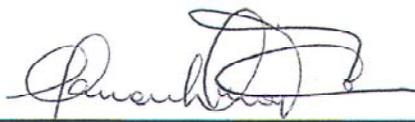


ALOCAÇÃO ÓTIMA DE DISPOSITIVOS LIMITADORES DE CORRENTE DE  
CURTO-CIRCUITO EM REDES DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO  
ALGORITMOS GENÉTICOS

Clarissa Santos Ferreira

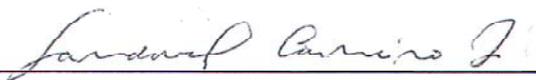
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS  
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS  
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA.

Aprovada por:



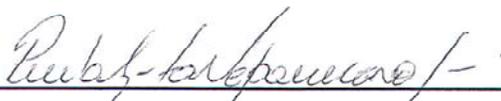
---

Prof.ª Carmen Lucia Tancredo Borges, D. Sc.



---

Prof. Sandoval Carneiro Júnior, Ph. D.



---

Prof. Paulo Augusto Nepomuceno Garcia, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2006

FERREIRA, CLARISSA SANTOS

Alocação Ótima de Dispositivos Limitadores de Corrente de Curto-Circuito em Redes de Energia Elétrica Utilizando Algoritmos Genéticos [Rio de Janeiro] 2006

XIV, 155 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Elétrica, 2006)

Dissertação - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Dispositivos limitadores de curto-circuito
2. Superação de equipamentos
3. Algoritmos Genéticos

I. COPPE/UFRJ II. Título ( série )

*Dedico este trabalho aos meus pais, Tarciso e Tuquinha, e ao  
meu amado Roberto*

## AGRADECIMENTOS

Ao meu marido Roberto Farizele pelo incentivo e apoio dado, sem o qual este trabalho não seria possível.

Aos meus queridos pais, Tarciso e Tuquinha, e aos meus irmãos, Leonardo e Livia, pelo enorme carinho, amor e paciência.

À professora Carmen Lucia Tancredo Borges pela orientação e por todas as discussões que contribuíram para o aprimoramento deste trabalho.

Aos colegas da Eletrobrás pelo companheirismo e compreensão. Especialmente agradeço ao Marcos Simas Parentoni, Paulo Cesar de Almeida, Elizabeth Almeida Franceschett e Débora Rosana Ribeiro Penido.

Ao Antônio Carlos Ferreira por toda ajuda dada durante o curso de mestrado.

À Eletrobrás pela oportunidade de cursar o mestrado.

Aos engenheiros Juan Ignacio Rossi e Sergio Porto, pelas informações prestadas que auxiliaram na elaboração deste trabalho.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ALOCAÇÃO ÓTIMA DE DISPOSITIVOS LIMITADORES DE CORRENTE DE  
CURTO-CIRCUITO EM REDES DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO  
ALGORITMOS GENÉTICOS

Clarissa Santos Ferreira

Março/2006

Orientadora: Carmen Lucia Tancredo Borges

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho apresenta uma metodologia para auxiliar nos estudos de limitação das correntes de curto-circuito através da alocação ótima de dispositivos limitadores de corrente em sistemas com problemas de superação de equipamentos por corrente de curto-circuito. A detecção da superação é feita somente para disjuntores, através da análise tanto do módulo da corrente de curto-circuito que o disjuntor deve interromper, como também da relação  $X/R$  do sistema. Sua modelagem é feita como um problema de otimização baseado em Algoritmos Genéticos, levando em consideração os requisitos de custo mínimo, alocação de um número mínimo de dispositivos e máxima redução da corrente de curto-circuito nas barras do sistema. A ferramenta computacional desenvolvida utiliza de modo integrado o programa ANAFAS para cálculo de defeitos, mantendo a compatibilidade com as bases de dados utilizadas em estudos de curto-circuito no setor elétrico brasileiro. Foram feitas simulações com o sistema IEEE14 barras, para validar o algoritmo, e com o sistema da ELETROSUL, para analisar a solução de problemas práticos. Os resultados comprovam a robustez e eficiência do método, apresentando soluções que satisfazem às restrições com custo de investimento reduzido para todos os cenários analisados.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

OPTIMAL FAULT CURRENT LIMITERS ALOCATION IN ELECTRICAL POWER  
SYSTEMS USING GENETIC ALGORITHMS

Clarissa Santos Ferreira

March/2006

Advisor: Carmen Lucia Tancredo Borges

Department: Electrical Engineering

This work presents a methodology for helping in short-circuit limiting studies via the indication of the optimal allocation of fault current limiters in systems where the equipment interruption capability is exceeded. Short-circuit analyses are performed throughout the system to identify the circuit breakers which will be subject to short-circuit currents above their nominal interruption capacity. The methodology is modeled as an optimization problem using Genetic Algorithms, taking into consideration the objectives of minimum cost, minimum number of fault current limiters allocated and maximum reduction of the short-circuit level at the system buses. The computational tool developed uses the ANAFAS program to calculate the short-circuit current in order to keep the compatibility with the data base used in short-circuit studies in the Brazilian electricity sector. The methodology has been tested using the IEEE14 bus system, to validate the algorithm, and the ELETROSUL system, to analyze the performance for an actual problem. The results have confirmed the robustness and effectiveness of the methodology in finding solutions that satisfy the constraints with reduced investments cost for all the analyzed scenarios.

# Índice

Capítulo 1	Introdução.....	1
1.1	Objetivos.....	3
1.2	Revisão Bibliográfica.....	4
1.3	Estrutura do Trabalho.....	7
Capítulo 2	Superação de Equipamentos e Dispositivos Limitadores de Corrente de Curto-Circuito.....	8
2.1	Contribuições das Correntes de Curto-Circuito.....	8
2.2	Superação de Subestações e Equipamentos.....	10
2.2.1	Superação por Corrente de Carga.....	10
2.2.2	Superação de Disjuntores por Tensão de Restabelecimento Transitória.....	11
2.2.3	Superação por Corrente de Curto-Circuito.....	12
2.3	Medidas Adotadas para Limitar o Curto-Circuito.....	20
2.3.1	Medidas Operativas.....	21
2.3.2	Modificação da Configuração da Rede.....	23
2.3.3	Recapitação das Instalações e Substituição dos Equipamentos.....	24
2.3.4	Utilização de Dispositivos Limitadores de Curto-Circuito (DLCs).....	25
Capítulo 3	Introdução aos Algoritmos Genéticos.....	34
3.1	Resolução de Problemas de Otimização.....	34
3.2	Algoritmos Genéticos.....	35
3.3	Implementação dos Algoritmos Genéticos.....	36
3.4	Codificação.....	37
3.5	Inicialização.....	38
3.6	Função de Aptidão.....	38
3.7	Escalamento Linear.....	39
3.8	Operadores dos Algoritmos Genéticos.....	41
3.8.1	Seleção.....	41
3.8.2	Cruzamento.....	43
3.8.3	Mutação.....	45
3.9	Parâmetros Genéticos.....	46

3.9.1	Tamanho da População .....	47
3.9.2	Taxa de Cruzamento.....	47
3.9.3	Taxa de Mutação .....	47
3.9.4	Cr�terio de Parada.....	48
3.9.5	Tamanho ou Comprimento do Cromossomo ( <i>L</i> ).....	48
Capítulo 4	Metodologia de Aloca�o de DLC Desenvolvida.....	49
4.1	Premissas Adotadas .....	50
4.2	Estrutura da Metodologia .....	53
4.2.1	Programas Computacionais Utilizados.....	54
4.3	Modelagem Matemática .....	56
4.3.1	Defini�o da Fun�o Objetivo.....	56
4.3.2	Defini�o da Fun�o de Aptidão .....	58
4.3.3	Valores e Custos dos DLCs.....	64
4.4	Estrutura do Cromossomo .....	64
4.5	Implementa�o do Modelo Computacional.....	69
4.5.1	Características dos Algoritmos Genéticos Implementados .....	73
Capítulo 5	Resultados .....	75
5.1	Sistemas Elétricos de Teste .....	75
5.1.1	Sistema IEEE14 Barras .....	75
5.1.2	Sistema Elétrico da ELETROSUL .....	76
5.2	Considera�es.....	78
5.2.1	Custos utilizados.....	78
5.2.2	Fun�es de Aptidão Testadas .....	79
5.2.3	Conjunto de Parâmetros do AG e Fatores Penalidade Utilizados nos Testes. 79	
5.2.4	Regime Permanente.....	80
5.3	Resultados dos Testes com o Sistema IEEE14.....	81
5.3.1	Objetivo 1 .....	83
5.3.2	Objetivo 2 .....	104
5.3.3	Resumo dos resultados dos testes do sistema IEEE14 .....	108
5.4	Resultados Numéricos com o Sistema da ELETROSUL.....	112
5.4.1	Objetivo 1 .....	115
5.4.2	Objetivo 2 .....	119
5.4.3	Resumo dos resultados dos testes do sistema ELETROSUL .....	123

Capítulo 6	Conclusões.....	125
	Referências Bibliográficas.....	128
Apêndice A	Teoria Básica de Curto-Circuito .....	132
Apêndice B	Síntese dos Principais DLCs .....	143
Apêndice C	Gráficos de Convergência do AG .....	151

## Índices das Figuras

Figura 1	Evolução da corrente assimétrica de curto-circuito ( $I_f$ ) ao longo do tempo .....	13
Figura 2	Corrente típica de curto-circuito .....	14
Figura 3	Contribuição das correntes para curto na barra 1 .....	15
Figura 4	Contribuição das correntes para curto-circuito na linha 1 .....	16
Figura 5	Contribuição das correntes de curto-circuito para condição de <i>line-out</i> .....	17
Figura 6	Componente CC numa corrente de curto-circuito assimétrica, a partir do início da falta .....	19
Figura 7	Limitação do curto com seccionamento de barra [23] .....	21
Figura 8	Exemplo de <i>by-pass</i> de linha.....	22
Figura 9	Comportamento dos DLCs [10] .....	27
Figura 10	Locais de instalação de DLCs .....	28
Figura 11	DLC utilizado seccionando barramentos .....	29
Figura 12	DLC utilizado em série com os circuitos alimentadores.....	30
Figura 13	DLC utilizado em série com os circuitos de saída .....	31
Figura 14	RLCs existentes na subestação de Mogi das Cruzes.....	33
Figura 15	Diagrama de blocos do AG .....	37
Figura 16	Gráfico de escalamento linear .....	40
Figura 17	Representação da Roleta .....	42
Figura 18	Exemplo de cruzamento de um ponto .....	44
Figura 19	Exemplo de cruzamento de dois pontos .....	44
Figura 20	Exemplo de cruzamento uniforme .....	45
Figura 21	Exemplo de mutação por troca de bit.....	46
Figura 22	Exemplo da definição do nível máximo de curto-circuito admitido por cada barra .....	51

Figura 23	Corrente que passa pelo disjuntor definida por aproximação como sendo a corrente calculada para curto-circuito na barra em que está ligado o disjuntor .....	52
Figura 24	Estrutura da Metodologia .....	53
Figura 25	Sistema exemplo.....	65
Figura 26	Bits do cromossomo para cada linha.....	65
Figura 27	Parte do cromossomo relativa aos circuitos .....	66
Figura 28	Bits do cromossomo para as barras do sistema .....	66
Figura 29	Parte do cromossomo relativa às barras .....	67
Figura 30	Representação completa do cromossomo .....	68
Figura 31	DLCs inseridos para o cromossomo do exemplo.....	69
Figura 32	Fluxograma do programa computacional implementado.....	70
Figura 33	Fluxograma com a integração dos módulos do programa computacional .....	71
Figura 34	Variação da taxa de mutação em função do número da geração	74
Figura 35	Diagrama unifilar do sistema IEEE14 barras.....	75
Figura 36	Diagrama unifilar do sistema equivalente da ELETROSUL .....	77
Figura 37	Diagrama unifilar do comportamento do sistema em regime permanente .....	82
Figura 38	Legenda do diagrama unifilar .....	83
Figura 39	Teste 1 - Localizações possíveis para os DLCs (tracejado).....	85
Figura 40	Teste 1 - Sistema em regime permanente.....	87
Figura 41	Teste 2 - Localizações possíveis para os DLCs (tracejado).....	89
Figura 42	Teste 2 - Sistema em regime permanente.....	90
Figura 43	Teste 3 - Localizações possíveis para os DLCs (tracejado).....	92
Figura 44	Teste 3 - Sistema em regime permanente.....	94
Figura 45	Teste 4 - Localizações possíveis para os DLCs (em azul).....	95
Figura 46	Teste 4 - Sistema em regime permanente.....	97
Figura 47	Teste 5 - Sistema em regime permanente.....	100

Figura 48	Teste 6 - Localizações possíveis para os DLCs (em azul) .....	101
Figura 49	Teste 6 - Sistema em regime permanente.....	103
Figura 50	Teste 8 - Sistema em regime permanente.....	107
Figura 51	Diagrama unifilar do comportamento do sistema em regime permanente .....	114
Figura 52	Teste r1 - Sistema em regime permanente .....	118
Figura 53	Teste r2 - Sistema em regime permanente .....	122
Figura A1	Sistema exemplo para cálculo de curto-circuito .....	132
Figura A2	Sistema equivalente para curto-circuito trifásico .....	133
Figura A3	Equivalente para curto-circuito trifásico .....	134
Figura A4	Diagrama do sistema para curto-circuito monofásico.....	136
Figura A5	Equivalente para curto-circuito monofásico .....	138
Figura A6	Diagrama do sistema para curto-circuito bifásico.....	138
Figura A7	Equivalente para curto-circuito bifásico .....	139
Figura A8	Diagrama do sistema para curto-circuito bifásico-terra .....	139
Figura B1	TCSC operando como limitador de curto .....	144
Figura B2	TPSC utilizado como DLC.....	145
Figura B3	Desenho esquemático do DLC pirotécnico da ABB [5] .....	148
Figura B4	Diagrama esquemático de um IPC com n ramos [12].....	150
Figura C1	Teste 1 - Gráfico de convergência do AG.....	151
Figura C2	Teste 2 - Gráfico de convergência do AG.....	151
Figura C3	Teste 3 - Gráfico de convergência do AG.....	152
Figura C4	Teste 4 - Gráfico de convergência do AG.....	152
Figura C5	Teste 5 - Gráfico de convergência do AG.....	153
Figura C6	Teste 6 - Convergência do AG.....	153
Figura C7	Teste 7 - Convergência do AG.....	154
Figura C8	Teste 8 - Convergência do AG.....	154
Figura C9	Teste r1 - Gráfico de convergência do AG .....	155
Figura C10	Teste r2 - Convergência do AG.....	155

## Índice das Tabelas

Tabela 1	Curto-circuito trifásico em Tucuruí 500kV .....	9
Tabela 2	Contribuição de Itaipu 500kV para curto-circuito em Tucuruí 500kV .....	9
Tabela 3	Valores padronizados de $\tau$ e $X/R$ .....	19
Tabela 4	Principais DLCs existentes ou em fase de desenvolvimento .....	25
Tabela 5	Valores de DLC utilizados .....	66
Tabela 6	Custo dos RLCs utilizados .....	78
Tabela 7	Limite de tensão aceitável para a operação do sistema em regime permanente .....	80
Tabela 8	Valores de curto-circuito do caso base do IEEE14 .....	81
Tabela 9	Teste 1 - Valores adotados da corrente de curto suportável por cada barra .....	84
Tabela 10	Teste 1 - Reator inserido em barra .....	85
Tabela 11	Teste 1 - Valores de curto calculados após a inserção de RLC ..	86
Tabela 12	Teste 2 - Reator inserido em circuito .....	88
Tabela 13	Teste 2 - Valores de curto calculados após a inserção de RLC ..	89
Tabela 14	Teste 3 - Valores adotados da corrente de curto suportável por cada barra .....	91
Tabela 15	Teste 3 - Reator inserido em barra .....	93
Tabela 16	Teste 3 - Valores de curto calculados após a inserção de RLC ..	93
Tabela 17	Teste 4 - Reator inserido em ramo .....	96
Tabela 18	Teste 4 - Valores de curto calculados após a inserção de RLC ..	96
Tabela 19	Teste 5 - Valores adotados da corrente de curto suportável por cada barra .....	98
Tabela 20	Teste 5 - Reator inserido em barra .....	99
Tabela 21	Teste 5 - Valores de curto calculados após a inserção de RLC ..	99
Tabela 22	Teste 6 – Reatores inseridos em circuitos e transformadores ...	102

Tabela 23	Teste 6 - Valores de curto calculados após a inserção de RLC	102
Tabela 24	Teste 7 - Reator inserido em barra .....	105
Tabela 25	Teste 8 - Reator inserido em barra .....	106
Tabela 26	Teste 8 - Valores de curto calculados após a inserção de RLC	106
Tabela 27	Percentual do valor do curto trifásico em relação ao caso base	108
Tabela 28	Valor da relação $X/R$ trifásica.....	109
Tabela 29	Percentual do valor do curto monofásico em relação ao caso base .....	109
Tabela 30	Valor da relação $X/R$ monofásica .....	110
Tabela 31	Resultados dos testes com o sistema IEEE14 .....	111
Tabela 32	Valores das constantes dos fatores penalidade utilizados .....	112
Tabela 33	Parâmetros de controle e operadores genéticos dos AGs.....	112
Tabela 34	Valores de curto-circuito das barras com equipamentos superados no caso base da ELETROSUL para o ano de 2010.....	113
Tabela 35	Teste r1 – Locais escolhidos para permitir a inserção dos RLCs ... .....	115
Tabela 36	Teste r1 - Reatores inseridos nas barras .....	116
Tabela 37	Teste r1 - Reator inserido em circuito.....	117
Tabela 38	Teste r1 - Valores de curto calculados após a inserção de RLC	117
Tabela 39	Teste r1 - Queda de tensão nos reatores .....	119
Tabela 40	Teste r2 - Reator inserido em circuito.....	120
Tabela 41	Teste r2 - Reatores inseridos nas barras .....	120
Tabela 42	Teste r2 - Valores de curto calculados após a inserção de RLC	121
Tabela 43	Teste r2 - Queda de tensão nos reatores .....	121
Tabela 44	Resultados dos testes com o sistema da ELETROSUL .....	123

# Capítulo 1

## Introdução

A contínua expansão dos sistemas elétricos de potência tem procurado atender adequadamente ao aumento da demanda dos modernos parques industriais e ao crescimento dos grandes centros urbanos com a construção de novas unidades geradoras próximas aos centros de carga, ampliação das linhas de transmissão, aumento da interligação entre ramais, construção de novas subestações e repotenciação das subestações já existentes. Este cenário leva a um aumento significativo das correntes de curto-circuito que podem apresentar níveis superiores aos valores nominais e de operação dos equipamentos por onde circulam. Sendo assim, além dos problemas que estas correntes podem causar nos equipamentos diretamente envolvidos, podem ocorrer ainda solicitações dinâmicas e térmicas nas linhas, cabos, transformadores e equipamentos de manobra, capazes de comprometer a integridade do sistema ou a redução da vida útil dos equipamentos. Essas solicitações merecem maior destaque no que se refere aos disjuntores pois, aos mesmos, cabe a missão de interromper as correntes de curto-circuito e desenergizar o equipamento com defeito.

Uma solução utilizada para reduzir o risco de danos associados a correntes de curto-circuito seria substituir todos os equipamentos superados das subestações por outros de maior capacidade. No entanto, esse procedimento apresenta custos elevados e grande complexidade de planejamento e execução, envolvendo risco de acidentes, erros de montagem e ainda, no período de transição, há uma redução da confiabilidade da instalação devido aos desligamentos prolongados necessários para executar as obras.

São encontradas na literatura diversas técnicas para limitação das correntes de defeito utilizando dispositivos denominados dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito – DLC [1]. Estes dispositivos permitem manter em serviço os equipamentos cuja capacidade de manobra seria ultrapassada na ausência de um processo de limitação. Na ocorrência de curto-circuito, os DLCs atuam rapidamente limitando a corrente elétrica a

níveis suportados pelos demais componentes elétricos do sistema já instalados, evitando assim a necessidade de substituição.

O problema de descobrir a melhor alternativa para inserção de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito no sistema é bastante complexo, pois os mesmos podem estar localizados seccionando dois barramentos de uma subestação ou em série com os circuitos e transformadores. Além disso, os DLCs podem ter diversos valores e serem de diferentes tecnologias. A solução ótima para este problema é a inserção de DLCs no sistema com a melhor configuração possível, isto é, que resulte em custo baixo e, ao mesmo tempo, em diminuição da corrente de curto-circuito de forma que o sistema estudado não tenha mais equipamentos superados.

A resolução deste problema sem o auxílio de um programa específico é muito trabalhosa. Estudam-se diversas alternativas avaliando seu desempenho e se escolhe a melhor delas. Ainda assim, só se pode garantir que a solução escolhida seja a melhor entre as alternativas estudadas que, muitas vezes, não retratam todas as situações possíveis. Além disso, este trabalho exige tempo e a utilização de uma equipe com conhecimentos específicos. Na literatura, os métodos propostos para inserir limitadores de corrente de curto-circuito no sistema apresentam procedimentos práticos para a solução do problema, porém sem buscar a solução ótima [2], [3], [4] e [5].

A solução proposta nesta dissertação é o desenvolvimento de uma metodologia que automatize a tarefa de fazer a alocação ótima de DLCs em redes de energia elétrica. Matematicamente, este é um problema de otimização complexo, de variáveis inteiras, difícil de ser solucionado por métodos tradicionais de otimização. Por isso, são utilizados Algoritmos Genéticos como método de otimização. A cada resultado encontrado pela metodologia é feito, separadamente, o estudo de fluxo de potência do sistema para averiguar se o resultado proposto se comporta em regime permanente sem violar as restrições de operação.

Os estudos para avaliar a metodologia proposta são realizados em dois sistemas: o sistema IEEE14 barras e o sistema elétrico da ELETROSUL. Este último foi escolhido porque já tem, atualmente, problemas de disjuntores que estão com a capacidade de interrupção de curto-circuito superada, conforme divulgado em [6].

## 1.1 Objetivos

Esse trabalho apresenta o desenvolvimento de uma metodologia para auxiliar nos estudos de limitação de curto-circuito através da alocação ótima de DLCs em sistemas com problemas de superação de equipamentos por corrente de curto-circuito. A detecção da superação é feita somente para disjuntores, através da análise tanto do módulo da corrente de curto-circuito que o disjuntor deve interromper como também da relação  $X/R$  do sistema. Desta forma, é possível avaliar a superação pela componente simétrica e assimétrica da corrente de curto-circuito. Os tipos de curto considerados são os trifásicos e os monofásicos.

Para solucionar o problema das subestações com disjuntores superados, é estudada a inserção no sistema de um tipo de DLC denominado Reator Limitador de Curto-Circuito – RLC, pelo fato do RLC ser de grande uso no Brasil. A inserção de RLCs pode ser feita em série com circuitos e transformadores ou seccionando barramentos.

O processo de otimização é feito baseado em Algoritmos Genéticos pois os mesmos são capazes de fazer a busca em um espaço de solução mais abrangente, logo, com mais probabilidade de encontrar o ótimo global. Além disso, os Algoritmos Genéticos não necessitam de estimativa sobre um ponto de partida da região de solução. São consideradas diversas alternativas para a implementação do Algoritmo Genéticos visando obter um melhor desempenho do método.

A solução ótima encontrada pela metodologia deve ser aquela com menor custo e maior redução do curto-circuito no sistema de forma que, após a inserção de RLCs, o sistema não tenha mais problemas de equipamentos superados.

O programa computacional desenvolvido é implementado no MATLAB e, para a aplicação dos Algoritmos Genéticos, utiliza-se a *toolbox* “*Genetic Algorithm*”, também do MATLAB [7]. A ferramenta utilizada para fazer o cálculo do curto-circuito no sistema e identificar automaticamente as subestações que estão com equipamentos superados é o programa ANAFAS [8] pelo fato desta ferramenta ser adotada no setor elétrico brasileiro. Desta forma, visa-se permitir que os especialistas no setor tenham uma ferramenta computacional compatível com as bases de dados utilizadas nos estudos de curto-circuito.

Também para manter a compatibilidade com a base de dados existente no setor, utiliza-se, para análise em regime permanente, o programa ANAREDE [9].

## 1.2 Revisão Bibliográfica

Nos tempos atuais, a procura pelo tema abordado neste trabalho está crescendo visto que muitos equipamentos existentes no sistema elétrico não foram projetados para atender à grande expansão da rede, estando muitos deles superados atualmente ou com previsão de superação em breve.

Informações sobre os dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito são encontradas na literatura. [10] introduz o problema da limitação da corrente de falta, descreve o comportamento dos dispositivos limitadores de corrente em geral, mostrando suas principais aplicações, os locais de instalação dos DLCs e suas vantagens. Também cita os efeitos que o DLC causa no sistema e vice-versa. [11] faz um apanhado geral de aplicação de limitadores de curto apresentando os principais locais de instalação.

[12] descreve as soluções gerais para limitação de correntes de curto apresentando os principais DLCs existentes no momento e dá ênfase no IPC – *Interphase Power Controller*. O problema da superação dos limites de interrupção de correntes de curto-circuito de disjuntores, devido à entrada em operação de novas unidades geradoras, é apresentado.

[13] cita que a conexão de produtores independentes à rede básica contribui para o aumento da corrente de curto-circuito para níveis não previstos anteriormente em estudos de planejamento à longo prazo. São descritas diversas soluções para o problema, entre elas, os dispositivos limitadores de corrente de curto. São abordadas as novas tecnologias disponíveis ou em fase de desenvolvimento como os DLCs supercondutores e os DLCs pirotécnicos.

[1] e [14] fazem uma revisão bibliográfica da literatura a respeito dos DLCs e, em especial, dos Relatórios do ONS. Detêm-se no exame dos dispositivos mais promissores para uma aplicação imediata no Brasil, e buscam atualizar as perspectivas de desenvolvimento e comercialização de novos dispositivos.

[15] apresenta a experiência de FURNAS na limitação das correntes de curto-circuito e faz um breve levantamento das tecnologias disponíveis e em fase de desenvolvimento nessa área. Ao mesmo tempo, analisa situações em que a prática da limitação das correntes de curto-circuito vem se tornando cada vez mais necessária, para viabilizar novos empreendimentos de geração, com a conexão de produtores independentes à rede básica.

[4] estuda a aplicação de DLCs em subestações da área Rio que sofrem com o aumento da corrente de curto devido à implantação de novas gerações térmicas na região. Os dispositivos considerados são os que já apresentam experiência operativa em situações semelhantes. O relatório busca soluções aderentes ao planejamento de médio e longo prazos, privilegiando aquelas que não imponham restrições operativas ao sistema, quando em condição normal de funcionamento, e que possam até mesmo reverter alterações topológicas porventura já executadas em caráter emergencial. Também desenvolve uma sistemática de estudos para questões dessa natureza, delineando uma metodologia aplicável a outras áreas com problemas similares.

[3] apresenta uma retrospectiva da recapitação procedida na subestação de Mogi das Cruzes 345/230 kV, com ênfase na análise realizada para inclusão de reatores limitadores de corrente. Mostra que os RLCs foram eficientes na redução de custos de substituição de chaves e disjuntores bem como de reforços nos barramentos e malha de terra, ao limitarem o efeito proveniente das correntes de curto-circuito.

[5] trata especialmente do DLC pirotécnico indicando suas características e descrevendo seu princípio de funcionamento através de um exemplo real.

Muitos artigos abordam o desenvolvimento de novas tecnologias como solução para contornar os altos níveis de curto-circuito presentes nos sistemas elétricos atuais. Particularmente, [16] apresenta a tecnologia de FACTS para uso como limitador de curto-circuito e cita suas vantagens. [17] faz uma breve descrição da utilização do TPSC – *Thyristor Protected Series Compensation* para limitar a corrente de curto e [18] apresenta o TCSC – *Thyristor Controlled Series Capacitor* como limitador de curto-circuito informando suas principais características e demonstrando seu comportamento. O conceito dos limitadores de curto-circuito baseados em supercondutores é abordado em [2], [19], [20], [21] e [22].

Foi feita também uma pesquisa da teoria sobre curto-circuito e equipamentos de proteção onde se destacam os livros [23], [24], [25], [26], [27], [28] e [29]. Em especial, [23] explica como se identifica a superação dos equipamentos por corrente de curto-circuito e descreve vários métodos para eliminar a superação tal como: seccionamento de barras realizado por meio de chaves, reator ou DLC, interligação de redes através de sistema de corrente contínua, transformador de maior reatância, entre outros. Quando não for possível limitar a corrente de curto, o livro indica algumas formas de resolver o problema, entre elas destacam-se: a permuta dos disjuntores, compra de novos equipamentos e modificações nos disjuntores para aumentar sua capacidade de interrupção.

Entre os assuntos relacionados à superação de equipamentos, o relatório [6] apresenta os níveis de curto-circuito verificados e esperados no horizonte 2005-2007 nas barras do Sistema Interligado Nacional, indicando a relação  $X/R$  destas barras e apresentando um diagnóstico daquelas que estão com possíveis problemas de superação da capacidade de interrupção dos disjuntores. [30], [31] e [32] abordam algumas diretrizes e critérios para análise de superação de equipamentos, [33] foi elaborado para tratar especialmente das medidas mitigadoras para a superação de equipamentos de alta tensão, [34] introduz a metodologia de cálculo da tensão de restabelecimento transitório para estudos de superação de disjuntores e [35] mostra como a componente assimétrica de curto-circuito pode influenciar na capacidade de interrupção dos disjuntores. [36] apresenta a metodologia adotada na CHESF para analisar a superação de disjuntores devido a corrente de curto-circuito e tensão de restabelecimento transitória.

Como a ferramenta utilizada para cálculo de curto-circuito foi o ANAFAS, informações gerais sobre este programa foram adquiridas no manual do usuário [37] e no artigo [8].

Como o método desenvolvido nesta dissertação faz uso de Algoritmos Genéticos, foi feita uma pesquisa bibliográfica sobre o tema, sendo que os documentos [38], [39] e [40] abordam a teoria de Algoritmos Genéticos, [41] apresenta a resolução de problemas de otimização usando evolução simulada, faz comparação com os métodos clássicos e descreve os princípios básicos do AG tais como: codificação e função de aptidão. Apresenta também os operadores de seleção, cruzamento e mutação utilizados nos Algoritmos Genéticos assim como o processo de convergência do método.

[7], [42] e [43] introduzem os conceitos da ferramenta de Algoritmos Genéticos existente para ser usada no MATLAB, descrevendo seus principais elementos e estrutura de dados, além de dar uma visão geral da teoria de Algoritmos Genéticos.

### **1.3 Estrutura do Trabalho**

Este trabalho está dividido em 6 capítulos, onde o Capítulo 1 traz a introdução, contendo as considerações iniciais sobre o problema e a revisão bibliográfica.

No Capítulo 2 é mostrada a teoria de superação de equipamentos, necessária para definição das premissas utilizadas no trabalho. São mostrados os conceitos atuais para determinar a superação de um equipamento e as medidas que devem ser tomadas para evitar a superação. Também neste capítulo, são apresentadas as características dos dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito, indicando os possíveis locais de instalação.

O Capítulo 3 é dedicado às características dos Algoritmos Genéticos.

O Capítulo 4 aborda o modelo matemático desenvolvido e o Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos nos testes com o método proposto.

As conclusões e sugestões de trabalhos futuros são mostradas no Capítulo 6.

No Apêndice A é mostrada a teoria básica de curto-circuito e, no Apêndice B, a síntese dos principais dispositivos encontrados na literatura.

Finalmente, o Apêndice C apresenta os gráficos de convergência do algoritmo para os testes realizados.

## Capítulo 2

# Superação de Equipamentos e Dispositivos Limitadores de Corrente de Curto-Circuito

Os estudos de curto-circuito são de grande importância para os sistemas de potência pois possibilitam a seleção de disjuntores e dos demais dispositivos de proteção. Através de estudos de curto-circuito, é possível determinar se um equipamento está ou não com a capacidade de suportar curto-circuito superada. Assim, interessa saber a corrente máxima a que os equipamentos podem ser expostos, durante condições de faltas simétricas e assimétricas. Caso a corrente máxima indicada nos estudos de curto-circuito for superior à capacidade de determinado equipamento, medidas corretivas devem ser adotadas para limitar a corrente de curto-circuito no local estudado. O método de cálculo dos diferentes tipos de curto-circuito está apresentado no Apêndice A.

### 2.1 Contribuições das Correntes de Curto-Circuito

O curto-circuito em uma determinada barra influencia significativamente apenas a região que está próxima eletricamente desta barra. Isso faz com que as usinas, mesmo as de grande porte, só contribuam significativamente no valor do curto-circuito nas barras localizadas em suas vizinhanças. Logo, diferentemente do que acontece com os estudos de fluxo de potência, os estudos de curto-circuito podem ser realizados analisando localmente a região de interesse.

Como exemplo, Itaipu é a maior usina hidrelétrica do mundo. Abastece o Brasil e o Paraguai com 18 máquinas de 700MW dando um total de 12.600 MW. Tucuruí é a maior hidrelétrica 100% brasileira, com capacidade total de 6.870 MW (dados de agosto de 2005) e previsto para atingir 8.370 MW em 2007. Se for aplicado curto-circuito trifásico em uma das barras de 500kV de Tucuruí, o resultado será o seguinte para o ano de 2005:

Tabela 1 Curto-circuito trifásico em Tucuruí 500kV

Nome da Barra (Número)	Curto-Circuito Trifásico	
	Módulo (MVA)	Ângulo (grau)
Tucuruí 500 (3000)	25.218,28	-89,13

Através do cálculo das correntes de contribuição utilizando o programa ANAFAS, pode-se concluir que a contribuição da barra de 500kV de Itaipu CA para um curto-circuito trifásico em Tucuruí 500kV é desprezível, conforme mostrado na Tabela 2.

Isto acontece visto que as duas usinas estão distantes eletricamente uma da outra, o que mostra que o estudo de curto-circuito pode ser feito analisando apenas algumas vizinhanças a partir do ponto de falta.

Tabela 2 Contribuição de Itaipu 500kV para curto-circuito em Tucuruí 500kV

Nome da Barra de (Número)	Nome da Barra para (Número)	Curto-Circuito Trifásico	
		Módulo (MVA)	Ângulo (grau)
Itaipu 500 (209)	F Iguaçu 500A (228)	-0,8	-74,4
Itaipu 500 (209)	F Iguaçu 500B (229)	-0,7	-74,4
Itaipu 500 (209)	F Iguaçu 500C (230)	-0,7	-74,4
Itaipu 500 (209)	F Iguaçu 500D (231)	-0,7	-74,3
Itaipu 500 (209)	Referência (0)	3,0	-74,4

## **2.2 Superação de Subestações e Equipamentos**

Os equipamentos elétricos devem ser dimensionados para suportarem as ampliações que ocorrerem no sistema durante o período de tempo em que ficam em operação [23]. Os subsídios necessários para a definição das características nominais desses equipamentos são fornecidos por estudos de planejamento do sistema a longo prazo. Entretanto, durante o tempo em que o equipamento estiver em operação, é possível que ocorram mudanças na configuração do sistema que não haviam sido previstas no planejamento original tornando-se necessário averiguar periodicamente se a capacidade nominal do equipamento atende às solicitações impostas pelo sistema. No caso de ser detectada alguma superação da característica nominal, devem ser estudadas medidas que evitem ou pelo menos adiem a troca do equipamento. A detecção da superação de subestações e equipamentos é feita levando-se em conta os seguintes critérios:

- Superação por corrente de carga
- Superação de disjuntores por Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT)
- Superação por corrente de curto-circuito

A seguir é abordada uma breve descrição sobre cada um destes critérios e os métodos para evitar a superação.

### **2.2.1 Superação por Corrente de Carga**

A superação por corrente de carga, também chamada de sobrecarga, é caracterizada pela ocorrência de correntes superiores à corrente nominal do equipamento para o sistema operando com sua rede completa ou em condição de emergência. Para evitar a ocorrência de sobrecarga, nada se pode fazer a não ser a execução de obras para expansão do sistema.

Antes da execução de obras, o procedimento mais comum a ser adotado deve ser a comprovação ou não da superação, que pode ser detectada pelo refinamento dos resultados. Como exemplo, se a sobrecarga é detectada apenas para condições de emergência crítica significa que a possibilidade de ocorrer sobrecarga é pequena e, caso ocorra, pode ser por

curta duração. Neste caso, para ocorrer superação, é necessário que o momento em que ocorre a emergência coincida com o instante de ocorrência das condições de carga que tornam essa emergência crítica.

### **2.2.2 Superação de Disjuntores por Tensão de Restabelecimento Transitória**

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.

A tensão de restabelecimento transitória (TRT) é a diferença de potencial entre os terminais do disjuntor que se estabelece após a separação elétrica dos seus contatos em seguida à interrupção de uma corrente já que, após o acionamento mecânico dos contatos no período anterior ao amortecimento das oscilações, existe o afastamento dos mesmos, mas a conexão elétrica se mantém através do arco elétrico que rompe concomitante ao início do afastamento.

A superação do disjuntor por TRT fica caracterizada pela ultrapassagem dos valores de suportabilidade dielétrica ou térmica do seu meio de extinção do arco, ou seja, quando, considerada a abertura do disjuntor, a tensão entre os contatos imposta pelo sistema for superior à especificada, seja por magnitude ou por taxa de crescimento.

As suportabilidades dos disjuntores à tensão de restabelecimento transitória e à taxa de crescimento da TRT (TCTRT) devem ser comparadas com os valores fornecidos por estudos de transitórios elétricos devidos a manobras de abertura de correntes de curto-circuito. Embora a TRT seja função da corrente de curto-circuito, existem casos em que o disjuntor pode estar superado por TRT sem que esteja por corrente de curto-circuito.

A possibilidade de superação dos disjuntores por TRT deve ser investigada quando o curto-circuito no local for igual ou superior a 90% da capacidade de interrupção do disjuntor. Para essas magnitudes de corrente de falta, a recuperação do meio dielétrico entre

contatos após a interrupção de um curto-circuito pode ser insuficiente para suportar as solicitações impostas pela rede (valor de pico ou taxa de crescimento da TRT). É nessa situação que há maior risco de haver uma reignição entre contatos por TRT, após a extinção da falta, acarretando a danificação do disjuntor.

De uma forma geral, um aumento na indutância do sistema contribui para elevar o valor de pico da TRT enquanto que um acréscimo na capacitância provoca diminuição na TCTRT. Sendo assim, uma possível medida utilizada quando ocorre superação do disjuntor por TRT é a instalação de capacitores no lado da fonte, para o caso de faltas terminais (ocorridas praticamente sobre os terminais dos disjuntores), ou no lado da linha, para faltas quilométricas (ocorridas sobre linhas de transmissão à distância de poucos quilômetros do disjuntor).

### **2.2.3 Superação por Corrente de Curto-Circuito**

Durante a ocorrência de curto-circuito na rede, os equipamentos devem ser capazes de suportar todas as solicitações de corrente que surgirem até o instante em que os disjuntores atuarem isolando o trecho em que ocorreu a falta. Os próprios disjuntores precisam atuar com rapidez, a fim de minimizar os efeitos da falta sobre o resto do sistema. Os mesmos devem ser capazes tanto de abrir um circuito em falta como também de interromper as correntes que surgirem quando, em manobra de fechamento, estabelecerem novamente o curto-circuito.

A corrente de curto-circuito é constituída por uma componente periódica, geralmente referida como componente CA, e uma componente aperiódica, freqüentemente denominada componente unidirecional ou CC. Durante o processo de interrupção de um curto-circuito por um disjuntor trifásico, as correntes em duas ou nas três fases terão certo grau de assimetria, que dependerá do tipo de falta e do instante de sua ocorrência. Como o processo de interrupção em cada pólo do disjuntor é independente dos demais, é necessário que cada pólo seja capaz de operar satisfatoriamente na eventualidade da ocorrência simultânea dos valores mais desfavoráveis possíveis das componentes CA e CC na respectiva fase. A Figura 1 mostra a evolução da corrente assimétrica de curto-circuito ( $I_f$ ), formada pela soma das componentes CA e CC, ao longo do tempo. Através desta figura, é

possível visualizar os parâmetros que devem ser definidos numa especificação para garantir a operação correta do disjuntor nessas condições.

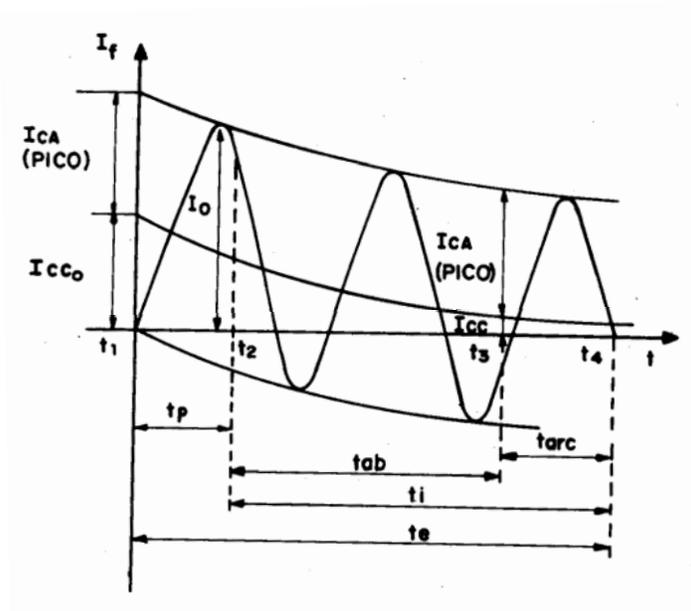


Figura 1 Evolução da corrente assimétrica de curto-circuito ( $I_f$ ) ao longo do tempo

onde:

$t_1$  – instante de ocorrência da falta;

$t_2$  – instante de energização da bobina de abertura do disjuntor;

$t_3$  – instante da separação dos contatos do disjuntor;

$t_4$  – instante de interrupção da corrente;

$t_p$  – tempo de atuação da proteção;

$t_{ab}$  – tempo de abertura do disjuntor;

$t_{arc}$  – tempo de duração do arco elétrico;

$t_i$  – tempo de interrupção da falta pelo disjuntor;

$t_e$  – tempo para eliminação da falta;

$I_{CA(pico)}$  – valor de crista da componente CA da corrente de falta;

$I_{CC0}$  – valor inicial da componente CC da corrente de falta (notar que, para a condição de máxima assimetria admitida,  $I_{CC0} = I_{CA}$ ).

A corrente de curto-circuito apresenta as seguintes características:

- A parte inicial da senoide é deslocada em relação ao eixo dos tempos, em razão da componente contínua (CC) que decai exponencialmente com o tempo.
- A magnitude da componente alternada (CA) decai exponencialmente com o tempo em função das reatâncias subtransitórias, transitórias e síncronas dos geradores e das tensões atrás dessas impedâncias. A Figura 2 mostra os primeiros ciclos de uma típica corrente de curto-circuito que o disjuntor deve interromper.

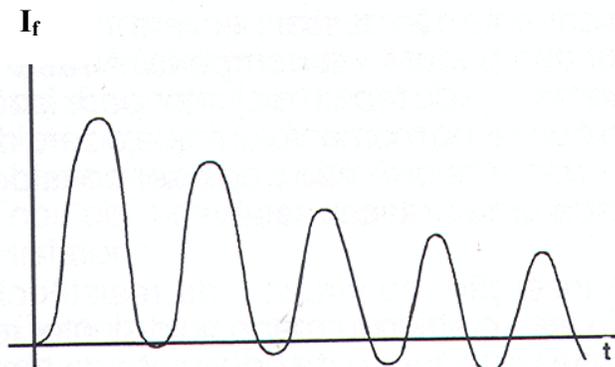


Figura 2 Corrente típica de curto-circuito

- A corrente é mais assimétrica ou menos assimétrica, isto é, mais deslocada ou menos deslocada em relação ao seu eixo, dependendo do instante da falta. Assim, uma corrente de curto-circuito será simétrica quando, em razão do instante de ocorrência da falta, a componente unidirecional for nula.

A superação por curto-circuito é caracterizada pela ocorrência de correntes de curto-circuito, simétricas ou assimétricas, com magnitudes superiores àquelas definidas como nominais para os equipamentos em análise, em condições normais e de emergência [30]. A

análise da superação por curto-circuito deve então ser realizada através do estudo das correntes de curto-circuito simétricas e assimétricas.

### 2.2.3.1 Superação por corrente simétrica de curto-circuito

Neste caso, a superação se dá quando a corrente simétrica de defeito máxima esperada no local for superior à corrente nominal de curto suportada dos equipamentos. Devem ser avaliados os níveis das correntes de curtos-circuitos monofásicos e trifásicos. Nos estudos finais, a análise da superação de equipamentos, mais especificamente de disjuntores, deve ser feita para a condição mais severa de curto-circuito que pode acontecer em três situações.

(1) Curto na barra

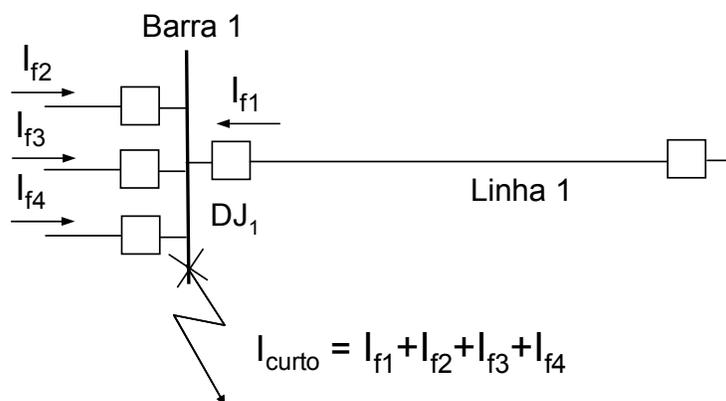


Figura 3 Contribuição das correntes para curto na barra 1

Para ocorrência de curto-circuito na barra, a corrente que passa pelo disjuntor será igual à corrente de contribuição do circuito onde o equipamento está conectado. Como exemplo, no caso da Figura 3:

$$I_{DJI} = I_{f1} \quad (2.1)$$

(2) Curto na linha

Para curto-circuito na linha, deve-se considerar a redução da contribuição do próprio circuito na corrente de falta terminal máxima que cada disjuntor irá interromper, ou seja, da corrente máxima de curto na subestação deverá ser subtraída a parcela da corrente de falta que passa pelo circuito alimentado pelo disjuntor em análise, para se determinar a corrente de falta máxima que deverá ser interrompida por cada disjuntor da subestação.

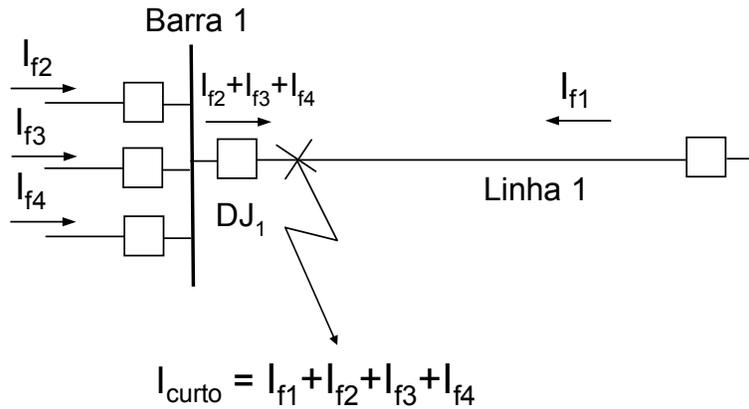


Figura 4 Contribuição das correntes para curto-circuito na linha 1

Note pela Figura 4 que o defeito que o disjuntor 1 deve ser capaz de interromper corresponde à corrente total de curto-circuito menos a contribuição da linha 1:

$$I_{DJI} = I_{curto} - I_{f1} = I_{f2} + I_{f3} + I_{f4} \quad (2.2)$$

(3) Condição de *line-out*

Esta situação ocorre quando o curto é aplicado na saída de linha que está com a extremidade oposta aberta, conforme indicado na Figura 5.

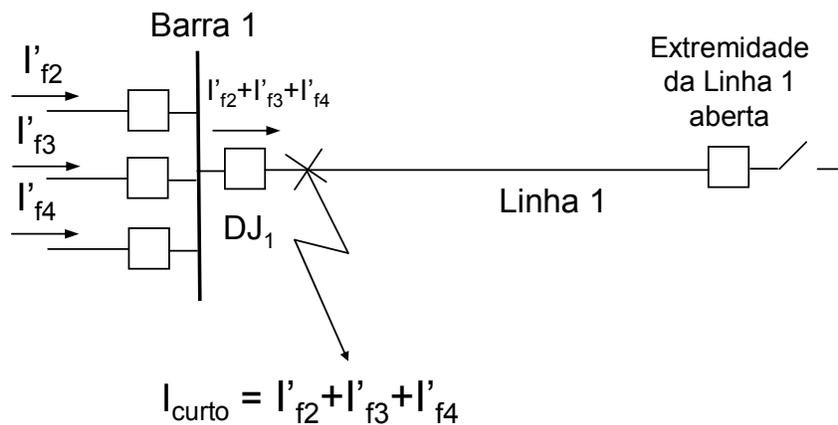


Figura 5 Contribuição das correntes de curto-circuito para condição de *line-out*

Estudos indicam que, na maioria dos casos, a condição de *line-out* é a mais severa pois o disjuntor deverá interromper toda a corrente de falta [23], ou seja:

$$I_{DJI} = I_{curto} \quad (2.3)$$

### 2.2.3.2 Superação por corrente assimétrica de curto-circuito

A verificação da superação por corrente assimétrica de curto-circuito deve ser feita analisando o valor de  $\tau$  e, conseqüentemente, da relação  $X/R$  do sistema, conforme será mostrado a seguir.

A corrente total de curto-circuito assimétrica é representada pela equação:

$$I_{assimétrica} (\%) = 100 I_{simétrica} (1 + e^{-t/\tau}) \quad (2.4)$$

Onde  $t$  é o tempo contado a partir do início da falta (antes da abertura do disjuntor),  $I_{simétrica}$  é a corrente de curto-circuito simétrica e  $\tau$  é a constante de tempo do circuito visto

dos terminais do disjuntor. Observa-se pela Equação (2.5) que  $\tau$  é função da relação  $X/R$  da rede, vista do ponto de falta.

$$\tau = \frac{X}{\omega R} \quad (2.5)$$

Sendo que:

$$\omega = 2\pi f \quad (2.6)$$

$$f = 60\text{Hz} \quad (2.7)$$

$X$  - reatância equivalente de Thévenin vista do ponto de falta

$R$  - resistência equivalente de Thévenin vista do ponto de falta

O valor da componente unidirecional (CC) da corrente de curto-circuito (responsável pela assimetria da corrente), decai exponencialmente conforme a equação:

$$I_{cc} (\%) = 100 e^{-t/\tau} \quad (2.8)$$

Na Figura 6 é mostrada a curva de decaimento exponencial da componente contínua da corrente de curto-circuito em função do tempo. Pela figura, é possível observar a influência da relação  $X/R$  do sistema na composição da corrente de curto-circuito ao longo do tempo. Nota-se que a relação  $X/R$  pode influenciar diretamente na capacidade de interrupção de curto-circuito de um equipamento pois quanto maior for essa relação, mais lento é o decaimento da corrente, logo, maior será a componente unidirecional desta corrente.

A forma de onda da corrente de curto-circuito em função do tempo pode ser obtida diretamente através da utilização de programas convencionais de cálculo de transitórios eletromagnéticos, onde pode ser adotada a representação trifásica da rede em estudo, por meio de suas resistências e reatâncias a 60Hz [23].

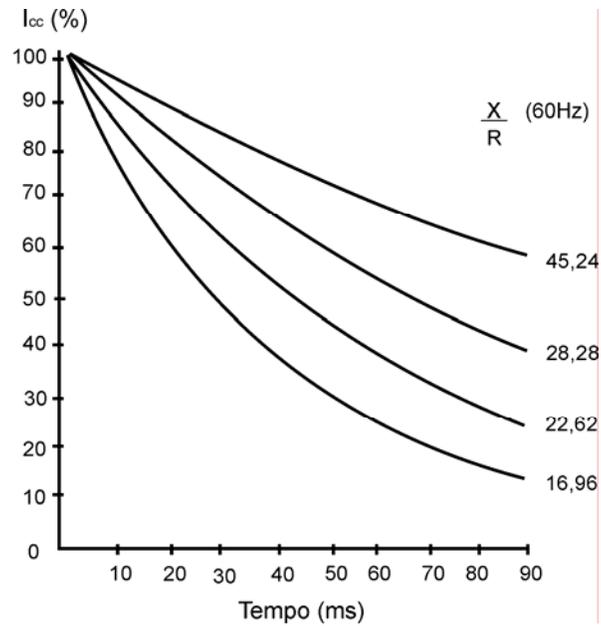


Figura 6 Componente CC numa corrente de curto-circuito assimétrica, a partir do início da falta

A Tabela 3 apresenta os valores de  $\tau$  correspondentes aos valores  $X/R$  apresentados na Figura 6.

Tabela 3 Valores padronizados de  $\tau$  e  $X/R$

$\tau$ (ms)	45	60	75	120
$X/R$	16,96	22,62	28,28	45,24

Atualmente, com a instalação de novas usinas térmicas em locais próximos aos grandes centros de carga, os níveis de corrente de curto-circuito estão alcançando patamares próximos a 90% da capacidade de interrupção simétrica dos disjuntores [35]. Como a relação  $X/R$  também tem aumentado, esses disjuntores já podem estar superados pelos valores assimétricos das correntes de curto-circuito. Sendo assim, é importante fazer a análise da superação de disjuntores levando em conta não apenas a corrente de curto simétrica como também a relação  $X/R$  do sistema. Segundo [30], a identificação do potencial de superação de disjuntores por correntes simétricas e assimétricas se dá, de

forma simplificada, pela verificação de um dos cinco critérios listados nas Inequações (2.9) a (2.13).

$$X/R < 16,96 \text{ e } I_{curto} > 90\% I_{curton} \quad (2.9)$$

$$16,96 < X/R < 22,62 \text{ e } I_{curto} > 85\% I_{curton} \quad (2.10)$$

$$22,62 < X/R < 28,28 \text{ e } I_{curto} > 80\% I_{curton} \quad (2.11)$$

$$28,28 < X/R < 45,24 \text{ e } I_{curto} > 70\% I_{curton} \quad (2.12)$$

$$X/R > 45,24 \quad (2.13)$$

Sendo que  $I_{curto}$  é a corrente simétrica calculada através de um programa para cálculo de curto-circuito e  $I_{curton}$  é a corrente nominal de curto-circuito suportada pelo disjuntor. Se qualquer um dos critérios listados for atingido, significa que o disjuntor está em estado de alerta, com possibilidade de estar superado.

Os métodos adotados para limitar o curto-circuito e evitar a superação de equipamentos estão apresentados no item a seguir.

### **2.3 Medidas Adotadas para Limitar o Curto-Circuito**

Quando for detectada superação de equipamentos por corrente de curto-circuito, as medidas adotadas para limitação da corrente de defeito podem ser divididas em:

- Medidas operativas
- Modificação da configuração da rede
- Recapitação da subestação e substituição dos equipamentos
- Utilização de dispositivos limitadores de curto-circuito

A seguir será feita a abordagem de cada uma delas.

### 2.3.1 Medidas Operativas

Geralmente são medidas simples e de baixo custo que devem ser tomadas de forma provisória até que se desenvolva uma alternativa definitiva para o problema.

- Seccionamento de barra

Com o seccionamento de barras, ocorre o aumento das impedâncias de seqüência positiva, negativa e zero provocando redução dos níveis de curto-circuito. A Figura 7 apresenta o seccionamento de um barramento onde as barras A e B foram divididas nas seções A1 e A2, e B1 e B2, respectivamente, para limitar o nível de curto-circuito.

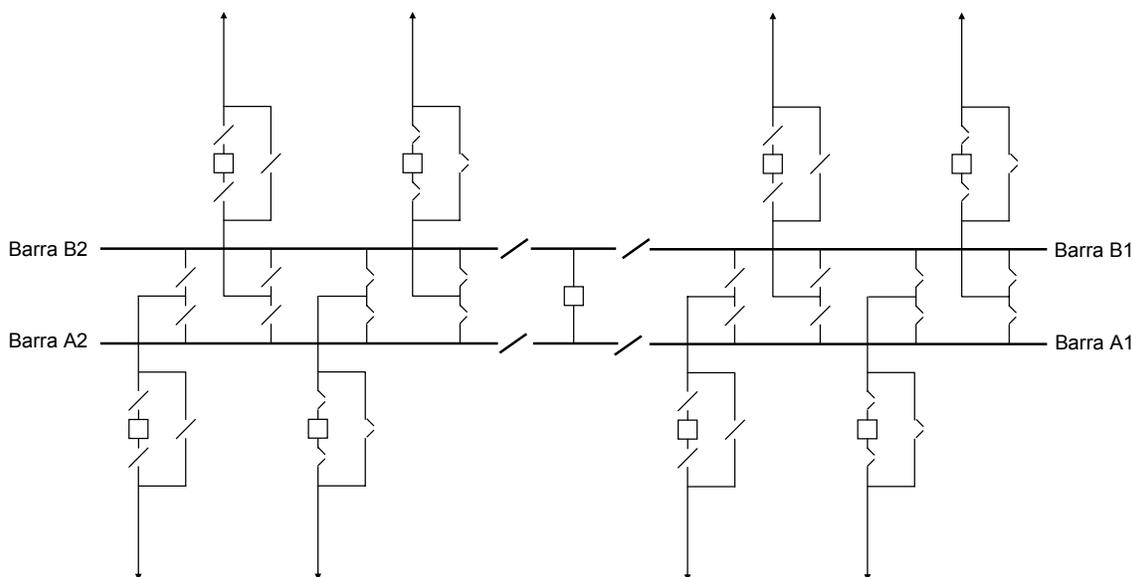


Figura 7 Limitação do curto com seccionamento de barra [23]

O ponto de seccionamento deve ser, preferencialmente, o vão do disjuntor de interligação, para que este possa ser utilizado em qualquer das duas seções do barramento, conforme figura anterior. Para que as perdas não fiquem elevadas, é necessário balancear a divisão de cargas entre as duas seções. Caso isto não seja possível, o aumento nas perdas é inevitável. Além disso, o seccionamento de barra provoca redução da confiabilidade do

sistema pois as duas seções do barramento podem ficar com tensões diferentes e a carga mais importante poderá não estar na seção mais confiável.

- *By-pass* de linhas nas SEs

Quando um barramento está com o nível de curto-circuito superado, pode-se verificar a possibilidade de *by-passar* algum circuito que está ligado neste barramento, conforme Figura 8. O objetivo é fazer com que a linha *by-passada* não contribua para o curto-circuito na subestação, reduzindo assim o nível de curto-circuito no barramento.

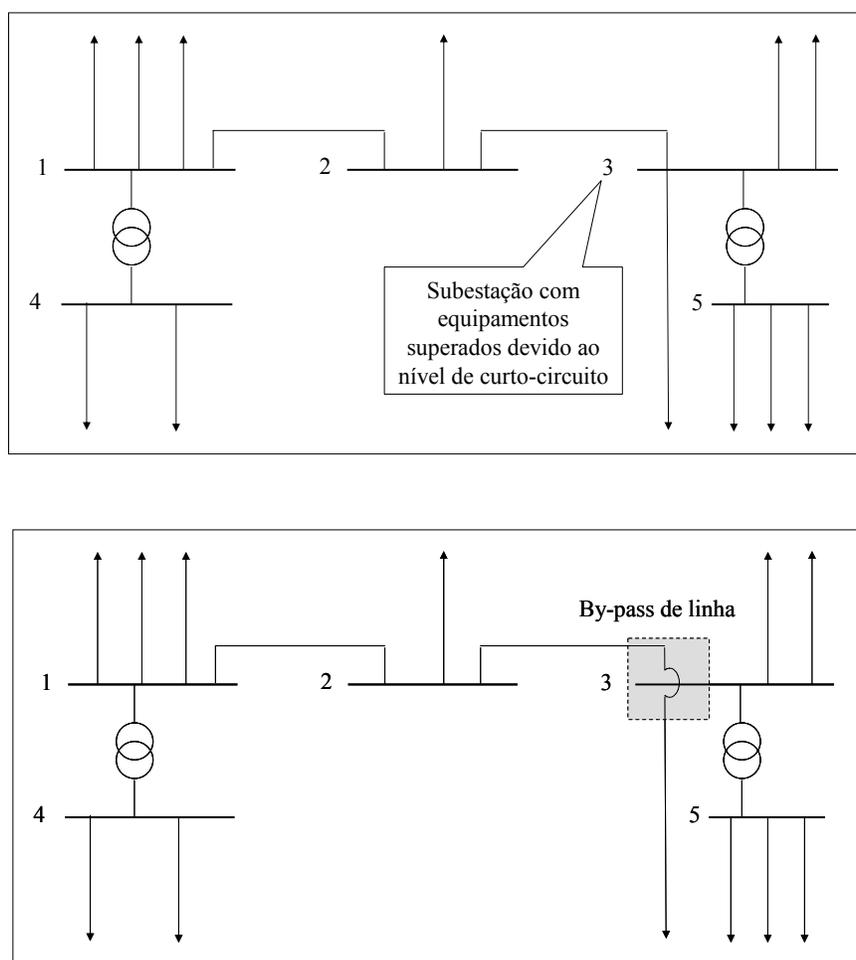


Figura 8 Exemplo de *by-pass* de linha

Semelhante ao que ocorre com o seccionamento de barra, o *by-pass* de linhas provoca a radialização da rede e conseqüente redução da confiabilidade do sistema.

- Chaveamento seqüencial

A abertura seqüencial se dá de forma que o disjuntor que estiver com sua capacidade superada atue somente após a abertura de outro disjuntor. Assim, a operação do disjuntor com capacidade superada se daria com um nível de curto-circuito mais baixo.

- Desligamento de geradores

Com esta medida, evita-se a contribuição desses geradores para o curto-circuito.

### 2.3.2 Modificação da Configuração da Rede

São métodos desenvolvidos para alterarem a impedância total da rede.

- Modificação da rede de seqüência zero do sistema

Esta medida é adotada para limitar apenas a corrente de curto-circuito monofásico o que a torna uma solução válida somente quando o curto monofásico for maior do que o trifásico. Pela Equação (A.28) indicada no Apêndice A, supondo que  $Z_{mm(1)} = Z_{mm(2)}$ , tem-se para curto monofásico:

$$I_{curto} = \frac{3E}{2Z_{mm(1)} + Z_{mm(0)} + 3Z_f} \quad (2.14)$$

Pela Equação (A.27) do Apêndice A, sabe-se que, para curtos trifásicos:

$$I_{curto} = \frac{E}{Z_{mm(1)} + Z_f}$$

Nota-se que o curto-circuito monofásico é maior do que o trifásico quando:

$$Z_{mm(0)} < Z_{mm(1)} \quad (2.15)$$

A modificação da seqüência zero do sistema pode ser feita pelas formas descritas a seguir:

- Desaterramento de transformadores
  - Introdução de resistores ou reatores para aterramento do neutro dos transformadores
  - Introdução de impedâncias nos deltas dos terciários
- 
- Utilização de Transformadores de Maior Reatância

Ao se instalar um novo transformador, utiliza-se impedância maior do que a usual a fim de aumentar a impedância do sistema para limitar a corrente de curto-circuito.

### **2.3.3 Recapacitação das Instalações e Substituição dos Equipamentos**

Neste caso, é feita a troca ou recapacitação de todos os elementos superados da subestação, o que significa que, além do disjuntor, há a necessidade de verificar a superação de chaves seccionadoras, transformadores de corrente, barramentos, cabos pára raios, entre outros. Também deve ser avaliado o estado da malha de terra e dos cabos de aterramento.

Para saber se a medida é viável ou não, deve-se analisar o custo da substituição ou recapacitação dos equipamentos assim como o tempo necessário para a realização das obras. Para fazer o cálculo do custo total é necessário incluir, além da compra dos equipamentos, a readaptação da subestação e os custos da instalação e substituição dos equipamentos associados. Isso faz com que, muitas vezes, o custo total da recapacitação torna o empreendimento inviável. Além disso, para recapacitar uma subestação são necessários diversos desligamentos a fim de executar todas as trocas dos equipamentos.

Ainda assim, em alguns casos, recapacitar os equipamentos pode ser a melhor alternativa para limitação de curto-circuito devido à falta de espaço para instalação de DLC (como por exemplo, quando a subestação está localizada em áreas urbanas altamente valorizadas) ou devido ao fato das subestações serem muito antigas, sendo necessária a troca de equipamentos em curto espaço de tempo.

### 2.3.4 Utilização de Dispositivos Limitadores de Curto-Circuito (DLCs)

Os DLCs têm a finalidade de limitar as correntes de curto-circuito quando seus valores máximos podem ser superiores às características nominais das instalações existentes. Na maioria das vezes, são métodos definitivos utilizados quando a substituição de todos os equipamentos superados não é possível ou é economicamente inviável. A Tabela 4 [14] apresenta alguns dispositivos existentes no mercado ou que estão em fase de desenvolvimento.

Tabela 4 Principais DLCs existentes ou em fase de desenvolvimento

DLCs disponíveis no mercado com ampla experiência de uso	DLCs disponíveis no mercado com experiência de uso ainda limitada	DLCs em fase de pesquisa e desenvolvimento
Reator com núcleo de ar	Transformadores especiais (IPC)	Disjuntores eletrônicos de abertura rápida
Dispositivo Pirotécnico	Supercondutores (média e baixa tensão)	
Elos de CC: Conexão <i>back-to-back</i> HVDC Light	TCSC	Supercondutores (alta tensão)

As características desejáveis dos DLCs 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;
- Baixa necessidade de manutenção;
- 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.

Obviamente, o DLC ideal não existe, mas deve-se buscar ao máximo atender a esses requisitos.

#### **2.3.4.1 Comportamento dos DLCs Quanto à Interrupção de Corrente**

O DLC age interrompendo a corrente de curto ou apenas limitando-a para que o disjuntor faça a interrupção. No primeiro caso, a interrupção da corrente deve ser feita em tempos extremamente rápidos de tal forma que o máximo valor assimétrico da corrente de curto-circuito fique bastante reduzido. No segundo caso, ocorre a inserção de uma impedância elevada no momento do curto, reduzindo a corrente de curto-circuito de forma que o disjuntor da subestação atue interrompendo a corrente de falta.

Entre os DLCs que agem interrompendo a corrente de curto-circuito, destacam-se os dispositivos pirotécnicos e os disjuntores eletrônicos e, entre os que apenas limitam a corrente, estão os RLCs, os dispositivos FACTS, os transformadores especiais (IPC) e os dispositivos a supercondutores.

A Figura 9 descreve o comportamento dos DLCs para ocorrência de curto-circuito em  $t = 0$ . O DLC da curva a) age apenas limitando a corrente de curto e o dispositivo da curva b) age limitando com interrupção da corrente de falta.

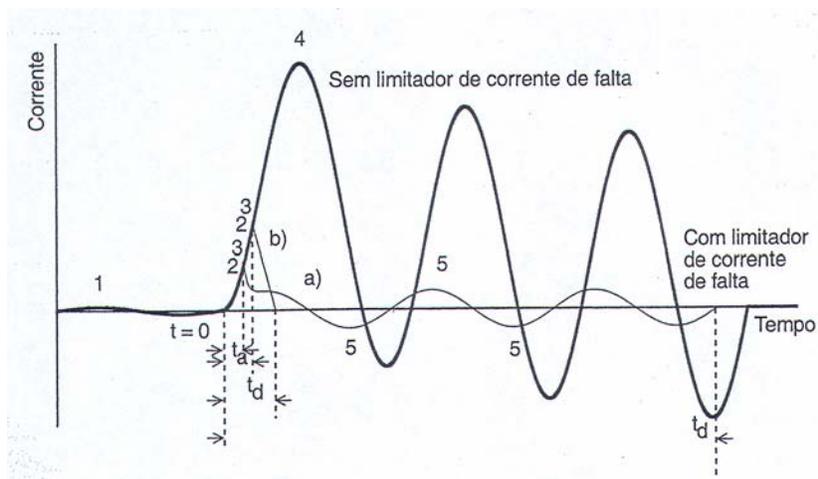


Figura 9 Comportamento dos DLCs [10]

onde:

curva a) DLC que age apenas limitando a corrente de curto-circuito;

curva b) DLC que age interrompendo a corrente de curto-circuito;

$t = 0$  instante de ocorrência do curto;

$t_a$  tempo para limitação da corrente de falta;

$t_d$  tempo para interrupção da corrente de falta;

ponto 1 valor de pico da corrente antes do curto-circuito;

ponto 2 corrente iniciante;

ponto 3 corrente limitada;

ponto 4 valor de pico da corrente de curto;

ponto 5 corrente resultante depois do DLC agir limitando a corrente.

Pela figura anterior, observa-se que a corrente se comporta em regime permanente com valor de pico dado no ponto 1. No instante  $t=0$ , dá-se início a um curto-circuito cuja corrente atingiria o ponto 4, caso não fosse interrompida ou reduzida por um DLC.

No caso da curva b), o DLC necessita de um tempo igual a  $t_a$  para iniciar a limitação da corrente de curto-circuito e depois iniciar sua interrupção. O processo de limitação somado ao de interrupção tem duração de  $t_d$ . Após este tempo, a corrente de curto-circuito é

completamente interrompida, ficando seu valor em zero até que o sistema seja restabelecido.

Para o caso da curva a), o DLC limita a corrente em um tempo igual a  $t_a$ . Depois, a corrente limitada se comporta com valor de pico indicado no ponto 5, até que seja interrompida pelo disjuntor. O tempo total desde o início do curto é de  $t_d$ . Note que  $t_d$  para a curva a) é maior do que  $t_d$  para a curva b) visto que, para a curva a), quem faz a interrupção da corrente é o disjuntor.

### 2.3.4.2 Instalação dos DLCs

Em princípio, DLCs podem ser instalados seccionando um barramento, em série com os circuitos alimentadores ou em série com os circuitos de saída, conforme apresentado na Figura 10. As vantagens e desvantagens de cada tipo de instalação devem ser analisadas antes da escolha da melhor localização para estes dispositivos, dependendo do problema a ser solucionado. É importante mencionar que estudos devem ser feitos para comprovar se todos os tipos de DLCs podem ser instalados em todas as posições descritas [10].

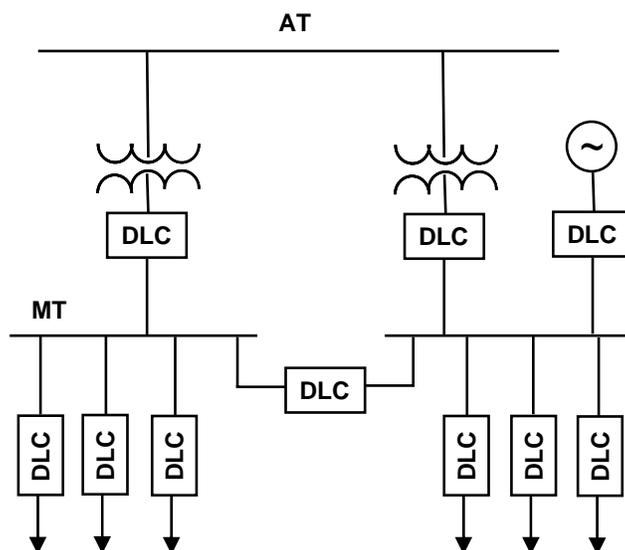


Figura 10 Locais de instalação de DLCs

- **Instalação de DLC Seccionando Barramentos**

O DLC instalado seccionando barramentos na subestação, conforme apresentado na Figura 11, limita a contribuição de um subsistema para a corrente de curto-circuito total do sistema. Neste caso, deve ser analisada a possibilidade das cargas, nas seções de cada barramento, serem equilibradas para se evitar uma corrente de valor elevado passando pelo equipamento que está seccionando os barramentos, provocando perdas no sistema. Em muitos casos, a utilização do RLC somente se torna viabilizada com o reposicionamento de conexões de vãos de algumas LTs.

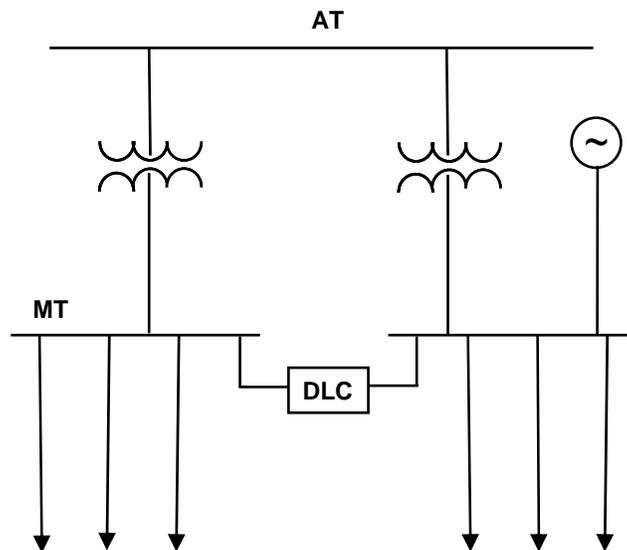


Figura 11 DLC utilizado seccionando barramentos

As vantagens do uso de DLCs acoplado barramentos são:

- Permite a equalização dos carregamentos dos transformadores em paralelo [15];
- Não é necessário o desligamento de nenhum dos transformadores após o desligamento do DLC [15];
- Barras separadas podem ficar unidas sem que ocorra aumento na capacidade de suportar as faltas do sistema [19];

- A capacidade de cada barra fica disponível para ambas as barras, fazendo assim, melhor uso da capacidade do transformador [19];
- Durante a falta, uma alta queda de tensão no limitador mantém o nível de tensão na barra que não está em falta [19].

A desvantagem do uso de DLC para acoplamento de barras é que as contribuições de cada circuito não serão limitadas individualmente.

- **Instalação de DLC em Série com os Circuitos Alimentadores**

O DLC instalado em série com os circuitos alimentadores, conforme apresentado na Figura 12, limita a contribuição do alimentador em questão para um curto-circuito no sistema assim como também limita a contribuição do sistema para curtos no próprio alimentador.

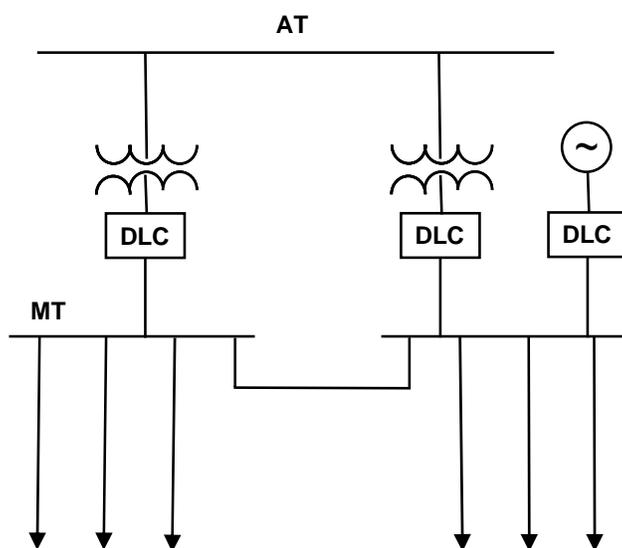


Figura 12 DLC utilizado em série com os circuitos alimentadores

A vantagem da utilização de DLCs em série com os circuitos alimentadores é que as contribuições individuais de cada um dos circuitos alimentadores serão limitadas [15]. A desvantagem é que, como as contribuições individuais de cada um dos circuitos alimentadores ainda podem ser elevadas, as perdas totais podem ser elevadas.

- **Instalação de DLC em Série com os Circuitos de Saída**

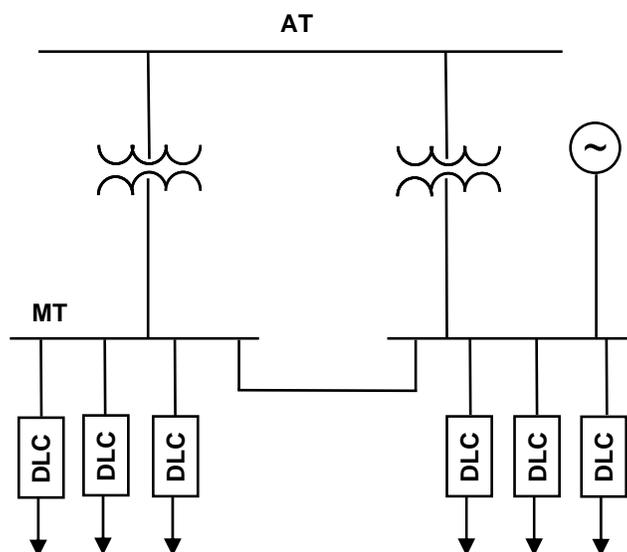


Figura 13 DLC utilizado em série com os circuitos de saída

Neste caso, ocorre a redução da corrente de curto-circuito no alimentador no qual será inserido o DLC.

As vantagens do uso de DLCs na saída de alimentadores, como mostrado na Figura 13, são:

- Protege equipamentos antigos difíceis de substituir como por exemplo cabos subterrâneos [19];
- Quando comparado com o caso anterior, resulta em menores perdas além de proporcionar uma melhor regulação pois, nesse caso, as contribuições individuais de cada um dos circuitos de saída são menores [15];
- A presença do DLC em um circuito de saída sob falta reduz a queda de tensão na barra durante o curto-circuito, aumentando conseqüentemente a estabilidade das máquinas alimentadas pelos outros circuitos de saída [15].

### 2.3.4.3 Principais DLCs

Informações sobre os principais dispositivos existentes no mercado atualmente ou que estão em fase de desenvolvimento estão apresentadas no Apêndice B. Como o

dispositivo utilizado neste trabalho é o reator limitador de curto-circuito, será feita uma breve descrição deste equipamento a seguir.

- **Reator Limitador de Curto-Circuito (RLC)**

Os reatores limitadores de curto-circuito a núcleo de ar (RLCs) têm sido utilizados com sucesso para reduzir a corrente de curto-circuito há alguns anos. Este reator se caracteriza por apresentar impedância baixa em operação normal do sistema e, no momento do curto, apresenta alta impedância, limitando o valor do curto-circuito existente na subestação.

Antes da escolha pela instalação de RLCs é necessária a análise do espaço físico existente na subestação, respeitando-se as distâncias mínimas exigidas face aos campos magnéticos produzidos por esses equipamentos. Muitas vezes a subestação não comporta a instalação de um equipamento deste porte, principalmente quando a mesma está localizada em centros urbanos.

As principais desvantagens deste equipamento são que os mesmos influenciam na operação do sistema em regime permanente pois a presença do dispositivo é permanente. Sendo assim, quando a rede está com carregamento alto, a corrente que circula pelo RLC também é alta, provocando, portanto, queda de tensão no sistema e perdas por efeito Joule. Tal circunstância aponta para o seu emprego em redes altamente malhadas, visto que, em geral, os efeitos sobre a variação da tensão são bem menos afetados.

Este é um dispositivo que vem sendo utilizado no país devido ao seu baixo custo e relativa facilidade de instalação quando comparados aos demais DLCs existentes atualmente. A Figura 14 mostra os RLCs que estão localizados na subestação de Mogi das Cruzes cujas características estão apresentadas a seguir:

Localização – Linha de Interligação Itapeti-Mogi, circuito 1

Indutância – 24 mili-henry, Frequência 60Hz

Impedância – 9,048  $\Omega$

Tensão Nominal – 362 kV

Corrente Nominal – 2100 A

Corrente de Curta duração – 25kA, 1 segundo para tensão do sistema igual a 362kV

Valor da Crista de Curta Duração – 63kA, queda de tensão 19kV

Meio Isolante – a seco

Peso Total – 15000kg

Perdas por Fase – 130kW

Ano de Fabricação – 1998



Figura 14 RLCs existentes na subestação de Mogi das Cruzes

# Capítulo 3

## Introdução aos Algoritmos Genéticos

### 3.1 Resolução de Problemas de Otimização

O problema de otimização é na verdade um problema de busca, que tem como alvo o ponto ótimo da função. Em termos gerais, consiste em encontrar um vetor  $x \in M$ , onde  $M$  define a região de soluções viáveis, tal que um certo critério de qualidade  $f$ , tipicamente denominada função objetivo, é maximizado ou minimizado. Para o caso de um problema de maximização, tem-se:

$$\text{Maximizar } f(x) \tag{3.1}$$

A função objetivo depende diretamente do tipo de problema a ser analisado, podendo ser, para sistemas reais, de complexidade arbitrária. A solução para a otimização global deste problema, denominada  $x^*$ , é caracterizada como:

$$x^* \mid \forall x \in M, f(x) < f(x^*) \tag{3.2}$$

onde:  $x \neq x^*$ .

Quando o problema é de minimização pretende-se, por exemplo, minimizar custos ou perdas e quando é de maximização pretende-se, por exemplo, maximizar o lucro ou desempenho de algum equipamento.

## 3.2 Algoritmos Genéticos

Os Algoritmos Genéticos (AGs) são métodos de busca ou de otimização baseados em mecanismos que procuram imitar o processo de evolução natural das espécies. A seleção natural e a reprodução são as duas forças que em conjunto direcionam esta evolução. Na natureza, a competição entre indivíduos para obter recursos resulta na sobrevivência dos indivíduos mais aptos. Nesse processo, os genes dos elementos mais adaptados sobreviverão. A reprodução de indivíduos produzirá a recombinação de seus materiais genéticos levando a um novo grupo de indivíduos e a um novo grupo de genes [38].

Os Algoritmos Genéticos são muito utilizados em problemas onde, dado um conjunto de indivíduos, deseja-se encontrar aquele que melhor atenda a certas condições previamente especificadas. Cada indivíduo representa uma possível solução para o problema. O que o Algoritmo Genético faz é procurar aquela que seja muito boa ou a melhor, visando a otimização de uma função especificada, denominada função objetivo. As principais diferenças entre os AGs e os principais métodos tradicionais de busca da solução ótima são:

- procuram uma população de pontos e não apenas um único ponto;
- utilizam uma função objetivo diretamente como direção de busca e não derivadas ou outro tipo de conhecimento auxiliar;
- utilizam regras de transição probabilísticas e não determinísticas;
- operam num espaço de busca codificado e não diretamente no espaço de busca.

Ao contrário de outros métodos que realizam a busca examinando um ponto de cada vez, os Algoritmos Genéticos são beneficiados pelo fato de operarem sobre um conjunto de pontos (indivíduos) que têm o grupo de soluções candidatas, reduzindo a probabilidade de encontrar um falso máximo global, ou seja, um máximo local. Este conjunto de pontos codificados segundo a representação definida é denominado de população.

A população é modificada a cada iteração (geração) do processo, através dos operadores genéticos, de modo a encontrar os indivíduos com melhor aptidão. Para isso, os AGs só precisam da avaliação da função objetivo para realizarem a busca no espaço de soluções viáveis.

### 3.3 Implementação dos Algoritmos Genéticos

Na implementação dos AGs, o processo é iterativo, sendo que um critério para terminar sua execução é atingir um número máximo de iterações. Considerando cada iteração  $t$  como uma geração, pode-se descrever o processo através do seguinte algoritmo:

*início*

$t = 0$

*Definir uma população inicial  $P(t)$*

*Calcular a aptidão de cada indivíduo de  $P(t)$*

*Enquanto ( $t \leq$  número máximo de iterações) Faça*

*Repita*

*Selecione os indivíduos mais aptos de  $P(t)$*

*Faça o cruzamento e a mutação gerando outros indivíduos para  $P(t+1)$*

*Calcular a aptidão dos novos indivíduos de  $P(t+1)$*

$t = t+1$

*Fim*

*Fim*

O digrama de blocos do AG pode ser dado conforme a Figura 15.

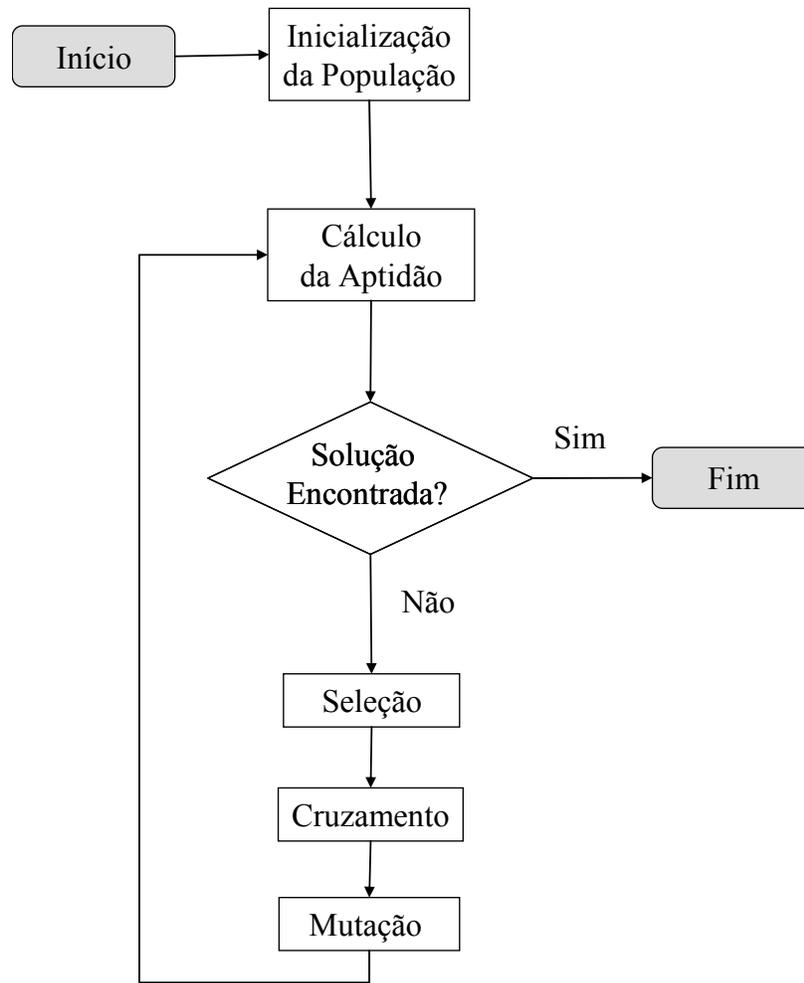


Figura 15 Diagrama de blocos do AG

### 3.4 Codificação

Uma solução potencial de um problema pode ser representada como um conjunto de parâmetros. Estes parâmetros, chamados de genes, são colocados juntos para formarem uma *string* de valores chamada de cromossomo sendo que, na maioria das implementações dos AGs, um indivíduo corresponde a um único cromossomo [38].

A forma mais simples de codificação é feita através do código binário, onde cada cromossomo é representado por uma seqüência de zeros e uns. Esse tipo de codificação apresenta inúmeras vantagens no decorrer do processo de otimização como tornar as operações genéticas mais fáceis de serem executadas, tornar possível o trabalho com

variáveis que assumam valores contínuos, facilitar a variação da faixa de trabalho dos parâmetros, além de apresentar relativa simplicidade na variação da precisão dos valores de cada parâmetro.

Em problemas de otimização onde as variáveis assumem valores inteiros, a codificação do cromossomo fica simplificada. Dependendo do caso, é desnecessário fazer os procedimentos de codificação e decodificação pois o número de caracteres escolhidos pode corresponder aos valores inteiros passíveis de serem assumidos pelas variáveis.

### **3.5 Inicialização**

Para iniciar o processo de procura no espaço de busca, os AGs precisam de um conjunto de pontos iniciais, isto é, da população inicial. Para gerar essa população, pode-se utilizar um processo aleatório, heurístico ou a combinação dos dois. A vantagem do processo heurístico é de poder colocar algum conhecimento do problema na população inicial de forma a ajudar o método de busca. No processo aleatório, os genes de cada cromossomo da população inicial são gerados aleatoriamente. Qualquer que seja o método escolhido, é importante que a população inicial cubra a maior região possível do espaço de busca.

### **3.6 Função de Aptidão**

Os AGs necessitam do valor de uma função que dê uma medida de quão bem adaptado um indivíduo está, isto é, quanto maior o valor desta função, maiores são as chances do indivíduo sobreviver nas próximas gerações. Tal função, denominada de função de aptidão, pode ser a própria função objetivo ou uma variação dela.

Quando o problema é de maximização, a função de aptidão se confunde com a função objetivo, e quando o problema é de minimização, a função de aptidão deve ser invertida ou sofrer um redimensionamento, pois os Algoritmos Genéticos não trabalham com problemas de minimização. Um problema que pode surgir na determinação da função

de aptidão é o da não negatividade. O AG, por ser um método probabilístico, não aceita que a função de aptidão tenha valores negativos. É preciso então deslocar toda a curva construída pelos valores desta função, ou seja, à mesma deve ser somada uma constante tal que todos os seus valores sejam positivos.

Para a maioria dos problemas, existe ainda a inserção de restrições na função de aptidão. Este processo se faz somando à função objetivo um fator de penalidade multiplicado por uma função penalidade nos quais são atribuídas as restrições do problema. Este procedimento é necessário quando algum parâmetro for violado, e se deseja que a função de penalidade atue tornando este indivíduo inviável. Uma demonstração deste método pode ser visto pela Equação (3.3).

$$f_o^{atual}(x) = f_o^{antiga}(x) + r.Q(x) \quad (3.3)$$

onde:

- $f_o^{antiga}$  função objetivo original;
- $f_o^{atual}$  função objetivo modificada;
- $r$  constante de penalidade;
- $Q$  função de penalidade.

### 3.7 Escalamento Linear

Durante o processo de busca, é interessante que nas primeiras gerações a pressão seletiva seja baixa e vá aumentando até as últimas gerações, uma vez que no final do processo os indivíduos tendem a ter valores de função de aptidão muito próximos. Assim, é interessante que, no início, o processo não seja tão rigoroso e evite uma convergência prematura.

A forma mais usual de controlar a pressão seletiva é realizar o escalamento linear da função de aptidão [39]. Para um cromossomo  $s_i$ , o escalamento é feito através da Equação (3.4).

$$f'_{ap}(s_i) = \alpha f_{ap}(s_i) + \beta \quad (3.4)$$

onde:

$f'_{ap}(s_i)$  função de aptidão após o escalamento linear;

$f_{ap}(s_i)$  função de aptidão original;

$\alpha$  e  $\beta$  coeficientes de aptidão.

A Figura 16 mostra o gráfico de escalamento linear.

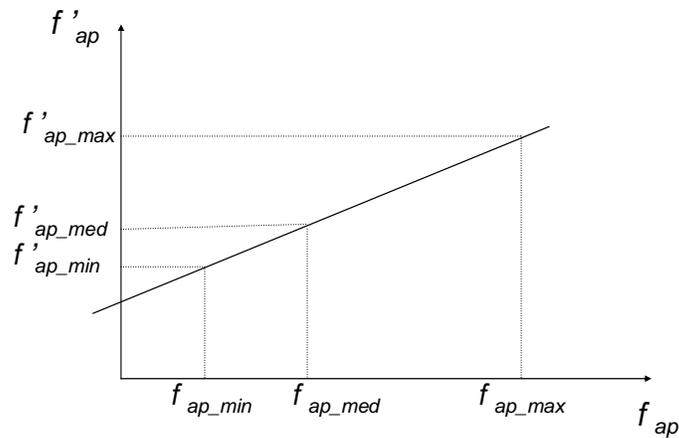


Figura 16 Gráfico de escalamento linear

A finalidade do escalamento linear é que, ao seu final, os indivíduos de aptidão média continuem na média ( $f'_{ap\_med} = f_{ap\_med}$ ) e que, se possível, o valor máximo da função de aptidão seja  $\gamma$  vezes o valor médio, ou seja:

$$f'_{ap\_max} = \gamma f'_{ap\_med} \quad (3.5)$$

onde:

$\gamma$  fator de escalamento linear.

Caso ocorram valores negativos após o escalamento linear,  $\alpha$  e  $\beta$  são calculados de forma a manter o valor mínimo em zero. Normalmente, utilizam-se valores entre 1,5 e 2,0 para  $\gamma$ .

### 3.8 Operadores dos Algoritmos Genéticos

Os mecanismos utilizados nos Algoritmos Genéticos são simples e de fácil implementação. Inicialmente define-se uma população que terá sua evolução definida por operadores genéticos. São três os operadores presentes na maioria dos Algoritmos Genéticos: seleção, cruzamento e mutação.

#### 3.8.1 Seleção

É o mecanismo que copia ou seleciona os indivíduos de uma população para a população seguinte, segundo valores da função objetivo. Os indivíduos da população são avaliados para medir seu desempenho na geração atual sendo que, para cada indivíduo, é calculado o valor de sua função de aptidão.

Após avaliados os indivíduos da geração  $t$ , a população em  $P(t+1)$  é escolhida a partir de  $P(t)$  através de um processo de seleção probabilística, que assegura que o número esperado de vezes que um indivíduo é escolhido seja proporcional a seu desempenho relativo ao resto da população. No final deste processo, a população  $P(t+1)$  contém cópias exatas das estruturas selecionadas em  $P(t)$  [41]. A seguir são apresentados alguns dos mais importantes tipos de seleção.

- Roleta

Neste método, cada indivíduo da população é representado na roleta proporcionalmente ao seu índice de aptidão. Assim, aos indivíduos com alta aptidão é dada uma porção maior da roleta, enquanto aos de aptidão mais baixa é dada uma porção relativamente menor da roleta. Finalmente, a roleta é girada um determinado número de vezes, dependendo do tamanho da população, e são escolhidos como indivíduos que

participarão da próxima geração aqueles sorteados na roleta. A representação da roleta pode ser vista pela Figura 17.

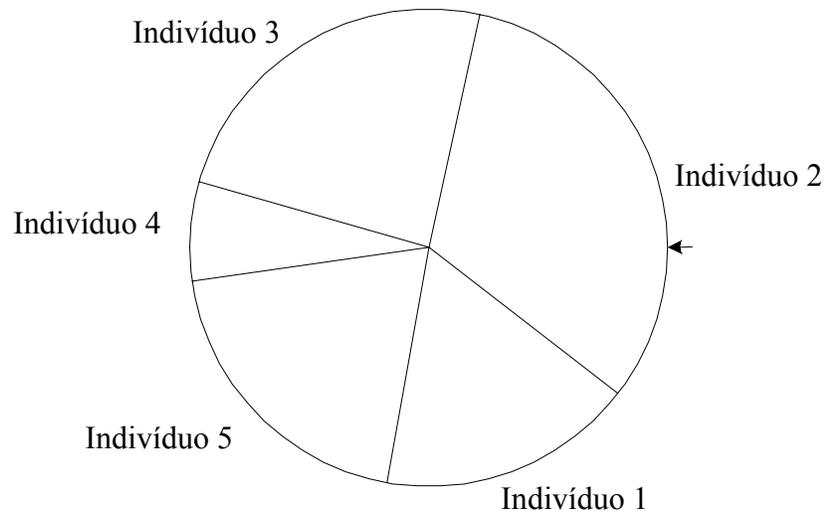


Figura 17 Representação da Roleta

Neste exemplo, pode-se observar que o indivíduo 2 tem uma maior chance de ser escolhido pois sua área na roleta é maior do que a dos demais indivíduos. Usando o mesmo raciocínio, o indivíduo 4 tem pequenas chances de ser escolhido.

- Ranking

Neste método, a seleção é realizada baseando-se em valores de uma função aptidão modificada definida pela atribuição de valores arbitrários de aptidão aos indivíduos, tipicamente seguindo uma regra linear. Em geral, o processo é executado ordenando-se os indivíduos de forma decrescente em relação aos seus valores de aptidão [39].

- Torneio

A seleção por torneio não é baseada na competição de todos os indivíduos da população, mas em um subconjunto dela. Neste método, são escolhidos aleatoriamente (com probabilidades iguais)  $n$  indivíduos da população, e o indivíduo com maior aptidão é

selecionado para a população temporária. O processo repete-se um número de vezes igual ao número de indivíduos existente na população de forma a permitir que a população temporária seja totalmente preenchida [39]. Utiliza-se, geralmente, o valor  $n = 2$ .

- Elitismo

O elitismo consiste em copiar os melhores indivíduos de uma população na geração seguinte, eliminando-se os piores indivíduos desta geração. Isso faz com que bons indivíduos não sejam perdidos com o processo evolutivo. Normalmente, o elitismo supervisiona apenas o melhor indivíduo.

### **3.8.2 Cruzamento**

O processo de seleção não introduz novos indivíduos na população temporária, apenas os chamados progenitores, que servirão como pais para a nova geração, composta pelos filhos. Para gerar a nova população, é necessária a introdução do operador de cruzamento, que tem como objetivo realizar a troca do material genético dos progenitores escolhidos pelo operador de seleção de forma que seus descendentes herdem parte das características de um progenitor e parte do outro [41]. Dentre os vários tipos de cruzamento, destacam-se:

- Cruzamento de Um Ponto

Neste caso, escolhe-se aleatoriamente um ponto de cruzamento no cromossomo e, a partir deste ponto, as informações genéticas dos progenitores serão trocadas [43]. Um dos descendentes recebe parte do cromossomo de um dos progenitores e parte do outro, sendo que o segundo descendente recebe as partes restantes dos progenitores. Uma representação deste tipo de cruzamento é mostrada na Figura 18 onde o ponto de cruzamento escolhido está na posição 5.

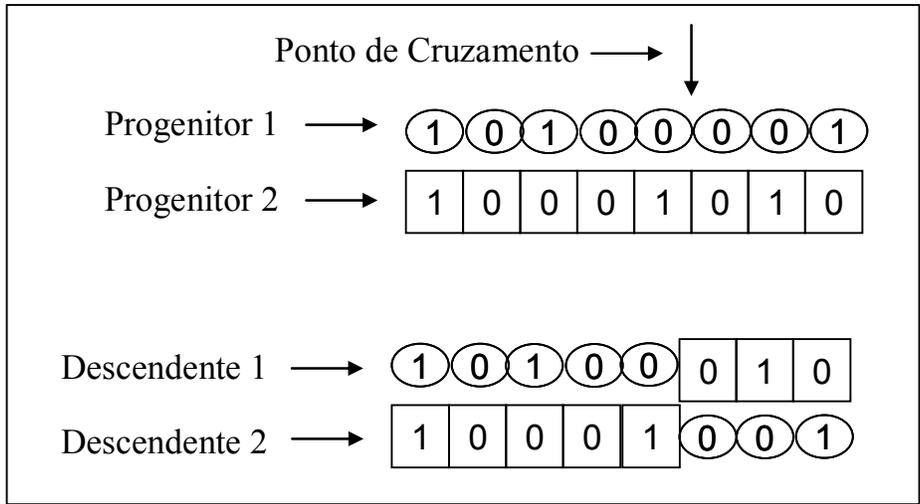


Figura 18 Exemplo de cruzamento de um ponto

- Cruzamento de  $X$  Pontos

Semelhante ao cruzamento de um ponto, este cruzamento é feito escolhendo-se  $X$  pontos [43]. Uma representação será mostrada na Figura 19, com  $X = 2$ , onde os pontos de cruzamento escolhidos são as posições 3 e 6.

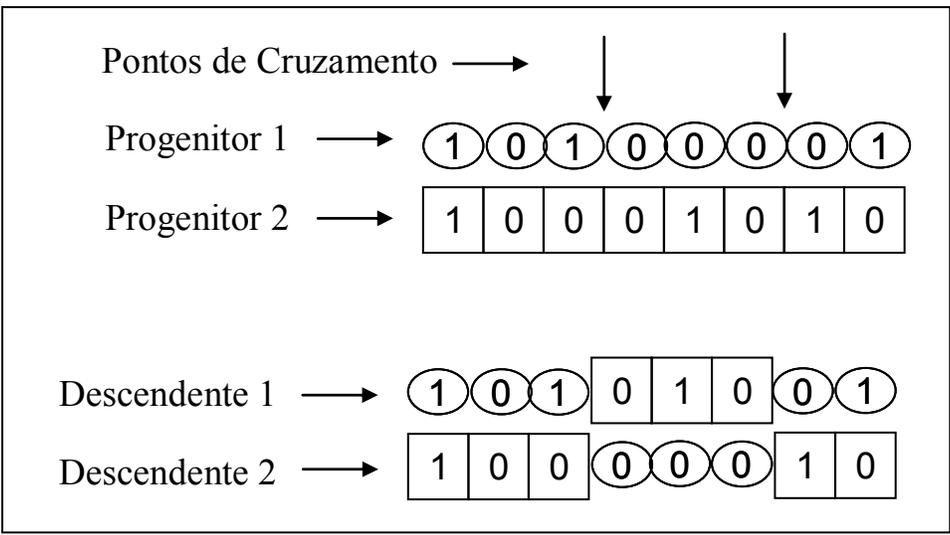


Figura 19 Exemplo de cruzamento de dois pontos

- Cruzamento Uniforme

Neste tipo de cruzamento, cria-se uma máscara aleatória com o mesmo tamanho dos cromossomos dos progenitores. O primeiro descendente é formado de tal forma que, quando a máscara tiver bit igual a 1, este descendente herda o bit do primeiro progenitor e quando a máscara tiver bit igual a 0 o mesmo herda o bit do segundo progenitor. Para formar o segundo descendente, o processo ocorre de modo inverso [43]. Uma representação para este tipo de cruzamento está mostrada na Figura 20.

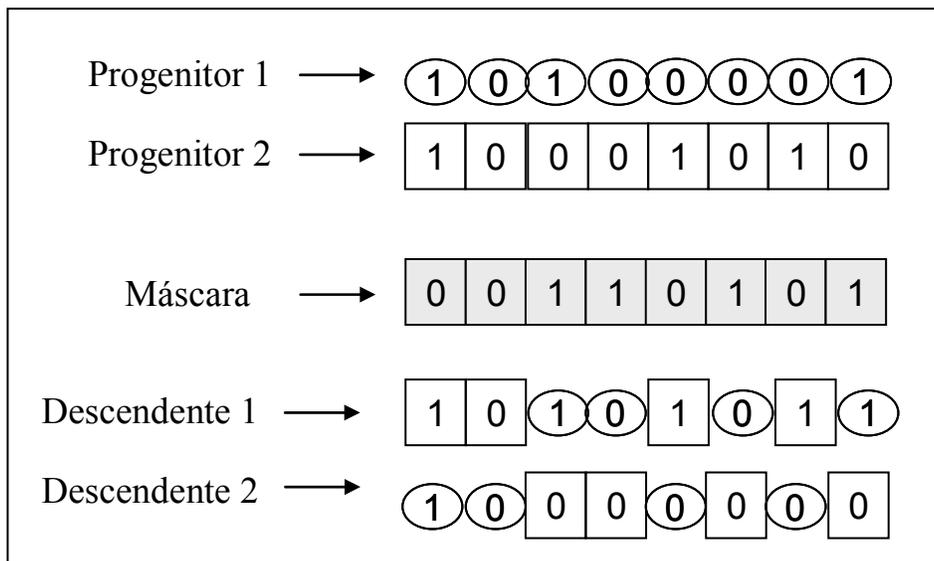


Figura 20 Exemplo de cruzamento uniforme

### 3.8.3 Mutação

O operador de mutação é aplicado de forma a explorar aleatoriamente outras trajetórias no espaço de busca tendo como objetivo inserir novas características aos descendentes e até mesmo restaurar materiais genéticos perdidos durante o processo de

evolução. Esse processo faz com que alguns descendentes de cada geração sofram uma troca no valor de um de seus bits [41].

O operador mutação cumpre um papel secundário, porém decisivo no Algoritmo Genético pois atua quando os processos de seleção e de cruzamento geram uma homogeneização da população. Este operador pode ser uma ferramenta importante contra a convergência prematura, evitando máximos locais.

O tipo mais comum de mutação é a mutação por troca de bit, onde escolhe-se aleatoriamente uma posição de um descendente para fazer a troca do valor do bit. A Figura 21 ilustra o processo onde a mutação é feita na posição 4 do cromossomo.

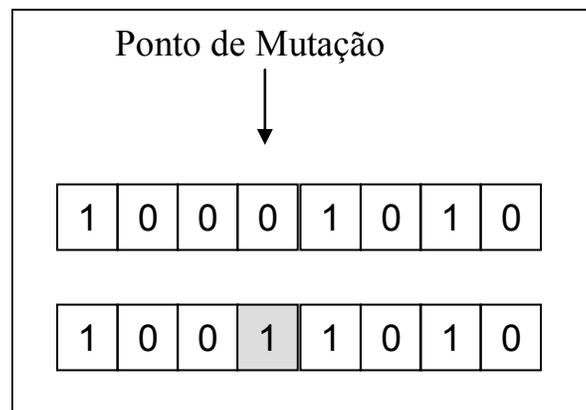


Figura 21 Exemplo de mutação por troca de bit

### 3.9 Parâmetros Genéticos

O bom funcionamento dos AGs depende do equilíbrio entre a exploração de novas regiões no espaço de busca e a exploração das regiões já visitadas. Tal equilíbrio depende da escolha certa dos parâmetros de controle, cujas principais características estão descritas a seguir.

### 3.9.1 Tamanho da População

O tamanho da população afeta o desempenho global e a eficiência dos AGs. Com uma população pequena o desempenho pode cair, pois deste modo a população fornece uma pequena cobertura do espaço de busca do problema. Uma grande população geralmente fornece uma cobertura representativa do domínio do problema, além de prevenir convergências prematuras para soluções locais ao invés de globais. No entanto, para se trabalhar com grandes populações, são necessários maiores recursos computacionais, ou que o algoritmo trabalhe por um período de tempo muito maior.

### 3.9.2 Taxa de Cruzamento

Este parâmetro indica quantos indivíduos da população irão reproduzir. Quanto maior for esta taxa, mais rapidamente novas estruturas serão introduzidas na população. Mas se esta for muito alta, indivíduos com boas aptidões poderão ser retirados do processo de busca, já que a maior parte da população será substituída. Para um valor baixo da taxa de cruzamento, o algoritmo pode tornar-se muito lento [43].

### 3.9.3 Taxa de Mutação

Este parâmetro indica quantos indivíduos da população irão sofrer mutação. Uma baixa taxa de mutação previne que uma dada população fique estagnada em um valor. Com uma taxa muito alta, a busca se torna essencialmente aleatória [43].

O aumento da diversidade da população no início do processo de busca dos AGs pode ser conseguido variando-se a taxa de um valor mais alto, nas primeiras gerações, para um valor mais baixo nas últimas. Esse efeito pode ser alcançado através da seguinte função:

$$T_{mut} = \frac{k}{ger^{C_{mut}}} \quad (3.6)$$

onde:

$T_{mut}$  taxa de mutação;

$C_{mut}$  constante que define a taxa de decréscimo da probabilidade de mutação;

$k$       constante aleatória;  
 $ger$     número da geração.

Estudos empíricos sugerem, para uma boa performance dos AGs, a escolha de uma alta taxa de cruzamento (acima de 0,6) e de uma baixa taxa de mutação, inversamente proporcional ao tamanho da população (abaixo de 0,01).

#### **3.9.4 Critério de Parada**

O critério de parada é o parâmetro que indica quando o algoritmo deve encerrar o processo de busca. Entre os critérios de parada, destaca-se o número fixo de gerações, onde o algoritmo encerra o processo evolutivo quando um dado número de gerações previamente estipulado for atingido. Neste caso, não se pode garantir que o algoritmo chegou a uma solução satisfatória. Um outro critério de parada é quando ocorre a convergência, ou seja, não ocorre melhora significativa na solução durante um dado número de gerações.

#### **3.9.5 Tamanho ou Comprimento do Cromossomo ( $L$ )**

É o número de bits que um cromossomo possui. Deve ser escolhido de acordo com o tipo de problema a ser solucionado.

## Capítulo 4

# Metodologia de Alocação de DLC Desenvolvida

Sabendo-se que a instalação de DLCs no sistema pode ser efetuada de diversas formas que variam em função do local de instalação (seccionando barras ou inserindo em série com circuitos), do nível de tensão onde é inserido e da capacidade do equipamento, é preciso descobrir qual a melhor maneira entre as possíveis levando-se em consideração o custo e o benefício para o sistema. O estudo de todas as alternativas individualmente demandaria um tempo muito grande além da necessidade de mão-de-obra especializada. A idéia de se ter uma metodologia que avalie diversas alternativas e escolha a mais apropriada automaticamente auxilia na solução deste problema.

A metodologia foi então desenvolvida para fazer a alocação ótima de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito no sistema. O objetivo é que, dado um sistema com problemas de equipamentos superados, sejam testadas diversas alternativas para solucionar esses problemas. A solução ótima encontrada deve ser aquela com menor custo, desde que atenda a todas as restrições impostas pelo problema. As restrições consideradas foram:

- O sistema não pode ter nenhum equipamento superado pela corrente de curto-circuito;
- Deve ser feita a inserção de um número reduzido de DLCs no sistema;
- Quanto mais o nível de curto-circuito nas barras do sistema diminuir, melhor será esta solução perante às demais;
- A inserção de DLCs não pode causar danos para a operação do sistema em regime permanente, ou seja, tanto as perdas quanto a queda de tensão provocada pelos DLCs não devem atingir valores muito elevados.

São utilizados Algoritmos Genéticos integrados a um programa para cálculo de curto-circuito de modo que, a cada iteração, sejam simulados curtos-circuitos em todas as barras do sistema. Os resultados do curto-circuito são comparados com o nível máximo admissível na subestação em questão. Se a corrente de defeito de alguma barra for maior do que o valor especificado como o máximo tolerado pela subestação, inicia-se um processo de busca por uma solução ótima de inserção de DLCs no sistema.

A análise do sistema em regime permanente é feita separadamente. Depois que o processo de busca estiver encerrado, simula-se em regime permanente o resultado ótimo encontrado pelo processo, para averiguar se a configuração resultante se comporta de forma adequada, sem violar os níveis de tensão do sistema, sem que exceda o carregamento dos circuitos e sem que as perdas atinjam valores muito elevados.

#### **4.1 Premissas Adotadas**

As premissas adotadas são as seguintes:

- Como os disjuntores são os responsáveis pela eliminação da falta na rede, os mesmos servem de referência para estudos de superação das subestações e equipamentos por corrente de curto-circuito. Logo, considerou-se o nível máximo de curto suportado por cada barra do sistema como sendo igual à capacidade do disjuntor que possui a menor capacidade de interrupção simétrica de corrente de curto-circuito existente na subestação. Para o exemplo da Figura 22, como o disjuntor que tem menor capacidade é o disjuntor 2, tem-se para a barra 1:

$$I_{curton} = 30kA \tag{4.1}$$

Apesar de conservativo, este critério foi adotado em função da dificuldade de implementação de um método que considere apenas a contribuição da corrente de curto-circuito que passa pelo disjuntor para avaliação da superação da capacidade do mesmo.

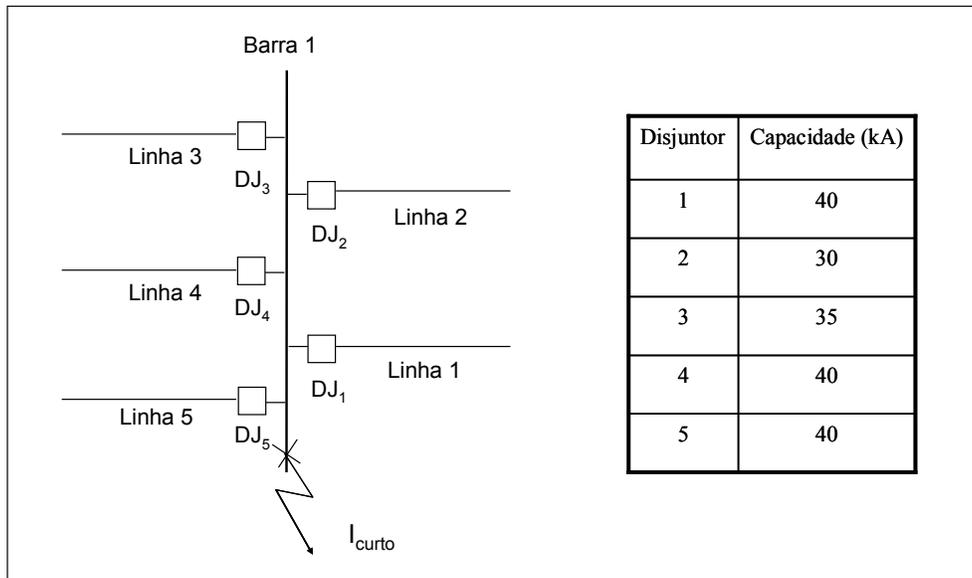


Figura 22 Exemplo da definição do nível máximo de curto-circuito admitido por cada barra

Vale lembrar que a superação do disjuntor pode vir acompanhada da superação dos barramentos, malha de terra e cabos pára-raios da subestação assim como de outros equipamentos, como por exemplo, chaves seccionadoras, transformadores de corrente e bobinas de bloqueio.

- Devido à característica do módulo de cálculo de curto-circuito utilizada, foram simulados apenas curtos-circuitos monofásicos e trifásicos, ambos sem impedância de falta, e a comparação dos resultados é feita em kA visto que esta é a unidade normalmente utilizada para informar a capacidade dos disjuntores.

- A identificação da superação da capacidade de interrupção de disjuntores foi feita analisando apenas as correntes de curto-circuito simétricas e assimétricas; portanto a superação destes equipamentos por corrente de carga ou por tensão de restabelecimento transitória não foi considerada.

- Para saber se a corrente de curto-circuito que passa por determinado disjuntor supera ou não a capacidade do mesmo, esta corrente foi suposta como sendo a

corrente calculada simulando curto-circuito na barra em que se liga a linha onde está localizado o disjuntor, conforme exemplo mostrado na Figura 23. Esta aproximação foi feita para simplificar o processo de comparação dos níveis de curto-circuito, mas vale lembrar que, nos estudos finais de superação, deve-se analisar com mais detalhes o local de ocorrência do curto, simulando as condições de curto na barra, curto na linha e a condição de *line-out* (Figuras 3, 4 e 5) para definir qual a maior corrente de curto que pode passar pelo disjuntor.

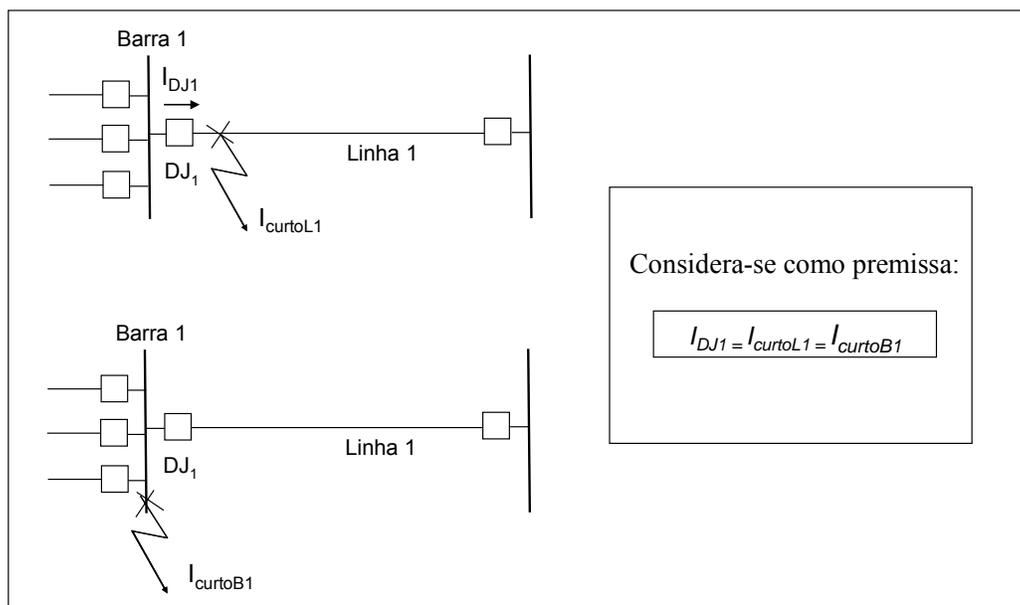


Figura 23 Corrente que passa pelo disjuntor definida por aproximação como sendo a corrente calculada para curto-circuito na barra em que está ligado o disjuntor

- Os casos base utilizados para análise do curto-circuito estão considerando a rede simulada com a sua configuração completa, ou seja, com todos os seus componentes operando, pois esta é a situação mais crítica para efeito de curto-circuito. Outro fato importante é que não foi considerado o carregamento pré-falta do sistema e as tensões de todas as barras foram consideradas iguais a 1 p.u..

- Foi considerada apenas a alocação de RLCs no sistema, portanto, os demais DLCs não foram incluídos como alternativa nos estudos.

## 4.2 Estrutura da Metodologia

A estrutura da metodologia desenvolvida está apresentada de forma sucinta na Figura 24.

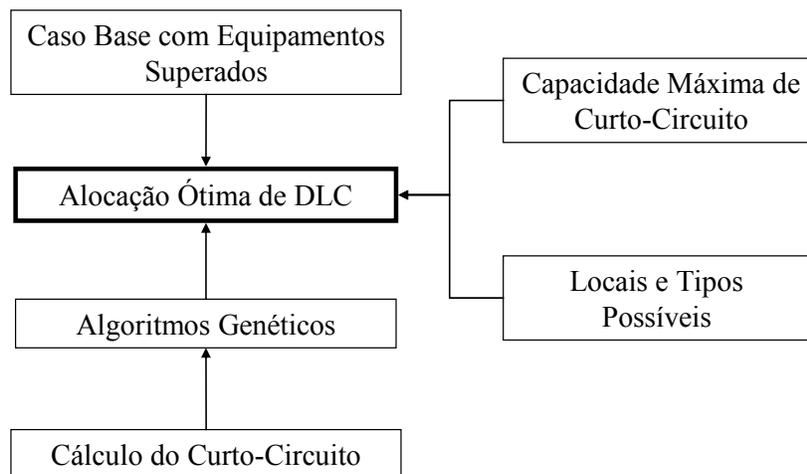


Figura 24 Estrutura da Metodologia

Para o módulo central da metodologia desenvolvida, que corresponde à alocação ótima de DLC, é necessário fornecer os seguintes dados de entrada:

a) Caso base para cálculo de curto-circuito

Este caso conterá o problema que se quer resolver, ou seja, o caso deverá ter equipamentos superados por corrente de curto-circuito. É através do caso base que serão criadas e testadas as diversas soluções para o problema.

b) Valores das capacidades máximas de curto-circuito admitidas por cada barra do sistema

Estes valores são necessários para identificação da superação da barra.

c) Possíveis locais de inserção e tipos de DLCs

Muitas subestações que estão com problemas de superação de equipamentos no Brasil estão localizadas em grandes centros urbanos, não havendo espaço, em alguns casos, para a inserção de DLCs. Com isso, na implementação da metodologia, foi necessário indicar se a subestação suporta a instalação de DLC. Desta forma, a metodologia desenvolvida testa somente a alocação de DLCs nas subestações que não tiverem restrições. Esta estratégia é baseada na prática tendo em vista que a alocação de DLCs se dá nas proximidades do equipamento superado, que é suposto conhecido na metodologia desenvolvida. Sendo assim, o AG testa apenas as soluções possíveis de serem executadas na prática. Para isso, são necessárias informações sobre o espaço disponível na subestação e a viabilidade do projeto. Os tipos de DLCs correspondem aos diferentes valores de RLCs possíveis de instalação.

A partir do caso base e das demais informações fornecidas, o processo de evolução do AG cria possíveis soluções para o problema, cada uma com uma configuração de localização e valor de DLC, obedecendo às localizações possíveis fornecidas nos dados de entrada.

A obtenção do valor da função de aptidão é feita calculando-se, para cada uma das possíveis soluções do problema criadas pelo AG, o curto-circuito em todas as barras do sistema e comparando-o com as capacidades admitidas por cada barra. A solução ótima será aquela que não contiver equipamentos superados e que atenda às restrições estabelecidas com menor custo.

#### **4.2.1 Programas Computacionais Utilizados**

A implementação do programa foi realizada com a versão 6.5 do programa MATLAB que integrou o programa de curto-circuito utilizado (ANAFAS) com a execução dos Algoritmos Genéticos. Todo o processo é feito de forma automática sendo necessário fornecer apenas os dados de entrada e alguns parâmetros necessários para a execução do AG.

- Programa de Curto-Circuito

Para o cálculo do curto-circuito nas barras, utilizou-se a versão 4.2 do ANAFAS, desenvolvido pelo CEPEL, que é um programa para solução de faltas de diversos tipos e composições, em sistemas elétricos de grande porte [8].

O ANAFAS foi utilizado como módulo de cálculo de curto-circuito por ser a ferramenta adotada pelo setor elétrico brasileiro. Desta forma, foi possível manter a compatibilidade com a base de dados existente e utilizada nos estudos de curto-circuito.

Para verificar se cada possível solução para o problema fornecida pelo AG soluciona o problema dos equipamentos superados, foi utilizado um relatório de saída padrão do programa ANAFAS denominado *Relatório de Níveis de Curto* que contém informações do módulo e ângulo da corrente de curto-circuito e a relação  $X/R$  para cada barra do sistema tanto para curtos monofásicos como trifásicos. A metodologia foi desenvolvida de modo que cada caso gerado pelo AG seja transformado em um caso em formato compatível com o programa ANAFAS. Sendo assim, este caso é carregado automaticamente no programa ANAFAS e é gerado o *Relatório de Níveis de Curto*. A metodologia então extrai do relatório as informações úteis para análise da superação, que são o módulo do nível de curto-circuito trifásico e monofásico e a relação  $X/R$  trifásica e monofásica, que serão utilizados na comparação com a capacidade de curto-circuito suportada pela barra. Desta forma, a metodologia define se os casos analisados continuam ou não com equipamentos superados.

- Algoritmos Genéticos

Para o processo de otimização feito através de Algoritmos Genéticos, utilizou-se a *toolbox* de AG do MATLAB [7] que tem uma série de rotinas versáteis que possibilitam implementar uma grande variedade de opções possíveis para a representação dos Algoritmos Genéticos. As principais estruturas de dados na *toolbox* de AG são os cromossomos, os valores da função objetivo e os valores da função de aptidão. A estrutura do cromossomo armazena a população em uma única matriz de tamanho  $N_{ind} \times L_{ind}$ , onde  $N_{ind}$  é o número de indivíduos e  $L_{ind}$  é a extensão da estrutura do cromossomo. Uma matriz

$N_{ind} \times N_{obj}$  armazena os valores da função objetivo, onde  $N_{obj}$  é o número de objetivos. Finalmente, os valores da função de aptidão são armazenados em um vetor de comprimento  $N_{ind}$ . O armazenamento é feito da forma descrita com o objetivo de explorar a característica vetorial do MATLAB e aumentar o desempenho da ferramenta desenvolvida. Em todas as estruturas de dados, cada linha corresponde a um indivíduo em particular.

## 4.3 Modelagem Matemática

### 4.3.1 Definição da Função Objetivo

Conforme dito anteriormente, o objetivo da metodologia é encontrar a solução de alocação de DLC que apresente o menor custo e respeite as restrições operativas impostas, de modo a eliminar o problema de equipamentos superados.

É esperado que a função objetivo atue de forma a selecionar, entre as soluções candidatas, aquela que apresente um bom resultado para o problema em questão. Será necessário, portanto, que a solução encontrada como resultado da simulação do programa satisfaça às restrições impostas pelo problema sem que se torne uma solução inviável de se executar na prática. Sendo assim, alguns critérios foram adotados na definição da função objetivo na tentativa de que o resultado encontrado esteja o mais próximo possível do ótimo global, tais como:

- A função objetivo foi definida de forma a atribuir valores a cada solução candidata a eliminar o problema de superação minimizando o custo total dos DLCs instalados. Como a solução final do problema não pode ter mais nenhum equipamento superado, então, soluções candidatas que não satisfaçam a este requisito devem ser eliminadas do processo de busca.

- A função objetivo foi definida de forma que seja inserido o menor número de DLCs que atendam aos requisitos propostos já que cada DLC inserido exige, além dos custos associados, obras e desligamentos no sistema.

- Para soluções equivalentes em relação aos DLCs inseridos, é importante que, quanto mais o nível de curto-circuito nas barras for reduzido, melhor. A função objetivo foi definida de forma a penalizar soluções que reduzam pouco os níveis de curto do sistema.

Sabendo que a função objetivo tem como meta encontrar uma solução viável para o sistema com o menor custo, conclui-se que esta seja uma função de minimização. O problema de otimização pode então ser modelado conforme a seguir:

$$\min_{\zeta} [C(\zeta) + k_1 nDLC + k_2 (I_{curto3f_i} - I_{curton_i}) + k_3 (I_{curto1f_i} - I_{curton_i})],$$

$$i = 1, \dots, Nb \quad (4.2)$$

s.a.

$$a(I_{curto3f_i}) \leq I_{curton_i}, \quad i = 1, \dots, Nb \quad (4.3)$$

$$a(I_{curto1f_i}) \leq I_{curton_i}, \quad i = 1, \dots, Nb \quad (4.4)$$

$$X/R3f_i \leq b, \quad i = 1, \dots, Nb \quad (4.5)$$

$$X/R1f_i \leq b, \quad i = 1, \dots, Nb \quad (4.6)$$

onde:

$C(\zeta)$  custo de instalação da configuração de DLC candidata;

$\zeta$  configuração de DLC candidata;

$nDLC$  número de DLCs inseridos no sistema;

$k_1, k_2, k_3$  fatores de ponderação;

$a$  é a constante que define qual a porcentagem da corrente de curto simétrica deve ser considerada para se comparar com a corrente nominal máxima suportada pela subestação de modo que se garanta que a barra não tenha problemas de equipamentos superados. O valor de  $a$  pode ser obtido pelas Inequações (2.9) a (2.12);

$b$  é a constante que define qual o valor da relação  $X/R$  máxima calculada para cada barra para que seja garantido que o sistema não tenha problemas de equipamentos superados. É importante

	mencionar que o valor de $b$ depende do valor de $a$ e pode ser obtido pelas Inequações (2.9) a (2.13);
$Nb$	número de barras do sistema;
$I_{curto3f_i}$	valor do curto-circuito simétrico trifásico na barra $i$ ;
$I_{curto1f_i}$	valor do curto-circuito simétrico monofásico na barra $i$ ;
$I_{curton_i}$	valor da corrente nominal de curto-circuito suportada pela barra $i$ . Este valor deve ser fornecido como dado de entrada do programa, conforme já mencionado, e deve ser definido conforme o exemplo da Figura 22;
$X/R3f_i$	valor da relação $X/R$ trifásica da barra $i$ . Esta relação é definida como sendo a relação $X/R$ da rede equivalente de seqüência positiva no ponto de defeito;
$X/R1f_i$	valor da relação $X/R$ monofásica da barra $i$ . Esta relação é definida como sendo a relação $X/R$ da rede equivalente de seqüência positiva, negativa e zero no ponto de defeito.

A parcela  $C(\zeta)$  visa que a solução encontrada tenha o menor custo possível e a parcela  $k_1 nDLC$  visa que seja inserido o número mínimo de DLCs no sistema. As parcelas  $k_2(I_{curto3f_i} - I_{curton_i})$  e  $k_3(I_{curto1f_i} - I_{curton_i})$  visam que as soluções que mais diminuam o nível de curto-circuito trifásico e monofásico, respectivamente, sejam beneficiadas perante as demais.

#### 4.3.2 Definição da Função de Aptidão

Na definição da função de aptidão para avaliação das soluções candidatas pelo AG, de modo a representar a função objetivo definida na Equação (4.2), foi necessário fazer algumas adaptações na função objetivo porque os AGs não tratam funções de minimização e não consideram problemas com restrições. Para equacionar o problema com as restrições, a função de aptidão foi definida como uma combinação linear da função custo com funções penalidade cujas características estão descritas a seguir.

- Fator Penalidade  $Fator_i$

O fator penalidade  $Fator_i$  foi desenvolvido de modo que, caso a solução analisada não resolva o problema da subestação superada, o indivíduo tenha grandes chances de ser descartado pelo processo de evolução. Logo, como o problema em questão é de minimização, o fator penalidade deve ser alto para indivíduos ruins de forma que a solução proposta tenha pouca probabilidade de sobreviver às gerações seguintes.

Da mesma forma, os indivíduos que resultem em boas soluções para o problema devem permanecer na geração seguinte, logo, um fator penalidade zero auxilia neste processo fazendo com que a função fique com valor pequeno.

Para definir se a solução candidata soluciona ou não o problema dos equipamentos superados, foi estipulado que uma subestação estará superada se o nível de curto-circuito da barra estiver dentro dos limites definidos baseando-se nas Inequações (2.9) a (2.13), repetidas abaixo:

$$X_i/R_i < 16,96 \text{ e } I_{curto_i} > 90\% I_{curton_i} \quad (4.7)$$

$$16,96 \leq X_i/R_i < 22,62 \text{ e } I_{curto_i} > 85\% I_{curton_i} \quad (4.8)$$

$$22,62 \leq X_i/R_i < 28,28 \text{ e } I_{curto_i} > 80\% I_{curton_i} \quad (4.9)$$

$$X_i/R_i \geq 28,28 \text{ e } I_{curto_i} > 70\% I_{curton_i} \quad (4.10)$$

$$X_i/R_i \geq 45,24 \quad (4.11)$$

$$i = 1, \dots, Nb \quad (4.12)$$

onde:

$I_{curto_i}$  maior valor de corrente simétrica de curto-circuito, trifásica ou monofásica, calculada na barra  $i$  através do ANAFAS.

Se qualquer um dos critérios listados for atingido, será atribuída uma penalidade para a solução candidata, denominada  $Fator_i$ , de modo que a mesma tenha grandes chances de ser eliminada do processo de busca. Sendo assim:

$$Fator_i = \sum_i^{Nb} k_i \quad (4.13)$$

onde:

$Nb$  número de barras do sistema.

O valor de  $k_i$  foi estipulado de modo que, quanto mais a corrente da barra  $i$  estiver acima da capacidade do disjuntor, maior será o  $Fator_i$ . Isto faz com que uma solução candidata que tenha como resultado barras cujas correntes de curto-circuito estejam muito acima da capacidade tenham mais chances de serem eliminada do processo de busca do que as soluções em que a corrente supera a capacidade por uma pequena parcela. O objetivo é que as soluções que violam por pouco as restrições ainda tenham alguma chance de passar pelo processo evolutivo e se tornar uma boa solução para o problema. O valor de  $k_i$  foi então definido pelas Equações (4.14) a (4.18).

$$\begin{aligned} \text{Se } & X_i/R_i < 16,96 \text{ e } Icurto_i > 90\% Icurton_i \\ & k_i = 10^3 + 10(Icurto_i - Icurton_i) \end{aligned} \quad (4.14)$$

$$\begin{aligned} \text{Se } & 16,96 \leq X_i/R_i < 22,62 \text{ e } Icurto_i > 85\% Icurton_i \\ & k_i = 10^3 + 10(Icurto_i - Icurton_i) \end{aligned} \quad (4.15)$$

$$\begin{aligned} \text{Se } & 22,62 \leq X_i/R_i < 28,28 \text{ e } Icurto_i > 80\% Icurton_i \\ & k_i = 10^3 + 10(Icurto_i - Icurton_i) \end{aligned} \quad (4.16)$$

$$\begin{aligned} \text{Se } & (X_i/R_i \geq 28,28) \text{ e } Icurto_i > 70\% Icurton_i \\ & k_i = 10^3 + 10(Icurto_i - Icurton_i) \end{aligned} \quad (4.17)$$

$$\begin{aligned} \text{Se } & (X_i/R_i \geq 45,24) \\ & k_i = 10^5 \end{aligned} \quad (4.18)$$

Se nenhum destes casos ocorrerem, ou seja, se a solução candidata solucionar o problema dos equipamentos superados na barra  $i$ :

$$k_i = 0 \quad (4.19)$$

Note pela Equação (4.14) que, mesmo para valores de  $X/R$  inferiores a 16,96, está se admitindo que a subestação tem equipamentos com capacidade superada quando a corrente máxima suportada pela subestação for igual ou superior a 90% da corrente que o disjuntor de menor capacidade pode suportar. Este foi um critério adotado de forma conservadora para garantir que o resultado seja confiável considerando que:

- Os casos base utilizados para teste podem ter algumas aproximações nos dados, o que poderia comprometer os resultados das simulações. Como exemplo, estes casos muitas vezes não têm as informações exatas de resistência e reatância da rede, logo, estes critérios não podem ser fielmente examinados. Por aproximação, é usual a resistência dos transformadores nos casos base serem supostas iguais a zero. Adotando este critério conservador, está se aumentando as chances do resultado do programa estar dentro de um limite de tolerância;

- Podem ocorrer mudanças no planejamento da expansão dos sistemas que não estão representadas no caso base utilizado para teste. Estas mudanças podem aumentar o nível de curto-circuito do sistema para valores não previstos no caso utilizado;

- Conforme dito anteriormente, não está se considerando o cálculo da TRT na análise de superação dos disjuntores. Como esta análise em geral é feita apenas quando o curto atinge valor superior a 90% da capacidade de interrupção simétrica dos disjuntores, o critério adotado dispensa este tipo de análise, simplificando o processo de busca.

É importante ressaltar que uma subestação só terá equipamentos realmente superados por corrente simétrica de curto-circuito quando a corrente no equipamento em

questão for maior do que a indicada nos seus dados de placa, ou seja,  $I_{curto_i} > 100\% I_{curton_i}$ .

- Fatores Penalidade *FatorNDLCSerie* e *FatorNDLCSeccionado*

Este fator foi desenvolvido para penalizar as soluções candidatas que apresentem um alto número de DLCs inseridos. Desta forma, quanto menor o número de DLCs inseridos, mais a solução será beneficiada. O ideal é que se tenha apenas um DLC seccionando barras. Quando inseridos em série com os circuitos, é admitido mais de um DLC, mas nunca em grande número pois, caso contrário, os problemas operacionais causados invalidariam a solução encontrada. Sendo assim:

$$FatorNDLCSer = \sum_j^{NDLC} k_{NDLCSer_j} \quad (4.20)$$

$$FatorNDLCSec = \sum_j^{NDLC} k_{NDLCSec_j} \quad (4.21)$$

onde:

$NDLC$  número de DLCs inseridos no sistema;

$k_{NDLCSer_j}$  constante que penaliza a alocação de muitos DLCs em série com os circuitos;

$k_{NDLCSec_j}$  constante que penaliza a alocação de muitos DLCs seccionando as barras.

O valor estipulado para estas constantes depende do peso que se quer dar a cada fator perante os demais. Em geral, entende-se que  $k_{NDLCSec_j}$  deve ser maior do que  $k_{NDLCSer_j}$  já que a inserção de DLC seccionando barras exige, muitas vezes, manobra de vãos de linhas. Para o caso do DLC ser um RLC, a inserção seccionando barras provoca perda de confiabilidade enquanto que a instalação de RLC em série com os circuitos provoca, geralmente, maiores perdas para o sistema.

- Fatores Penalidade  $Fator3f$  e  $Fator1f$

Neste caso, o fator foi desenvolvido para penalizar as soluções candidatas que não reduziram muito o nível de curto-circuito do sistema, mesmo que tenham solucionado o problema dado. Fazendo o raciocínio inverso, este fator beneficia as soluções candidatas que apresentam alta queda no nível de curto do sistema. O  $Fator3f$  e o  $Fator1f$  são definidos pelas Equações (4.22) e (4.23), respectivamente.

$$Fator3f = \sum_i^{Nb} k_{3f} (Icurto3f_i - Icurton_i) \quad (4.22)$$

$$Fator1f = \sum_i^{Nb} k_{1f} (Icurto1f_i - Icurton_i) \quad (4.23)$$

onde:

$k_{3f}$  e  $k_{1f}$  constantes definidas de acordo com o grau de importância se quer dar ao  $Fator3f$  e  $Fator1f$ , respectivamente, na busca por uma solução ótima para o problema;

$Icurto3f_i$  valor da corrente de curto-circuito trifásico na barra  $i$  calculado pelo ANAFAS para a solução candidata;

$Icurto1f_i$  valor da corrente de curto-circuito monofásico na barra  $i$  calculado pelo ANAFAS para a solução candidata;

$Icurton_i$  valor da capacidade máxima de curto-circuito admitida pela subestação (barra  $i$ ).

Considerando todas as funções penalidades descritas anteriormente, a função de aptidão pode ser representada por:

$$f_{ap} = \frac{1}{C(\zeta) + S(\zeta)} \quad (4.24)$$

onde:

$$S(\zeta) = Fator_i + FatorNDLCSec + FatorNDLCSer + Fator3f + Fator1f \quad (4.25)$$

A função de minimização foi transformada em maximização obtendo seu valor inverso. Vale lembrar que a função de minimização não pode ser transformada em função de maximização diretamente multiplicando seu valor por -1 porque os AGs não trabalham com valores negativos.

Como resumo, pode-se afirmar que a função de aptidão adotada nada mais é do que a função objetivo alterada para que seus valores sejam todos não negativos e seja de maximização ao invés de minimização.

### 4.3.3 Valores e Custos dos DLCs

O custo adotado para instalação de DLCs no sistema foi estimado através do valor de RLCs, sem considerar os custos de projeto e instalação. O custo total da instalação real deste DLC será portanto superior ao valor considerado. O RLC foi escolhido para o estudo visto que o mesmo é muito utilizado no Brasil.

Antes do início da simulação do programa, é possível alterar os valores dos RLCs que devem ser testados, assim como de seus custos associados. Valores típicos de RLCs variam de 5 a 30  $\Omega$  e seus custos dependem, entre outras coisas, do nível de tensão onde o reator será instalado. O programa contém os valores e seus custos associados tanto para os RLCs inseridos seccionando barras, como para os inseridos em série com os circuitos. Logo, as alterações serão razoáveis apenas se o usuário necessitar incluir ou excluir algum RLC ou mesmo mudar seu custo. O valor do RLC assim como seu custo pode ser diferenciado quando inserido seccionando barras ou em série com circuitos. Os custos utilizados neste trabalho estão apresentados no item 5.2.1.

## 4.4 Estrutura do Cromossomo

A metodologia desenvolvida utilizando Algoritmo Genético irá abranger as possibilidades de alocação de DLCs no sistema. Será testada a inserção de DLCs em série

com circuitos e transformadores ou seccionando barras. Considere o exemplo mostrado na Figura 25.

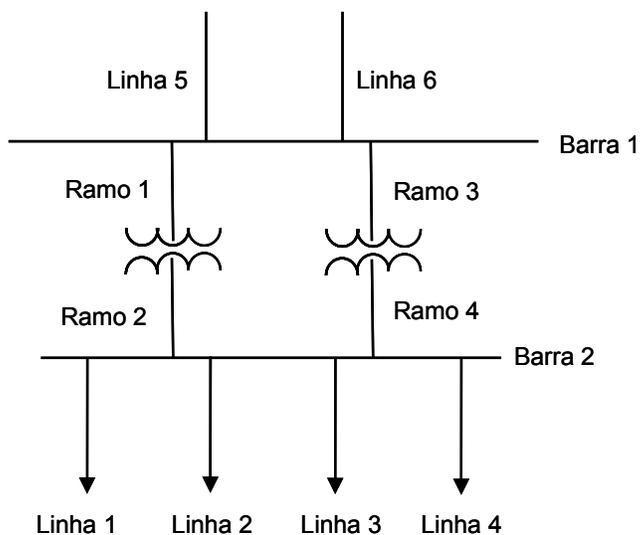


Figura 25 Sistema exemplo

Para cada linha ou ramo existente são reservados 4 bits do cromossomo, conforme Figura 26. O primeiro bit dá a informação se a linha ou o ramo tem ou não DLC em série, e os três últimos bits informarão o valor do DLC, caso ele esteja presente.

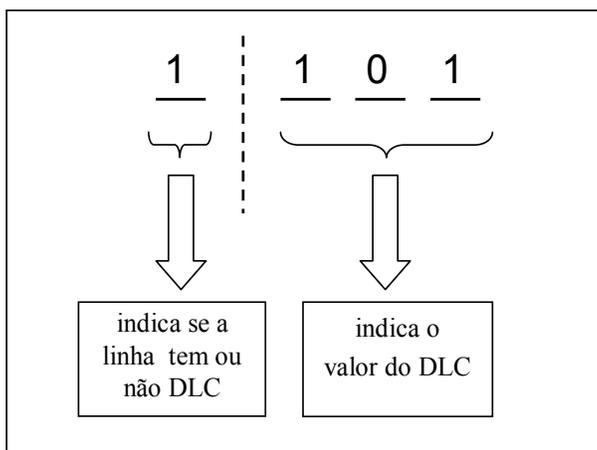


Figura 26 Bits do cromossomo para cada linha

Se o primeiro bit for 0, significa que não será inserido DLC. Sendo assim, os demais bits não terão influência na solução final. Se o primeiro bit for 1, significa que será inserido DLC. O valor do DLC é então estipulado nos 3 bits que seguem conforme as informações da Tabela 5, baseado nos valores típicos de RLC.

Tabela 5 Valores de DLC utilizados

Seqüência de bits	000	001	010	011	100	101	110	111
Valor do DLC ( $\Omega$ )	5	10	12	15	18	20	25	30

Assim, para todas as linhas do exemplo tem-se:

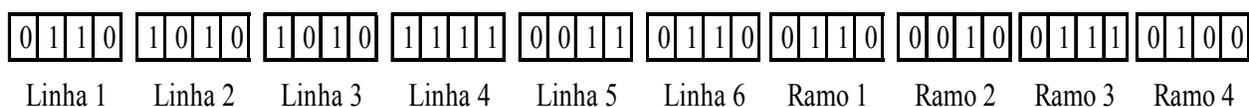


Figura 27 Parte do cromossomo relativa aos circuitos

O exemplo anterior significa inserção de DLC nas linhas 2, 3 e 4 nos valores  $12\Omega$ ,  $12\Omega$  e  $30\Omega$ , respectivamente.

Para o caso do seccionamento de barras, a parte do cromossomo responsável pela informação da existência ou não de DLC se dá conforme a Figura 28.

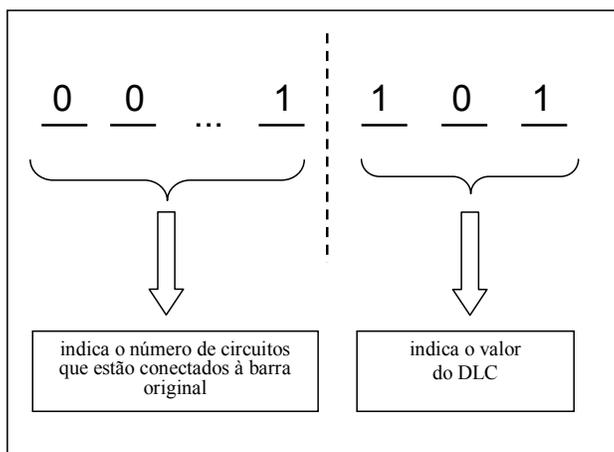


Figura 28 Bits do cromossomo para as barras do sistema

Pela figura anterior, observa-se que o número de bits do cromossomo reservado para cada barra do sistema depende de quantos circuitos estão ligados na referida barra pois cada circuito corresponderá a um bit. A barra original é seccionada dando origem a duas seções de barras separadas por um DLC de forma que, para os bits iguais a 0, os circuitos associados serão agrupados em uma seção da barra e, de forma semelhante, os circuitos correspondentes aos bits iguais a 1 serão agrupados na outra seção. Esta forma de representar os DLCs nas barras tem a vantagem de não permitir que a mesma barra seja seccionada mais de uma vez, caso este que seria inviável na prática.

Na implementação computacional, foi criada uma barra fictícia representando uma das seções da barra para que todos os circuitos que estiverem com 1 no cromossomo, estejam ligados a esta barra fictícia e os circuitos que estiverem com 0 no cromossomo, estejam ligados a barra original que passará a representar a outra seção da barra. Será então inserido um DLC ligando as duas seções da barra (representadas pelas barras fictícia e original) cujo valor é obtido através dos três últimos bits, conforme indicado na figura anterior.

De forma similar ao caso das linhas, os DLCs inseridos seccionando as barras também podem ter 8 valores diferentes, não necessariamente iguais aos valores escolhidos para os circuitos. Para o exemplo apresentado na Figura 25, a parte do cromossomo responsável por seccionar ou não a barra poderia ficar da seguinte forma:

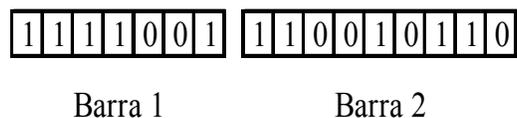


Figura 29 Parte do cromossomo relativa às barras

Note que a barra 1 tem 4 bits representando os 4 circuitos conectados a ela mais 3 bits para o valor do DLC, totalizando 7 bits. Seguindo a mesma linha de raciocínio, são reservados 9 bits para o caso da barra 2, onde 6 deles representam os circuitos conectados e 3 deles são reservados para o valor do DLC.

A ordem dos bits relativa aos circuitos para o caso do seccionamento das barras corresponde à ordem em que cada circuito aparece no caso do ANAFAS, através do cartão *Dados de Circuitos* (cartão 37). Logo, se os circuitos que estão ligados à barra 2 aparecem no caso ANAFAS na seqüência: linha 1, linha 2, linha 3, linha 4, ramo 2 e ramo 4; então, a barra 2 é seccionada de modo que fiquem, na barra com a numeração original, as linhas 1, 2 e o ramo 2; e na barra fictícia criada, as linhas 3, 4 e o ramo 4, para a seqüência de bits dada anteriormente.

Se os bits que indicam os circuitos que estão conectados à barra forem todos 1 ou todos 0, a barra não será seccionada. Então, para a seqüência de bits anterior, a barra 1 não terá DLC seccionando a mesma.

O cromossomo completo é montado primeiro com os dados dos circuitos e depois com os das barras sendo que para ambos a ordem que aparece no indivíduo é a mesma da que aparece no caso original. O cromossomo do exemplo terá então a seguinte característica:

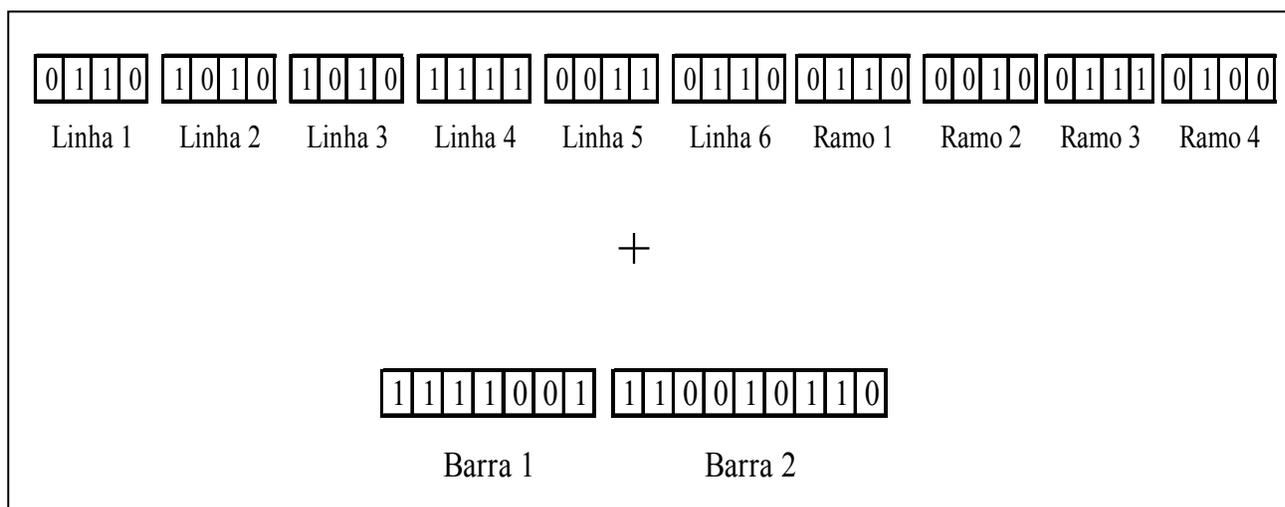


Figura 30 Representação completa do cromossomo

Para este caso, os DLCs estariam inseridos da seguinte maneira:

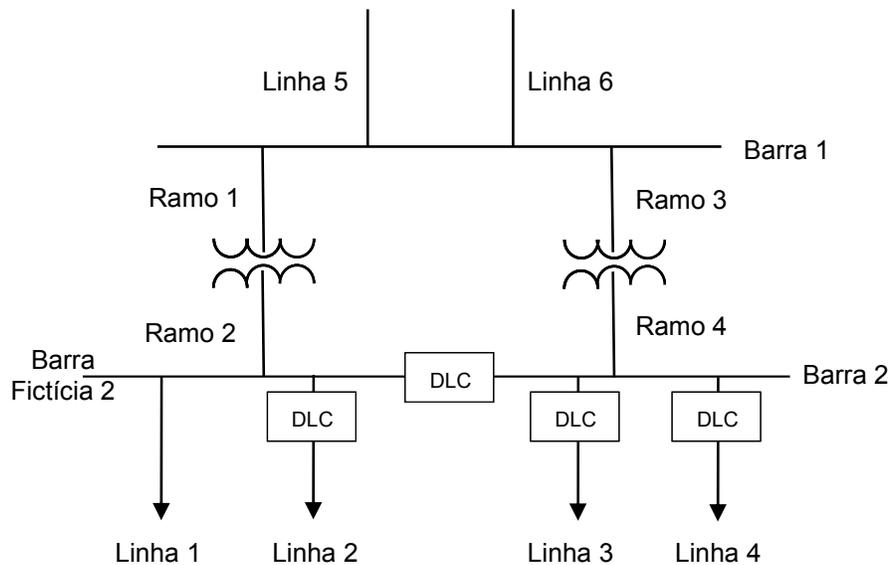


Figura 31 DLCs inseridos para o cromossomo do exemplo

Esse processo é feito para cada cromossomo da geração em questão, e depois repetido para todas as gerações ao longo do espaço de busca.

Como é possível selecionar os locais em que a instalação do DLC é permitida (seccionando barras ou em série com circuitos e transformadores), o cromossomo conterá apenas os genes das barras, circuitos e transformadores que suportam a instalação de DLC. Do ponto de vista computacional, a possibilidade de se escolher as barras, circuitos e transformadores a serem alocados no caso estudado tem a vantagem de diminuir o tamanho do cromossomo visto que seus bits conterão apenas os dados dos circuitos e das barras onde a instalação de DLC é permitida. Esse fato diminui o tempo computacional do programa, o que é uma grande vantagem. Apesar disso, dependendo do porte do sistema elétrico em análise, o número de genes do cromossomo ainda pode ser elevado.

#### 4.5 Implementação do Modelo Computacional

O modelo computacional foi implementado de forma que o programa desenvolvido em MATLAB e o ANAFAS trabalhem de forma totalmente integrada, conforme mostrado no fluxograma da Figura 32.

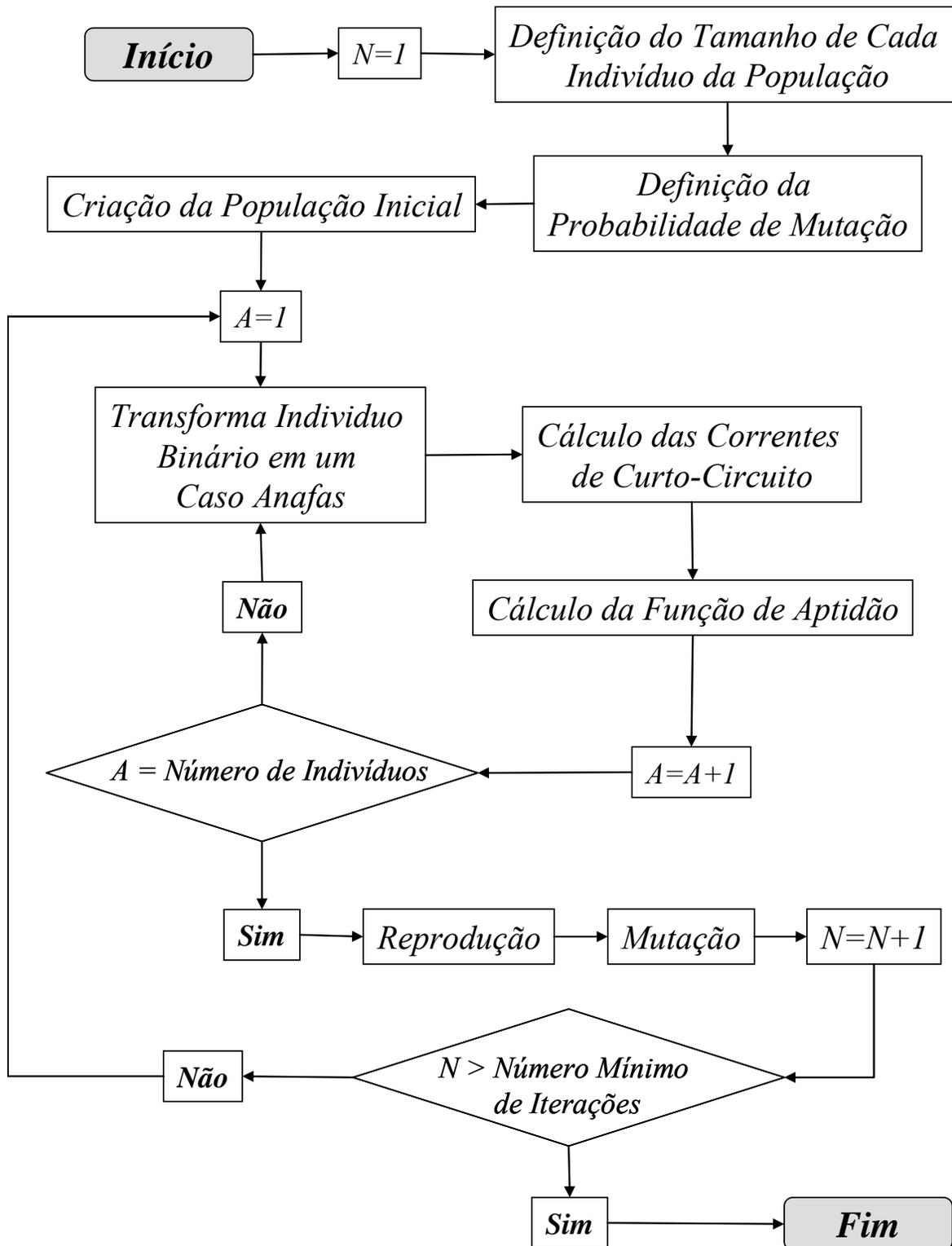


Figura 32 Fluxograma do programa computacional implementado

A cada iteração do processo de otimização pelo AG, um conjunto de soluções para o problema é gerado e cada solução é um dado de entrada para o programa ANAFAS. Se um determinado resultado for satisfatório, a solução será guardada como possível solução para o problema e, se o resultado não for satisfatório, esta solução terá grandes chances de ser descartada pelo próprio processo de evolução do AG.

Para implementar a metodologia, foram desenvolvidos módulos independentes, que se integram conforme mostrado na Figura 33 e cujas funções estão descritas a seguir.

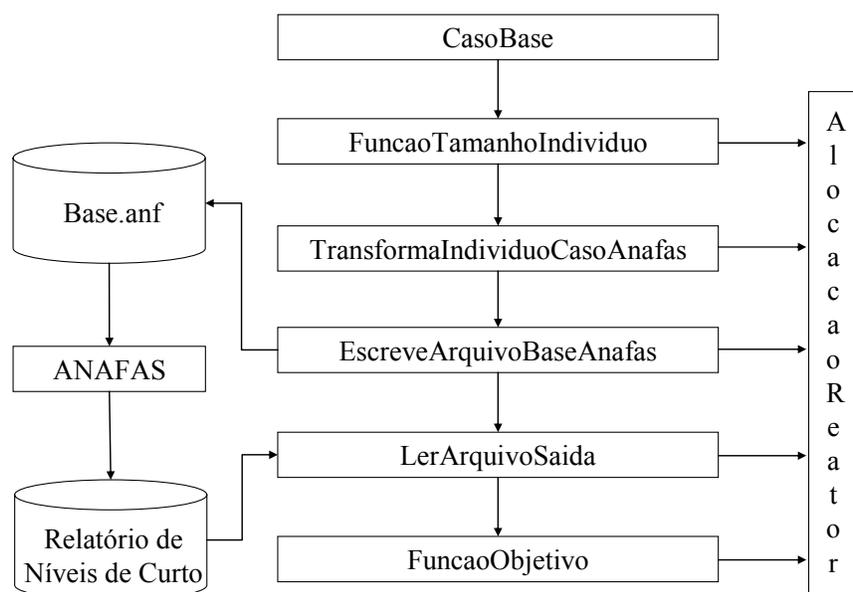


Figura 33 Fluxograma com a integração dos módulos do programa computacional

- *AlocacaoReator*

É o módulo principal pois reúne os passos do programa. É onde estão as funções do AG, como por exemplo os operadores de seleção, cruzamento e mutação, e definidos os parâmetros de controle como o número de indivíduos inicial da população, o número de gerações, as taxas de cruzamento e mutação, entre outros. Também está presente neste módulo a estrutura do programa pois nele está reunida a maioria das funções existentes nos outros módulos.

Além disso, *AlocacaoReator* cria o arquivo denominado *Anafas.inp* que contém um conjunto de comandos necessários para executar as simulações de curto-circuito monofásico e trifásico para as barras do sistema através do programa ANAFAS.

- *CasoBase*

É o módulo que contém todos os dados de entrada fornecidos pelo usuário. Este módulo é formado pelo caso base, que possui todos os parâmetros necessários para executar o cálculo do curto-circuito do sistema no qual se deseja solucionar o problema. Também possui informações sobre as barras, circuitos e transformadores onde é permitida a inserção de DLC e informações sobre os valores das capacidades de todas as barras existentes no sistema.

- *FuncaoTamanhoIndividuo*

Calcula o tamanho que devem ter os indivíduos de acordo com o número de barras e circuitos do caso base.

- *TransformaIndividuoCasoAnafas*

Este módulo decodifica os indivíduos da população transformando-os em dados necessários para montar um caso de curto-circuito. Cada indivíduo corresponde a uma possível solução para o problema, logo, deverá ter as informações da localização dos reatores que serão inseridos no caso base na tentativa de solucionar o problema.

- *EscreveArquivoBaseAnafas*

Transforma cada indivíduo que foi decodificado em um arquivo em formato ANAFAS, denominado *base.anf*, que será lido pelo programa de curto-circuito. Isto é feito para todos os indivíduos da população. Note que *TransformaIndividuoCasoAnafas* apenas decodifica o indivíduo enquanto *EscreveArquivoBaseAnafas* escreve o arquivo de dados.

- *LerArquivoSaida*

Através do programa ANAFAS e do arquivo *base.anf*, é gerado um relatório com diversos resultados, entre eles, o nível de curto-circuito trifásico e monofásico e a relação  $X/R$  de todas as barras do sistema. Isto é repetido para todos os casos criados. Como o formato do relatório é padrão do ANAFAS, foi verificada a necessidade de se criar o módulo *LerArquivoSaida* para que seja feita a leitura deste relatório, extraíndo dele apenas as informações que serão utilizadas posteriormente no cálculo da função de aptidão.

- *FuncaoObjetivo*

É o módulo que contém as informações sobre a função objetivo e função de aptidão do problema. Os dados de entrada deste arquivo são muito importantes já que os mesmos determinam se a solução candidata atende ou não às restrições do problema.

#### **4.5.1 Características dos Algoritmos Genéticos Implementados**

Com o objetivo de ampliar a região de busca a fim de encontrar a solução ótima para o problema, algumas opções presentes nos Algoritmos Genéticos podem variar dependendo do problema a ser tratado. Desta forma, o módulo computacional permite escolher os seguintes dados de entrada:

- Número de indivíduos da população inicial

Pode ser escolhido qualquer valor inteiro lembrando que, quanto maior o número de indivíduos na população inicial, maior é o espaço de busca. A geração da população da população inicial é feita de maneira aleatória.

- Número máximo de gerações

Também poderá ser escolhido qualquer valor inteiro.

- Operadores Genéticos

Para a seleção, é necessária a escolha entre o método da roleta e do torneio, sendo possível associar o elitismo ao processo evolutivo. O elitismo é importante pois evita que um bom indivíduo seja perdido ao longo do processo.

O cruzamento pode ser de um ponto, de dois pontos ou uniforme e a taxa de cruzamento pode ser alterada.

A mutação utilizada é a mutação por troca de bit e a taxa de mutação pode ser realizada por uma constante previamente definida ou através de uma exponencial decaindo ao longo do processo. Caso se opte pela taxa de mutação decaindo através de uma exponencial, foi definido que:

$$T_{mut} = \frac{0,4}{ger^{1,7}} \quad (4.26)$$

onde:

$T_{mut}$  taxa de mutação;

$ger$  número da geração que pode variar de 1 até o número de iterações estipulado.

A equação anterior pode também ser representada pelo gráfico da Figura 34. É importante mencionar que esta taxa de mutação foi definida de maneira empírica e pode ser alterada.

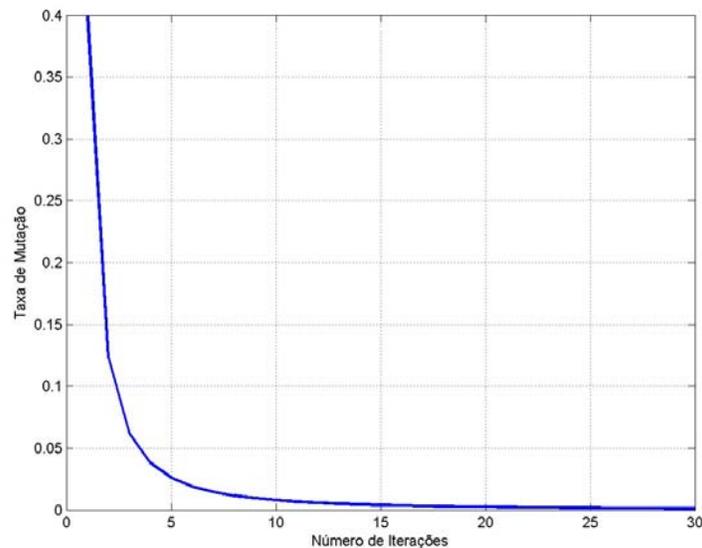


Figura 34 Variação da taxa de mutação em função do número da geração

# Capítulo 5

## Resultados

A metodologia apresentada no capítulo anterior foi validada através de testes. A descrição das simulações realizadas, os parâmetros do AG e penalidades utilizados e os resultados obtidos estão apresentados neste capítulo.

### 5.1 Sistemas Elétricos de Teste

Os testes foram feitos utilizando dois sistemas elétricos: o sistema IEEE14 barras e o sistema elétrico da ELETROSUL na representação do ano de 2010. Suas principais características estão apresentadas a seguir.

#### 5.1.1 Sistema IEEE14 Barras

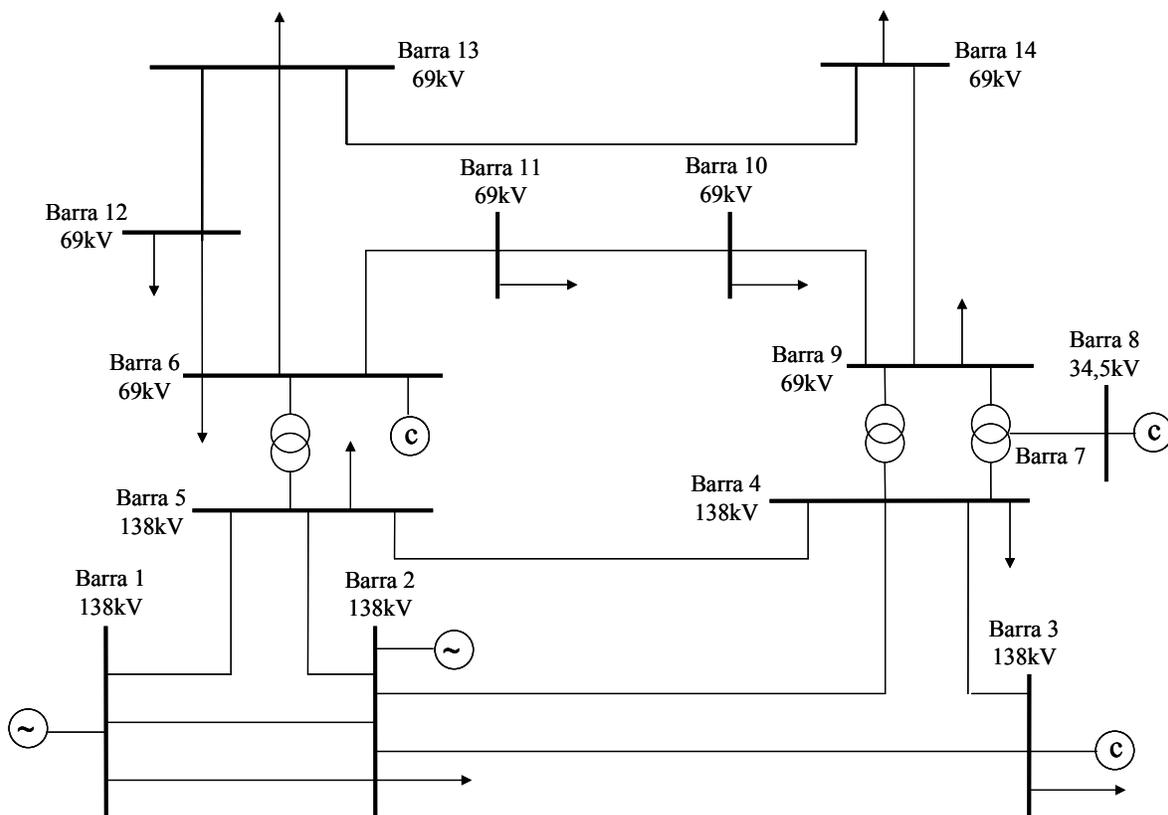


Figura 35 Diagrama unifilar do sistema IEEE14 barras

O sistema IEEE14 barras tem 14 barras, 16 linhas de transmissão, 3 transformadores, 2 geradores e 3 compensadores síncronos. Este sistema, apresentado na Figura 35, foi escolhido para validar o algoritmo e fazer os primeiros ajustes nos parâmetros do AG. Foi considerado que as barras 1 a 5 são de 138kV, 9 a 14, de 69kV e a barra 8, de 34,5kV.

### **5.1.2 Sistema Elétrico da ELETROSUL**

O sistema real escolhido para teste foi o sistema elétrico da ELETROSUL. A escolha deste sistema se deu pelo fato de o mesmo apresentar características importantes para avaliação do método estudado na solução de problemas práticos, tais como:

- ter linhas de transmissão em alta tensão;
- ter subestações superadas por níveis de curto já em 2005.

A base de dados de curto-circuito utilizada nos testes para o ano de 2010 foi disponibilizada pela ELETROBRÁS, através do Plano Indicativo de Transmissão da Região Sul, período 2004/2013. Foi feito um equivalente do sistema da região sul mantendo no caso apenas a parte do sistema da ELETROSUL que tinha equipamentos superados. O sistema equivalente tem 41 linhas, 21 transformadores, 37 barras reais e 21 barras fictícias (para representar o ponto do meio de cada transformador). A base de dados de fluxo de potência utilizada nos testes para o ano de 2010 foi disponibilizada pela ELETROBRÁS, através do Plano Indicativo de Transmissão, período 2004/2013. O diagrama unifilar do sistema equivalente da ELETROSUL está mostrado na Figura 36.

O ano de 2010 foi escolhido de modo que seja encontrado um resultado que solucione o problema a médio prazo, e não apenas o problema existente atualmente.

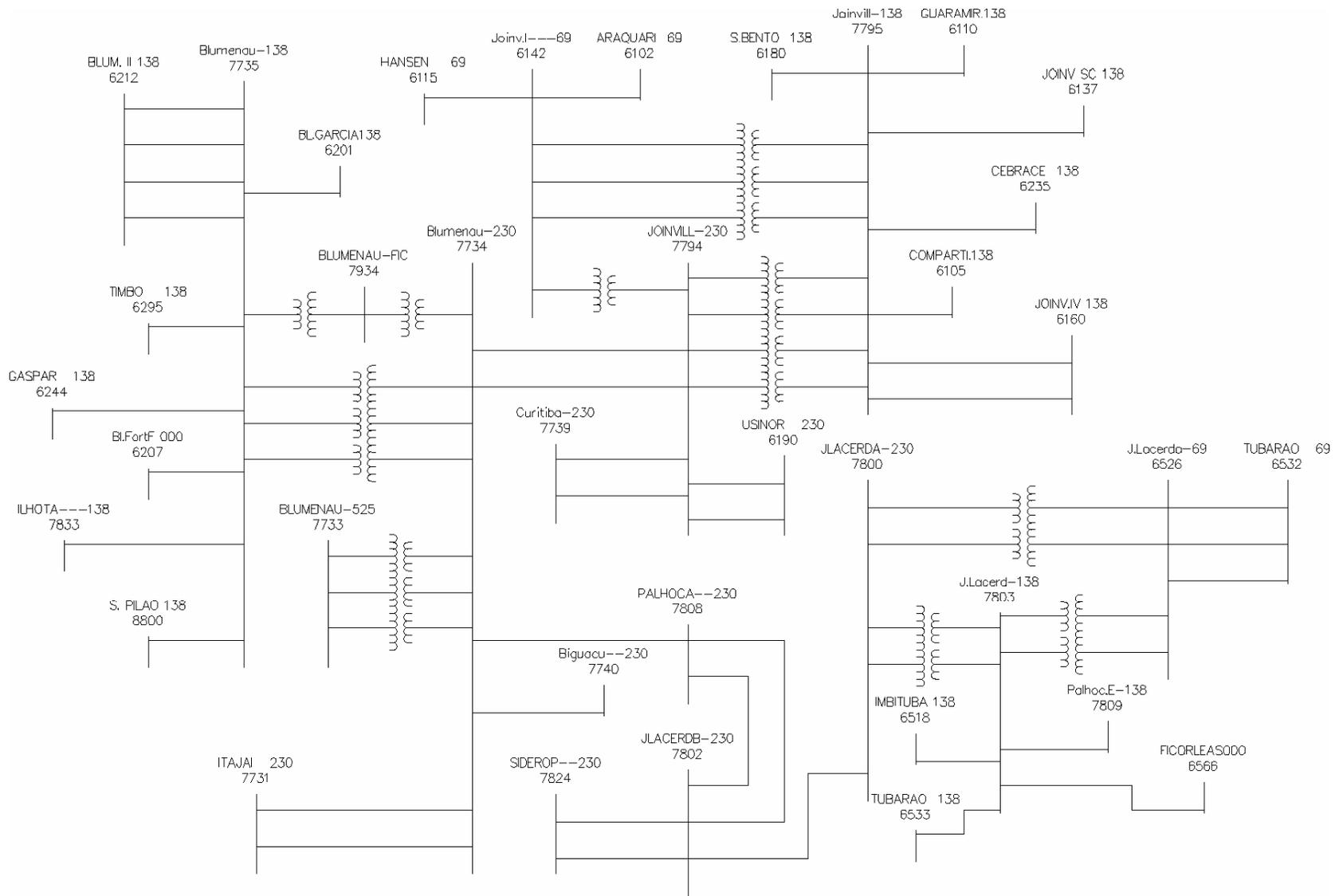


Figura 36 Diagrama unifilar do sistema equivalente da ELETROSUL

## 5.2 Considerações

Para facilitar a análise dos testes, os resultados encontrados em cada simulação do programa foram salvos em arquivos nomeados *caso<número do caso>*, sendo que a solução com melhor desempenho encontrada pelo AG foi salva no arquivo *caso1*. Para cada teste feito, os resultados do AG foram salvos até o número 10, que corresponde ao décimo melhor caso encontrado pelo AG, considerando sua função de aptidão. Cada conjunto de 10 casos foram salvos em pastas denominadas *teste<número do teste>*. Quando o mesmo teste é simulado diversas vezes alterando apenas os parâmetros do AG, foram criadas subpastas dentro das pastas anteriormente mencionadas. Os gráficos correspondentes a cada teste se encontram nos arquivos do tipo: *fig<número do teste>.fig*.

### 5.2.1 Custos utilizados

Os custos adotados dos RLCs em todos os testes estão indicados na Tabela 6.

Tabela 6 Custo dos RLCs utilizados

Valor do RLC ( $\Omega$ )	Custo do Reator Unidades Monetárias (UM)					
	765kV	500kV	345kV	230kV	138kV	69kV
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

Estes valores foram estimados através dos custos de alguns reatores existentes no documento de Referência de Custos de LTs e SEs de AT e EAT da ELETROBRÁS, base

de junho de 2004. É importante mencionar que os custos utilizados são valores aproximados e discretizados, não correspondendo fielmente à realidade. Os valores reais dos custos dos RLCs devem ser obtidos fazendo um levantamento de dados com os fabricantes.

### **5.2.2 Funções de Aptidão Testadas**

Nos testes realizados considerou-se a aplicação de dois diferentes objetivos, através da adaptação da função de aptidão. Cada objetivo pode ser atendido através da alteração nos valores das constantes utilizadas para cada penalidade. As situações consideradas foram:

**Objetivo 1:** Atendimento aos requisitos de mínimo custo e mínimo número de DLCs inseridos no sistema

Neste caso, o objetivo é atender às restrições do sistema considerando apenas a minimização do custo e a inserção do número mínimo de DLCs no sistema. A implementação deste objetivo se dá fazendo com que as constantes associadas às penalidades de mínima diferença entre a corrente nominal do equipamento e a corrente calculada pelo ANAFAS sejam iguais a zero.

**Objetivo 2:** Atendimento aos requisitos de mínimo custo, mínimo número de DLCs inseridos no sistema e máxima redução da corrente de curto

Além das considerações do objetivo 1, também foi considerada a máxima redução da corrente de curto no sistema.

### **5.2.3 Conjunto de Parâmetros do AG e Fatores Penalidade Utilizados nos Testes**

O conjunto de parâmetros e fatores penalidade necessários para a execução do AG deve ser ajustado de forma que se tenha um resultado mais próximo da solução ótima global. Foram testadas as seguintes variações dos parâmetros do AG:

- Tamanho da população: valores entre 50 e 300;
- Número máximo de gerações: valores entre 100 e 500;
- Taxa de cruzamento: 0,5 e 0,7;
- Taxa de mutação: valores variando de 0,05 a 0,001 ou decaindo por uma exponencial;
- Operador de cruzamento: um ponto, dois pontos e uniforme;
- Operador de seleção: roleta e torneio;
- Operador de mutação: mutação por troca de bit.

As constantes dos fatores penalidade testadas foram:

- $k_{NDLCSer_j}$  e  $k_{NDLCSec_j}$ : valores entre 0,1 e 3,3;
- $k_{3f}$  e  $k_{1f}$ : valores entre 0,0 e 1,0.

#### 5.2.4 Regime Permanente

Para as análises em regime permanente, considerou-se que as tensões estão dentro da normalidade quando seus valores ficarem de acordo com a Tabela 7.

Tabela 7 Limite de tensão aceitável para a operação do sistema em regime permanente

Tensão (kV)	Valor mínimo (p.u.)	Valor máximo (p.u.)
69	0,95	1,05
138	0,95	1,05
230	0,95	1,05
345	0,95	1,05
500	0,95	1,10
765	0,95	1,10

Além disso, as capacidades das linhas devem ser respeitadas e as perdas totais no sistema devem ficar em até 6% da potência instalada em MW.

### 5.3 Resultados dos Testes com o Sistema IEEE14

Para avaliar o desempenho do método, validação do algoritmo e ajuste dos parâmetros de controle do AG e das constantes de penalidade, foram feitos diversos testes com o sistema IEEE14. O caso base do sistema possui os valores de curto listados na Tabela 8 e se comporta em regime permanente conforme o diagrama unifilar da Figura 37. Como a barra 7 é fictícia, a mesma não entra na análise do nível de curto-circuito do sistema.

Tabela 8 Valores de curto-circuito do caso base do IEEE14

Barra Número	Módulo da corrente de curto- circuito trifásico (kA)	Relação $X/R$ trifásica	Módulo da corrente de curto- circuito monofásico (kA)	Relação $X/R$ monofásica
1	8,35	12,45	3,10	3,88
2	8,24	9,10	3,50	3,64
3	3,78	3,62	2,21	2,03
4	4,98	4,01	4,27	4,33
5	4,96	4,56	4,13	5,20
6	5,54	6,29	2,14	2,01
8	8,33	19,10	7,40	21,80
9	4,98	4,76	4,72	5,30
10	3,94	3,66	3,00	3,25
11	3,49	3,24	2,03	2,38
12	2,78	2,36	1,38	1,63
13	3,74	3,04	1,85	1,84
14	2,80	2,57	1,85	2,08

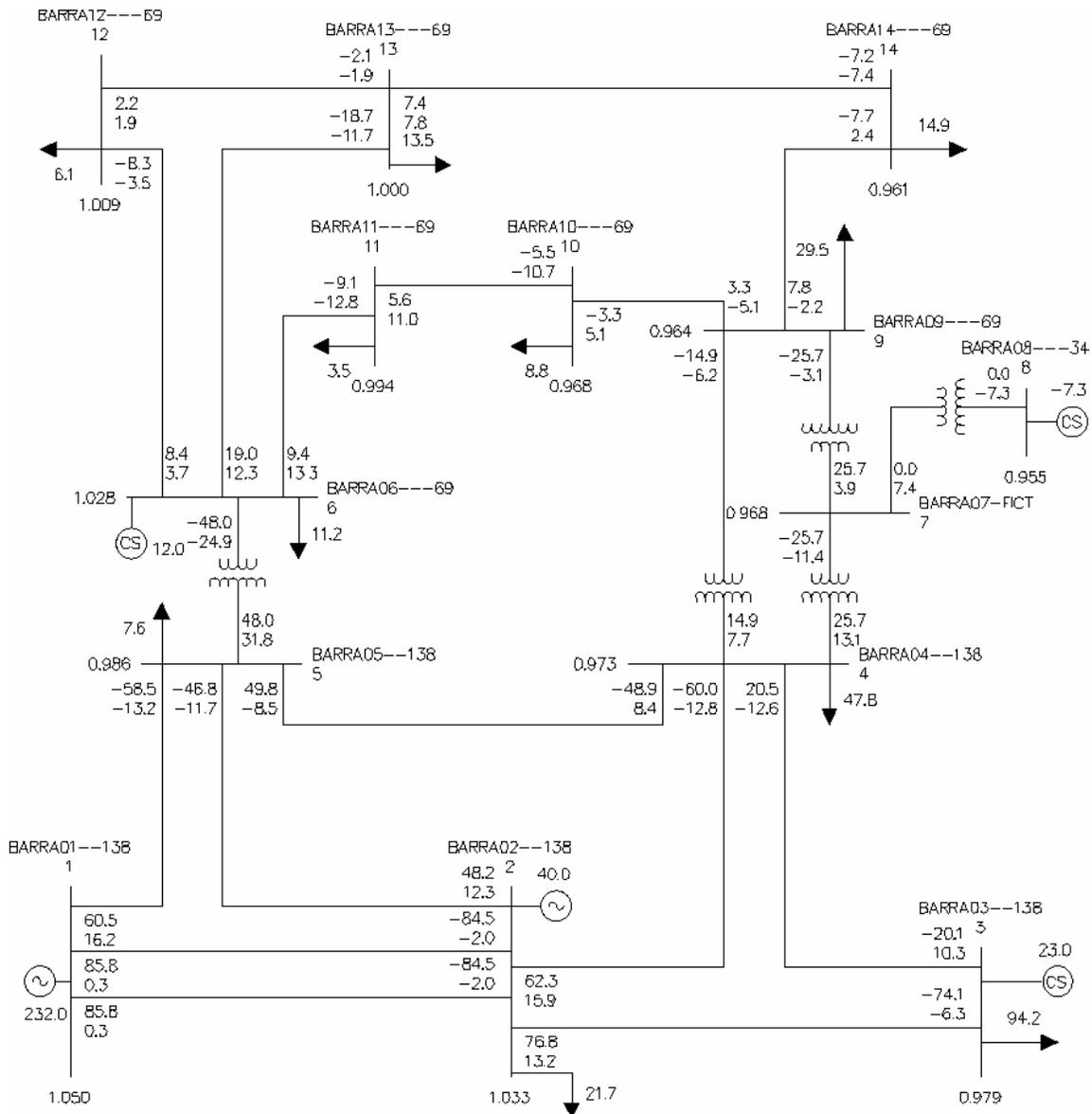


Figura 37 Diagrama unifilar do comportamento do sistema em regime permanente

O diagrama unifilar do sistema mostra os valores de fluxo de potência de acordo com a legenda da Figura 38.

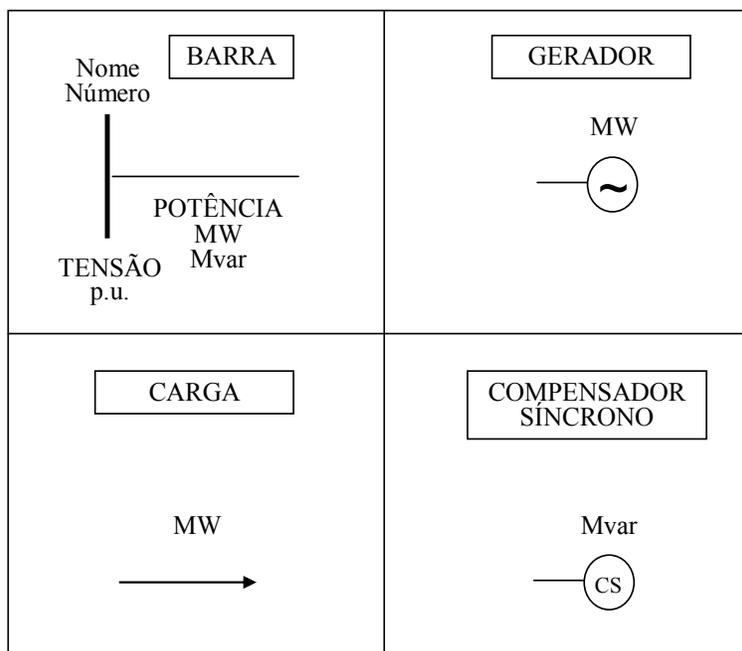


Figura 38 Legenda do diagrama unifilar

A potência instalada no caso base é de 271,8MW e as perdas são 12,2MW. A seguir, encontra-se uma breve descrição dos principais testes feitos.

### 5.3.1 Objetivo 1

- **Teste 1:** Teste com a barra 4 superada por corrente de curto-circuito simétrica – Alocação de reatores em barras, circuitos e transformadores

O teste considerando que apenas a barra 4 estava superada foi feito com o objetivo de analisar se o programa tem a capacidade de encontrar a solução de um problema pontual. Os parâmetros e as constantes utilizadas foram:

- Tamanho da população: 50;
- Número máximo de gerações: 200;

- Taxa de cruzamento: 0,5;
- Operador de cruzamento: dois pontos;
- Operador de seleção: roleta;
- Taxa de mutação: decaindo por uma exponencial;
- $k_{NDLCSer_j} : 1,5;$
- $k_{NDLCSec_j} : 1,7;$
- $k3f$  e  $k1f : 0.$

Os valores máximos de curto-circuito admissíveis por cada barra foram considerados de acordo com a Tabela 9.

Tabela 9 Teste 1 - Valores adotados da corrente de curto suportável por cada barra

Nº da Barra	1	2	3	4	5	6	8	9	10	11	12	13	14
Corrente (kA)	12,0	12,0	5,2	4,8	7,0	7,6	12,0	5,6	5,5	5,0	4,0	6,0	4,0

Foi adotada possibilidade de inserir reator seccionando as barras 4, 5, 6 e 9 bem como inserir reator em série com os circuitos que ligam as barras 1-5, 2-4, 2-5, 3-4, 4-5, 6-11, 6-12, 6-13, 9-10, 9-14, e nos dois transformadores localizados entre as barras 4 e 9. A Figura 39 ilustra os possíveis locais de instalação que foram testados onde os elementos tracejados permitem a inserção de DLC.

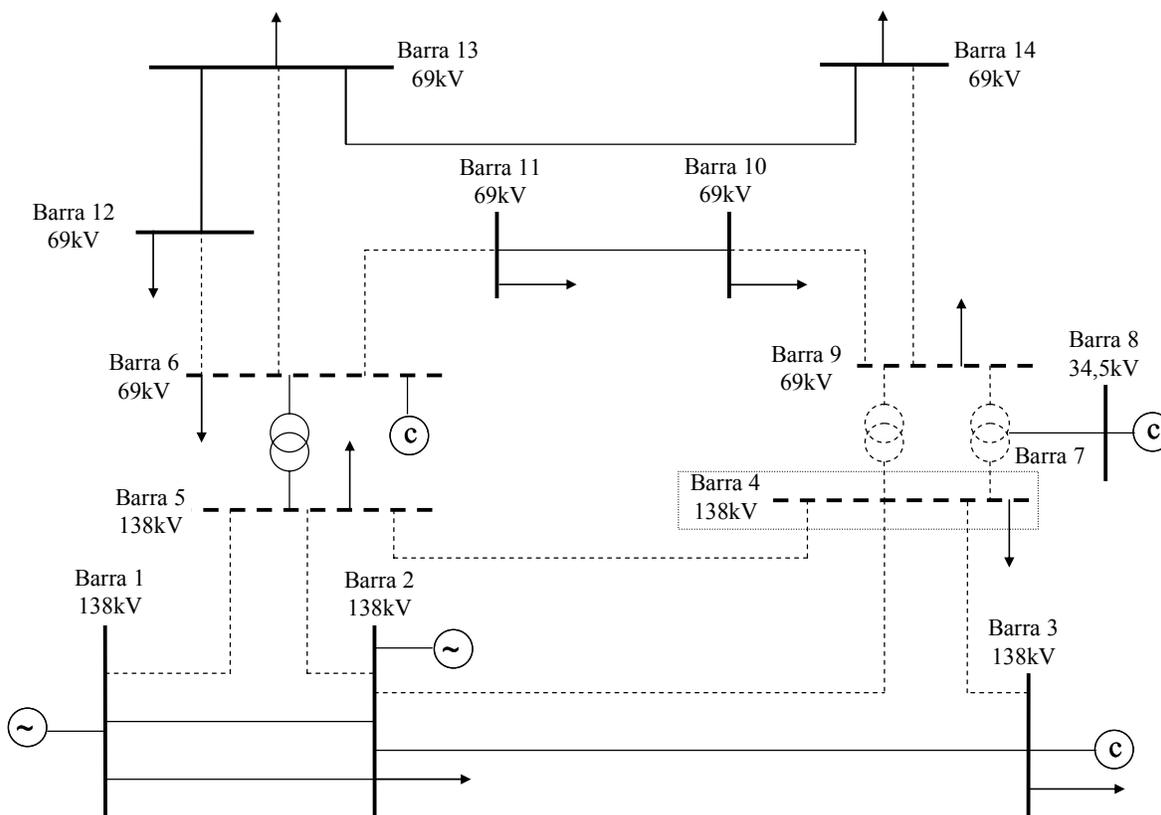


Figura 39 Teste 1 - Localizações possíveis para os DLCs (tracejado)

O resultado encontrado foi idêntico para os 10 casos salvos e está mostrado na Tabela 10, que corresponde a inserir um reator de 15ohms seccionando a barra 4 onde o transformador 4-9 e os circuitos 2-4 e 3-4 estão ligados a um dos seccionamentos da barra 4 e o outro transformador 4-9 (representado pela ligação 4-7) e o circuito 4-5 estão ligados ao outro seccionamento.

Tabela 10 Teste 1 - Reator inserido em barra

Barra		Tensão (kV)	Reator (ohm)	Custo (UM)	Circuitos ou transformadores	
Num	Nome				Sec 1	Sec 2
4	Barra 4	138	15	16,8	4-9 2-4 3-4	4-7 4-5

Para este resultado, as correntes de curto-circuito nas barras foram reduzidas para os valores apresentados na Tabela 11, que indica também a percentagem de redução do curto quando comparado com os valores do caso base.

Tabela 11 Teste 1 - Valores de curto calculados após a inserção de RLC

Barra Número	Módulo da corrente de curto-circuito trifásico (kA)	Redução da corrente de curto trifásico (%)	Relação $X/R$ trifásica	Módulo da corrente de curto- circuito monofásico (kA)	Redução da corrente de curto monofásico (%)	Relação $X/R$ monofásica
1	8,35	0,00	12,44	3,08	-0,56	3,86
2	8,23	-0,16	9,12	3,47	-0,79	3,62
3	3,69	-2,47	3,74	2,15	-2,77	2,05
4 sec1	4,24	-14,90	4,52	3,55	-16,84	4,89
5	4,66	-6,10	4,79	3,97	-3,87	5,39
6	5,48	-1,04	6,26	2,14	-0,08	2,01
8	8,28	-0,63	19	7,36	-0,57	21,74
9	4,96	-0,33	4,77	4,70	-0,39	5,3
10	3,93	-0,23	3,67	2,99	-0,23	3,25
11	3,47	-0,44	3,24	2,02	-0,46	2,38
12	2,77	-0,30	2,37	1,38	-0,08	1,63
13	3,71	-0,72	3,04	1,85	-0,25	1,84
14	2,79	-0,24	2,58	1,85	0,00	2,09
4 sec2	4,30	-13,65	4,43	3,83	-10,24	4,71

Pela tabela anterior, observa-se que a redução do curto-circuito foi mais significativa na barra 4, como era de se esperar, e quase imperceptível nas barras mais distantes eletricamente da barra 4, como é o caso da barra 1. O resultado do fluxo de potência no sistema é mostrado na Figura 40.

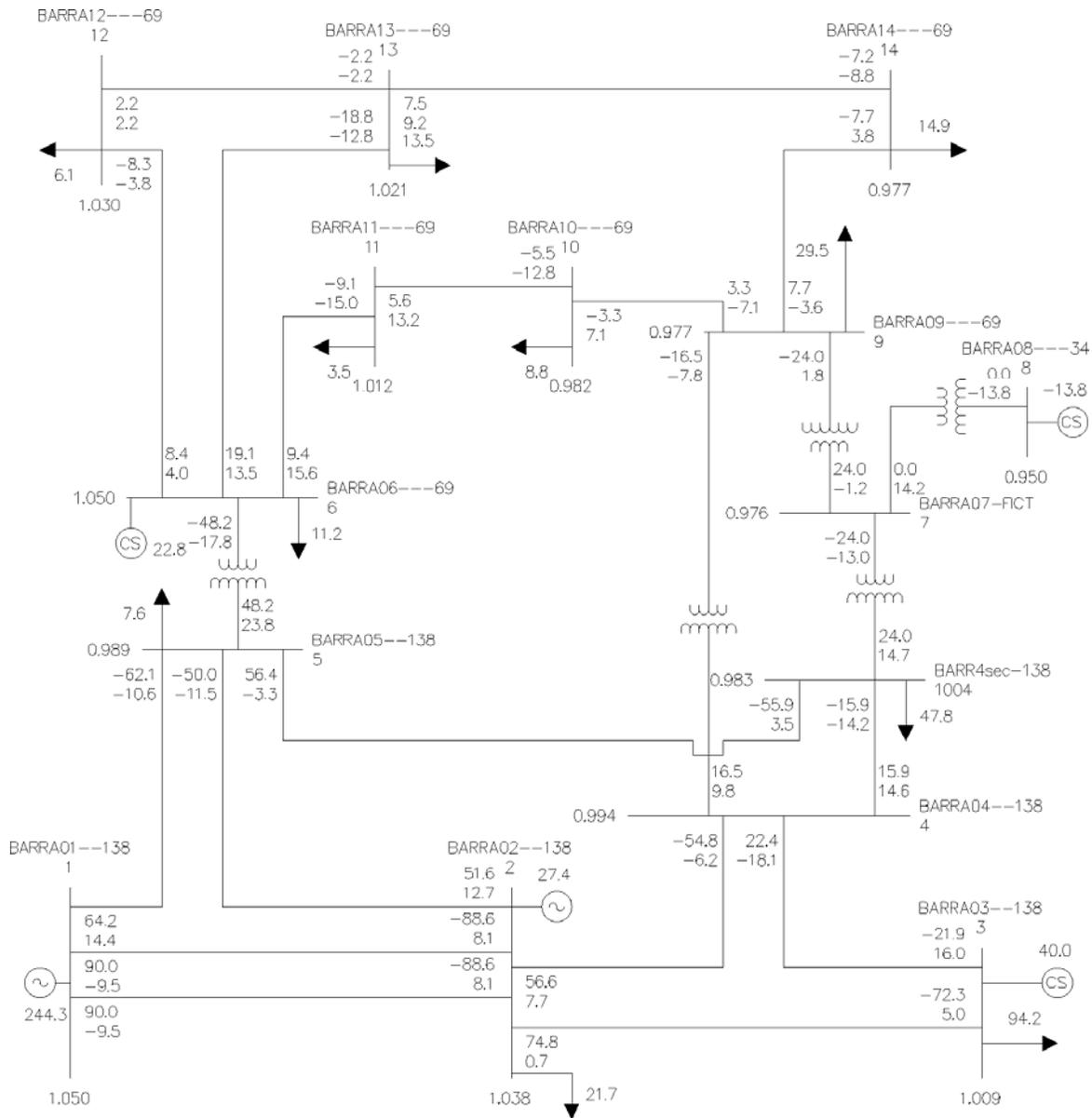


Figura 40 Teste 1 - Sistema em regime permanente

O valor encontrado para as perdas totais no sistema em regime permanente foi 13,0MW, o que corresponde a 4,78% da capacidade instalada estando, portanto, dentro do aceitável, e a queda de tensão no reator foi 0,011 p.u.. Nota-se pela Figura 40 que o sistema se comporta em regime permanente dentro das restrições operativas com todas as tensões entre 0,95 e 1,05. Os gráficos de convergência do AG, tanto para o teste 1 quanto para todos os outros testes feitos, estão apresentados no Apêndice C.

- **Teste 2:** Teste com a barra 4 superada por corrente de curto-circuito simétrica – Alocação de reatores apenas em circuitos e transformadores

Este teste foi feito utilizando os seguintes parâmetros e constantes do AG:

- Tamanho da população: 50;
- Número máximo de gerações: 200;
- Taxa de cruzamento: 0,5;
- Operador de cruzamento: dois pontos;
- Operador de seleção: roleta;
- Taxa de mutação: decaindo por uma exponencial;
- $k_{NDLCSer_j} : 1,5;$
- $k_{NDLCSec_j} : 1,7;$
- $k3f$  e  $k1f : 0.$

Os valores máximos de curto-circuito admissíveis por cada barra foram considerados idênticos aos do teste 1, mostrado na Tabela 9. Foi adotada a possibilidade de inserir reator em série com os circuitos que ligam as barras 2-4, 3-4, 4-5, 9-10, 9-14, e nos dois transformadores localizados entre as barras 4 e 9. A Figura 41 ilustra os possíveis locais de instalação que foram testados onde os elementos tracejados permitem a inserção de DLC.

O resultado encontrado para os 10 melhores casos da simulação foi idêntico e está indicado na Tabela 12 e os valores de curto calculados após a inserção do RLC estão mostrados na Tabela 13.

Tabela 12 Teste 2 - Reator inserido em circuito

Barra de		Barra para		Tensão (kV)	Reator (ohm)	Custo (UM)
Num	Nome	Num	Nome			
4	Barra 4	5	Barra 5	138	30	24,0

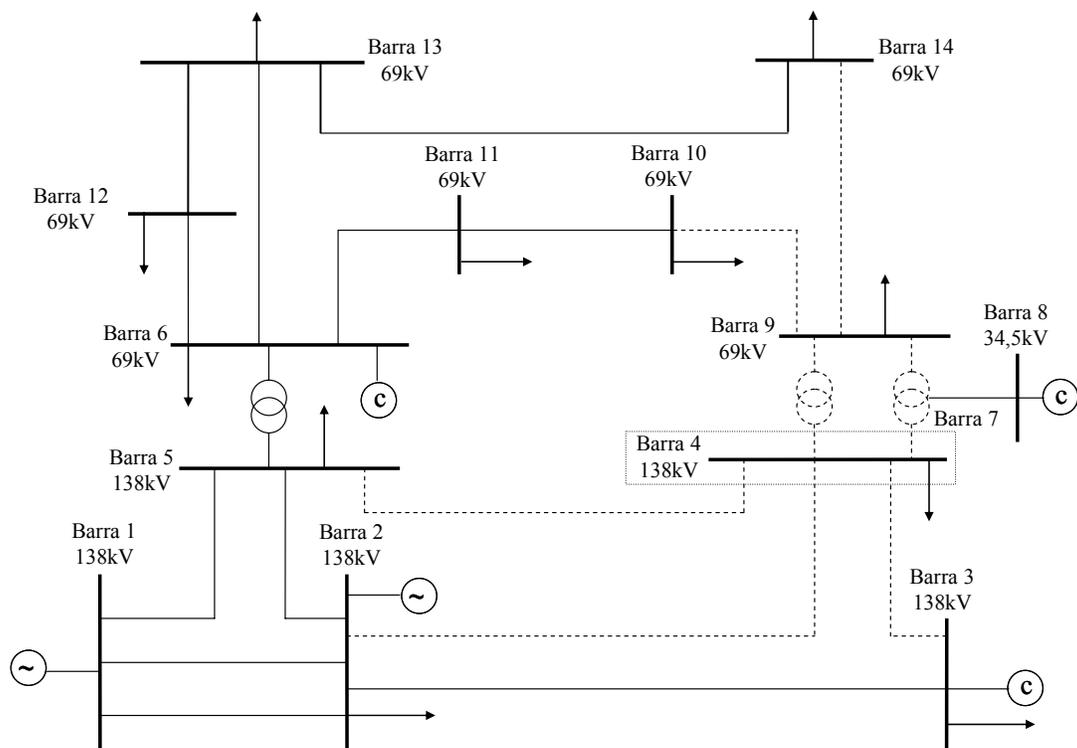


Figura 41 Teste 2 - Localizações possíveis para os DLCs (tracejado)

Tabela 13 Teste 2 - Valores de curto calculados após a inserção de RLC

Barra Número	Módulo da corrente de curto-circuito trifásico (kA)	Redução da corrente de curto trifásico (%)	Relação $X/R$ trifásica	Módulo da corrente de curto-circuito monofásico (kA)	Redução da corrente de curto monofásico (%)	Relação $X/R$ monofásica
1	8,32	-0,31	12,78	3,09	-0,34	3,93
2	8,24	0,00	9,15	3,50	0,00	3,66
3	3,70	-2,08	3,64	2,18	-1,17	2,04
4	4,26	-14,53	4,01	3,77	-11,82	4,35
5	4,26	-14,07	5,46	3,62	-12,47	6,35
6	5,50	-0,74	6,25	2,14	-0,03	2,01
8	8,25	-0,98	17,51	7,34	-0,85	20,36
9	4,92	-1,23	4,56	4,67	-1,04	5,12
10	3,93	-0,37	3,6	2,99	-0,36	3,23
11	3,49	0,03	3,24	2,02	-0,30	2,38
12	2,78	-0,07	2,37	1,38	-0,03	1,63
13	3,73	-0,32	3,04	1,85	-0,14	1,84
14	2,80	-0,04	2,56	1,85	0,00	2,08

Pela Tabela 13, tem-se que o percentual do curto-circuito trifásico na barra 4 em relação à capacidade da barra é:  $I_{curto3f}(\%) = 100 \frac{4,26}{4,8} = 88,75\%$ .

E, para curto-circuito monofásico:  $I_{curto1f}(\%) = 100 \frac{3,77}{4,8} = 78,54\%$ .

Isto que mostra que, como a relação  $X/R$  trifásica e monofásica são inferiores a 16,96, o nível de curto-circuito da barra 4 está dentro do permitido, ou seja, inferior a 90% da capacidade da barra. Logo, esta barra não apresenta mais problemas de equipamentos superados.

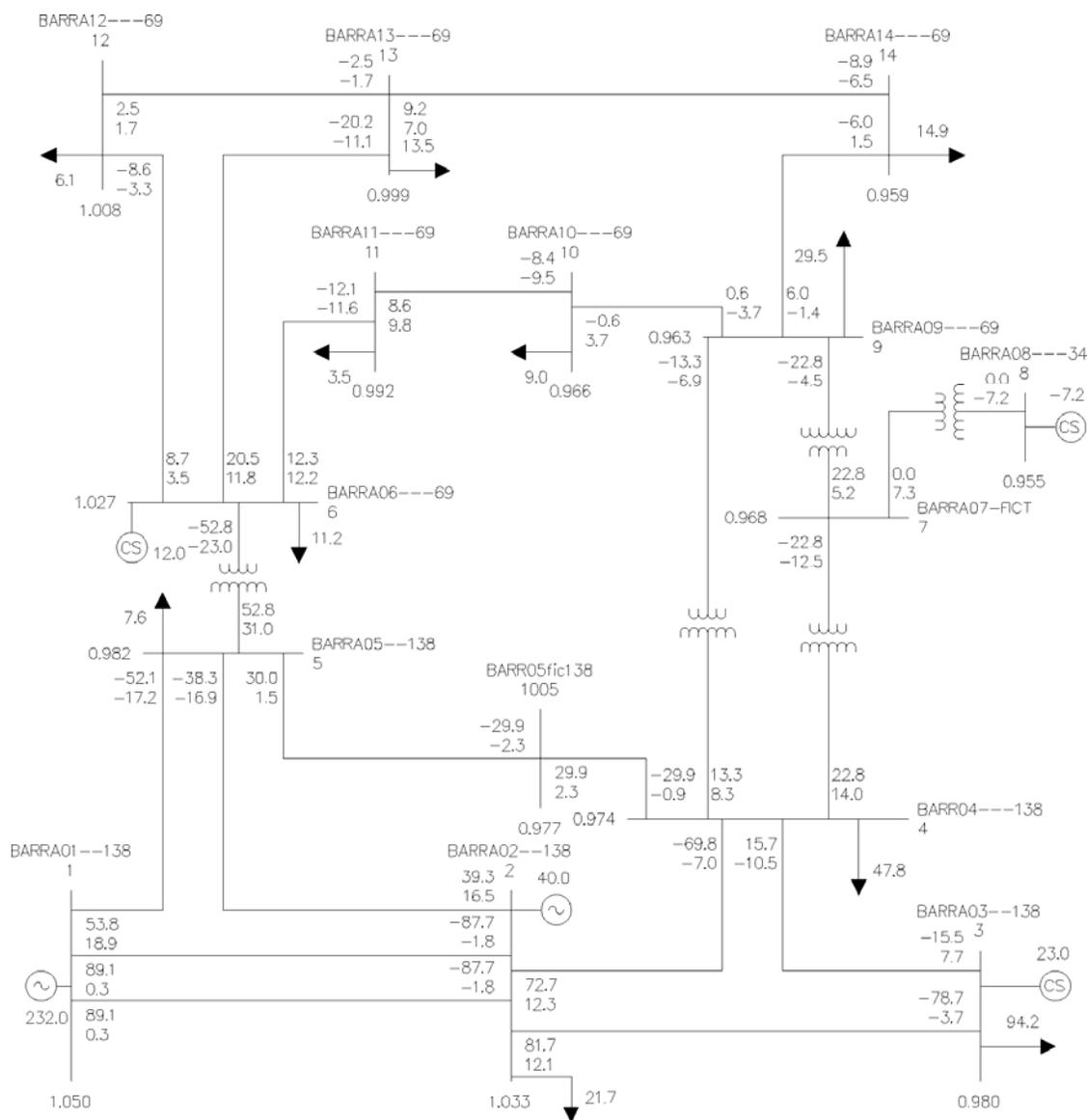


Figura 42 Teste 2 - Sistema em regime permanente

O sistema se comporta em regime permanente conforme Figura 42. A queda de tensão no reator foi de 0,003 p.u. e as perdas no sistema foram de 13MW, o que corresponde a 4,78% da capacidade instalada. Portanto, o sistema em regime permanente atendeu a todas as restrições operativas.

Comparando com o teste 1, o teste 2 tem a vantagem de não necessitar de seccionamento de barras, porém o seu custo é mais elevado, já que foi considerado apenas o custo do reator inserido. Caso fosse considerado o custo total da obra, incluindo as obras associadas ao seccionamento da barra (para o teste 1), é possível que o custo total do reator inserido no teste 2 seja equivalente, ou até mesmo menor do que o custo do reator inserido no teste 1.

- **Teste 3:** Teste com a barra 8 superada pela relação  $X/R$  – Alocação de reatores em barras, circuitos e transformadores

Neste caso, considera-se que a barra 8 está com equipamentos superados pela relação  $X/R$  do sistema. Os valores máximos de curto-circuito admissíveis por cada barra foram considerados de acordo com a Tabela 14.

Tabela 14 Teste 3 - Valores adotados da corrente de curto suportável por cada barra

Número Barra	1	2	3	4	5	6	8	9	10	11	12	13	14
Corrente (kA)	12,0	12,0	5,2	5,6	7,0	7,6	9,4	5,6	5,5	5,0	4,0	6,0	4,0

É possível notar pela Tabela 8 que a corrente de curto trifásica na barra 8 é 8,33 kA, que corresponde a 89% de  $I_{curton}$ , e a relação  $X/R$ , monofásica e trifásica, é 19,10 e 21,80, respectivamente. Nota-se, portanto, que a barra 8 está superada pela relação  $X/R$  do sistema visto que o valor do curto-circuito está entre 85% e 90% da capacidade da barra e a relação  $X/R$  está entre 16,96 e 22,62.

Para este teste, possibilitou-se inserir reator seccionando as barras 4 e 9 tanto quanto inserir reator em série com os circuitos que ligam as barras 2-4, 3-4, 4-5, 9-10, 9-14, nos dois transformadores localizados entre as barras 4 e 9 e no compensador síncrono da barra 8, conforme ilustrado na Figura 43.

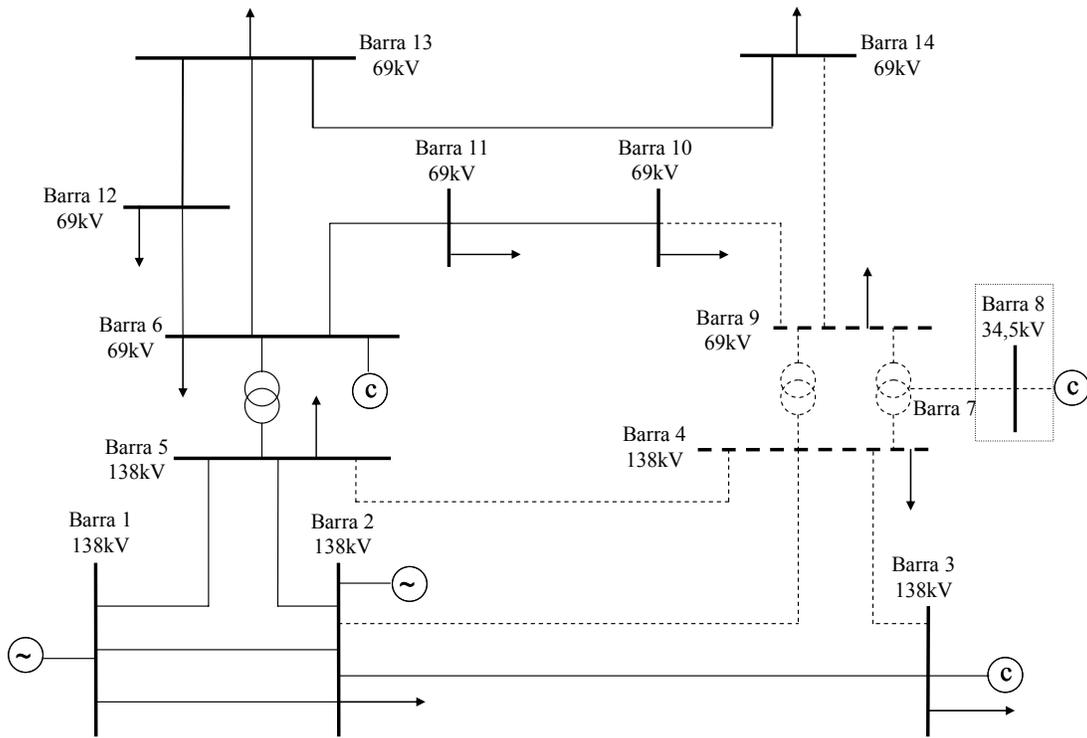


Figura 43 Teste 3 - Localizações possíveis para os DLCs (tracejado)

Os operadores, parâmetros do AG e fatores penalidade utilizados foram:

- Tamanho da população: 100;
- Número máximo de gerações: 200;
- Taxa de cruzamento: 0,5;
- Operador de cruzamento: uniforme;
- Operador de seleção: torneio;
- Taxa de mutação: decaindo por uma exponencial;
- $k_{NDLCSer_j} : 2,0$ ;
- $k_{NDLCSec_j} : 2,2$ ;
- $k3f$  e  $k1f : 0$ .

O resultado da simulação foi idêntico para os 10 melhores casos e correspondeu a inserir um reator de 12ohms seccionando a barra 4, conforme Tabela 15. Os valores de curto-circuito encontrados estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 15 Teste 3 - Reator inserido em barra

Barra		Tensão (kV)	Reator (ohm)	Custo (UM)	Circuitos ou transformadores	
Num	Nome				Sec 1	Sec 2
4	Barra 4	138	12	15,4	2-4 3-4 4-5	4-7 4-9

Tabela 16 Teste 3 - Valores de curto calculados após a inserção de RLC

Barra Número	Módulo da corrente de curto-circuito trifásico (kA)	Redução da corrente de curto-circuito trifásico (%)	Relação $X/R$ trifásica	Aumento ou redução de $X/R$ trifásica (%)	Módulo da corrente de curto-circuito monofásico (kA)	Redução da corrente de curto-circuito monofásico (%)	Relação $X/R$ monofásica	Aumento ou redução de $X/R$ monofásica (%)
1	8,32	-0,25	12,86	3,29	3,01	-2,79	3,89	0,26
2	8,21	-0,41	9,38	3,08	3,39	-3,08	3,65	0,27
3	3,77	-0,35	3,66	1,10	2,16	-2,20	2,02	-0,49
4 sec1	4,90	-1,67	4,17	3,99	3,96	-7,20	4,46	3,00
5	4,93	-0,53	4,67	2,41	3,99	-3,33	5,38	3,46
6	5,52	-0,45	6,33	0,64	2,14	0,06	2,01	0,00
8	8,02	-3,71	16,61	-13,04	7,22	-2,47	19,87	-8,85
9	4,65	-6,62	4,45	-6,51	4,51	-4,49	5,04	-4,91
10	3,79	-3,92	3,57	-2,46	2,93	-2,18	3,22	-0,92
11	3,44	-1,49	3,23	-0,31	2,01	-0,89	2,38	0,00
12	2,78	-0,13	2,37	0,42	1,38	-0,04	1,63	0,00
13	3,71	-0,72	3,04	0,00	1,85	-0,26	1,84	0,00
14	2,75	-1,90	2,57	0,00	1,84	-0,76	2,09	0,48
4 sec2	3,41	-31,50	5,00	24,69	3,30	-22,69	5,21	20,32

Nota-se pela Tabela 16 que a maior redução da relação  $X/R$  ocorreu na barra 8, como era de se esperar, fazendo com que esta barra não esteja mais com equipamentos superados. Para este resultado, o sistema se comporta em regime permanente conforme a Figura 44.

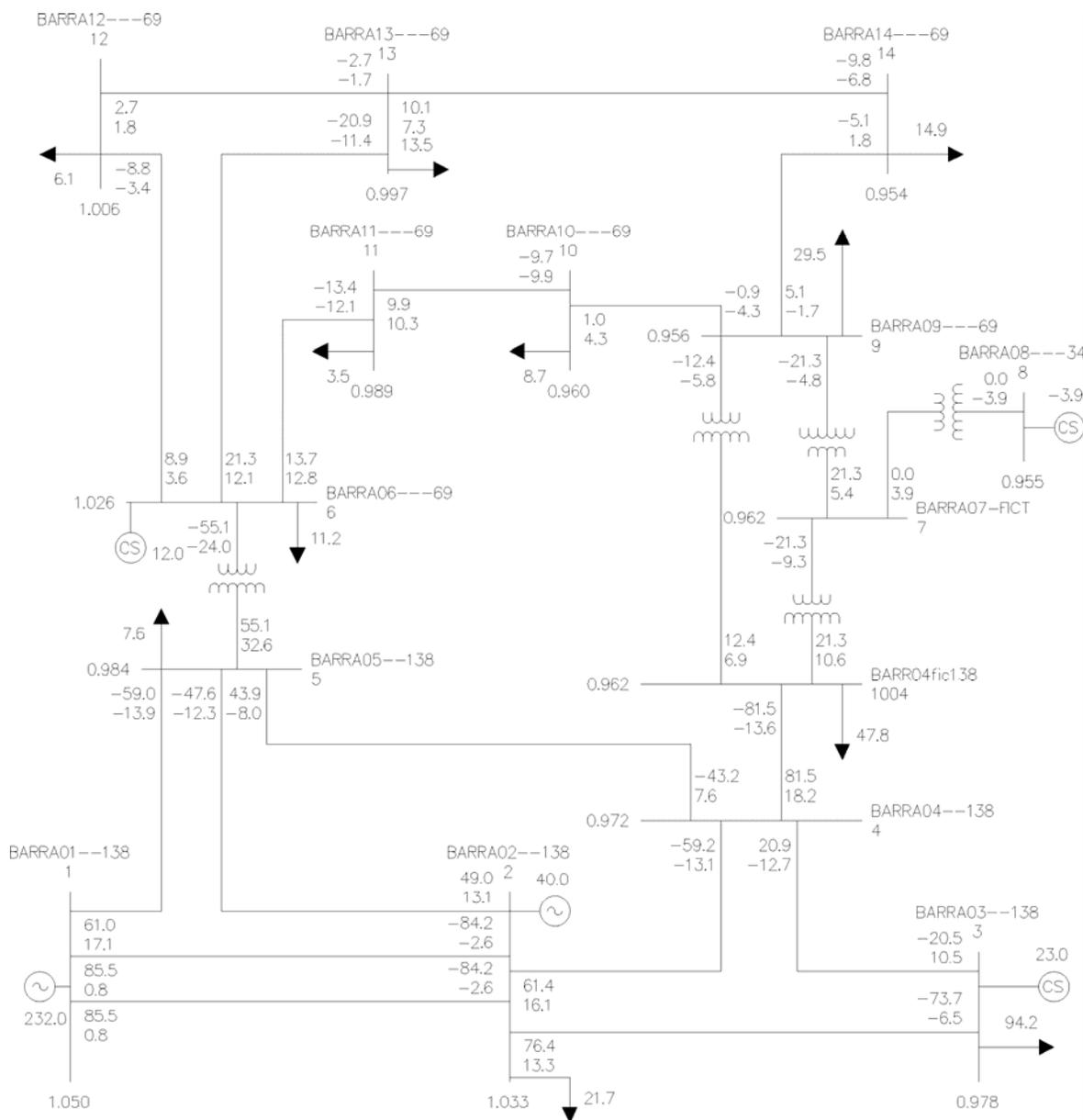


Figura 44 Teste 3 - Sistema em regime permanente

O valor encontrado para as perdas totais no sistema em regime permanente foi 12,9MW, o que corresponde a 4,75% da capacidade instalada, e a queda de tensão no reator foi de 0,010 p.u.. Logo, o sistema se comporta em regime permanente atendendo às restrições operativas.

- **Teste 4:** Teste com a barra 8 superada pela relação  $X/R$  – Alocação de reator apenas em circuitos e transformadores do sistema

Neste teste, foi permitido inserir reatores nos circuitos que ligam as barras 2-4, 3-4, 4-5, 9-10, 9-14 e nos dois transformadores localizados entre as barras 4 e 9, conforme Figura 45.

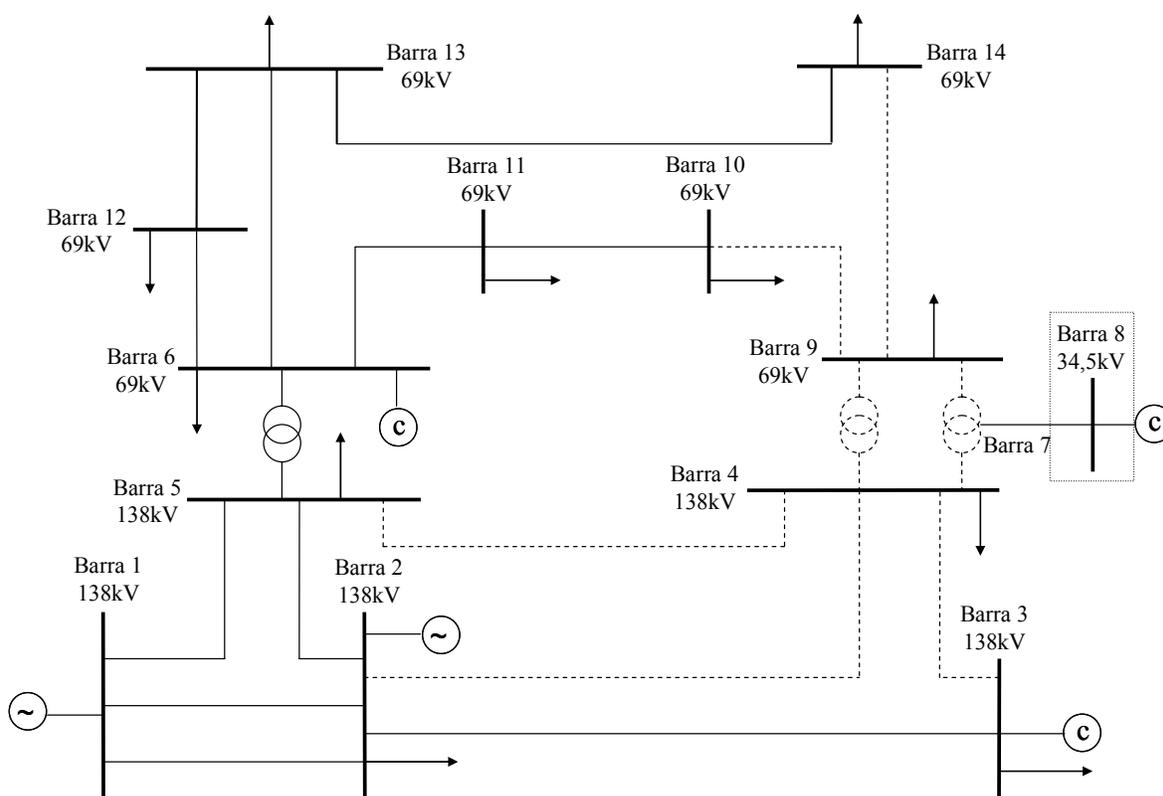


Figura 45 Teste 4 - Localizações possíveis para os DLCs (em azul)

Os parâmetros e constantes do AG utilizados foram os mesmos do teste 3. Os valores máximos de curto-circuito admissíveis por cada barra também foram considerados idênticos aos do teste 3, que estão apresentados na Tabela 14. Os 10 melhores casos salvos deram o mesmo resultado, que está mostrado nas Tabelas 17 e 18.

Tabela 17 Teste 4 - Reator inserido em ramo

Barra de		Barra para		Tensão (kV)	Reator (ohm)	Custo (UM)
Num	Nome	Num	Nome			
4	Barra 4	7	Barra 7	138	25	21,60

Tabela 18 Teste 4 - Valores de curto calculados após a inserção de RLC

Barra Número	Módulo da corrente de curto- circuito trifásico (kA)	Redução da corrente de curto trifásico (%)	Relação $X/R$ trifásica	Aumento ou redução de $X/R$ trifásica (%)	Módulo da corrente de curto- circuito monofásico (kA)	Redução da corrente de curto monofásico (%)	Relação $X/R$ trifásica (%)	Aumento ou redução de $X/R$ monofásica
1	8,32	-0,30	12,56	0,88	3,04	-2,03	3,83	-1,29
2	8,20	-0,45	9,15	0,55	3,42	-2,20	3,58	-1,65
3	3,77	-0,38	3,63	0,28	2,17	-1,62	2,01	-0,99
4	4,90	-1,62	4,01	0,00	4,04	-5,46	4,2	-3,00
5	4,93	-0,60	4,57	0,22	4,02	-2,57	5,17	-0,58
6	5,53	-0,22	6,37	1,27	2,14	-0,11	2,01	0,00
8	7,95	-4,61	18,58	-2,72	7,12	-3,74	21,84	0,18
9	4,76	-4,37	4,71	-1,05	4,54	-3,86	5,28	-0,38
10	3,84	-2,49	3,67	0,27	2,94	-1,91	3,27	0,62
11	3,46	-0,90	3,26	0,62	2,01	-0,92	2,39	0,42
12	2,78	0,04	2,37	0,42	1,38	-0,13	1,63	0,00
13	3,72	-0,44	3,05	0,33	1,84	-0,37	1,84	0,00
14	2,77	-1,16	2,59	0,78	1,84	-0,67	2,09	0,48

Com este resultado, o sistema não tem mais equipamentos superados, visto que, para a barra 8:

$$I_{curto3f}(\%) = 100 \frac{7,95}{9,4} = 84,57\%, \text{ para a relação } X/R = 18,58$$

$$I_{curto1f}(\%) = 100 \frac{7,12}{9,4} = 75,74\%, \text{ para a relação } X/R = 21,84$$

O sistema se comporta em regime permanente conforme Figura 46.

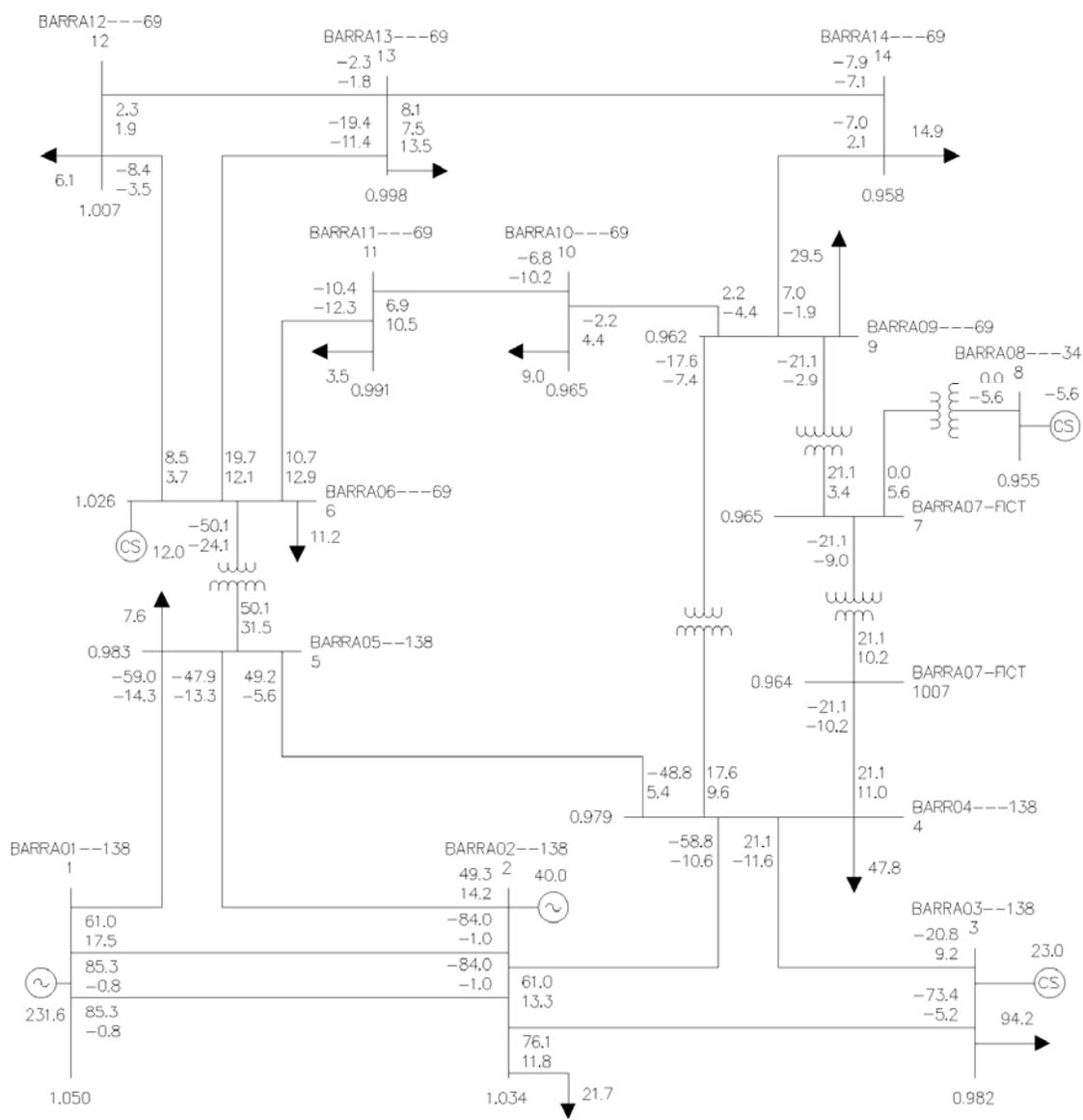


Figura 46 Teste 4 - Sistema em regime permanente

A queda de tensão no reator foi de 0,015 p.u. e as perdas foram 13,2MW, o que corresponde a 4,86% da capacidade instalada, estando os valores dentro do aceitável.

Comparando com o teste 3, o teste 4 tem a vantagem de não necessitar de seccionamento de barras, porém, o seu custo ficou mais elevado. É importante lembrar que o custo considerado é apenas o do reator inserido.

- **Teste 5:** Teste com as barras 5, 6 e 9 superadas pela corrente de curto simétrica e a barra 8 superada pela relação  $X/R$  – Alocação de reatores em barras, circuitos e transformadores do sistema

Este teste tem o objetivo de avaliar o desempenho do método na solução de vários pontos críticos no mesmo caso. Os parâmetros genéticos utilizados foram:

- Tamanho da população: 200;
- Número máximo de gerações: 200;
- Taxa de cruzamento: 0,7;
- Taxa de mutação: 0,005;
- Operador de cruzamento: dois pontos;
- Operador de seleção: roleta;
- $k_{NDLCSer_j}$  : 0,1;
- $k_{NDLCSec_j}$  : 0,15;
- $k3f$  e  $k1f$  : 0.

Os valores máximos de curto-circuito admissíveis por cada barra estão de acordo com a Tabela 19.

Tabela 19 Teste 5 - Valores adotados da corrente de curto suportável por cada barra

Número Barra	1	2	3	4	5	6	8	9	10	11	12	13	14
Corrente (kA)	12,0	12,0	5,2	5,6	5,4	6,0	9,4	5,4	5,5	5,0	4,0	6,0	4,0

Possibilitou-se a inserção de DLC em todos os pontos do sistema sejam eles barras, transformadores ou circuitos. A solução encontrada para os 10 melhores casos foi inserir um reator de 12ohms seccionando a barra 4 e um reator de 10ohms seccionando a barra 5, conforme Tabela 20. A Tabela 21 apresenta os valores encontrados para o melhor caso da simulação.

Tabela 20 Teste 5 - Reator inserido em barra

Barra		Tensão (kV)	Reator (ohm)	Circuitos ou transformadores		Custo (UM)
Num	Nome			Sec 1	Sec 2	
4	Barra 4	138	10	2-4 3-4 4-5	4-7 4-9	14,4
6	Barra 6	69	5	6-12 6-13	6-11 6-5	10,0
<b>Custo Total</b>						<b>24,4</b>

Tabela 21 Teste 5 - Valores de curto calculados após a inserção de RLC

Barra Número	Módulo da corrente de curto-circuito trifásico (kA)	Redução da corrente de curto-circuito trifásico (%)	Relação $X/R$ trifásica	Aumento ou redução de $X/R$ trifásica (%)	Módulo da corrente de curto-circuito monofásico (kA)	Redução da corrente de curto-circuito monofásico (%)	Relação $X/R$ monofásica	Aumento ou redução de $X/R$ monofásica (%)
1	8,29	-0,68	12,86	3,29	3,02	-2,49	3,9	0,52
2	8,16	-0,93	9,36	2,86	3,40	-2,76	3,65	0,27
3	3,76	-0,63	3,66	1,10	2,17	-2,02	2,02	-0,49
4 sec1	4,86	-2,47	4,13	2,99	3,98	-6,73	4,44	2,54
5	4,86	-2,09	4,61	1,10	3,98	-3,73	5,32	2,31
6 sec1	4,74	-14,52	6,95	10,49	2,02	-5,60	2,1	4,48
8	8,06	-3,27	16,9	-11,52	7,24	-2,17	20,12	-7,71
9	4,68	-5,93	4,49	-5,67	4,53	-4,00	5,08	-4,15
10	3,78	-4,05	3,61	-1,37	2,93	-2,31	3,25	0,00
11	3,35	-4,12	3,33	2,78	1,98	-2,44	2,45	2,94
12	2,61	-6,29	2,5	5,93	1,34	-3,05	1,67	2,45
13	3,46	-7,45	3,24	6,58	1,78	-3,57	1,89	2,72
14	2,74	-2,20	2,59	0,78	1,83	-1,06	2,09	0,48
4 sec2	3,56	-28,57	4,89	21,95	3,40	-20,29	5,1	17,78
6 sec2	4,93	-11,10	7,04	11,92	2,05	-4,33	2,17	7,96

O diagrama unifilar da solução do teste 5 está apresentado na Figura 47.

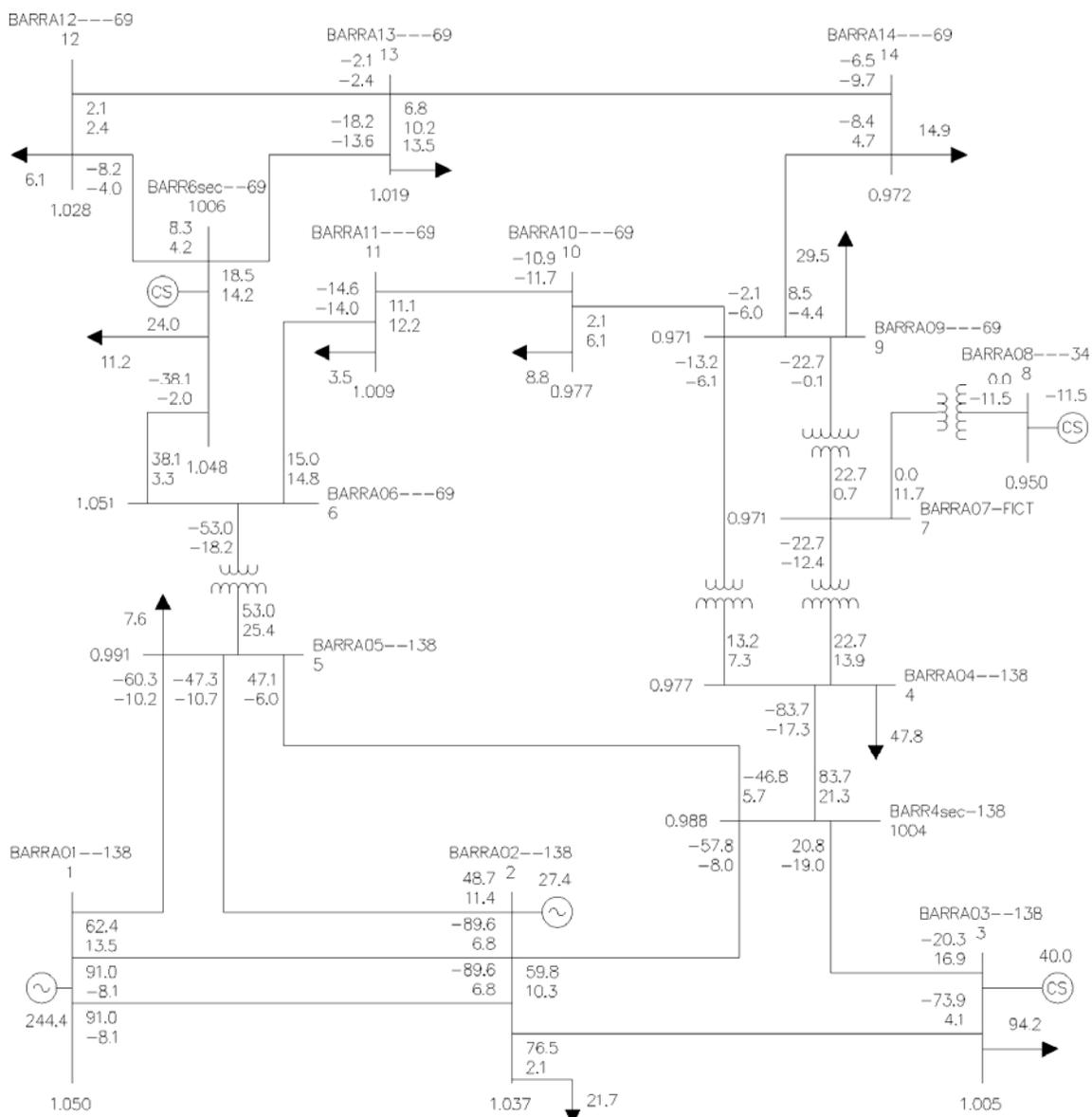


Figura 47 Teste 5 - Sistema em regime permanente

O valor encontrado para as perdas totais no sistema em regime permanente foi 13,4MW, o que corresponde a 4,93% da capacidade instalada, e a queda de tensão no reator da barra 4 foi de 0,011 p.u. e no reator da barra 6 foi de 0,003 p.u.. Pela Figura 47, observa-se que as tensões estão todas dentro dos valores aceitáveis.

- **Teste 6:** Teste com as barras 5, 6 e 9 superadas pela corrente de curto simétrica e a barra 8 superada pela relação  $X/R$  – Alocação de reatores apenas em alguns circuitos do sistema

Este teste foi realizado de maneira idêntica ao teste 5 com mudanças apenas nos locais de alocação e nas constantes  $k_{NDLCSer_j}$  e  $k_{NDLCSec_j}$ . Permitiu-se alocar reatores nos circuitos e transformadores indicados na Figura 48.

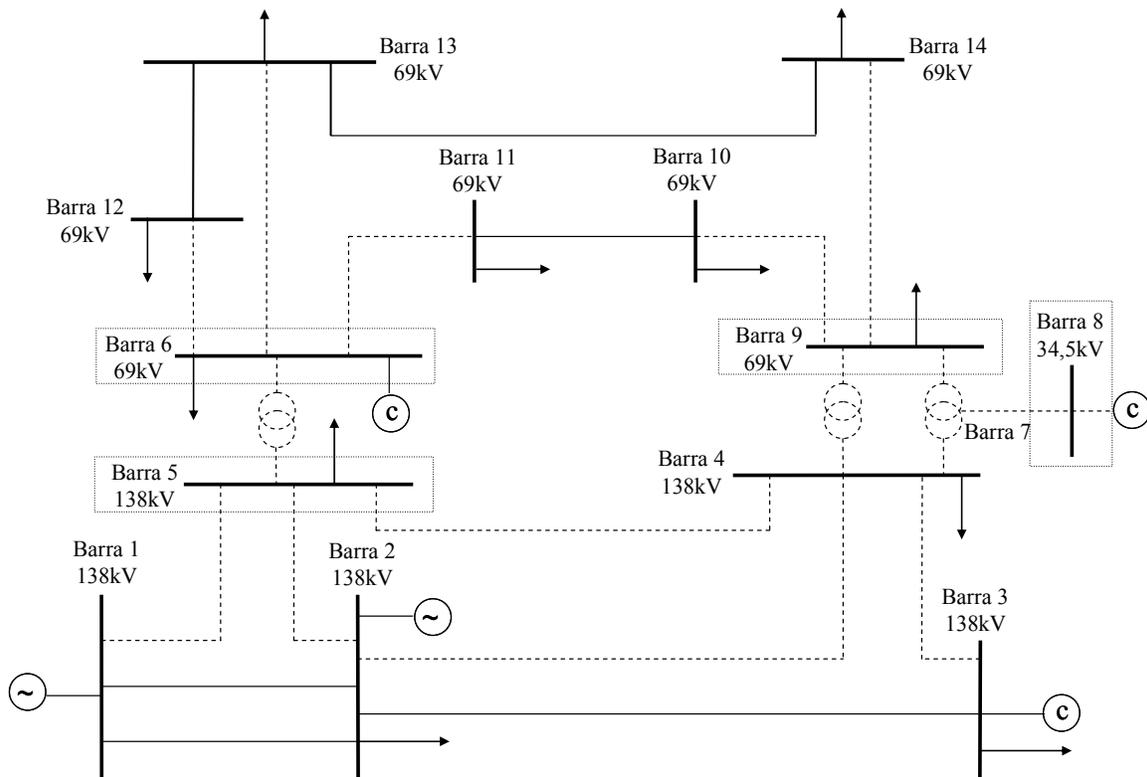


Figura 48 Teste 6 - Localizações possíveis para os DLCs (em azul)

E as constantes utilizadas foram:

- $k_{NDLCSer_j} : 2,6;$
- $k_{NDLCSec_j} : 2,9.$

O resultado da simulação, idêntico para os 10 melhores casos, foi inserir reatores conforme mostrado na Tabela 22. Os resultados numéricos do caso estão apresentados na Tabela 23.

Tabela 22 Teste 6 – Reatores inseridos em circuitos e transformadores

Barra de		Barra para		Tensão (kV)	Reator (ohm)	Custo (UM)
Num	Nome	Num	Nome			
4	Barra 4	5	Barra 5	138	5	12,0
9	Barra 9	10	Barra 10	69	12	12,8
4	Barra 4	7	Barra 7	138/69	18	18,2
<b>Custo Total</b>						<b>43,0</b>

Tabela 23 Teste 6 - Valores de curto calculados após a inserção de RLC

Barra Número	Módulo da corrente de curto- circuito trifásico (kA)	Redução da corrente de curto- circuito trifásico (%)	Relação $X/R$ trifásica	Aumento ou redução de $X/R$ trifásico (%)	Módulo da corrente de curto- circuito monofásico (kA)	Redução da corrente de curto- circuito monofásico (%)	Relação $X/R$ monofásica	Aumento ou redução de $X/R$ monofásico (%)
1	8,32	-0,30	12,62	1,37	3,05	-1,61	3,85	-0,77
2	8,21	-0,36	9,15	0,55	3,44	-1,66	3,6	-1,10
3	3,75	-0,89	3,64	0,55	2,18	-1,56	2,02	-0,49
4	4,70	-5,66	4,08	1,75	3,95	-7,45	4,29	-0,92
5	4,75	-4,28	4,88	7,02	3,92	-4,97	5,51	5,96
6	5,40	-2,55	6,71	6,68	2,05	-4,38	2,01	0,00
8	7,95	-4,57	19,25	0,79	7,14	-3,53	22,38	2,66
9	4,61	-7,40	5,15	8,19	4,45	-5,62	5,64	6,42
10	2,74	-30,34	4,02	9,84	2,10	-29,95	3,62	11,38
11	3,06	-12,42	3,46	6,79	1,78	-12,16	2,48	4,20
12	2,76	-0,69	2,4	1,69	1,35	-2,31	1,63	0,00
13	3,70	-0,97	3,09	1,64	1,80	-2,66	1,83	-0,54
14	2,77	-1,20	2,6	1,17	1,83	-0,88	2,08	0,00

Foi eliminado o problema dos equipamentos superados em todas as barras. O sistema se comporta em regime permanente conforme mostrado na Figura 49.

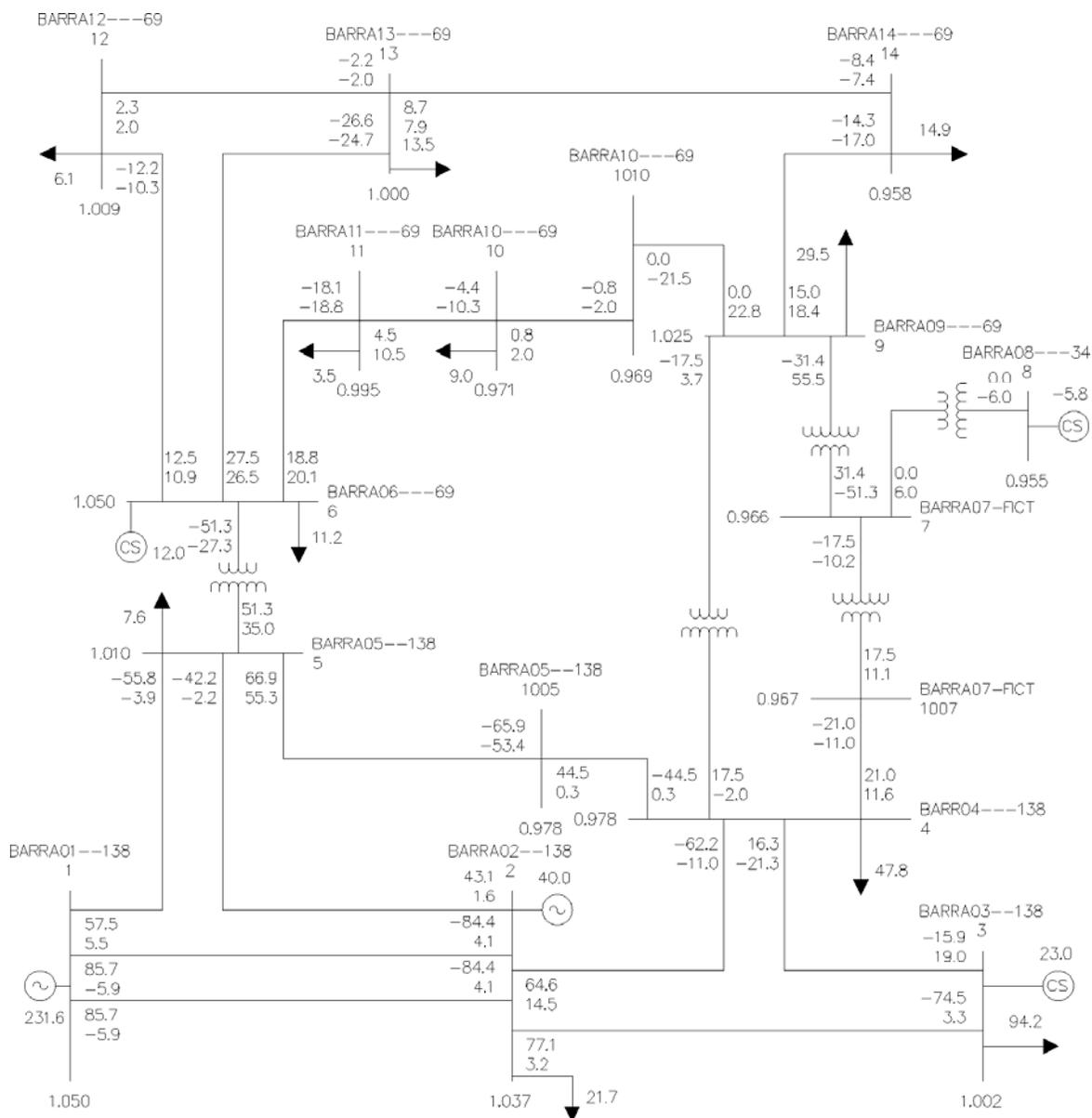


Figura 49 Teste 6 - Sistema em regime permanente

O valor encontrado para as perdas totais no sistema em regime permanente foi 14,6MW, o que corresponde a 5,37% da capacidade instalada. A queda de tensão no reator do circuito 9-10 foi de 0,056 p.u., no reator do transformador 4-7 foi de 0,011 p.u. e no

reator do circuito 4-5 foi de 0,0 p.u.. Tanto as perdas quanto as tensões das barras do sistema ficaram dentro dos valores aceitáveis.

Comparando com o teste 5, o teste 6 apresentou maior custo e maior perda no sistema. Apesar da solução do teste 6 não necessitar de seccionamento de barras, o custo deste teste é 18,6 UM superior ao do teste 5, o que faz com que, possivelmente, o teste 5 ainda seja a melhor solução para o problema proposto.

### 5.3.2 Objetivo 2

- **Teste 7:** Teste com as barras 5, 6 e 9 superadas pela corrente de curto simétrica e a barra 8 superada pela relação  $X/R$

Este teste foi feito de maneira idêntica ao teste 5 com pequenas mudanças nos parâmetros do AG e inclusão dos fatores trifásico e monofásico, conforme abaixo:

- Tamanho da população: 150;
- Número máximo de gerações: 200;
- Taxa de cruzamento: 0,7;
- Operador de cruzamento: dois pontos;
- Operador de seleção: roleta;
- Taxa de mutação: decaindo por uma exponencial;
- $k_{NDLCSer_j} : 2,9$ ;
- $k_{NDLCSec_j} : 3,3$ ;
- $k_{3f} : 0,1$ ;
- $k_{1f} : 0,1$ .

Todos os 10 resultados encontrados foram idênticos, dando como resposta a inserção de um reator de 10ohms seccionando a barra 4 e um reator de 5ohms seccionando a barra 6, conforme Tabela 24.

Tabela 24 Teste 7 - Reator inserido em barra

Barra		Tensão (kV)	Reator (ohm)	Circuitos ou transformadores		Custo (UM)
Num	Nome			Sec 1	Sec 2	
4	Barra 4	138	10	2-4	4-7	14,4
				3-4	4-9	
				4-5		
6	Barra 6	69	5	6-12	6-11	10,0
				6-13	6-5	
<b>Custo Total</b>						<b>24,4</b>

Pode-se observar que o teste 7 deu o mesmo resultado do teste 5 e, conseqüentemente, os valores de curto após a alocação e de operação em regime permanente são idênticos aos do teste 5. Este resultado mostra que o algoritmo encontrou a solução ótima em relação ao custo e que o valor das constantes  $k3f$  e  $k1f$  não foram altos o suficiente para alterar o resultado.

- **Teste 8:** Teste com as barras 5, 6 e 9 superadas pela corrente de curto simétrica e a barra 8 superada pela relação  $X/R$  – Mudança nas constantes  $k3f$  e  $k1f$

Este teste foi feito de maneira idêntica ao teste 7 com mudança apenas nas constantes  $k3f$  e  $k1f$ , conforme abaixo:

- $k3f$ : 0,15;
- $k1f$ : 0,15.

Os valores de  $k3f$  e  $k1f$  foram considerados maiores do que o do teste 7 na tentativa de fazer com que o resultado da simulação reduza mais o valor do curto-circuito nas barras do sistema.

Todos os 10 casos salvos deram resultados idênticos, que foi inserir um reator de 5ohms seccionando a barra 6 e um reator de 12ohms seccionando a barra 4, conforme Tabela 25. A Tabela 26 apresenta os principais resultados numéricos do caso.

Tabela 25 Teste 8 - Reator inserido em barra

Barra		Tensão (kV)	Reator (ohm)	Circuitos ou transformadores		Custo (UM)
Num	Nome			Sec 1	Sec 2	
4	Barra 4	138	12	2-4 3-4 4-5	4-7 4-9	15,4
6	Barra 6	69	5	6-12 6-13	6-11 6-5	10,0
<b>Custo Total</b>						<b>25,4</b>

Tabela 26 Teste 8 - Valores de curto calculados após a inserção de RLC

Barra Número	Módulo da corrente de curto- circuito trifásico (kA)	Redução da corrente de curto- circuito trifásico (%)	Relação <i>X/R</i> trifásica	Aumento ou redução de <i>X/R</i> trifásica (%)	Módulo da corrente de curto- circuito monofásico (kA)	Redução da corrente de curto- circuito monofásico (%)	Relação <i>X/R</i> monofásica	Aumento ou redução de <i>X/R</i> monofásica (%)
1	8,29	-0,72	12,92	3,78	3,01	-2,90	3,9	0,52
2	8,16	-0,99	9,41	3,41	3,39	-3,23	3,65	0,27
3	3,75	-0,68	3,66	1,10	2,16	-2,32	2,02	-0,49
4 sec 1	3,39	-31,92	4,97	23,94	3,29	-22,99	5,19	19,86
5	4,85	-2,19	4,63	1,54	3,96	-4,20	5,35	2,88
6 sec1	4,92	-11,14	7,04	11,92	2,05	-4,36	2,17	7,96
8	8,01	-3,81	16,53	-13,46	7,21	-2,53	19,81	-9,13
9	4,64	-6,85	4,45	-6,51	4,50	-4,64	5,03	-5,09
10	3,76	-4,62	3,59	-1,91	2,92	-2,63	3,25	0,00
11	3,34	-4,32	3,33	2,78	1,98	-2,53	2,45	2,94
12	2,60	-6,34	2,5	5,93	1,34	-3,07	1,67	2,45
13	3,46	-7,53	3,24	6,58	1,78	-3,60	1,89	2,72
14	2,73	-2,49	2,58	0,39	1,83	-1,20	2,09	0,48
4 sec2	4,85	-2,71	4,16	3,74	3,94	-7,73	4,46	3,00
6 sec2	4,73	-14,58	6,95	10,49	2,02	-5,62	2,1	4,48

Comparando esse resultado com o resultado do teste 7, observa-se que o nível de curto-circuito baixou para o teste 8, porém, este apresentou valores de custos mais elevados. O diagrama do sistema em regime permanente se encontra na Figura 50.

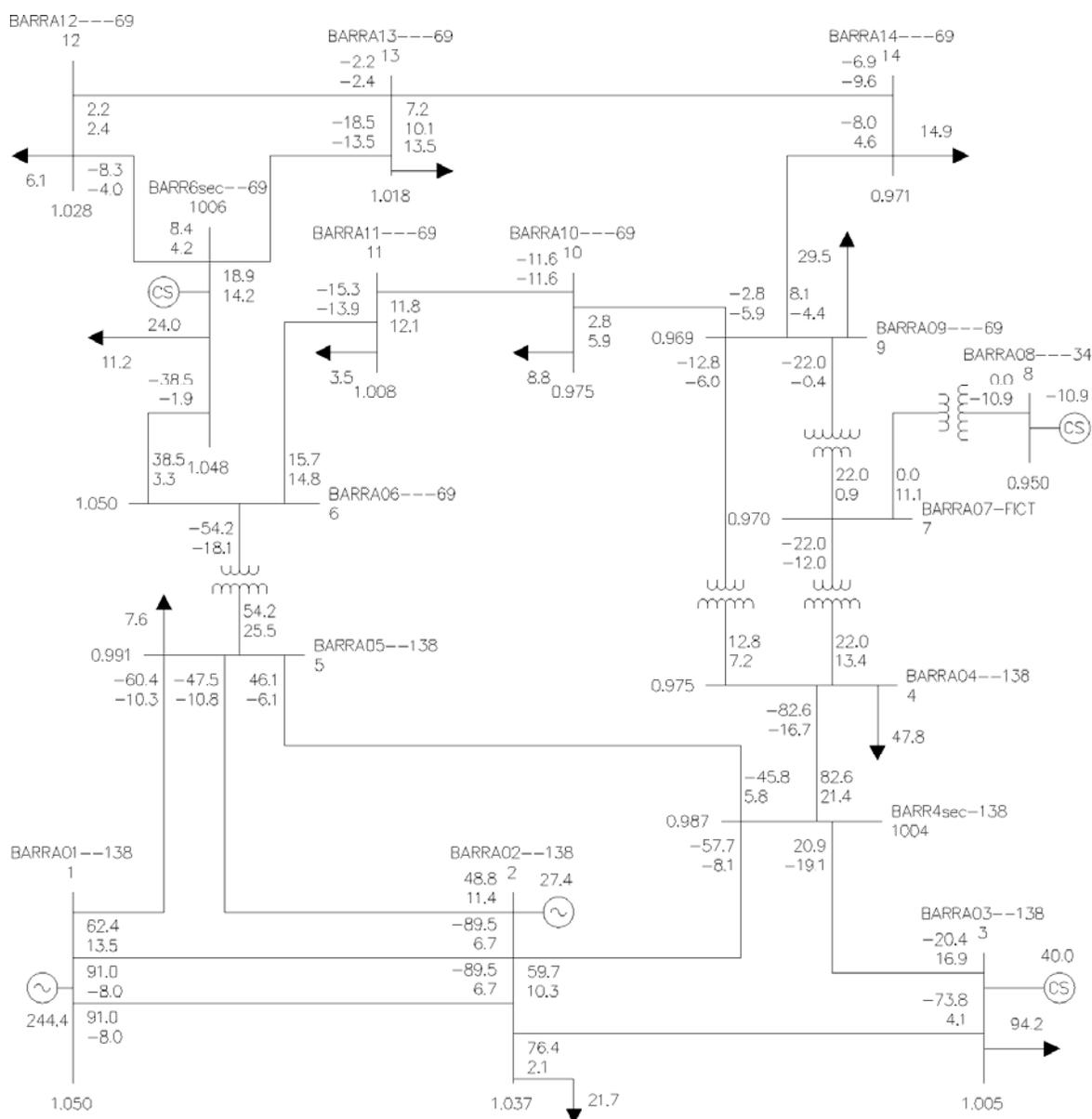


Figura 50 Teste 8 - Sistema em regime permanente

Para este sistema, as perdas ficaram em 13,5MW, o que corresponde a 4,97% da capacidade instalada, e a queda de tensão ficou em 0,002 p.u. no reator da barra 6 e 0,012 p.u. no reator da barra 4. Todos os valores estão dentro dos limites operativos.

### 5.3.3 Resumo dos resultados dos testes do sistema IEEE14

As Tabelas 27 e 29 indicam a percentagem da corrente de curto-circuito trifásico e monofásico, respectivamente, do caso encontrado como resultado do programa em relação à capacidade da barra estipulada em cada teste. As Tabelas 28 e 30 apresentam a relação  $X/R$  trifásica e monofásica, respectivamente, de cada teste feito.

Tabela 27 Percentual do valor do curto trifásico em relação ao caso base

Barra Número	Percentual da Corrente de Curto-Circuito Trifásico em Relação à Capacidade do Disjuntor Especificada em Cada Teste							
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7	Teste 8
1	69,58	69,33	69,33	69,34	69,08	69,34	69,08	69,05
2	68,58	68,67	68,42	68,36	68,03	68,42	68,03	67,99
3	70,96	71,18	72,50	72,42	72,24	72,04	72,24	72,20
4 sec 1	88,33	88,68	87,50	87,49	86,73	83,90	86,73	60,55
5	66,57	60,89	70,43	70,43	89,93	87,92	89,93	89,84
6 sec 1	72,11	72,35	72,63	72,74	78,92	89,98	78,92	82,05
8	69,00	68,74	85,32	84,53	85,72	84,57	85,72	85,24
9	88,57	87,83	83,04	85,04	86,76	85,40	86,76	85,90
10	71,45	71,37	68,91	69,85	68,73	49,90	68,73	68,33
11	69,40	69,82	68,80	69,17	66,93	61,13	66,93	66,78
12	69,25	69,45	69,50	69,53	65,13	69,02	65,13	65,09
13	61,83	62,13	61,83	62,06	57,69	61,73	57,69	57,64
14	69,75	69,97	68,75	69,19	68,46	69,16	68,46	68,26
4 sec 2	89,58	-	60,89	-	63,52	-	63,52	86,52
6 sec 2	-	-	-	-	82,09	-	82,09	78,87

Tabela 28 Valor da relação  $X/R$  trifásica

Barra Número	Relação $X/R$ trifásica							
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7	Teste 8
1	12,44	12,78	12,86	12,56	12,86	12,62	12,86	12,92
2	9,12	9,15	9,38	9,15	9,36	9,15	9,36	9,41
3	3,74	3,64	3,66	3,63	3,66	3,64	3,66	3,66
4 sec 1	4,52	4,01	4,17	4,01	4,13	4,08	4,13	4,97
5	4,79	5,46	4,67	4,57	4,61	4,88	4,61	4,63
6 sec 1	6,26	6,25	6,33	6,37	6,95	6,71	6,95	7,04
8	19,00	17,51	16,61	18,58	16,90	19,25	16,90	16,53
9	4,77	4,56	4,45	4,71	4,49	5,15	4,49	4,45
10	3,67	3,6	3,57	3,67	3,61	4,02	3,61	3,59
11	3,24	3,24	3,23	3,26	3,33	3,46	3,33	3,33
12	2,37	2,37	2,37	2,37	2,5	2,40	2,5	2,5
13	3,04	3,04	3,04	3,05	3,24	3,09	3,24	3,24
14	2,58	2,56	2,57	2,59	2,59	2,60	2,59	2,58
4 sec 2	4,43	-	5,00	-	4,89	-	4,89	4,16
6 sec 2	-	-	-	-	7,04	-	7,04	6,95

Tabela 29 Percentual do valor do curto monofásico em relação ao caso base

Barra Número	Percentual da Corrente de Curto-Circuito Monofásico em Relação à Capacidade do Disjuntor Especificada em Cada Teste							
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7	Teste 8
1	25,67	25,74	25,08	25,31	25,19	25,42	25,19	25,08
2	28,92	29,18	28,25	28,52	28,36	28,68	28,36	28,22
3	41,35	42,00	41,54	41,81	41,64	41,84	41,64	41,51
4 sec 1	73,96	78,44	70,71	72,09	71,12	70,57	71,12	58,72
5	56,71	51,64	57,00	57,48	73,63	72,68	73,63	73,27
6 sec 1	28,16	28,15	28,16	28,13	33,67	34,11	33,67	34,11
8	61,33	61,14	76,81	75,78	77,01	75,94	77,01	76,73
9	83,93	83,41	80,54	81,03	83,91	82,50	83,91	83,35
10	54,36	54,35	53,27	53,51	53,28	38,21	53,28	53,11
11	40,40	40,48	40,20	40,23	39,61	35,66	39,61	39,57
12	34,50	34,49	34,50	34,45	33,45	33,70	33,45	33,44
13	30,83	30,79	30,83	30,72	29,73	30,01	29,73	29,72
14	46,25	46,28	46,00	45,94	45,76	45,84	45,76	45,70
4 sec 2	79,79	-	58,93	-	60,78	-	60,78	70,36
6 sec 2	-	-	-	-	34,12	-	34,12	33,66

Tabela 30 Valor da relação  $X/R$  monofásica

Barra Número	Relação $X/R$ monofásica							
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7	Teste 8
1	3,86	3,93	3,89	3,83	3,90	3,85	3,90	3,90
2	3,62	3,66	3,65	3,58	3,65	3,60	3,65	3,65
3	2,05	2,04	2,02	2,01	2,02	2,02	2,02	2,02
4 sec 1	4,89	4,35	4,46	4,20	4,44	4,29	4,44	5,19
5	5,39	6,35	5,38	5,17	5,32	5,51	5,32	5,35
6 sec 1	2,01	2,01	2,01	2,01	2,10	2,01	2,10	2,17
8	21,74	20,36	19,87	21,84	20,12	22,38	20,12	19,81
9	5,3	5,12	5,04	5,28	5,08	5,64	5,08	5,03
10	3,25	3,23	3,22	3,27	3,25	3,62	3,25	3,25
11	2,38	2,38	2,38	2,39	2,45	2,48	2,45	2,45
12	1,63	1,63	1,63	1,63	1,67	1,63	1,67	1,67
13	1,84	1,84	1,84	1,84	1,89	1,83	1,89	1,89
14	2,09	2,08	2,09	2,09	2,09	2,08	2,09	2,09
4 sec 2	4,71	-	5,21	-	5,10	-	5,10	4,46
6 sec 2	-	-	-	-	2,17	-	2,17	2,10

Conforme já dito anteriormente, como o sistema IEEE14 barras é acadêmico, foram estipulados valores diferentes da capacidade nominal máxima de cada barra dependendo do teste a ser feito. Logo, não é possível comparar os valores das tabelas anteriores de um teste com o outro. O mais importante dado desta tabela é que tanto o nível de curto-circuito trifásico quanto o monofásico estão inferiores a 90% da capacidade nominal estipulada para os disjuntores. Em alguns casos, onde a superação foi dada pela relação  $X/R$ , o nível de curto está ainda menor, ou seja, com valores inferiores a 85% da capacidade nominal sempre que a relação  $X/R$  está entre 16,96 e 22,62. Isto mostra que o programa foi capaz de eliminar todas as superações do sistema em todos os testes feitos.

A Tabela 31 apresenta um resumo dos resultados encontrados para custo, perdas, tempo de execução e violação de restrições dos testes feitos com o sistema IEEE14 barras.

Tabela 31 Resultados dos testes com o sistema IEEE14

Número do Teste	Custo Total (UM)	Violação de Restrições	Perdas no Sistema		Tempo de Execução <sup>(*)</sup>
			MW	Mvar	
1	16,8	Não houve	13,0	21,0	00h40m
2	24,0	Não houve	13,0	23,9	00h40m
3	15,4	Não houve	12,9	21,1	01h17m
4	21,6	Não houve	13,2	23,4	01h17m
5	24,4	Não houve	13,4	26,9	02h12m
6	43,0	Não houve	14,6	30,0	02h13m
7	24,4	Não houve	13,4	26,9	02h01m
8	25,4	Não houve	13,5	27,4	02h00m

(\*): Os tempos de execução foram obtidos para testes feitos em um computador Pentium 4Mhz.

Comparando os teste 1 e 2, nota-se que os custos totais foram mais elevados para o teste 2, ou seja, quando ocorre a inserção de reatores apenas nos circuitos do sistema. O mesmo pode ser observado ao comparar os testes 3 e 4, e 5 e 6. Com estes resultados, conclui-se que a inserção de reatores seccionando barras, provoca maior redução do nível de curto total no sistema, exigindo um reator de menor capacidade e, conseqüentemente, menor custo. A inserção de reatores de menor capacidade tem a vantagem de reduzir a queda de tensão no sistema operando em regime permanente e as perdas, porém, em geral, sua execução demande maior complexidade.

Comparando os testes 7 e 8, pode-se observar que a variação das constantes de penalidade podem influenciar no resultado final encontrado. Como o teste 8 utilizou maiores valores para as constantes  $k3f$  e  $k1f$ , o nível de curto-circuito do sistema ficou menor, quando comparado com o teste 7. Porém, o teste 8 apresentou maior custo pois indicou a inserção de um reator de maior valor. Nota-se, portanto, que as constantes das penalidades têm influência direta no resultado final do método e as que deram resultados mais satisfatórios estão apresentadas na Tabela 32.

Tabela 32 Valores das constantes dos fatores penalidade utilizados

Constantes dos Fatores Penalidade	Valores mais Satisfatórios	
	Objetivo 1	Objetivo 2
$k_{3f}$	0,0	Abaixo de 0,2
$k_{1f}$	0,0	Abaixo de 0,2
$k_{NDLCSer_j}$	Entre 0,1 e 3,0	Entre 0,1 e 3,0
$k_{NDLCSec_j}$	Entre 0,15 e 3,2	Entre 0,15 e 3,2

Em resumo, os parâmetros de controle e os operadores genéticos que melhor se adaptaram ao problema estão apresentados na Tabela 33.

Tabela 33 Parâmetros de controle e operadores genéticos dos AGs

Parâmetros de Controle do AG	Melhor Valor Encontrado
Seleção	Roleta ou torneio
Cruzamento	Dois pontos ou uniforme
Mutação	Por troca de bit
Taxa de cruzamento	0,5 ou 0,7
Taxa de mutação	Decaindo por uma exponencial
Tamanho da população	Valores entre 50 e 200 indivíduos
Número máximo de gerações	200 gerações

#### 5.4 Resultados Numéricos com o Sistema da ELETROSUL

O sistema da ELETROSUL apresenta as barras com equipamentos superados listadas na Tabela 34. A capacidade nominal dos disjuntores foi extraída de [6]. Para obter o maior percentual da corrente de curto-circuito em relação à capacidade nominal do disjuntor (valor apresentado na última coluna da tabela), calculou-se a razão entre o maior

valor de curto-circuito, monofásico ou trifásico, e a capacidade nominal do menor disjuntor. Como exemplo, para a barra Joinville 69kV (6142), o maior percentual da capacidade nominal foi calculada dividindo o maior valor da corrente de curto-circuito calculado para a referida barra, que para este caso foi o curto monofásico, pela capacidade nominal do menor disjuntor, ou seja:

$$Maior\%daCapacidadeNom = \frac{17,9}{14,4} = 124\%$$

Tabela 34 Valores de curto-circuito das barras com equipamentos superados no caso base da ELETROSUL para o ano de 2010

Barra		Módulo da corrente de curto-circuito trifásico (kA)	Relação X/R trifásica	Módulo da corrente de curto-circuito monofásico (kA)	Relação X/R monofásica	Capacidade nominal do menor disjuntor (kA)	Maior percentual da capacidade nominal
Número	Nome						
6142	Joinville 69	14,2	8,41	17,9	8,69	14,4	124
6526	J. Lacerda A 69	15,6	18,68	19,8	17,26	20,0	99
7735	Blumenau 138	21,4	8,66	24,0	8,96	19,9	121
7795	Joinville 138	14,2	6,29	15,3	6,59	14,4	106
7800	J. Lacerda A 230	13,7	12,19	16,4	12,09	14,4	114
7803	J. Lacerda A 138	12,4	8,90	13,7	9,88	14,4	95

Este sistema se comporta em regime permanente, para o patamar de carga pesada, conforme o diagrama da Figura 51. As perdas no sistema da ELETROSUL são de 243,1MW e a capacidade instalada é de 4.575,8MW.

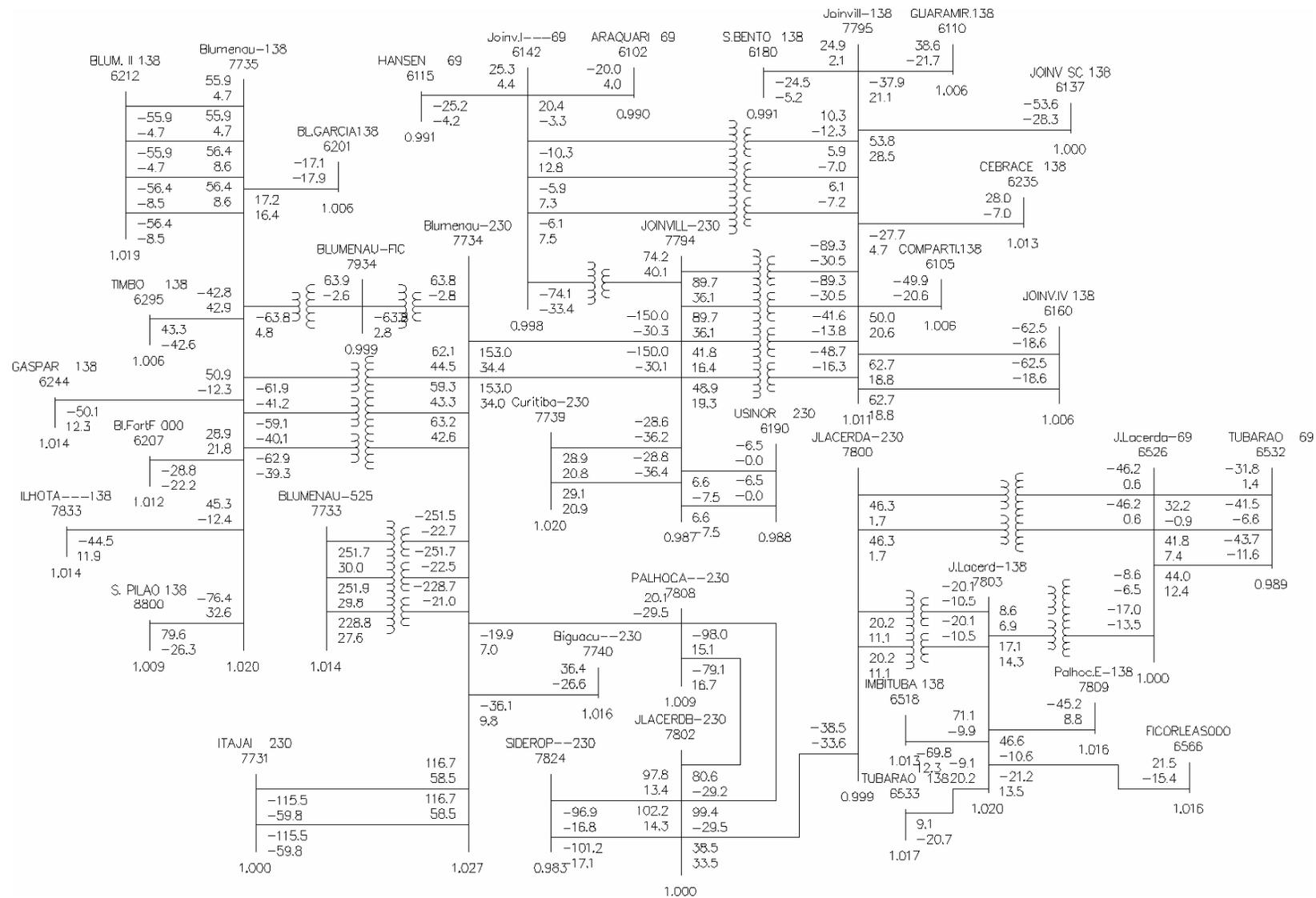


Figura 51 Diagrama unifilar do comportamento do sistema em regime permanente

Foram realizados vários testes com o equivalente do sistema da ELETROSUL para ajuste dos parâmetros do AG e os valores com o melhor desempenho foram praticamente os mesmos dos encontrados nos testes feitos com o sistema IEEE14. A única exceção foi o tamanho da população, cujo valor que melhor se adaptou aos testes com o sistema real foi 300 indivíduos. Valores superiores a estes não ofereceram melhores resultados, mas aumentaram consideravelmente o tempo de simulação. A seguir encontra-se uma breve descrição dos principais testes feitos.

#### 5.4.1 Objetivo 1

- **Teste r1:** Permite a inserção de RLCs nas barras e circuitos do sistema

Neste teste, foi permitida a inserção de RLCs nas barras superadas e em todas as barras e circuitos de 230kV do sistema equivalente, conforme mostrado na Tabela 35.

Tabela 35 Teste r1 – Locais escolhidos para permitir a inserção dos RLCs

Barras		Circuitos	
Num	Nome	Num	Nome
6142	Joinville 69kV	7800-7802 c1	J.Lacerda A - J.Lacerda B 230kV
6190	Usinor 230kV	7734-7794 c1 e c2	Blumenau - Joinville 230 kV
6526	J. Lacerda A 69kV	7808-7802 c1 e c2	Palhoça - J.Lacerda B 230kV
7734	Blumenau 230kV	7794-7739 c1 e c2	Joinville – Curitiba 230kV
7735	Blumenau 138kV	7795-6160 c1 e c2	Joinville- Joinville IV 138kV
7739	Curitiba 230kV	7734-7731 c1 e c2	Blumenau – Itajaí 230kV
7740	Biguaçu 230kV	7794-6190 c1 e c2	Joinville – Usinor 230kV
7794	Joinville 230kV	7734-7740 c1	Blumenau – Biguaçu 230kV
7795	Joinville 138kV	7824-7802 c1 e c2	Siderop – J. Lacerda B 230kV
7800	J. Lacerda A 230kV		
7802	J. Lacerda B 230kV		
7803	J. Lacerda A 138		
7808	Palhoça 230kV		
7824	Siderop 23kV		

Os seguintes parâmetros do AG foram utilizados:

- Tamanho da população: 300;

- Número máximo de gerações: 500;
- Taxa de cruzamento: 0,7;
- Operador de cruzamento: uniforme;
- Operador de seleção: roleta;
- Operador de mutação: decaindo por uma exponencial;
- $k_{NDLCSer_j} : 2,0$ ;
- $k_{NDLCSec_j} : 2,4$ ;
- $k_{3f}$  e  $k_{1f} : 0$ .

O resultado para os 10 melhores casos da simulação foi idêntico e correspondeu a inserir reatores nas posições indicadas nas Tabelas 36 e 37.

Tabela 36 Teste r1 - Reatores inseridos nas barras

Barra		Tensão (kV)	Reator (ohm)	Custo (UM)	Circuitos ou transformadores	
Num	Nome				Sec 1	Sec 2
7734	Blumenau	230	18	25,54	7734-7733 tr1 7734-7733 tr2 7734-7733 tr3 7734-7740 c1 7734-7808 c1	7734-7731 c1 7734-7731 c2 7734-7735 tr1 7734-7735 tr2 7734-7735 tr3 7734-7735 tr4 7734-7794 c1 7734-7794 c2
7794	Joinville	230	10	20,16	7794-6142 tr1 7794-7795 tr1 7794-7795 tr2 7794-7795 tr3	7794-6190 c1 7794-6190 c2 7794-7734 c1 7794-7734 c2 7794-7739 c1 7794-7739 c2 7794-7795 tr4
7795	Joinville	138	18	18,24	7795-6105 c1 7795-6160 c1 7795-6160 c2 7795-6142 tr1 7795-6142 tr2 7795-6142 tr3	7795-6110 c1 7795-6137 c1 7795-6180 c1 7795-6235 c1 7795-7794 tr1 7795-7794 tr2 7795-7794 tr3 7795-7794 tr4

Tabela 37 Teste r1 - Reator inserido em circuito

Barra de		Barra para		Número do circuito	Tensão (kV)	Reator (ohm)	Custo (UM)
Num	Nome	Num	Nome				
7800	J.Lacerda A	7802	J.Lacerda B	1	230	18	25,54

O custo total da solução é 89,47 UM. A Tabela 38 apresenta os resultados da simulação para as barras que tinham problemas de equipamentos superados e para as barras que foram seccionadas.

Tabela 38 Teste r1 - Valores de curto calculados após a inserção de RLC

Barra Número	Módulo da corrente de curto-circuito trifásico (kA)	Relação $X/R$ trifásica	Módulo da corrente de curto-circuito monofásico (kA)	Relação $X/R$ monofásica	Capacidade nominal do menor disjuntor (kA)	Maior percentual da capacidade nominal
6142	9,71	10,63	12,80	10,77	14,40	88,91
6526	13,10	19,08	16,97	17,75	20,00	84,85
7735	15,38	8,23	17,74	8,46	19,90	89,17
7800	7,87	17,64	9,47	17,99	14,40	65,73
7803	10,89	8,78	12,28	9,77	14,40	85,27
7734 sec1	11,03	10,6	12,51	10,23	40,00	31,26
7794 sec1	9,06	7,17	10,41	5,50	31,50	33,06
7795 sec1	10,65	7,08	11,46	6,94	14,40	79,62
7734 sec2	19,71	13,86	21,39	13,85	40,00	53,47
7794 sec2	6,71	8,64	7,48	8,76	31,50	23,76
7795 sec2	5,18	9,24	6,22	10,03	14,40	43,23

O sistema se comporta em regime permanente conforme Figura 52.



As perdas do sistema ficaram em 247,5MW, o que corresponde a 5,40% da capacidade instalada. A queda de tensão nos reatores está indicada na Tabela 39.

Tabela 39 Teste r1 - Queda de tensão nos reatores

Reator	Queda de Tensão (p.u.)	Reator (ohm)
Seccionando a barra 7734	0,072	18
Seccionando a barra 7794	0,008	10
Seccionando a barra 7795	0,045	18
No circuito 7800-7802	0,004	18

Portanto, o comportamento do sistema em regime permanente atendeu às restrições operativas.

#### 5.4.2 Objetivo 2

- **Teste r2**: Permite a inserção de RLCs nas barras e circuitos do sistema

Neste teste, foi permitida a inserção de RLCs nas barras superadas e em todas as barras e circuitos de 230kV do sistema equivalente, conforme Tabela 35. Os parâmetros genéticos e constantes utilizados foram:

- Tamanho da população: 300;
- Número máximo de gerações: 200;
- Taxa de cruzamento: 0,7;
- Operador de cruzamento: uniforme;
- Operador de seleção: roleta;
- Operador de mutação: decaindo por uma exponencial;
- $k_{NDLCSer_j}$ : 2,0;
- $k_{NDLCSec_j}$ : 2,4;
- $k_{3f}$ : 0,01;
- $k_{1f}$ : 0,01.

A solução encontrada para os 10 melhores casos da simulação foi idêntica e correspondeu a inserir reatores nos locais apresentados nas Tabelas 40 e 41.

Tabela 40 Teste r2 - Reator inserido em circuito

Barra de		Barra para		Número do circuito	Tensão (kV)	Reator (ohm)	Custo (UM)
Num	Nome	Num	Nome				
7800	J.Lacerda A	7802	J.Lacerda B	1	230	18	25,54

Tabela 41 Teste r2 - Reatores inseridos nas barras

Barra		Tensão (kV)	Reator (ohm)	Custo (UM)	Circuitos ou transformadores	
Num	Nome				Sec 1	Sec 2
7734	Blumenau	230	18	25,54	7734-7733 tr1 7734-7733 tr2 7734-7733 tr3 7734-7740 c1 7734-7808 c1	7734-7731 c1 7734-7731 c2 7734-7735 tr1 7734-7735 tr2 7734-7735 tr3 7734-7735 tr4 7734-7794 c1 7734-7794 c2
7794	Joinville	230	12	21,50	7794-6142 tr1 7794-7795 tr1 7794-7795 tr2 7794-7795 tr3	7794-6190 c1 7794-6190 c2 7794-7734 c1 7794-7734 c2 7794-7739 c1 7794-7739 c2 7794-7795 tr4
7795	Joinville	138	18	18,24	7795-6105 c1 7795-6160 c1 7795-6160 c2 7795-6142 tr1 7795-6142 tr2 7795-6142 tr3	7795-6110 c1 7795-6137 c1 7795-6180 c1 7795-6235 c1 7795-7794 tr1 7795-7794 tr2 7795-7794 tr3 7795-7794 tr4
7803	JLacerda A	138	5	12,00	7803-7800 tr1 7803-7800 tr2 7803-6526 tr1 7803-6526 tr2 7803-6518 c1 7803-6533 c1	7803-7809 c1 7803-6566 c1

O custo total da solução é 102,81 UM. A Tabela 42 apresenta os resultados da simulação para as barras que tinham problemas de equipamentos superados e para as barras que foram seccionadas.

Tabela 42 Teste r2 - Valores de curto calculados após a inserção de RLC

Barra Número	Módulo da corrente de curto-circuito trifásico (kA)	Relação X/R trifásica	Módulo da corrente de curto-circuito monofásico (kA)	Relação X/R monofásica	Capacidade nominal do menor disjuntor (kA)	Maior percentual da capacidade nominal
6142	9,59	10,58	12,67	10,72	14,40	87,97
6526	13,05	19,6	16,91	18,14	20,00	84,54
7735	15,37	8,24	17,74	8,47	19,90	89,13
7800	7,83	18,13	9,43	18,4	14,40	78,58
7803	10,70	9,29	12,12	10,25	14,40	65,50
7734 sec1	11,03	10,6	12,50	10,23	40,00	84,17
7794 sec1	9,04	7,19	10,40	5,51	31,50	31,26
7795 sec1	10,46	7,07	11,32	6,92	14,40	33,02
7734 sec2	19,71	13,87	21,39	13,86	40,00	78,58
7794 sec2	6,45	8,74	7,21	8,92	31,50	53,46
7795 sec2	5,12	9,2	6,17	9,98	14,40	22,89

O comportamento do sistema em regime permanente deste teste está indicado na Figura 53. As perdas do sistema ficaram em 247,7MW, o que corresponde a 5,41% da capacidade instalada. A queda de tensão nos reatores está indicada na Tabela 43.

Tabela 43 Teste r2 - Queda de tensão nos reatores

Reator	Queda de Tensão (p.u.)	Reator (ohm)
Seccionando a barra 7734	0,071	18
Seccionando a barra 7794	0,012	12
Seccionando a barra 7795	0,048	18
Seccionando a barra 7803	0,001	5
No circuito 7800-7802	0,004	18



Fazendo a análise dos resultados do sistema em regime permanente, nota-se que nas barras 795 (que corresponde ao seccionamento da barra 7795), 6105 e 6160, o perfil de tensão ficou um pouco abaixo do especificado, ou seja, abaixo de 0,95 p.u.. Através deste teste, foi possível perceber que é necessária a análise dos casos em regime permanente para verificar se a solução indicada como boa para o curto-circuito também é viável para as condições normais de operação do sistema. Também através do teste r2, pode-se notar que a mudança na definição da função objetivo pode influenciar no resultado final e que um bom ajuste nesta função é fundamental para que o programa dê resultados que podem ser executados na prática e que atendam às restrições de operação em regime permanente.

Uma solução para o problema da elevada queda de tensão no sistema poderia ser a instalação, ao invés do RLC, de um DLC que não influenciasse tanto no comportamento do sistema em regime permanente, como é o caso, por exemplo, dos dispositivos supercondutores.

### 5.4.3 Resumo dos resultados dos testes do sistema ELETROSUL

Um resumo dos custos totais de cada teste, assim como das perdas no sistema e do tempo de execução estão mostrados na Tabela 44, onde a violação de restrições não está levando em conta a análise em regime permanente do sistema, e sim apenas o processo de alocação.

Tabela 44 Resultados dos testes com o sistema da ELETROSUL

Número do Teste	Custo Total (UM)	Violação de Restrições	Perdas no Sistema	Tempo de Execução <sup>(*)</sup>
Tr1	89,47	Não houve	247,5	06h24m
Tr2	102,81	Não houve	247,7	06h20m

(\*): Os tempos de execução foram obtidos para testes feitos em um computador Pentium 4Mhz.

Comparando o teste r1 com o r2, nota-se que o último apresentou custo mais elevado. Isso ocorreu porque a função de aptidão utilizada neste teste considerava também a máxima redução do nível de curto do sistema, logo, reatores limitadores de curto com

maior capacidade foram necessários no caso. A desvantagem de inserir um número alto de reatores é que ocorre o aumento das perdas e da queda de tensão no sistema.

É importante ressaltar que nenhuma restrição foi adotada para inserção de RLC nas barras e circuitos do sistema, ou seja, nenhuma verificação foi feita sobre a possibilidade ou não de alocar os reatores nestas posições. Para que as soluções encontradas nos testes fossem realmente confiáveis, seria fundamental a identificação em campo de todas as barras e circuitos onde a inserção do reator é permitida.

# Capítulo 6

## Conclusões

Este trabalho descreve o desenvolvimento de uma metodologia para realizar a alocação ótima de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito em redes de energia elétrica utilizando Algoritmos Genéticos. No algoritmo desenvolvido, foram considerados os requisitos de custo do investimento, de número de dispositivos inseridos e de nível de curto-circuito do sistema. Foi analisada a superação por corrente de curto-circuito simétrica e assimétrica. A análise da tensão de restabelecimento transitória não foi objeto deste trabalho.

A integração dos AGs a um programa de cálculo de curto-circuito foi feita de forma que o programa de AGs ficou como um módulo totalmente independente e integrado. Foi escolhido o programa ANAFAS para cálculo de curto-circuito para possibilitar o uso imediato da ferramenta desenvolvida pelos especialistas do setor, visto que o ANAFAS é um dos programas de curto-circuito mais utilizados no setor elétrico brasileiro.

Durante os testes, comprovou-se que os AGs, para apresentarem resultados adequados, precisam de um ajuste correto nos parâmetros que influenciam na sua convergência, tais como: tamanho da população, número de gerações e fator penalidade. Para os testes realizados, tais parâmetros foram ajustados por tentativas a partir da verificação dos resultados obtidos. Constatou-se que alguns desses parâmetros dependem do tipo de função objetivo empregada e do tamanho do problema.

Verificou-se também a importância da correta modelagem e formulação da função de aptidão de acordo com o objetivo que se deseja. Definir corretamente o objetivo é uma das partes mais complexas e importantes do trabalho.

O tempo de processamento computacional desta metodologia é considerável, uma vez que a mesma executa um número de simulações de curto-circuito igual ao número de barras do sistema vezes o número de indivíduos da população vezes o número de gerações. Além disso, a ferramenta está implementada em MATLAB, que utiliza uma linguagem interpretada e não compilada. A maior parte do tempo gasto com o processamento, no entanto, é em consequência da escrita/leitura de arquivos para realizar a integração

automática com o programa ANAFAS. Quanto maior é o número de barras, circuitos e transformadores do sistema, maior é o tempo de execução do programa. O elevado tempo computacional é o preço pago para manter a compatibilidade com o ANAFAS.

Nos testes foram utilizados dois sistemas de potência: o sistema IEEE14 barras e o sistema da ELETROSUL. O primeiro, serviu para validar o algoritmo implementado e fazer os primeiros ajustes dos parâmetros de controle dos AGs. O outro sistema serviu para avaliar o método frente a problemas práticos de grande porte, permitindo verificar seu desempenho.

Os resultados obtidos nos testes foram encorajadores e mostraram que este problema pode ser adequadamente resolvido por AGs visto que o algoritmo implementado apresentou robustez ao obter soluções exequíveis para todos os cenários testados.

Os testes feitos revelaram que não existe apenas uma resposta possível para o problema, mas sim, várias soluções, as quais atendem a determinados objetivos de forma mais ou menos otimizada. A análise do sistema em regime permanente se mostrou necessária para averiguar se a queda de tensão e as perdas no sistema provocadas pelo RLC invalidariam ou não a solução encontrada nas simulações.

É importante ressaltar que, antes da decisão de instalar um RLC, vários outros aspectos devem ser estudados para garantir a viabilidade do projeto, tais como: a análise do desempenho do sistema em regime transitório, a definição das dimensões físicas para o RLC, os cuidados especiais com respeito aos possíveis danos causados pelo fluxo magnético gerado pelo RLC à vida humana, diretamente ou por contato com estruturas metálicas nas vizinhanças, e as especificações das características elétricas.

Como neste trabalho a otimização é feita apenas para a corrente de curto-circuito, para decidir-se por instalar RLCs no sistema, é preciso avaliar também o custo das perdas provocadas pelo RLC ao longo dos anos, quando o sistema está operando em regime permanente. Uma medida adotada para minimizar essas perdas, para o caso de RLC instalado seccionando barramentos, é distribuir as cargas de forma balanceada em cada seção do barramento a fim de minimizar a corrente que passa pelo RLC na operação normal do sistema já que, quanto menor a corrente, menor são as perdas.

Também deve ser feita a análise custo vs. benefício, comparando-se os lucros econômicos decorrentes da limitação de nível de curto-circuito com os custos da

substituição de equipamento sobrecarregado ou do reforço das instalações. Entre os equipamentos que podem necessitar de substituição estão, além dos disjuntores, as chaves seccionadoras, os transformadores de corrente, os transformadores de potencial, os cabos pára-raios e as bobinas de bloqueio.

- **Trabalhos Futuros**

Análises realizadas recentemente no sistema brasileiro indicam a necessidade cada vez maior do desenvolvimento de métodos e avanços tecnológicos na área de limitação das correntes de curto-circuito, visando garantir um maior número de alternativas para a solução deste problema. Sendo assim, este assunto ainda deve ser bastante discutido e a linha de pesquisa nesta área ainda apresenta muitos desafios. O método implementado e o problema em tela podem ser aprimorados em diversos aspectos. A seguir são apresentadas algumas propostas de trabalho que poderão ser desenvolvidas no futuro:

- Inclusão do cálculo da TRT na análise da superação dos disjuntores através de um programa para cálculo de transitórios eletromagnéticos;
- Inclusão, entre as opções para limitar o curto-circuito, do seccionamento de barra sem dispositivo limitador, prática bastante comum no Brasil. Para isso, seria necessária a realização de estudos de confiabilidade antes e após o seccionamento da barra para averiguação da viabilidade do projeto;
- Consideração de outros dispositivos limitadores de corrente de curto, além do reator a núcleo de ar;
- Utilização de técnicas de processamento paralelo de forma a diminuir o tempo computacional;
- Avaliação de outros métodos de busca ou otimização para solução do problema;
- Integração da análise em regime permanente à metodologia, para avaliação de cada candidato à alocação ótima;
- Melhoria da eficiência da implementação que pode ser obtida substituindo o ANAFAS por um programa de curto-circuito desenvolvido de modo integrado ao programa.

## Referências Bibliográficas

- [1] ONS, *Dispositivos Limitadores de Correntes de Defeito - DLCC - Estado da Arte*, Julho de 2004.
- [2] FREITAS, R., C., et al., “Projeto e Aplicação de Limitadores de Corrente Elétrica – Supercondutores Resistivos”, XVIII SNPTEE, Grupo VIII, 16 a 21 de Outubro de 2005.
- [3] PERES, L., P., AMON, J. F., “Recapitação da Subestação de Mogi 345/230 kV e Adaptação aos Novos Níveis de Curto-Circuito da Rede”, XIV SNPTEE, Grupo VIII, 1997.
- [4] ONS, *Estudo da Redução de Correntes de Curto-Circuito em Subestações da Área Rio Através da Aplicação de Dispositivos Limitadores*, Janeiro de 2002.
- [5] ARCON, A. B., PINTO, L. C., “Limitação dos Níveis de Curto-Circuito em uma Usina de Cogeração Utilizando o Equipamento IS-Limiter – Estudo de Caso”, XVIII SNPTEE, Grupo VIII, 16 a 21 de Outubro de 2005.
- [6] ONS, *Estudos de Curto-circuito período 2004-2007*, Novembro de 2004.
- [7] CHIPPERFIELD, A., FLEMING, P., et al., *Genetic Algorithm Toolbox for Use with MATLAB*, Version 1.2., University of Sheffield, 1994.
- [8] ROMÉRO, S. P., MACHADO, P. A., “ANAFAS – Programa de Análise de Falhas Simultâneas”, IV STPC, Fortaleza, Maio de 1993.
- [9] CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, *ANAREDE - Programa de Análise de Redes*, Manual do Usuário, V08, Março de 2005.
- [10] SCHMITT, H., et al, “Fault Current Limiters Report on Activities of CIGRE Working Group A3.10”, CIGRE WG 13.10.
- [11] GREENWOOD, et al., “Functional Specifications for a Fault Current Limiter”, CIGRE, 13.10, ELECTRA, 2001.

- [12] MONTEIRO, A. M., *Um Estudo de Dispositivos Limitadores de Corrente de Curto-circuito com Ênfase no IPC (Interphase Power Controller)*, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.
- [13] AMON, J. F., HARTUNG, K. H., “Aplicação de Novas Técnicas de Limitação de Curto-Circuito Face à Conexão de Produtores Independentes à Rede Básica sob o Novo Ambiente Desregulamentado do Setor Elétrico Brasileiro”, XVI SNPTEE – GSE/005, Campinas – São Paulo, 2001.
- [14] ONS, *Dispositivos Limitadores de Curto-Circuito – DLCC – Estado da Arte e Aplicações nas Redes Elétricas*, Janeiro de 2002.
- [15] AMON, J. F., “Limitação de Curto-Circuito: Novas Tecnologias já Existentes e em Desenvolvimento”, IX ERLAC, Foz do Iguaçu, Brasil, 2001.
- [16] SIEMENS, “SCCL – Short-Circuit Current Limitation with FACTS in High-Voltage Systems, Application & Features”.
- [17] GARRITY, T. F., “Shaping the Future of Global Energy Delivery”, IEEE Power & Energy Magazine, October 2003.
- [18] TENÓRIO, A. R. M., JENKINS, N., “Investigation of the TCSC as a Fault Current Limiter”, International Conference on Power System Transients – IPST, June 1997.
- [19] CHEN, M., LAKNER, M., RHYNER, W., PAUL, W., “Fault Current Limiter Based on High Temperature Superconductors”, 1997.
- [20] NOE, M. and OSWALD, B. R., “Technical and Economical Benefits of Superconducting Fault Current Limiters in Power Systems”, ASC98, Palm Desert, USA, 1998.
- [21] ROGERS, J.,D., et al., “Superconducting Fault Current Limiter and Inductor Design”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. Mag-19, No.3, May, 1983.
- [22] PAUL, W., CHEN, M., LAKNER, M., et al., “Superconducting Fault Current Limiter Applications, Technical and Economical Benefits, Simulations and Tests Results” – artigo 13-201, 38<sup>a</sup> Sessão Bienal da CIGRE, Paris, 2000.

- [23] D’AJUZ, A., et al., *Equipamentos Elétricos - Especificação e Aplicação em Subestações de Alta Tensão*, UFF, FURNAS, 1985.
- [24] KINDERMAN, G., *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*, Volume 1, 2ª Edição, 2005.
- [25] BARTHOLD, L. O., REPPEN, N. D., HEDMAN, D. E., *Análise de Circuitos de Sistemas de Potência – Curso de Engenharia em Sistemas Elétricos de Potência – série P.T.I.*, Convênio Eletrobrás/UFSM, Volume 1 , 2ª Edição, Santa Maria, 1983.
- [26] ALMEIDA, W. G., FREITAS, F. D, *Circuitos Polifásicos* , Finatec, Brasília, 1995.
- [27] MELLO, F. P., *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência – Curso de Engenharia em Sistemas Elétricos de Potência*, série P.T.I., Convênio Eletrobrás/UFSM, Volume 7 , Santa Maria, 1979.
- [28] CARVALHO, A. C., et al., *Disjuntores e Chaves - Aplicação em Sistemas de Potência*, EDUFF, Niterói, 1995.
- [29] STEVENSON, W. D. J., GRAINGER, J. J., *Power System Analysis*, McGraw-Hill International Editions, Electrical Engineering Series, 1994.
- [30] ONS, *Diretrizes para Análise de Superação de Disjuntores, Seccionadores e Bobinas de Bloqueio*, setembro de 2005.
- [31] ONS, *Diretrizes para Análise de Superação de Transformadores de Corrente*, setembro de 2005.
- [32] AMON, J. F., FERNANDES, P. C. A., PIMENTA, D. G., “Análise da Superação das Características Nominais de Equipamentos: Métodos para a Identificação da Possibilidade de Ocorrência e Estudo de Soluções de Mitigação Face as Regras do Atual modelo do Setor Elétrico”, XVIII SNPTEE, Grupo IV, 16 a 21 de Outubro de 2005.
- [33] ONS, *Diretrizes para a Aplicação de Medidas Mitigadoras nos Casos de Superação de Equipamentos de Alta Tensão*, Janeiro de 2006.

- [34] ONS, *Metodologia de Cálculo da TRT para Estudos de Superação de Disjuntores*, setembro de 2005.
- [35] D’AJUZ, A., et al., “Influência da Evolução da Componente Assimétrica de Curto-circuito na Capacidade de Interrupção dos Disjuntores”, X ERLAC, Maio de 2003.
- [36] GODOY, M., V., ALVES, F., R., “Análise de Superação de Disjuntores quanto a Curto-Circuito e Tensão de Restabelecimento Transitória no Planejamento CHESF”, XVIII SNPTEE, Grupo X, 16 a 21 de Outubro de 2005.
- [37] CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, *ANAFAS - Programa de Análise de Faltas Simultâneas*, Manual do Usuário, V3.4, Junho 2004.
- [38] SAAVEDRA, O. R., *Algoritmos Genéticos*, Universidade Federal do Maranhão, Apostila, 2002.
- [39] Falcão, D. M., *Algoritmos Genéticos e Evolucionários*, COPPE/UFRJ, Notas de aula, 2002.
- [40] GOLDBERG, D. E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley, 1989.
- [41] Penido, D. R. R., *Combinação de Algoritmos Genéticos e Algoritmos de Fluxo de Potência Ótimo na Solução de Problemas de Otimização Estática com Variáveis Discretas*, COPPE/UFRJ, Trabalho de Técnicas Inteligentes Aplicadas a Sistemas Elétricos de Potência, 2004.
- [42] CHIPPERFIELD, A. J., FLEMING, P. J. and FONSECA, C. M., “Genetic Algorithm Tools for Control Systems Engineering”, Proc. Adaptive Computing in Engineering Design and Control, Plymouth Engineering Design Centre, 21-22 September, pp. 128-133, 1994.
- [43] CHIPPERFIELD, A. J., FLEMING, P. J., “The MATLAB Genetic Algorithm Toolbox”, From IEEE Colloquium on Applied Control Techniques Using MATLAB, digest no. 1995/014, 1995.

# Apêndice A

## Teoria Básica de Curto-Circuito

Para exemplificar o método de cálculo dos diferentes tipos de curto-circuito, será considerado um exemplo formado por uma linha de transmissão interligando dois sistemas. A Figura A1 ilustra o processo sendo que os dois sistemas estão representados pelos seus equivalentes (equivalentes de Thévenin).

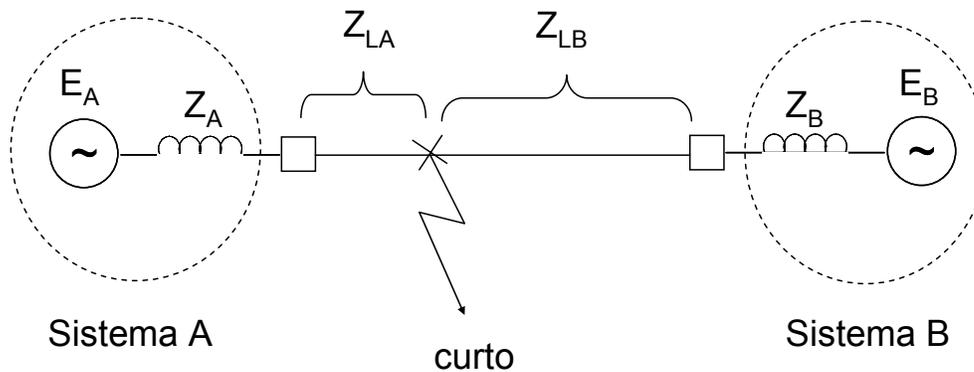


Figura A1 Sistema exemplo para cálculo de curto-circuito

Pelo Teorema de Thévenin, a corrente de curto-circuito em determinado ponto do sistema é dada por:

$$I_{curto} = \frac{V_{th}}{Z_{th}} \quad (A.1)$$

Onde  $V_{th}$  é a tensão no ponto de falta e  $Z_{th}$  é a impedância do circuito vista pelo ponto de curto.

Este Teorema é válido para o cálculo dos diversos tipos de curto que serão abordados a seguir.

- Curto-Circuito Trifásico (Simétrico)

Não provoca desequilíbrio no sistema pois se admite que todos os condutores da rede são solicitados de modo idêntico e conduzem o mesmo valor eficaz da corrente de curto. Por esse motivo são classificados como curto simétrico e seu cálculo pode ser efetuado por fase. Para o cálculo simplificado do curto trifásico, considera-se o circuito equivalente de seqüência positiva, sendo indiferente se o curto envolve ou não a terra. Considerando a Figura A1, o equivalente de seqüência positiva fica:

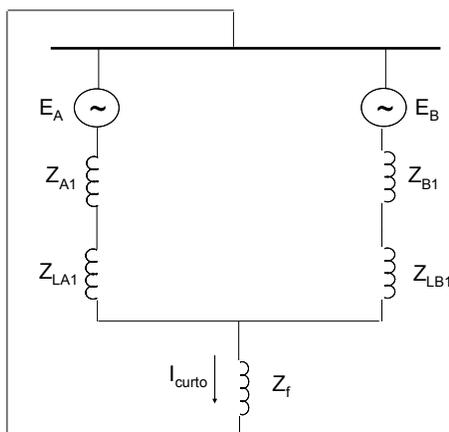


Figura A2 Sistema equivalente para curto-circuito trifásico

onde:

$Z_{A1}$  - impedância equivalente do sistema A;

$Z_{LA1}$  - impedância da linha entre o sistema A e o ponto de falta;

$E_A$  - tensão do sistema A;

$Z_{B1}$  - impedância equivalente do sistema B;

$Z_{LB1}$  - impedância da linha entre o sistema B e o ponto de falta;

$E_B$  - tensão do sistema B;

$Z_f$  - impedância de falta.

Calculando o equivalente de Thévenin no ponto de falta, tem-se:

$$Z_{th} = Z_I = (Z_{A1} + Z_{LA1}) // (Z_{B1} + Z_{LB1}) \quad (A.2)$$

A corrente de curto-circuito trifásico pode ser calculada por:

$$I_{curto} = \frac{E}{Z_1 + Z_f} \quad (A.3)$$

onde:

$E = V_{th}$  - Tensão equivalente no ponto de falta;

$I_{curto}$  - Corrente de falta.

O circuito equivalente pode ser representado pela Figura A3.

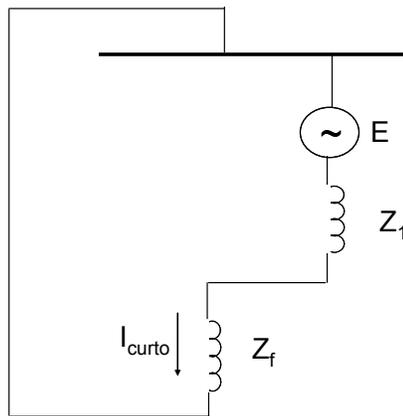


Figura A3 Equivalente para curto-circuito trifásico

- Curtos Assimétricos

São os curtos bifásicos (com ou sem contato com a terra) e os monofásicos. Como são curtos desequilibrados, seus cálculos são realizados através do uso de componentes simétricas.

O método das componentes simétricas se baseia no Teorema de Fortescue [26], que diz:

“Qualquer grupo desequilibrado de  $n$  fasores associados, do mesmo tipo, pode ser resolvido em  $n$  grupos de fasores equilibrados, denominados *componentes simétricas dos fasores originais*.”

De acordo com este teorema, um sistema trifásico desequilibrado, seqüência de fases  $a, b, c$ , caracterizado por três fasores de corrente  $I_a, I_b, I_c$ , girando à frequência angular da rede, pode ser resolvido por três outros sistemas simétricos:

- Um sistema trifásico equilibrado, na mesma seqüência de fases do sistema desequilibrado original, denominado *sistema de seqüência positiva*;
- Um sistema trifásico equilibrado, na seqüência de fases inversa da seqüência de fases do sistema desequilibrado original, denominado *sistema de seqüência negativa*;
- Um sistema simétrico de fasores paralelos, chamado de *sistema de seqüência zero*.

É possível representar esses três sistemas pela forma matricial dada pela Equação (A.4).

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (A.4)$$

onde:

$I_{a1}, I_{a2}$  e  $I_{a0}$  são os fasores de seqüência positiva, negativa e zero, respectivamente;

$\alpha = 1 \angle 120^\circ$ .

Para cálculo de curtos monofásicos, a configuração das componentes de seqüência está indicada na Figura A4, considerando curto-circuito da fase  $a$  para a terra.

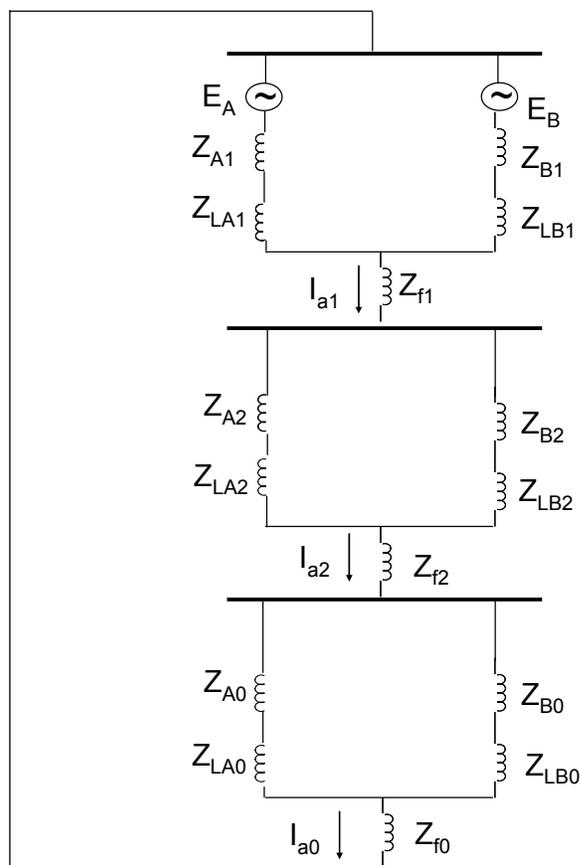


Figura A4 Diagrama do sistema para curto-circuito monofásico

Onde:

$Z_{A1}$  - impedância de seqüência positiva equivalente do sistema A;

$Z_{LA1}$  - impedância de seqüência positiva da linha entre o sistema A e o ponto de falta;

$Z_{B1}$  - impedância de seqüência positiva equivalente do sistema B;

$Z_{LB1}$  - impedância de seqüência positiva da linha entre o sistema B e o ponto de falta;

$Z_{f1}$  - impedância de falta de seqüência positiva;

$Z_{A2}$  - impedância de seqüência negativa equivalente do sistema A;

$Z_{LA2}$  - impedância de seqüência negativa da linha entre o sistema A e o ponto de falta;

$Z_{B2}$  - impedância de seqüência negativa equivalente do sistema B;

$Z_{LB2}$  - impedância de seqüência negativa da linha entre o sistema B e o ponto de falta;

$Z_{f2}$  - impedância de falta de seqüência negativa;

$Z_{A0}$  - impedância de seqüência zero equivalente do sistema A;

$Z_{LA0}$  - impedância de seqüência zero da linha entre o sistema A e o ponto de falta;

$Z_{B0}$  - impedância de seqüência zero equivalente do sistema B;

$Z_{LB0}$  - impedância de seqüência zero da linha entre o sistema B e o ponto de falta.

$Z_{f0}$  - impedância de falta de seqüência zero.

Considerando:

$$Z_{th1} = Z_1 = (Z_{A1} + Z_{LA1}) // (Z_{B1} + Z_{LB1}) \quad (A.5)$$

$$Z_{th2} = Z_2 = (Z_{A2} + Z_{LA2}) // (Z_{B2} + Z_{LB2}) \quad (A.6)$$

$$Z_{th0} = Z_0 = (Z_{A0} + Z_{LA0}) // (Z_{B1} + Z_{LB0}) \quad (A.7)$$

$$Z_{f1} = Z_{f2} = Z_{f0} = Z_f \quad (A.8)$$

Então:

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = \frac{E}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_f} \quad (A.9)$$

$$I_{curto} = I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} = 3I_{a1} \quad (A.10)$$

Como o curto é da fase  $a$  para a terra, tem-se que:

$$I_b = I_c = 0 \quad (A.11)$$

O circuito equivalente está apresentado na Figura A5.

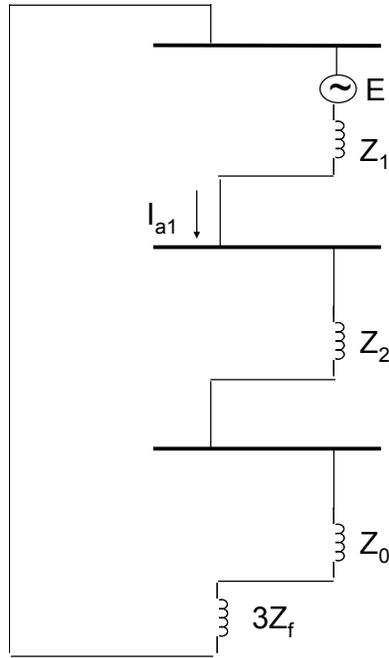


Figura A5 Equivalente para curto-circuito monofásico

Curto bifásicos entre as fases *b* e *c* podem ser representados através da Figura A6.

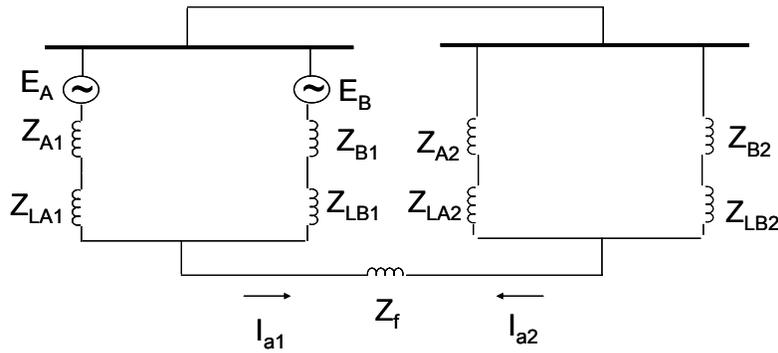


Figura A6 Diagrama do sistema para curto-circuito bifásico

Com  $Z_1$  e  $Z_2$  definidos conforme as equações para cálculo de curto-circuito monofásico apresentadas anteriormente, tem-se:

$$I_{a1} = -I_{a2} = \frac{E}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad (A.12)$$

$$I_{a0} = 0 \quad (A.13)$$

$$I_{curto} = I_{a1} \tag{A.14}$$

O equivalente está apresentado na Figura A7.

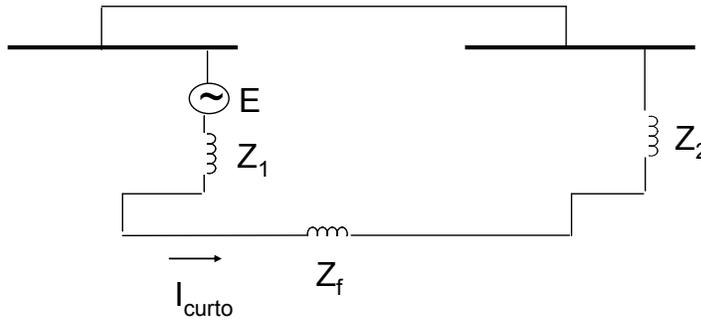


Figura A7 Equivalente para curto-circuito bifásico

No caso de curtos bifásicos envolvendo a terra, a representação se faz de acordo com a Figura A8, para curto entre as fases *b* e *c*.

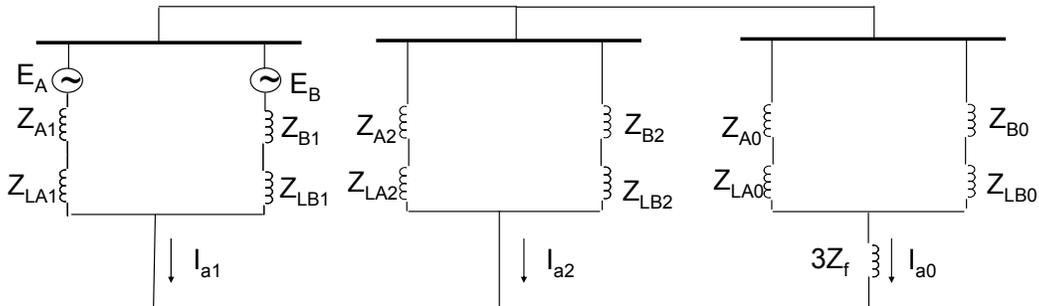


Figura A8 Diagrama do sistema para curto-circuito bifásico-terra

Neste caso, as correntes de seqüência são representadas conforme as Equações (A.15) a (A.17).

$$I_{a1} = \frac{E}{Z_1 + Z_2 // (Z_0 + 3Z_f)} \tag{A.15}$$

$$I_{a2} = -I_{a1} \frac{(Z_0 + 3Z_f)}{Z_2 + Z_0 + 3Z_f} \quad (A.16)$$

$$I_{a0} = -I_{a1} \frac{Z_2}{Z_2 + Z_0 + 3Z_f} \quad (A.17)$$

Como:

$$I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = 0 \quad (A.18)$$

Então:

$$I_{curto} = 2I_{a0} - I_{a1} - I_{a2} \quad (A.19)$$

Para sistemas de grande porte, o cálculo dos diversos tipos de curto-circuito é executado utilizando-se a matriz de impedância de barra,  $Z_{barra}$ , que está relacionada com a matriz de admitância de barra,  $Y_{barra}$ , conforme a Equação (A.20).

$$Z_{barra} = Y_{barra}^{-1} \quad (A.20)$$

A matriz de admitância de barra é obtida diretamente da rede elétrica por inspeção [29] e, a partir dela, obtém-se a matriz de impedância de barra por inversão explícita ou utilizando-se algoritmos mais eficientes computacionalmente.

Para análise em componentes de seqüência, as redes de seqüência positiva, negativa e zero têm associadas uma matriz  $Y_{barra}$  e, conseqüentemente, uma matriz  $Z_{barra}$ , representada pelas Equações (A.21) a (A.23).

$$Z_{barra}_{(1)} = \begin{bmatrix} Z_{11(1)} & Z_{12(1)} & \cdots & Z_{1m(1)} \\ Z_{21(1)} & Z_{22(1)} & \cdots & Z_{2m(1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{m1(1)} & Z_{m2(1)} & \cdots & Z_{mm(1)} \end{bmatrix} \quad (A.21)$$

$$Zbarra_{(2)} = \begin{bmatrix} Z_{11(2)} & Z_{12(2)} & \cdots & Z_{1m(2)} \\ Z_{21(2)} & Z_{22(2)} & \cdots & Z_{2m(2)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{m1(2)} & Z_{m2(2)} & \cdots & Z_{mm(2)} \end{bmatrix} \quad (A.22)$$

$$Zbarra_{(0)} = \begin{bmatrix} Z_{11(0)} & Z_{12(0)} & \cdots & Z_{1m(0)} \\ Z_{21(0)} & Z_{22(0)} & \cdots & Z_{2m(0)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{m1(0)} & Z_{m2(0)} & \cdots & Z_{mm(0)} \end{bmatrix} \quad (A.23)$$

$Z_{mm(1)}$ ,  $Z_{mm(2)}$  e  $Z_{mm(0)}$  representam as impedâncias de seqüência positiva, negativa e zero, respectivamente, vistas pelo ponto de curto-circuito (impedância equivalente de Thévenin). Sendo assim, o cálculo do curto-circuito na barra  $m$  através da matriz  $Zbarra$  é feito considerando que:

$$Z_{th(1)} = Z_{mm(1)} \quad (A.24)$$

$$Z_{th(2)} = Z_{mm(2)} \quad (A.25)$$

$$Z_{th(0)} = Z_{mm(0)} \quad (A.26)$$

Logo, basta substituir  $Z_1$ ,  $Z_2$  e  $Z_0$  das Equações anteriormente apresentadas por  $Z_{mm(1)}$ ,  $Z_{mm(2)}$  e  $Z_{mm(0)}$ , respectivamente. Sendo assim, para curtos-circuitos trifásicos:

$$I_{curto} = \frac{E}{Z_{mm(1)} + Z_f} \quad (A.27)$$

Para curtos-circuitos monofásicos, fase  $a$  para terra:

$$I_{curto} = \frac{3E}{Z_{mm(1)} + Z_{mm(2)} + Z_{mm(0)} + 3Z_f} \quad (A.28)$$

No caso de curtos-circuitos bifásico, fase  $b$  e  $c$ , sem a terra:

$$I_{curto} = \frac{E}{Z_{mm(1)} + Z_{mm(2)} + Z_f} \quad (A.29)$$

E para curtos-circuitos bifásicos, fases *b* e *c*, envolvendo a terra:

$$I_{a1} = \frac{E}{Z_{mm(1)} + Z_{mm(2)} // (Z_{mm(0)} + 3Z_f)} \quad (A.30)$$

$$I_{a2} = -I_{a1} \frac{(Z_{mm(0)} + 3Z_f)}{Z_{mm(2)} + Z_{mm(0)} + 3Z_f} \quad (A.31)$$

$$I_{a0} = -I_{a1} \frac{Z_{mm(2)}}{Z_{mm(2)} + Z_{mm(0)} + 3Z_f} \quad (A.32)$$

Como:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ I_{a0} + \alpha^2 I_{a1} + \alpha I_{a2} \\ I_{a0} + \alpha I_{a1} + \alpha^2 I_{a2} \end{bmatrix} \quad (A.33)$$

Então:

$$I_{curto} = I_b + I_c \quad (A.34)$$

Levantamentos estatísticos [26] indicam que a ocorrência dos tipos de defeitos em sistemas de potência se dá, na média, conforme a seguinte probabilidade:

- curtos-circuitos trifásicos: 5%
- curtos-circuitos bifásicos, sem terra: 15%
- curtos-circuitos bifásicos, com terra: 10%
- curtos-circuitos monofásicos: 70%

# Apêndice B

## Síntese dos Principais DLCs

Uma síntese dos principais DLCs encontrados na literatura estão descritos a seguir. Informações mais detalhadas sobre estes dispositivos são encontradas em [12].

### FACTS – Flexible AC Transmission Systems

O termo FACTS provém do inglês *Flexible AC Transmission Systems* e é definido pelo IEEE como: sistemas de transmissão em corrente alternada que utilizam dispositivos de eletrônica de potência e também outros controladores estáticos, com o objetivo de aumentar a controlabilidade e a capacidade de transferência de potência de um sistema elétrico.

A tecnologia FACTS já vem sendo aplicada em sistemas elétricos de potência em todo o mundo há bastante tempo como solução técnica para diferentes necessidades relacionadas à rede de transmissão. Suas principais áreas de atuação são:

- Aumento da capacidade do sistema utilizando FACTS em compensação série
- Controle do fluxo de potência
- Amortecimento de oscilações eletromecânicas e/ou subsíncronas
- Limitadores de curto-circuito

Os principais dispositivos FACTS utilizados como limitadores de curto-circuito são o TCSC e o TPSC, cujas características estão apresentadas a seguir.

- TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*)

O capacitor série controlado por tiristor (TCSC) é um dos controladores FACTS mais promissores para aplicações diversas nos sistemas de potência, inclusive a limitação

de correntes de falta. Ele combina capacitores série convencionais com reatores controlados por tiristores (RCT), permitindo um controle contínuo da reatância satisfazendo o requisito, aparentemente contraditório, de aumentar a capacidade de transmissão do sistema (diminuindo a impedância de transferência entre barras com os capacitores série) com um decréscimo do nível de curto-circuito [14].

O circuito de potência é formado por um banco de capacitores em paralelo com reatores controlados por tiristor e um pára-raios (MOV) para proteger o capacitor, conforme apresentado no diagrama da Figura B1.

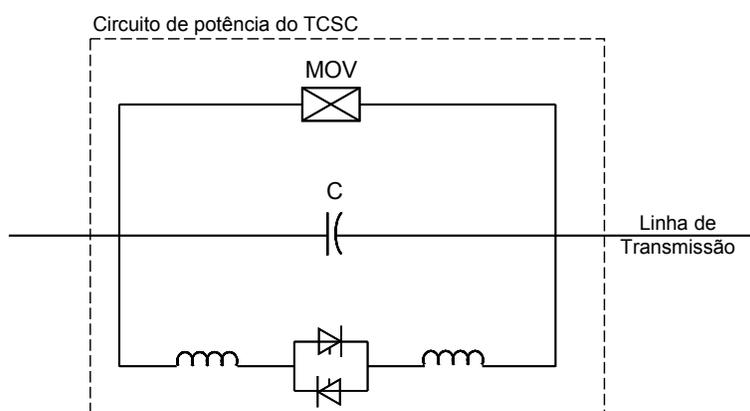


Figura B1 TCSC operando como limitador de curto

Quando o tiristor está conduzindo corrente, o banco de capacitores é *by-passado* pelo reator controlado por tiristor. Assim, a impedância do TCSC muda em curto espaço de tempo de capacitiva para indutiva aumentando a impedância do sistema e fazendo com que, desta forma, o TCSC atue como limitador de curto.

Segundo [18], para operar como limitador de corrente de falta, o TCSC deve ser dimensionado para resistir à corrente de curto-circuito e apresentar uma impedância indutiva alta. Como consequência, é necessário mudar algumas características do TCSC, como a frequência natural de ressonância do circuito LC e valores nominais dos componentes do equipamento em questão.

O custo desta tecnologia ainda é alto, inviabilizando a sua instalação para uso como limitador de corrente de curto-circuito apenas, a menos que traga outros benefícios para o

sistema como por exemplo o controle de fluxo de potência, o aumento na capacidade de transmissão ou o amortecimento de oscilações eletromecânicas e subsíncronas nos sistemas elétricos provocando o melhoramento da estabilidade dinâmica e transitória.

- TPSC (*Thyristor Protected Series Compensation*)

O TPSC é outra tecnologia baseada em FACTS em desenvolvimento que pode ser utilizada como dispositivo limitador de corrente de falta. Para isso, o TPSC deve ser instalado em série com um reator, cuja impedância deve ser especificada de acordo com o nível de curto-circuito permitido. Desta forma, o dispositivo opera com impedância zero em regime permanente (circuito LC série ressonante) e, no momento do curto, o capacitor é chaveado (*by-passado*), aumentando a impedância equivalente do sistema e limitando o curto-circuito. A Figura B2 ilustra o caso em questão.

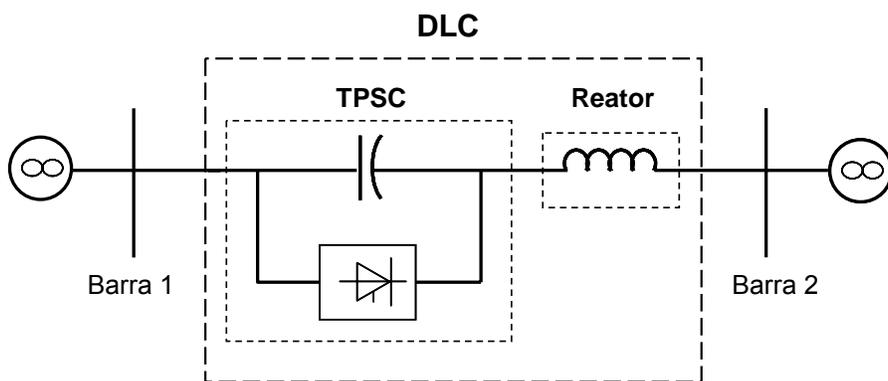


Figura B2 TPSC utilizado como DLC

Como a impedância equivalente só é notada no momento do curto, não há o consumo de energia em regime permanente, logo, a instalação desses dispositivos não causa impacto na operação normal do sistema. Entre as características do TPSC usado como limitador de curto, estão:

- Alta velocidade de limitação de corrente devido ao uso de tiristores de alta potência;

- Sua presença não modifica os esquemas de proteção existentes;
- Não produz impacto na estabilidade do sistema nem na operação em regime permanente;
- Projetado para suportar contingências múltiplas;
- A limitação da corrente é feita por um reator convencional, logo, não há risco de falha por não atuação do equipamento.

### **DLC Supercondutor**

Os dispositivos limitadores de curto-circuito baseados em supercondutores oferecem uma forma de contornar as restrições do sistema porque apresentam uma impedância que varia dependendo das condições de operação da rede. Normalmente, estes equipamentos apresentam impedância desprezível durante a operação normal do sistema e alta impedância no momento da falta devido à mudança do seu estado de supercondutividade para o de condutividade normal tornando possível, desta forma, a limitação passiva da corrente de curto-circuito. Com esses dispositivos é possível, portanto, uma combinação sempre desejada que é a de se ter uma rede com baixa impedância em regime permanente e com baixas correntes de curto-circuito nas condições de falta.

Essencialmente, existem dois conceitos de DLC supercondutores, denominados resistivo e indutivo. O DLC supercondutor resistivo é conectado diretamente em série com o circuito a ser protegido. Seu princípio de funcionamento se dá de forma que, quando ocorre um aumento na intensidade da corrente elétrica devido a um curto-circuito, o material supercondutor existente na parte interna do fio transita do estado supercondutor, em que possui resistência praticamente nula, para o estado normal de condução em um espaço de tempo da ordem de 1ms. Quando ocorre esta transição, a corrente elétrica passa a ser conduzida pela matriz metálica de alta resistividade que reveste o fio supercondutor, o que equivale a introduzir uma resistência elétrica em série no sistema, aumentando sua impedância e limitando a corrente elétrica a um valor pré-determinado [2].

O DLC supercondutor indutivo pode ser modelado como um transformador. O primário é o enrolamento de condutividade normal e é inserido em série com o circuito a ser protegido. Consiste em vários enrolamentos de forma análoga a um enrolamento

convencional. O secundário é o enrolamento supercondutor. Consiste, na maioria das vezes, num único enrolamento, que é invólucro cilíndrico. A impedância do dispositivo em regime permanente é perto de zero, já que a impedância nula do secundário é refletida para o primário. Na ocorrência de curto-circuito, um aumento na intensidade da corrente que passa pelo circuito induz uma alta corrente no secundário. Desta forma, este enrolamento perde seu estado de supercondutividade, resultando em uma impedância elevada que é refletida para o primário, limitando assim a corrente de falta.

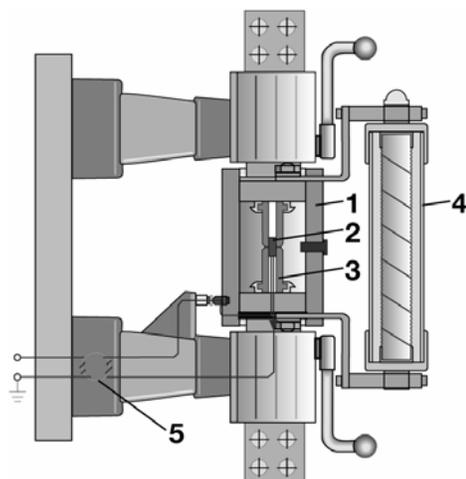
Comparando os dois tipos de dispositivos baseados em supercondutores, nota-se que o tipo indutivo apresenta a desvantagem de ser aplicado apenas para correntes CA e ter maiores tamanho e peso. Por outro lado, o mesmo não necessita de conduzir corrente, o que o torna bastante apropriado para aplicações em redes onde a circulação de corrente é alta, já que o valor das perdas é proporcional a esta corrente [22].

Embora a pesquisa sobre o uso de limitadores de curto-circuito baseado em materiais supercondutores tenha tido significativos progressos nos últimos anos, eles ainda não são comercialmente viáveis para aplicação em sistemas de transmissão em alta tensão. Pesquisas ainda estão sendo feitas para tornarem estes dispositivos tecnicamente eficientes e economicamente atrativos.

## **DLC Pirotécnico**

Os dispositivos pirotécnicos se caracterizam por limitar consideravelmente a corrente de curto-circuito no início de seu estabelecimento, de tal forma que o seu máximo valor assimétrico fique bastante reduzido. Têm sido utilizados com sucesso em sistemas com tensão nominal até 40kV, podendo ser instalados nas interligações de redes, nos vãos de geradores e na conexão de barramentos, a fim de eliminar a contribuição de novas fontes que acarretariam o aumento dos níveis de curto-circuito em instalações existentes.

Basicamente, o DLC pirotécnico consiste de um condutor principal projetado para conduzir uma corrente nominal de valor elevado, porém com baixa capacidade de interrupção, e um fusível em paralelo com alta capacidade de ruptura. A Figura B3 apresenta um desenho esquemático do dispositivo pirotécnico.



- 1 – tubo isolante
- 2 – carga explosiva para a interrupção da corrente de falta
- 3 – condutor principal
- 4 – fusível
- 5 – transformador de pulso

Figura B3 Desenho esquemático do DLC pirotécnico da ABB [5]

De forma a conseguir um baixíssimo tempo de interrupção, é instalada no condutor principal uma pequena carga explosiva com energia suficiente para interromper o fluxo de corrente que passa por este condutor.

Quando o condutor principal é aberto, a corrente continua fluindo pelo fusível paralelo, sendo limitada dentro de 0,5ms e então finalmente interrompida na próxima passagem por zero.

A corrente que flui pelo DLC pirotécnico é permanentemente monitorada por um dispositivo eletrônico de medição e atuação, o qual avalia o valor instantâneo e a taxa de crescimento da corrente e compara com os valores ajustados, de maneira que ocorra a atuação, se ambos limites forem atingidos, durante a primeira subida da corrente de curto-circuito. As três fases possuem monitoramento e atuação independentes uma da outra.

Após a interrupção do defeito, o DLC pirotécnico é então desconectado por um disjuntor em série para permitir a substituição das partes internas (carga explosiva e fusível). Durante este período, há a perda de suprimento às cargas afetadas ou a separação da rede quando o dispositivo é localizado, por exemplo, em interligações de barramentos de subestações.

É importante ressaltar que o dispositivo pirotécnico não elimina a necessidade de se ter equipamentos de manobra convencionais dos circuitos como por exemplo os disjuntores

e chaves seccionadoras já que o mesmo atua quando o disjuntor já está superado. Correntes de curto pequenas continuam sendo interrompidas pelo disjuntor.

### **Elos de Corrente Contínua**

Quando ocorre a interligação de grandes e complexos sistemas de corrente alternada, o nível de curto-circuito aumenta consideravelmente. Uma alternativa para evitar este problema é a interligação em corrente contínua visto que, desta forma, não haverá contribuição de corrente de curto-circuito de um sistema para o outro.

### **Disjuntores Eletrônicos de Abertura Rápida**

Estes dispositivos possuem tempo de abertura menor do que os disjuntores convencionais. Sendo assim, para funcionar como dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito, basta que os disjuntores eletrônicos de abertura rápida atuem antes dos disjuntores superados fazendo com que os disjuntores superados atuem apenas quando o nível de curto-circuito do sistema estiver mais baixo.

### ***IPC – Interphase Power Controllers***

Os IPCs são equipamentos desenvolvidos com o propósito de controlar o fluxo de potência ativa e reativa em interligações em CA, podendo ser aplicados na solução de alguns problemas de operação em regime permanente da rede, tais como: interligações de redes sem modificação dos níveis de curto-circuito, aumento da transferência de potência de instalações dotadas de transformador defasador e como dispositivos limitadores de corrente de defeito [1].

Conforme Figura B4, os dispositivos são formados por susceptâncias indutivas e capacitivas ligadas em série com elementos defasadores que podem ser transformadores.

Utilizando equipamentos convencionais (reatores de núcleo de ar, capacitores e transformadores defasadores) com um conceito original para o controle de potência ativa e reativa, os IPCs limitam sua própria contribuição para as correntes de falta, desacoplando

as tensões entre seus terminais. Podem ser também utilizados em série em uma linha de transmissão que faz a interligação de redes, controlando o fluxo de carga em tempo real (com possibilidade de inversão do fluxo) e evitando problemas de superação das subestações terminais por curto-circuito.

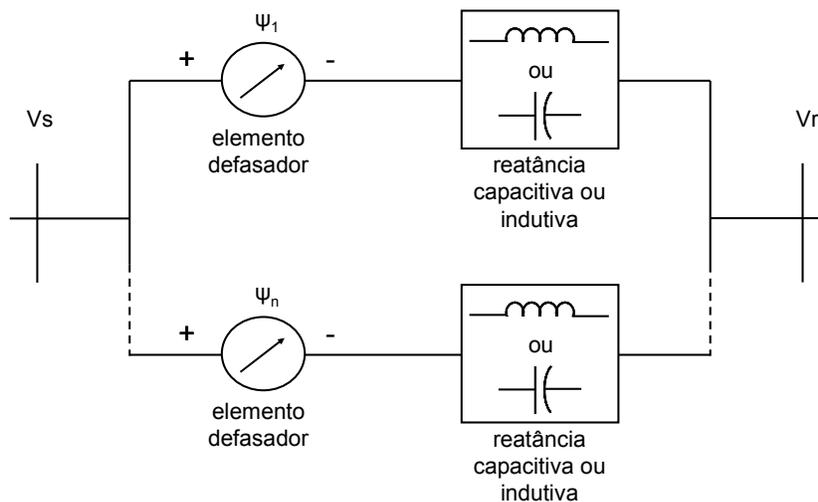


Figura B4 Diagrama esquemático de um IPC com n ramos [12]

# Apêndice C

## Gráficos de Convergência do AG

Os gráficos de convergência do AG para todos os testes feitos estão mostrados nas Figuras C1 a C10.

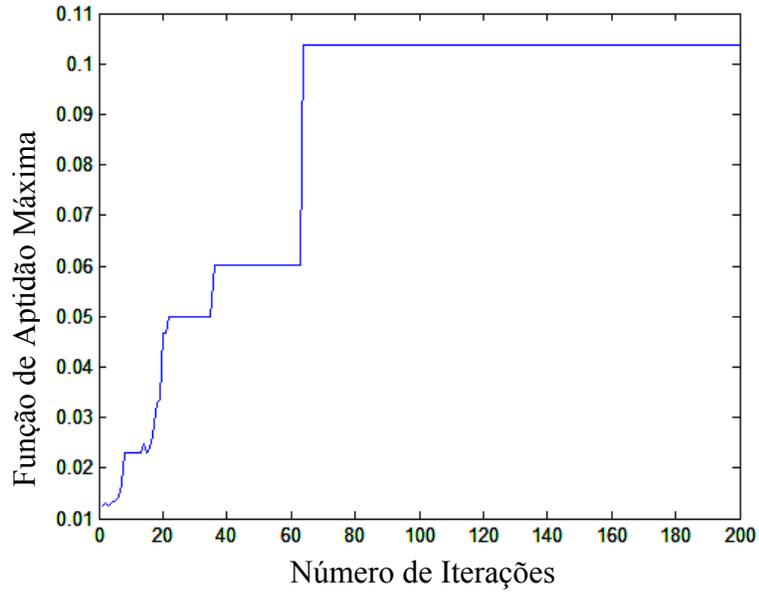


Figura C1 Teste 1 - Gráfico de convergência do AG

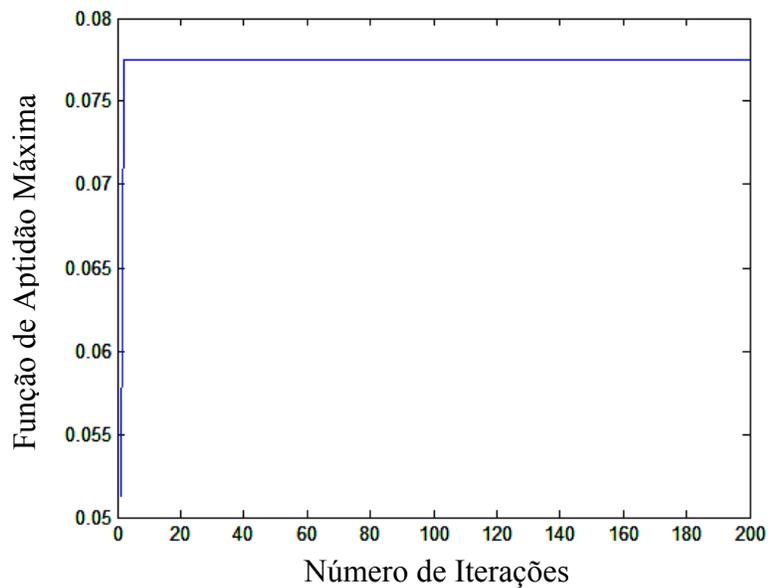


Figura C2 Teste 2 - Gráfico de convergência do AG

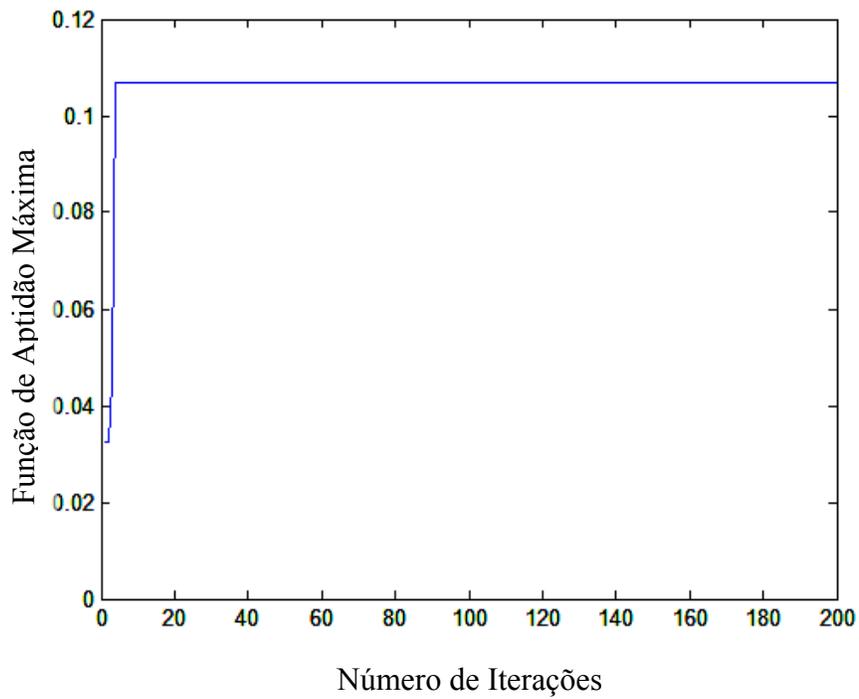


Figura C3 Teste 3 - Gráfico de convergência do AG

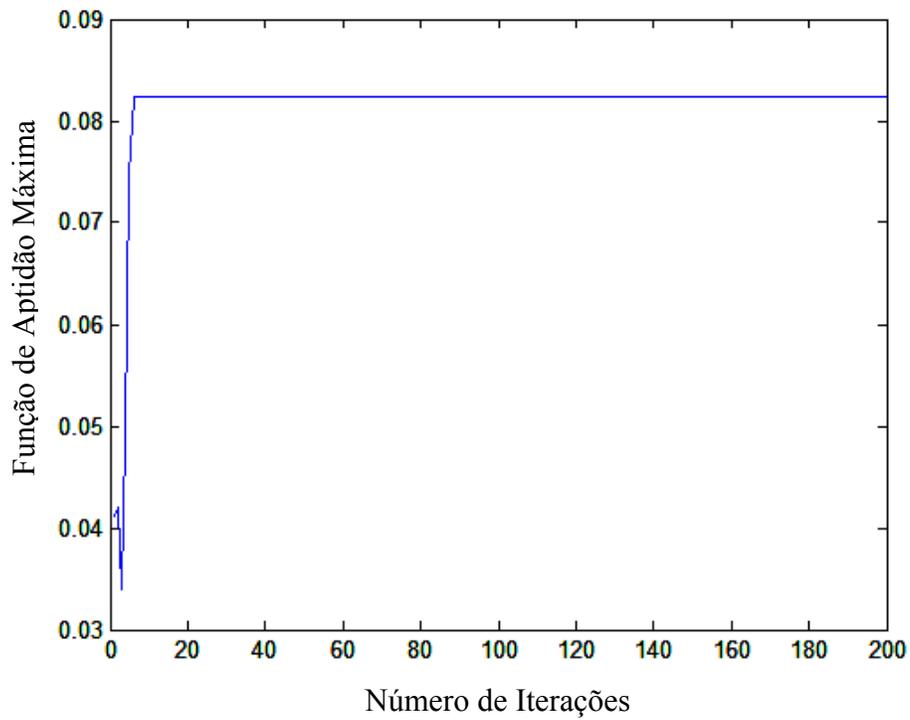


Figura C4 Teste 4 - Gráfico de convergência do AG

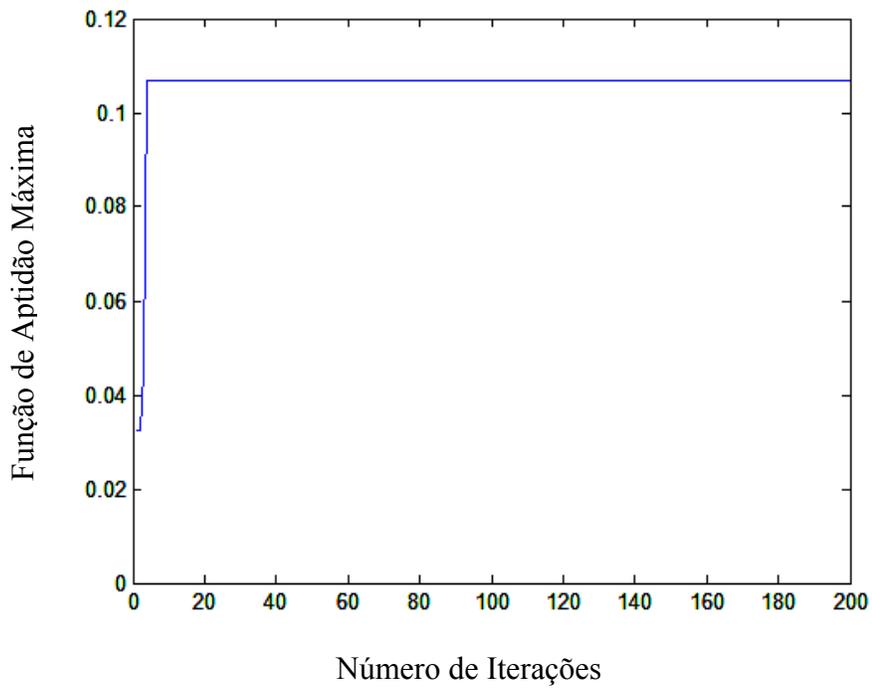


Figura C5 Teste 5 - Gráfico de convergência do AG

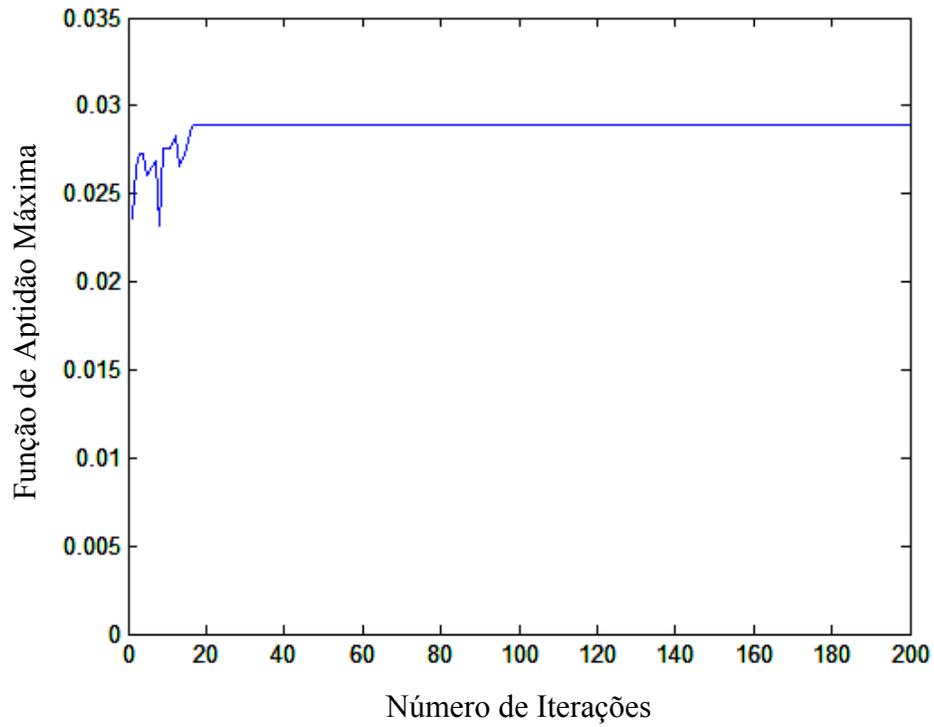


Figura C6 Teste 6 - Convergência do AG

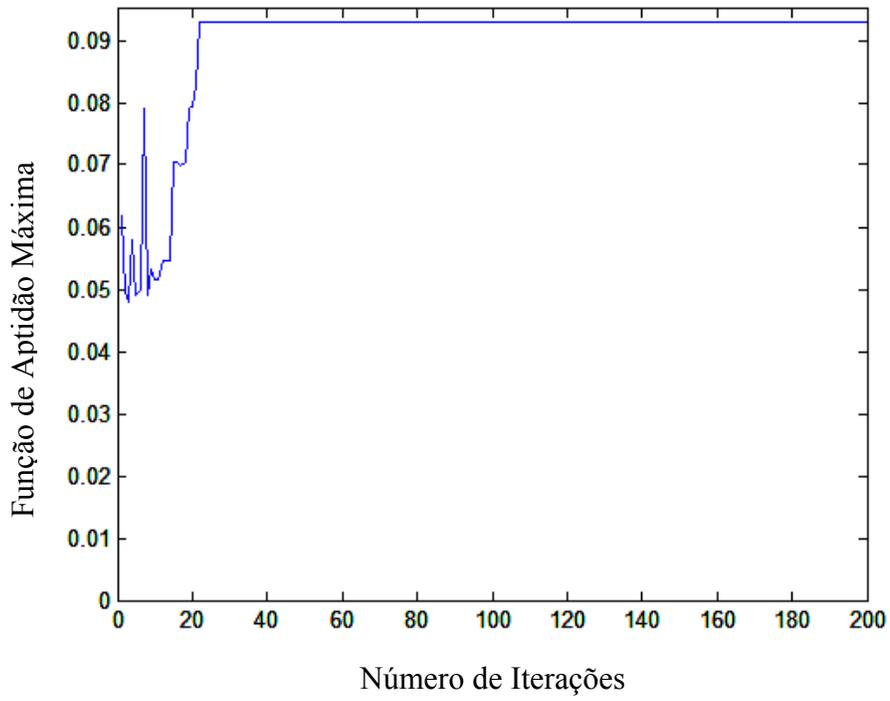


Figura C7 Teste 7 - Convergência do AG

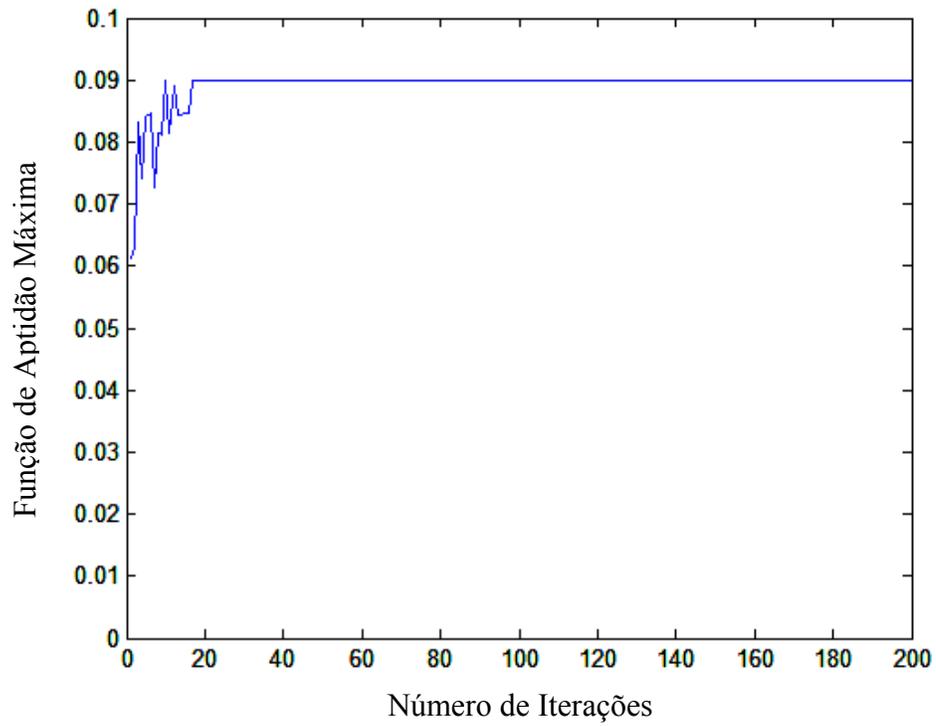


Figura C8 Teste 8 - Convergência do AG

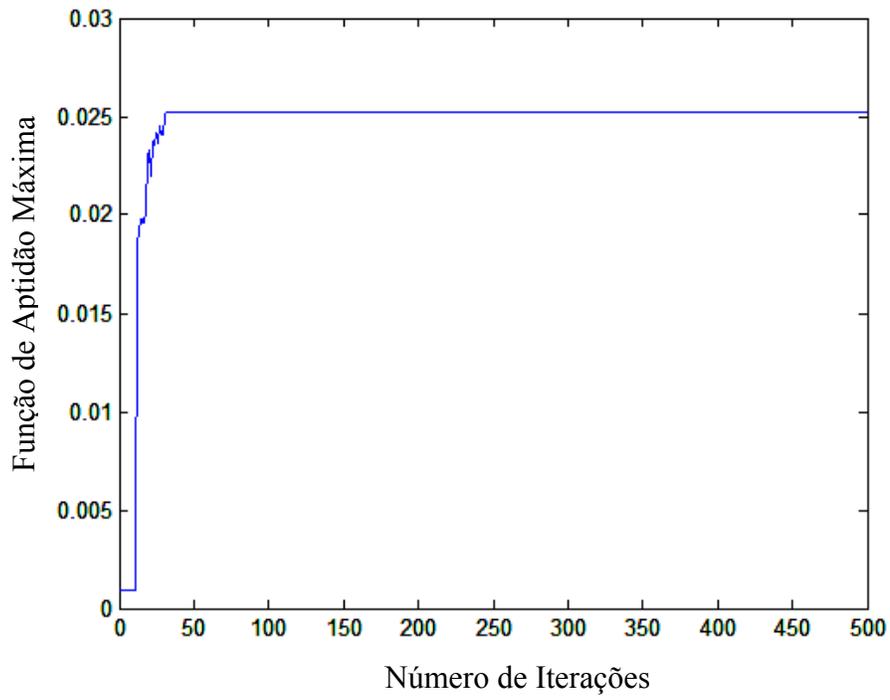


Figura C9 Teste r1 - Gráfico de convergência do AG

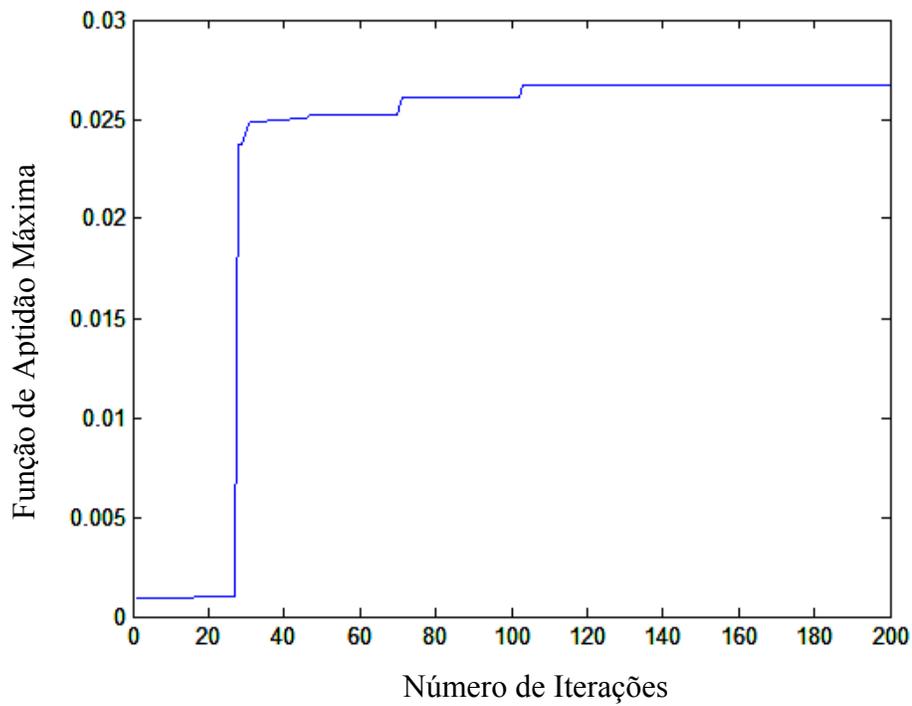


Figura C10 Teste r2 - Convergência do AG