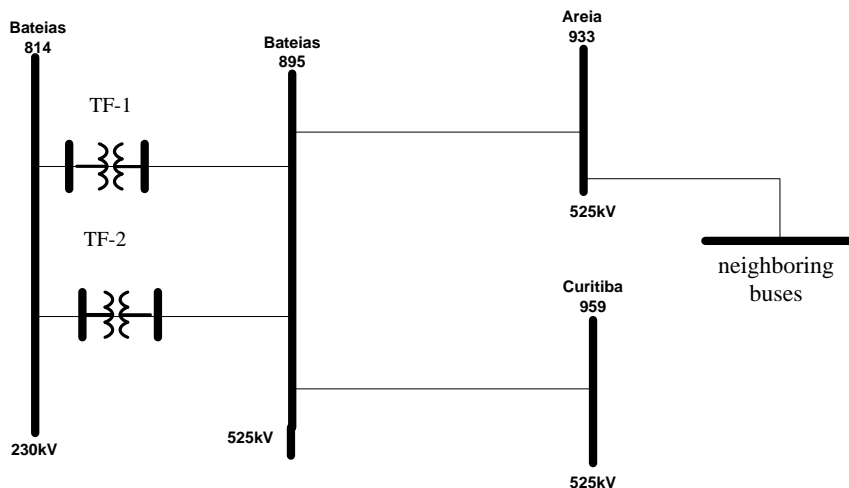


Figura B.1 – Sistema teste original 291 barras – modelagem barra-ramo

B.2 - SISTEMA 296 BARRAS - MODELAGEM NO NÍVEL DE SUBESTAÇÃO

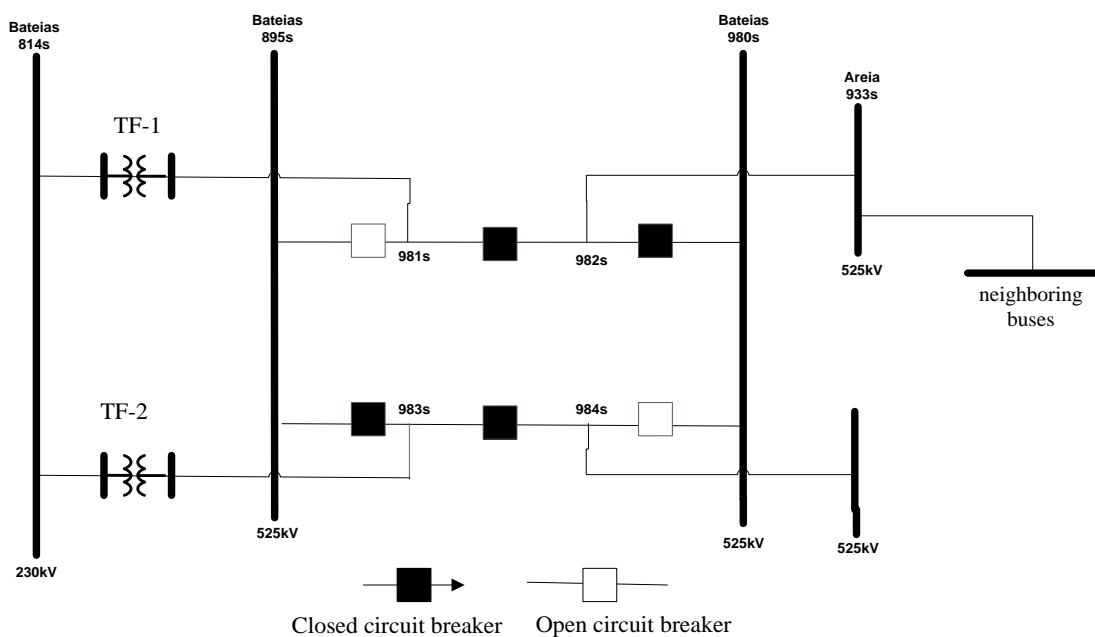


Figura B.2 – Sistema teste 296 barras – modelagem no nível de seção de barras da subestação Bateiras 525kV