

Felix Estevam de Jesus Brito

**Seleção e Alocação de Dispositivos Limitadores
de Corrente de Curto-Circuito utilizando o
algoritmo evolucionário multiobjetivo NSGA-II**

Brasil

16/02/2016

Felix Estevam de Jesus Brito

**Seleção e Alocação de Dispositivos Limitadores de
Corrente de Curto-Circuito utilizando o algoritmo
evolucionário multiobjetivo NSGA-II**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica - PROEE, da Universidade Federal de Sergipe, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Universidade Federal de Sergipe - UFS

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PROEE

Orientador: Professora Dra. Andrea Araújo Sousa

Brasil

16/02/2016



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

TERMO DE APROVAÇÃO

“Seleção e Alocação de Dispositivos Limitadores de Corrente de Curto-Circuito utilizando o algoritmo evolucionário multiobjetivo NSGA-II”

Discente:

Felix Estevam de Jesus Brito

Orientador:

Prof. Dr. Andrea Araújo Sousa

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PROEE, da Universidade Federal de Sergipe, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada pela banca examinadora composta por:

Prof. Dr. Carlos Alberto Villacorta Cardoso (PROEE/UFS)

Presidente

Prof. Dr. Ângelo Marcio Formiga de Almeida (DEL/UFS)

Examinador Interno

Prof. Dr. Rômulo Alves de Oliveira (IFS)

Examinador Externo

Cidade Universitária “Prof. José Aloísio de Campos”, 16 de fevereiro de 2016.

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

Brito, Felix Estevam de Jesus
B862s Seleção e alocação de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito utilizando o algoritmo evolucionário multiobjetivo NSGA-II / Felix Estevam de Jesus Brito ; orientador Andrea Araújo Sousa. – São Cristóvão, 2016.
142 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Sergipe, 2016.

1. Sistemas de energia elétrica - proteção. 2. Sistemas de energia elétrica - otimização. 3. Curtos-circuitos. 4. Algoritmos genéticos. 5. Disjuntores elétricos. I. Sousa, Andrea Araújo. II. Título.

CDU 621.316.721

Este trabalho é dedicado à Tata e a nossas avós Olga e Branca.

Agradecimentos

A Deus, pela infinita misericórdia e por cuidar de mim e de minha família.

Aos meus pais e meu irmão, por todo carinho e amor.

A minha orientadora, Professora Dra. Andréa Araújo Sousa, pela orientação, pela instrução e pela confiança.

Aos professores do PROEE e do Departamento de Engenharia Elétrica da UFS pelos ensinamentos.

Ao pessoal da secretaria do DEL e do PROEE, de modo especial Mayane, Hevilly, Ricardo, Artur e Dona Carminha.

A todos os amigos do mestrado e da graduação, em especial, aos do meu grupo de estudo: Felipe Santana e Roberto Menezes, pela amizade e por toda ajuda fornecida na elaboração deste trabalho.

Aos meus amigos e colegas externos à UFS, pelo incentivo e apoio na vida.

Aos meus amigos/irmãos Eduardo Góis e Maycon Barnabé, obrigado por estarem sempre por perto e pela confiança de sempre.

Aos meus alunos (UFS - IFS - Externos), pela compreensão, apoio e companheirismo. Obrigado a todos, de modo especial Rafaela Fiel, Gabriela Guimarães, Guilherme Monteiro, Renato Silva e Eduardo Alves.

Agradecimento Especial:

A Cláudia Santana e família, pelo amor, compreensão e ajuda nessa caminhada.

Bem-aventurados os que têm um coração de pobre, porque deles é o Reino dos céus!
Bem-aventurados os que choram, porque serão consolados!
Bem-aventurados os mansos, porque possuirão a terra!
Bem-aventurados os que têm fome e sede de justiça, porque serão saciados!
Bem-aventurados os misericordiosos, porque alcançarão misericórdia!
Bem-aventurados os puros de coração, porque verão Deus!
Bem-aventurados os pacíficos, porque serão chamados filhos de Deus!
Bem-aventurados os que são perseguidos por causa da justiça, porque deles é o Reino dos céus!
Bem-aventurados sereis quando vos caluniarem, quando vos perseguirem e disserem falsamente todo o mal contra vós por causa de mim.
Alegrai-vos e exultai, porque será grande a vossa recompensa nos céus, pois assim perseguiram os profetas que vieram antes de vós.
(Bíblia Sagrada, Mateus 5, 3-12)

Resumo

A condição de funcionamento dos sistemas elétricos de transmissão é um fator que demanda muita preocupação por parte dos fornecedores e usuários de energia. Manter condições adequadas para a operação do sistema é importante em todos os aspectos. Para este fim, vários equipamentos são utilizados, dispositivos elétricos de monitoramento e proteção, por exemplo. Entre eles, estão os dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito. Com este dispositivo é possível limitar a corrente de falta nas barras ou linhas do sistema elétrico. Neste trabalho, propõe-se realizar a seleção e alocação de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito em sistemas elétricos de modo a minimizar a corrente de curto-circuito, considerando o custo do dispositivo e o custo devido à perdas técnicas. Para isso, foi utilizado o algoritmo genético multiobjetivo NSGA-II por sua já conhecida eficiência em problemas de otimização em sistemas elétricos. O algoritmo proposto foi aplicado em sistemas teste de 30 e 57 barras e os sistemas foram simulados com e sem a presença dos dispositivos para efeito de comparação e validação dos resultados.

Palavras-chave: Algoritmo genético multiobjetivo; alocação de dispositivos limitadores de corrente; Curto-circuito.

Abstract

The working condition of the electrical transmission systems is a factor that takes a lot of concern among energy suppliers and users. To maintain appropriate conditions for operation of the system is important in all aspects. For this purpose, several devices are used, monitoring and protection electrical devices, for example. These include the fault current limiter, with this device you can limit the fault current in the bus or lines of the electrical system. In this work, it is proposed to accomplish the selection and allocation of fault current limiters devices in electrical systems to minimize the short-circuit current, considering the device cost and the cost due to technical losses. For this, it has been used the multi-objective genetic algorithm NSGA-II for his known efficiency in optimization problems in electrical systems. The proposed algorithm was applied in benchmark systems, a 30-bus and a 57-bus, and the systems were simulated with and without the presence of the devices for comparison and validation of results.

Keywords: Multiobjective genetic algorithm; FCLs allocation; Short circuit.

Lista de ilustrações

Figura 1.1 – Consumo de eletricidade no Brasil (GWh) (1).	32
Figura 2.1 – Atuação de um DLCC. Fonte: (2)	44
Figura 2.2 – RLC atuando como DLCC.	46
Figura 2.3 – RLC instalado seccionando barramentos.	47
Figura 2.4 – RLC instalado em série com as LTs.	47
Figura 2.5 – Configuração mecânica do dispositivo limitador do tipo pirotécnico.	48
Figura 2.6 – Atuação do dispositivo pirotécnico.	49
Figura 2.7 – Operação nominal.	49
Figura 2.8 – Detecção da falta.	49
Figura 2.9 – Acionamento explosivo.	49
Figura 2.10 – Abertura da chave.	49
Figura 2.11 – Atuação do fusível.	49
Figura 2.12 – Extinção da falta.	49
Figura 2.13 – Atuação dos dispositivos Pirotécnico e RLC em paralelo.	50
Figura 2.14 – Diagrama dos dispositivos Pirotécnico e RLC em paralelo.	50
Figura 2.15 – Circuito simplificado do HVDC.	52
Figura 2.16 – Operação monopolar do HVDC.	52
Figura 2.17 – Diagrama típico do IPC.	53
Figura 2.18 – Diagrama do IPC simplificado.	53
Figura 2.19 – Diagrama trifásico simplificado do IPC 240.	53
Figura 2.20 – Diagrama trifásico simplificado do IPC 120.	54
Figura 2.21 – TLCC instalado em um SE.	55
Figura 2.22 – Diagrama simplificado do TLCC.	55
Figura 2.23 – Diagrama básico de funcionamento do TLCC.	56
Figura 2.24 – Diagrama básico TCSC.	58
Figura 2.25 – Diagrama básico TPSC.	59
Figura 2.26 – Supercondutor do tipo resistivo.	60
Figura 3.1 – Corrente de Curto-circuito e componentes simétrica e assimétrica.	64
Figura 3.2 – Curto-circuito Monofásico.	64
Figura 3.3 – Curto-circuito Bifásico entre fases e terra.	64
Figura 3.4 – Curto-circuito Bifásico entre fases.	64
Figura 3.5 – Curto-circuito Trifásico entre fases e terra.	65
Figura 3.6 – Curto-circuito Trifásico entre fases.	65
Figura 3.7 – Diagrama de um sistema BARRA-RAMO de 4 barras.	66
Figura 3.8 – Diagrama unifilar - Fluxo de potência.	70
Figura 3.9 – Circuito equivalente - Fluxo de potência.	72

Figura 4.1 – Algoritmo Genético básico.	79
Figura 5.1 – Dominância entre soluções.	84
Figura 5.2 – Representação gráfica das definições de dominância de Pareto (3).	85
Figura 5.3 – Análise gráfica de espaço de busca não convexo.	87
Figura 5.4 – Análise gráfica de retas suporte	88
Figura 5.5 – Análise gráfica de retas suporte em espaço de busca convexo.	88
Figura 5.6 – Análise gráfica do método da restrição - ε (3).	89
Figura 6.1 – Fluxograma do NSGA-II. (4)	100
Figura 6.2 – Frentes de não-dominância.	101
Figura 6.3 – Distância de agrupamento.	102
Figura 6.4 – Cruzamento uniforme.	104
Figura 6.5 – Mutação por troca de bit.	104
Figura 6.6 – Formação da população de descendentes - NSGA-II . (5)	106
Figura 6.7 – Parte 1 do cromossomo - Sistema 30 barras.	106
Figura 6.8 – Cromossomo completo.	107
Figura 6.9 – Parte 1 do cromossomo - Sistema 57 barras.	107
Figura 6.10–Codificação dos valores de impedância.	108
Figura 7.1 – Curva de Pareto - IEEE 30 Barras.	113
Figura 7.2 – Correntes de Falta Monofásica - IEEE 30 Barras.	115
Figura 7.3 – Correntes de Falta Trifásica - IEEE 30 Barras.	115
Figura 7.4 – Curva de Pareto - IEEE 57 Barras.	118
Figura 7.5 – Correntes de Falta Monofásica - IEEE 57 Barras.	120
Figura 7.6 – Correntes de Falta Trifásica - IEEE 57 Barras.	120
Figura 7.7 – Perfil de Tensão - IEEE 30 Barras.	124
Figura 7.8 – Perfil de Tensão Parcial - IEEE 30 Barras.	124
Figura A.1–Circuito equivalente para curto-circuito trifásico.	141
Figura A.2–Circuito equivalente para curto-circuito monofásico.	142

Lista de tabelas

Tabela 1.1 – Consumo total de eletricidade na industria (GWh).	31
Tabela 1.2 – Consumo de eletricidade no Brasil (GWh).	32
Tabela 1.3 – Quantitativo de ampliações de transformadores.	33
Tabela 1.4 – Quantitativo de ampliações de LT's.	33
Tabela 1.5 – Soluções temporárias.	38
Tabela 1.6 – Soluções permanentes.	39
Tabela 2.1 – Dispositivos Limitadores de Corrente de Curto-Circuito	43
Tabela 7.1 – Custos dos RLCs utilizados [UM $\times 10^3$].	111
Tabela 7.2 – Resultado da análise de sensibilidade.	112
Tabela 7.3 – Melhor solução escolhida - IEEE30	114
Tabela 7.4 – Resumo da melhor solução.	114
Tabela 7.5 – Redução percentual de I_{CC} por barra - Falta Monofásica.	114
Tabela 7.6 – Redução percentual de I_{CC} por barra - Falta Trifásica.	116
Tabela 7.7 – Soluções alternativas - 30 Barras.	116
Tabela 7.8 – Solução escolhida - 3 DLCCs - IEEE30.	117
Tabela 7.9 – Resultado da análise de sensibilidade.	117
Tabela 7.10–Melhor solução escolhida - IEEE57.	119
Tabela 7.11–Resumo da melhor solução.	119
Tabela 7.12–Redução percentual de I_{CC} por barra - Falta Monofásica.	119
Tabela 7.13–Redução percentual de I_{CC} por barra - Falta Trifásica.	121
Tabela 7.14–Soluções alternativas - 57 Barras.	121
Tabela 7.15–Solução escolhida - 3 DLCCs - IEEE57.	122
Tabela 7.16–Perdas de potência ativa nos sistemas - MW.	123
Tabela 7.17–Custo do Acréscimo de Perdas Técnicas [UM].	123
Tabela 7.18–Custo Total [UM] - Preço do DLCC + Custo de Perdas Técnicas.	123

Lista de abreviaturas e siglas

AG	Algoritmo Genético.
DLCC	Dispositivo Limitador de Corrente de Curto-circuito.
EPE	Empresa Pública de Energia.
FACTS	Flexible Alternative Current Transmission Systems.
FO	Função Objetivo.
GD	Geração Distribuída.
GPFC	Grid Power Flow Controller.
HAG	Algoritmo Genético Hierárquico.
HIT	High-Impedance Transformer.
HVDC	High Voltage Direct Current.
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos.
ID	Interligador de Desacoplamento.
IPC	Interphase Power Controllers.
LT	Linha de Transmissão.
micro-AG	Algoritmo micro-Genético.
MOV	Metal Oxide Varistor.
MOGA	Multiobjective Genetic Algorithm.
NR	Newton-Raphson.
NSGA	Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm.
NPGA	Niched Pareto Genetic Algorithm.
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico.
PAR	Plano de Ampliação e Reforços.
PRTC	Dispositivo Pirotécnico.

PST	Phase Shift Transformer.
PST	Phase-Shifting Transformers.
RLC	Reator Limitador de Corrente.
SIN	Sistema Interligado Nacional.
SQP	Sequential Quadratic Programming.
SSFCL	Solid State Fault Current Limiter.
SFCL	Superconducting Fault Current Limiters.
SPEA	Strength Pareto Evolutionary Algorithm.
SLCC	Superconductor Limitador de Corrente de Curto-Circuito.
STATCOM	Static Synchronous Compensator.
SSSC	Static Synchronous Series Compensator.
SVC	Static Var Compensator.
TC	Transformadores de Corrente.
TP	Transformadores de Potencial.
TRT	Tensão de Restabelecimento Transitória.
TLCC	Transformador Limitador de Corrente de Curto-Circuito.
TDA	Transformador Defasador Assistido.
TSSC	Thyristor Series Switched Capacitor.
TSC	Thyristor Switched Capacitor.
TCSC	Thyristor Controlled Series Capacitor.
TCR	Thyristor Controlled Reactor.
TPSC	Thyristor Protected Series Compensation.
UM	Unidade Monetária.
UPFC	Unified Power Flow Controller.
VEGA	Vector Evaluated Genetic Algorithm.

Lista de símbolos

Z_r	Impedância do Reator.
q	Fator de qualidade do reator.
Q_r	Potência nominal do reator.
V_r	Tensão nominal do reator.
X_r	Reatância do reator.
R_r	Resistência do reator.
$I(t)_{AS}$	Corrente assimétrica no tempo t .
$I(t)_S$	Corrente simétrica no tempo t .
$I(t)_C$	Corrente contínua no tempo t .
I_{cc}	Corrente de curto-circuito.
I_{max}	Valor máximo da componente simétrica.
I_0	Valor inicial da componente contínua.
τ	Constante de tempo.
Z'	Impedância de falta entre fases.
I	Vetor de correntes $nx1$.
V	Vetor de tensão de barra $nx1$.
Z_{BARRA}	Matriz impedância de barra nxn .
Y_{BARRA}	Matriz admitância de barra nxn .
Y_{ii}	Somatório das admitâncias conectadas à barra i do sistema.
Z_{ii}	Somatório das impedâncias conectadas à barra i do sistema.
Y_{ij}	Admitância que conecta a barra i a barra j do sistema.
Z_{ij}	Impedância que conecta a barra i a barra j do sistema.
I_i	Componente i do vetor de correntes I $nx1$.

V_i	Componente i do vetor de tensões V $n \times 1$.
I_a, I_b e I_c	Componentes simétricas da corrente.
$\alpha = 1 \angle 120^\circ$	
$I^f(1)_j$	Corrente de falta na barra j .
V_j^{pf}	Tensão de pré-falta na barra j .
$Z_{jj(i)}$	Elemento jj da matriz $Z_{BARRA(i)}$.
$V^f(1)_j$	Tensão de falta na barra jj .
$I^f(1)_{Aj}$	Componente de sequência positiva na barra j , referente a fase A.
$I^f(2)_{Aj}$	Componente de sequência negativa na barra j , referente a fase A.
$I^f(0)_{Aj}$	Componente de sequência zero na barra j , referente a fase A.
S_{gi}	Potência aparente gerada na barra i .
S_{di}	Potência aparente demandada na barra i .
P_{gi}	Potência ativa gerada na barra i .
P_{di}	Potência ativa demandada na barra i .
Q_{gi}	Potência reativa gerada na barra i .
Q_{di}	Potência reativa demandada na barra i .
V_i	Tensão na barra i .
δ_i	Ângulo da tensão da barra i .
J_i	Injeção de corrente na barra i do sistema.
R_{ik}	Resistência entre a barra i a barra k .
X_{ik}	Reatância entre a barra i a barra k .
G_{ik}	Condutância entre a barra i a barra k .
B_{ik}	Susceptância entre a barra i a barra k .
P_i	Potência ativa na barra i .
Q_i	Potência reativa na barra i .
P_{perdas}	Perdas de potência ativa.

Q_{perdas}	Perdas de potência reativa.
$f_i(x)$	Função objetivo i .
w_i	Fator de ponderação da função objetivo i .
P_o	População Inicial.
F_k	Frente de Pareto k .
AP_i	Aptidão da solução i .
r_i	Índice k da frente da Pareto da solução i .
d_i	Distância de aglomeração da solução i .
σ_i^k	Distância de uma solução para seu k -vizinho mais próximo.
CNs	Capacidade de interrupção simétrica.
PU	Por unidade.
Icn_i	Corrente de capacidade nominal do disjuntor.
X_i/R_i	Constante de tempo nos terminais do disjuntor conectado a barra i .
ΔI_{cc}^l	Vetor relação de sensibilidade das correntes de falta em cada barra.
$\Delta I_{cc(l)}$	Variação da corrente de curto circuito na barra l , sendo l^* .
$I_{cc(l)}$	Corrente de falta na barra l , antes da alocação da impedância de $1pu$.
$I_{cc(l)}^D$	Corrente de falta na barra l , depois da alocação da impedância de $1pu$.
S_i	Vetor em ordem crescente de sensibilidade dos locais mais sensíveis a redução de I_{cc} .
$s_i(1)$	Local mais sensível do sistema a redução de corrente de falta.
$s_i(l^*)$	Local menos sensível do sistema a redução de corrente de falta.
dag_i	Distância de agrupamento do indivíduo i .
f_1	Nível de curto-circuito no sistema.
f_2	Custo total da instalação do(s) dispositivo(s).
f_{21}	Custo do dispositivo.
f_{22}	Custo das perdas técnicas.
f_{23}	Custo por violação dos limites de tensão.

Lista de Algoritmos

1	Algoritmo de Parametrização do IPC.	55
2	Cálculo Matricial de Curto-Circuito.	67
3	Algoritmo Proposto.	109

Sumário

I	PREPARAÇÃO DA PESQUISA	29
1	INTRODUÇÃO	31
1.1	Revisão Bibliográfica	34
1.2	Objetivo	37
1.2.1	Objetivos Específicos	37
1.3	Organização do Trabalho	37
1.4	Propostas Temporárias e Permanentes para Limitação de Corrente de Falta	38
1.4.1	Soluções Temporárias	38
1.4.2	Soluções Permanentes	38
II	REFERENCIAIS TEÓRICOS	41
2	DISPOSITIVOS LIMITADORES DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO	43
2.1	Limitação ou Interrupção de Corrente de Falta via DLCC	43
2.2	Características desejáveis e indesejáveis em DLCCs	45
2.3	RLC - Reator com Núcleo a Ar	46
2.4	PRTC - Dispositivo Pirotécnico	48
2.5	HVDC - Conversores de Fonte de Corrente	51
2.6	IPC - Interphase Power Controllers	52
2.7	FACTS - Flexible AC Transmission System	56
2.8	Dispositivos Supercondutores	59
2.9	Chaves Eletrônicas	60
2.10	Considerações Finais do Capítulo	61
3	TEORIA BÁSICA DE CURTO-CIRCUITO E FLUXO DE POTÊNCIA	63
3.1	Cálculo de Curto-Circuito utilizando a Matriz Z_{BARRA}	66
3.2	Cálculo Matricial de Curto-Circuito Trifásico	68
3.3	Cálculo Matricial de Curto-Circuito Monofásico-Terra	69
3.4	Fluxo de Potência	69
3.4.1	Fluxo de Potência Generalizado	73
3.4.2	Cálculo de Perdas de Potência Ativa e Reativa	74
3.4.3	Método de NR aplicado ao Problema de Fluxo de Potência	74
3.5	Considerações Finais do Capítulo	76
4	ALGORITMOS GENÉTICOS	77

4.1	Heurística e Metaheurística	77
4.2	Algoritmos Genéticos	77
4.2.1	Codificação - Representação Cromossomial	79
4.2.2	População Inicial	79
4.2.3	Função de Avaliação ou Função Aptidão	80
4.2.4	Operador Elitismo	80
4.2.5	Operador Seleção dos Pais	81
4.2.6	Operador Cruzamento	81
4.2.7	Operador Mutação	82
4.3	Considerações Finais do Capítulo	82
5	OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO	83
5.1	Dominância de Pareto	83
5.2	Classificação dos Métodos de Otimização Multiobjetivo	85
5.3	Métodos Clássicos de Otimização Multiobjetivo	86
5.3.1	Método da Soma Ponderada.	86
5.3.2	Método da Restrição - ϵ	89
5.4	Algoritmos Genéticos Multiobjetivo	90
5.5	Considerações Finais do Capítulo	94
III	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E RESULTADOS	95
6	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	97
6.1	Análise Preliminar do Sistema	98
6.2	Algoritmo Genético NSGA II	99
6.2.1	População Inicial	100
6.2.2	Função Objetivo	101
6.2.3	Seleção dos Pais com base na Distância de Aglomeração	103
6.2.4	Cruzamento	104
6.2.5	Mutação	104
6.2.6	Formação da População de Descendentes	105
6.2.7	Codificação	106
6.2.8	Codificação do cromossomo para o sistema de 30 barras.	106
6.2.9	Codificação do cromossomo para o sistema de 57 barras.	107
6.2.10	Recontagem	107
6.2.11	Codificação dos DLCCs	108
6.3	Algoritmo Proposto	108
6.4	Considerações Finais do Capítulo	109
7	ANÁLISE DE RESULTADOS	111

7.1	Sistemas Elétricos de Teste	111
7.2	Resultados com IEEE 30 Barras	112
7.3	Resultados com IEEE 57 Barras	117
7.4	Análise dos Resultados	122
7.5	Considerações Finais	125
IV	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	127
8	CONCLUSÕES	129
8.1	Perspectivas de Trabalhos Futuros	130
	REFERÊNCIAS	131
	ANEXOS	139
	ANEXO A – REDES DE SEQUÊNCIA	141

Parte I

Preparação da Pesquisa

1 Introdução

A conservação dos elementos do sistema elétrico é fundamental para o seu bom funcionamento. Garantir que os equipamentos estejam operando em condições satisfatórias é uma das grandes preocupações, principalmente no momento atual, pois o sistema elétrico brasileiro está atuando em situações extremas constantemente, forçado a trabalhar em níveis máximos de operação ou próximo dessa condição. Para esse fim, diversos equipamentos são utilizados, desde instrumentos de ensaio até dispositivos instalados no sistema de forma permanente ou temporária.

O crescimento do sistema elétrico devido a construção de novas unidades consumidoras, centros habitacionais como municípios e cidades, além de grandes parques industriais, aumenta significativamente a quantidade de potência fornecida ao sistema. Por consequência tem-se o aumento da corrente transferida da fonte às cargas.

A EPE - Empresa de Pesquisa Energética, empresa pública vinculada ao Ministério de Minas e Energia, publicou a pesquisa (1) em Fevereiro de 2015 sobre a projeção da demanda de energia elétrica no Brasil nos próximos 10 anos (horizonte decenal: (2014-2024). Nesse estudo é possível verificar a projeção do crescimento do consumo de energia elétrica dos subsistemas e das classes consumidoras.

Na tabela 1.1 verifica-se a projeção do consumo dos grandes consumidores industriais por subsistema (1).

Tabela 1.1 – Consumo total de eletricidade na industria (GWh).

Subsistema	2014	2019	2024	2014-2024 ($\Delta\%$ ao ano)
Norte	16.301	21.117	22.075	3.1
Nordeste	15.745	18.953	21.006	2.9
Sudeste/Centro-Oeste	49.757	60.682	67.074	3.0
Sul	9.891	13.803	16.817	5.5
SIN	91.693	114.554	126.971	3.3
Sistemas Isolados	120	136	163	3.1
Brasil	91.813	114.690	127.134	3.3

É possível verificar que ocorrerá um crescimento significativo no consumo dos subsistemas que compõe o SIN - Sistema Interligado Nacional. Segundo a projeção, as regiões Sul e Norte estão crescendo com um ritmo mais acelerado, tendo em vista o $\Delta\%$ ao ano das demais regiões.

As regiões Sudeste e Centro-Oeste ainda são as maiores consumidoras de energia no país devido à grande quantidade de parques industriais e conjuntos habitacionais instalados

nessas localidades. Na pesquisa observa-se que dois fatores que contribuem com maior relevância para o acréscimo de carga nas regiões Norte e Nordeste, a instalação de novas industriais e a enorme expansão residencial que está ocorrendo nestas regiões.

A EPE também apresenta projeções da demanda de energia elétrica em classes específicas como a Industrial e a Residencial. A projeção do consumo de eletricidade na rede do Brasil pode ser vista na tabela 1.2.

Tabela 1.2 – Consumo de eletricidade no Brasil (GWh).

Ano	Residencial	Industrial	Comercial	Outros	Total
2014	132.049	178.055	89.819	73.472	473.395
2015	138.872	176.971	95.302	76.311	487.456
2016	145.089	179.574	100.621	79.084	504.368
2017	151.391	184.370	106.238	82.134	524.134
2018	157.817	193.359	112.184	85.068	548.427
2019	164.487	200.950	117.954	88.137	571.529
2020	171.341	209.463	123.903	91.467	596.173
2021	178.381	216.202	130.022	94.918	619.523
2022	185.611	222.822	136.304	98.493	643.231
2023	193.029	230.409	142.738	102.194	668.370
2024	200.642	237.287	149.452	106.089	693.469

O perfil gráfico das projeções descritas na tabela 1.2 pode ser visto na figura 1.1.

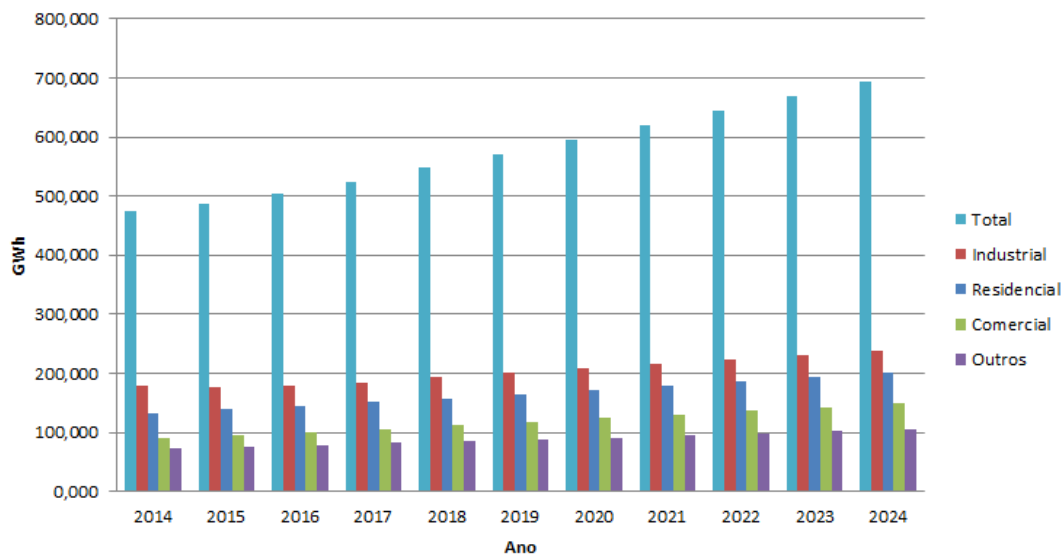


Figura 1.1 – Consumo de eletricidade no Brasil (GWh) (1).

O sistema elétrico atualmente disponível não foi projetado para atender à grande expansão da rede, muitos equipamentos estão submetidos a problemas de superação de

corrente e outros provavelmente serão superados em um tempo relativamente curto.

O ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico, publicou em seu *website* o PAR - Plano de Ampliação e Reforços, que é um documento com o objetivo de apresentar a visão do ONS sobre as ampliações e reforços das instalações de transmissão.

O PAR 2015-2017 pode ser visualizado em (6). No documento, é apresentado o quantitativo de ampliações previstas até o ano de 2018, assim como os acréscimos de linhas de transmissão (LTs) e de capacidade de transformadores. Esses valores correspondem a um acréscimo de 95 LTs e de 179 novas unidades transformadoras, o investimento global estimado é da ordem de 13,8 bilhões de reais. Nas tabelas 1.3 e 1.4 estão descritos os dados fornecidos pelo PAR 2015-2017 (6).

Tabela 1.3 – Quantitativo de ampliações de transformadores.

Tensão Primária [kV]	MVA
765	1650
500/525	26756
440	4050
345	9758
230	14157
TOTAL	56371

Tabela 1.4 – Quantitativo de ampliações de LT's.

Tensão [kV]	km
500/525	5570
440	130
345	521
230	3984
TOTAL	10205

Desta forma, a importância dos estudos sobre dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito é evidenciada, já que redimensionar o sistema, ou instalar novos equipamentos mais robustos, exige investimentos financeiros consideravelmente altos, além de muito tempo para executar todas as mudanças devidas.

Neste trabalho de dissertação, pretende-se elaborar um algoritmo genético para realizar a seleção e a alocação ótima de Dispositivos Limitadores de Corrente de Curto-circuito (DLCCs) em sistemas elétricos com problemas de superação de equipamentos por corrente de falta. O objetivo é selecionar um ou mais dispositivos dentro de uma lista de possibilidades e alocar o(s) DLCC(s) escolhido(s) no sistema para limitar a corrente de falta, levando em consideração a redução da corrente de falta, o custo de instalação e o impacto financeiro provocado por perdas técnicas.

O tipo de curto-circuito avaliado neste trabalho é o monofásico assimétrico, por ser o mais comum, responsável por 70% das ocorrências. É possível verificar a ocorrência dos tipos de curto-circuito em sistemas elétricos de potência no estudo feito por Almeida (7).

Os cálculos de curto-circuito serão realizados com base no conhecimento prévio das tensões de pré-falta em cada barra e da matriz impedância do sistema. Os sistemas avaliados serão o IEEE 30 barras e IEEE 57 barras. A seleção e alocação de forma otimizada será feita por um Algoritmo Evolucionário Multiobjetivo, o NSGA-II, devido à sua robustez e eficácia em problemas de otimização em sistemas elétricos.

A ferramenta utilizada para o desenvolvimento do algoritmo proposto e para os cálculos de curto-circuito foi o MATLAB Starter Application, versão 2013a, informações gerais sobre este software e seu uso foram coletadas em (8) e (9).

1.1 Revisão Bibliográfica

O problema causado por altas correntes de curto-circuito é um assunto bastante discutido, tanto no meio acadêmico como no âmbito das empresas do setor. Vários trabalhos abordando o tema podem ser encontrados na literatura.

Os efeitos causados pela corrente de falta no sistema, as características e tipos de ocorrência podem ser vistos em (10). O problema de limitação da corrente de falta e a descrição do modo como atuam os principais dispositivos é introduzido por Schmitt (2), onde são apresentadas as principais aplicações, vantagens e desvantagens e locais onde podem ser instalados os DLCCs.

Monteiro (11) apresenta uma revisão teórica onde é possível verificar soluções gerais para o problema de limitação de corrente de curto-circuito utilizando DLCCs, com destaque para o IPC – *Interphase Power Controller*.

Arcon (12) mostra em seu estudo as características e princípios de funcionamento do DLCC pirotécnico, avaliando um dispositivo instalado e atuando no sistema.

O conceito dos limitadores de curto-circuito baseados em supercondutores é abordado em (13), (14), (15) e (16). Nesses trabalhos foram realizados estudos sobre limitadores de corrente de curto-circuito com base em materiais supercondutores visando a proteção de sistemas elétricos.

A teoria de curto-circuito e equipamentos de proteção foi objeto de pesquisa deste trabalho, os livros mais relevantes neste tópico são (17), (18), (7), (19) e (20). A superação dos equipamentos por corrente de falta é abordada em (21) e (22), onde são descritas diversas formas de eliminar o problema, como, por exemplo, a instalação de reatores ou DLCCs, objetos de estudo deste trabalho.

Gomes & Teles (23) fez em seu trabalho uma comparação entre Algoritmo Genético

(AG), utilizado como método de otimização paramétrica, com o método de Programação Quadrática Sequencial (*Sequential Quadratic Programming - SQP*), os resultados obtidos foram precisos e os métodos desempenharam suas funções de forma equivalente, concluindo que o AG é adequado para otimização paramétrica de estruturas de engenharia.

O problema de alocação de dispositivos é um problema de otimização combinatória, no qual existe um número finito de equipamentos que deverão ser instalados de forma otimizada em uma ou mais barras do sistema, escolhidas dentro de um número limitado de opções. Nesse contexto, são conhecidos vários resultados obtidos com o uso de algoritmos genéticos na literatura.

Alves em (24) apresenta uma nova formulação para a alocação de interruptores e seccionadoras em sistemas de distribuição, considerando a confiabilidade e custos de investimentos. A metodologia de solução, com base em lógica fuzzy em conjunto com um algoritmo genético, é proposta para determinar os melhores pontos para instalação dos dispositivos interruptores.

De Almeida apresenta em (25) um algoritmo genético para realizar a alocação e o ajuste de reguladores de tensão em sistemas de distribuição. Em (26) é apresentada uma estratégia híbrida, combinado AG e lógica fuzzy para alocação integrada de bancos de capacitores e reguladores de tensão.

O problema de alocação ótima de equipamentos FACTS (*Flexible Alternative Current Transmission Systems*) usando algoritmos genéticos em sistemas de transmissão e distribuição já vêm sendo resolvido há alguns anos e encontram-se excelentes resultados na literatura (27), (28), (29) e (30).

O problema de alocação e otimização de DLCCs é apresentado por Ferreira (31). No trabalho, é apresentado um algoritmo genético para realizar alocação do reator limitador de corrente (RLC), considerando a corrente de curto-circuito e o custo de instalação do RLC.

Shahriari (32) estuda as falhas de limitadores de corrente a estado sólido, do inglês *Solid State Fault Current Limiter* (SSFCLs), utilizando um AG para procurar o número ideal, locais e valores do SSFCL com objetivo de minimizar os custos do sistema de proteção de redes de distribuição. Outro trabalho de Shahriari (33) avalia por meio de um AG potenciais candidatos (SSFCLs) buscando minimizar o custo da Geração Distribuída (GD) para o sistema de distribuição. O AG proposto é empregado para encontrar o número ótimo de localização e os dispositivos a serem utilizados na rede.

Konsan (34) propõe um Algoritmo Genético Hierárquico (HAG), combinado com um algoritmo micro-genético (micro-AG) para alocação e ajuste do DLCC do tipo *Superconducting Fault Current Limiters* (SFCL), com objetivo de minimizar a corrente de curto com o menor número possível de SFCLs alocados, mantendo o funcionamento em regime

permanente dentro dos limites estabelecidos.

Ye (35) estuda dois tipos de limitadores de corrente, *Current-Limiting Reactor* (CLR) e *High-Impedance Transformer* (HIT), e propõe um algoritmo genético multi-objetivo para seleção e alocação de limitadores de corrente considerando o investimento dos dispositivos e o nível de corrente de curto-circuito, bem como a estabilidade transitória do sistema.

Teng (36) apresenta um algoritmo genético para seleção, alocação e ajuste de DLCCs. Os dispositivos são selecionados a partir da análise da redução da corrente de falha da rede e do funcionamento do sistema em regime permanente.

O algoritmo aplicado nesta pesquisa é classificado como multiobjetivo. Algoritmos desta categoria são muito utilizados em processos de otimização em sistemas elétricos, além de aplicações em outros campos da ciência como a economia. Estão disponíveis na literatura diversos trabalhos utilizando algoritmos multiobjetivos, os que ganham destaque são o SPEA e o NSGA.

Na literatura é possível encontrar artigos sobre os principais algoritmos multiobjetivo. A publicação que mais se destaca é o artigo escrito por Zitzler (37). Nesse trabalho, o autor realizou uma comparação do desempenho dos algoritmos evolucionários disponíveis na época, demonstrando a robustez e eficácia do processo de minimização ou maximização.

Zitzler em (38) desenvolveu uma pesquisa focada no algoritmo multiobjetivo SPEA2, nesse trabalho é possível conhecer detalhes sobre o modo de funcionamento do algoritmo, suas etapas e possibilidades de aplicação.

O algoritmo multiobjetivo aplicado neste trabalho foi o NSGA-II, os principais conceitos e aplicações sobre o NSGA-II podem ser encontrados em (39). Nesses trabalhos são apresentados os conceitos mais importantes sobre a metodologia de busca utilizada pelo NSGA-II, assim como aplicações bem sucedidas, que demonstram a eficácia e robustez do algoritmo.

Avaliando os trabalhos publicados na literatura é possível notar que a utilização de algoritmos multiobjetivos em problemas de otimização é significativa. Contudo, não foram encontrados trabalhos que utilizaram algoritmos multiobjetivos para resolver o problema discutido nesta pesquisa. Os trabalhos citados nesta revisão bibliográfica sobre este tema utilizam algoritmos genéticos básicos e mono-objetivos ponderados, em que as soluções não desejadas recebem uma penalização em relação às soluções desejáveis.

A aplicação do NSGA-II para seleção e alocação de dispositivos limitadores de corrente de falta é um dos diferenciais desta pesquisa. Aplicar um algoritmo verdadeiramente multiobjetivo possibilita analisar todo o espaço de busca e obter resultados mais confiáveis, diferente dos algoritmos mono-objetivo, que limitam o espaço de busca ponderando as parcelas da função-objetivo.

1.2 Objetivo

O objetivo principal deste trabalho é aplicar um algoritmo evolucionário multibjetivo, o NSGA-II, capaz de otimizar a seleção e alocação de DLCCs, a fim de reduzir a corrente de falta no sistema elétrico.

1.2.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- Estudar os dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito desenvolvidos, em fase de testes, disponíveis comercialmente e utilizados no sistema elétrico;
- Implementar computacionalmente os algoritmos de cálculo matricial de curto-circuito;
- Desenvolver um algoritmo de otimização para realizar a seleção e alocação dos DLCCs em sistemas de transmissão;
- Testar o programa computacional de seleção e alocação desenvolvido em sistemas-teste, visando comprovar a eficácia do algoritmo de otimização proposto, sobretudo com relação à robustez de convergência;
- Elaborar artigo científico com o conteúdo estudado neste trabalho.

1.3 Organização do Trabalho

Esta dissertação encontra-se organizada em nove capítulos, descritos a seguir:

Capítulo 1 Estão descritos os objetivos do trabalho proposto, a justificativa para a pesquisa e a revisão bibliográfica sobre o tema estudado.

Capítulo 2 Mostra conceitos sobre dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito e faz-se uma revisão sobre o funcionamento e aplicações desses equipamentos.

Capítulo 3 Destinado a apresentação da formulação matemática sobre curto-circuito e fluxo de potência em redes de energia elétrica.

Capítulo 4 Teoria sobre Algoritmos Genéticos.

Capítulo 5 Neste capítulo são descritos conceitos sobre otimização multiobjetivo e são apresentados métodos de otimização multiobjetivo.

Capítulo 6 Expõe a formulação do problema, o algoritmo proposto e o método de solução utilizados nesta dissertação.

Capítulo 7 Discorre sobre os resultados obtidos na implementação do algoritmo proposto e faz-se uma discussão sobre as soluções encontradas.

Capítulo 8 Dedicado a conclusão e as propostas de trabalhos futuros.

1.4 Propostas Temporárias e Permanentes para Limitação de Corrente de Falta

Considerando o aumento da quantidade de equipamentos e instalações citadas no capítulo anterior, faz-se necessário avaliar quais são as melhores soluções para enfrentar o problema de redução dos níveis de corrente de curto-circuito. O tempo que as empresas de energia elétrica dispõem para resolver esse tipo de contingência pode ser relativamente curto, portanto devem escolher entre soluções *temporárias* ou *permanentes*. Estes dois tipos de resolução do problema englobam diferentes alternativas.

1.4.1 Soluções Temporárias

As soluções temporárias consistem em medidas operativas que interferem na configuração do sistema. O objetivo é assegurar que os equipamentos continuem operando até que as medidas definitivas sejam tomadas. O seccionamento de barramento é prática comum usada como solução provisória, contudo esse tipo de atividade deve estar disponível para situações de emergência que demandam pouco tempo, utilizar esse método como solução para redução da corrente de falta faz com que o sistema perca versatilidade para assumir outras configurações no caso de contingências simultâneas, trazendo prejuízo à segurança da instalação.

Monteiro (11) descreve as soluções e as classifica em dois conjuntos: as restrições operativas e as modificações na rede. Na tabela 1.5 estão apresentadas algumas soluções temporárias.

Tabela 1.5 – Soluções temporárias.

Restrições Operativas
Seccionamento de barras
Radialização de circuitos
Desligamentos Sequenciais de LTs
Desligamento de Compensadores Síncronos
By-pass de linhas nas subestações

1.4.2 Soluções Permanentes

Alterações definitivas no sistema são intervenções que demandam tempo e requerem altos custos financeiros, contudo esse tipo de solução é a mais adequada para sistemas complexos e robustos como o SIN brasileiro (40). Como pode ser visto na tabela 1.6,

o redimensionamento do sistema e a inserção de novos equipamentos são opções que modificam a estrutura da rede elétrica. Essas soluções também podem ser permanentes, mas, quando comparadas com a instalação de DLCCs, podem não ser soluções viáveis, principalmente considerando os custos de aquisição e instalação.

Tabela 1.6 – Soluções permanentes.

Modificações na Rede
Alteração do Aterramento de Transformadores
Instalação de Novos Equipamentos
Redimensionamento do Sistema
Instalar Dispositivos Limitadores de Correntes de Curto-circuito

A instalação de DLCCs é mais simples do que o redimensionamento do sistema. Comparando os valores de mercado, instalar dispositivos limitadores muitas vezes é consideravelmente mais barato do que substituir um conjunto de equipamentos ativos ou de proteção. A recapacitação do sistema utilizando a solução de inserção de novos equipamentos também é onerosa e desgastante no que diz respeito ao tempo e aos custos. É sabido que as empresas fornecedoras de energia elétrica recebem uma cota financeira significativa pela continuidade do fornecimento de energia elétrica, portanto, modificações tão significativas e que demandam grande parcelas de tempo são muito prejudiciais, tanto para a empresa quanto para o consumidor.

Considerando que a instalação de DLCCs é uma solução permanente e que dentre as destacadas é a menos impactante para o sistema, pode-se afirmar que existem justificativas concretas para utilização de DLCCs em sistemas elétricos com equipamentos sujeitos a superação por corrente de curto-circuito.

Parte II

Referenciais Teóricos

2 Dispositivos Limitadores de Corrente de Curto-Circuito

O objetivo dos dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito é impor limites a correntes de falta com intensidades que superam as suportadas em condições nominais pelos equipamentos instalados em redes de energia elétrica. Atuando como componente do sistema de proteção das redes os DLCCs podem ser responsáveis pela interrupção de correntes nocivas, isso depende da tecnologia empregada no dispositivo, alguns são capazes somente de limitar a corrente de falta, outros podem atuar interrompendo tais correntes. É importante ressaltar que o DLCC não é um equipamento que substitui os disjuntores de potência, o ideal é que estes dispositivos atuem em conjunto com equipamentos de medição como Transformadores de Corrente (TCs) e Transformadores de Potencial (TPs), proporcionando maior confiabilidade e segurança ao sistema elétrico.

No mercado atualmente existe um conjunto de DLCCs disponível, esse aglomerado de equipamentos engloba dispositivos consagrados comercialmente, comercializados em larga escala e outros dispositivos em fase de testes, agrupando desde dispositivos antigos até os mais modernos. Um dos dispositivos mais usados no sistema elétrico brasileiro é o RLC - Reator Limitador de Corrente, o RLC pode ser considerado um dos primeiros equipamentos utilizados para limitação de correntes de falta, os dispositivos FACTS - *Flexible AC Transmission System* e o Supercondutores são dispositivos mais modernos e em fase de teste. Na tabela 2.1 estão apresentados alguns dispositivos DLCCs e suas disponibilidades comerciais.

Tabela 2.1 – Dispositivos Limitadores de Corrente de Curto-Circuito

Disponíveis no Mercado Utilização Ampla	Disponíveis no Mercado Utilização Limitada	Fase de testes(P&D) Pesquisa e Desenvolvimento
RLC	IPC	SLC
PRTC	FACTS	Disjuntores Eletrônicos
HVDC	TCSC	

2.1 Limitação ou Interrupção de Corrente de Falta via DLCC

Os DLCCs podem ser divididos em dois grupos: dispositivos capazes de interromper a corrente de curto e dispositivos capazes de limitar a corrente de falta. O primeiro grupo é composto basicamente por dispositivos pirotécnicos e os disjuntores eletrônicos, o segundo

grupo é composto pelos demais dispositivos, tendo como destaques o RLC, o IPC e os FACTS.

A atuação dos DLCCs deve ser rápida e eficaz, seja limitando ou interrompendo a corrente de falta. O benefício mais significativo da velocidade de atuação é que a corrente de falta não atinge o seu valor máximo. Portanto os demais equipamentos não sofrem maiores danos devido à alta intensidade de corrente circulando na rede (2).

Na figura 2.1 é possível verificar o modo de atuação de um DLCC.

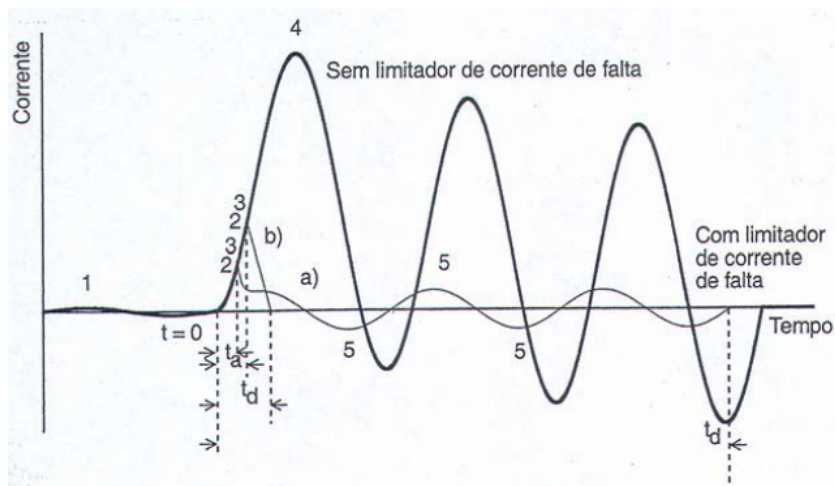


Figura 2.1 – Atuação de um DLCC. Fonte: (2)

Na figura 2.1, a curva a) representa o comportamento dos DLCCs, que *limitam* a corrente de falta; a curva b) representa os DLCCs que *interrompem* a corrente de falta (como um fusível, por exemplo); $t = 0$ é o momento de ocorrência do curto-circuito; t_a é o tempo de atuação do DLCC que limita a corrente de falta e t_d é o tempo de atuação do DLCC que interrompe a corrente de falta. Os valores observados nas curvas são:

1. Valor máximo da corrente, antes do curto-circuito.
2. Corrente de curto-circuito antes do pico.
3. Corrente de curto-circuito limitada pelo DLCC.
4. Valor máximo da corrente de curto-circuito não limitada.
5. Corrente de curto-circuito resultante após a limitação.

Observando a curva a) na figura 2.1, verifica-se que a atuação do DLCC é significativamente benéfica para o sistema. Em condições normais, a corrente de falta deveria atingir o ponto 4 no gráfico, mas com a atuação do dispositivo, o máximo valor da corrente de falta cai para o ponto 5, muito menor do que o máximo da corrente de curto-circuito original.

Na mesma figura é apresentada a curva b), em que se verifica o comportamento de um dispositivo que interrompe a corrente de falta. O tempo total de atuação, limitação e interrupção do dispositivo é t_d . A diferença entre o tempo total t_d das curvas a) e b) é a capacidade de interrupção do DLCC. Na curva a) quem interrompe a corrente de falta é o sistema de proteção e disjuntores. Na curva b) o próprio DLCC é responsável por interromper a corrente nociva, portanto o t_d da curva b) é bem mais rápido do que o da curva a), entretanto a corrente interrompida tem amplitude menor do que a corrente de curto original e não põe em risco a integridade dos equipamentos submetidos à falta.

2.2 Características desejáveis e indesejáveis em DLCCs

A seleção de dispositivos limitadores de corrente deve ser feita de acordo com a necessidade da rede ou equipamentos sujeitos à superação por correntes de falta. Com base em (41) e (42), as características dos DLCCs também são fatores consideráveis, algumas delas ganham destaque:

- Compatibilidade com os sistemas de proteção;
- Viabilidade financeira (custo de aquisição, instalação e manutenção);
- Máxima impedância no caso de uma falta (a corrente de falta é reduzida por um fator elevado);
- Mínima impedância em regime permanente (pouco impacto nas perdas e na queda de tensão do sistema em regime permanente);
- Máxima velocidade de operação possível, devendo operar no primeiro ciclo, antes do primeiro pico;
- Nenhum ou poucos equipamentos auxiliares.

A inserção de dispositivos limitadores nos sistemas elétricos pode acarretar algumas adversidades significativas, alguns exemplos são:

- **Descoordenação dos esquemas de proteção:** podem causar uma descoordenação da seletividade de dois ou mais dispositivos de proteção, fazendo com que estes operem fora dos seus limites estabelecidos anteriormente, podendo até interferir em outros dispositivos de proteção;
- **Compatibilidade dos fusíveis localizados a jusante:** os limitadores diminuem as correntes de falta das linhas de transmissão, os fusíveis atuantes nas LTs devem ser substituídos por outros redimensionados para a nova corrente de falta;

- **Direcionalidade:** inserir um DLCC pode causar a inversão da direção da corrente de curto-circuito em algumas linhas do sistema, podendo causar perdas de referência para relés direcionais operando em tal linha.

A seguir estão descritos vários tipos de DLCCs, seu funcionamento e particularidades. Por critérios de organização a descrição dos dispositivos limitadores segue na mesma ordem de exibição da tabela 2.1. O objetivo principal desta descrição é apresentar os dispositivos estudados neste trabalho, suas aplicações e modelos, e apresentar um panorama geral dos DLCCs mais conhecidos.

2.3 RLC - Reator com Núcleo a Ar

Reatores Limitadores de Corrente de Curto-circuito, ou RLCs, são dispositivos utilizados há muito tempo em sistemas elétricos de potência. A instalação de RLCs em redes elétricas acarreta influências significativas, por ser um equipamento instalado de forma permanente, o RLC insere perdas técnicas significativas e quedas de tensão na rede, eventos que são indesejados devido à regulação de tensão do sistema e ao custo das perdas técnicas em regime permanente. Considerando redes elétricas com grande quantidade de circuitos e linhas o efeito sobre a variação de tensão no sistema é amenizado.

Outra consequência da introdução de um RLC no sistema é que sua inserção pode aumentar a TRT (Tensão de Restabelecimento Transitória). A instalação de bancos de capacitores em paralelo podem aliviar o problema de alta TRT (21). A figura 2.2 apresenta um diagrama simplificado da utilização do RLC como limitador de corrente de curto-circuito. As Equações (2.1) a (2.3) descrevem de forma simplificada a modelagem matemática da impedância de um RLC (16).

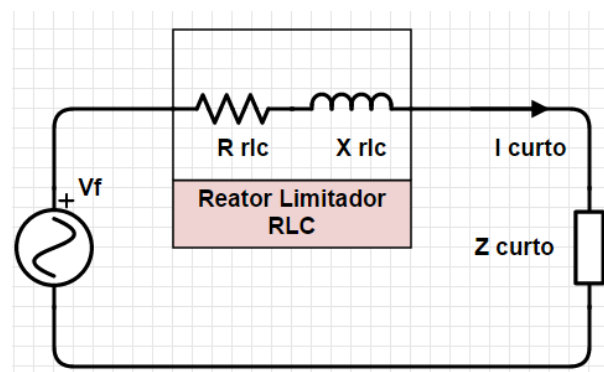


Figura 2.2 – RLC atuando como DLCC.

$$Z_r = \left(\frac{1}{q} + 1j\right)X_r \quad (2.1)$$

$$X_r = \frac{Q_r}{V_r^2} \quad (2.2)$$

$$q = \frac{X_r}{R_r} \quad (2.3)$$

em que:

Z_r : é a impedância do reator;

q : é o fator de qualidade do reator;

Q_r : é a potência nominal do reator;

V_r : é a tensão nominal do reator;

X_r : é a reatância do reator;

R_r : é a resistência do reator;

A instalação desse tipo de dispositivo no sistema pode ser executada de algumas formas: seccionando barramentos, em série com linhas de transmissão dos circuitos de saída, em série com circuitos alimentadores. As figuras 2.3 e 2.4 apresentam diagramas com duas das configurações supracitadas.

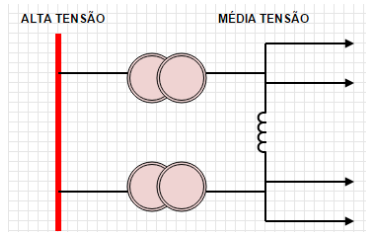


Figura 2.3 – RLC instalado seccionando barramentos.

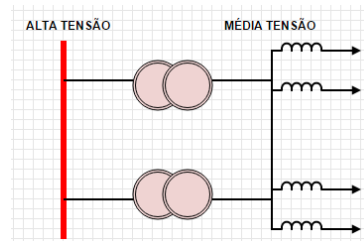


Figura 2.4 – RLC instalado em série com as LTs.

Naturalmente o RLC é capaz de produzir um campo magnético a sua volta, portanto o espaço onde o dispositivo será instalado deve ser avaliado cuidadosamente. A distância entre fases pode inviabilizar a instalação devido ao efeito produzido pelo campo magnético do RLC nas correntes que percorrem as linhas (43), (44). Para que o RLC seja instalado de forma adequada é recomendado que sejam realizados estudos de fluxo de potência, curto-circuito e transitórios eletromagnéticos no sistema, a fim de determinar qual o valor da impedância mais adequada para o sistema sob avaliação.

É importante destacar que a utilização do RLC apesar de amplamente difundida pode se tornar não recomendada a longo prazo, as perdas que esse tipo de dispositivo impõe ao sistema podem acarretar em consideráveis prejuízos financeiros, portanto é

necessário observar se a substituição dos equipamentos de proteção ou ativos é mais viável a longo prazo.

2.4 PRTC - Dispositivo Pirotécnico

Os dispositivos pirotécnicos também são dispositivos amplamente empregados em sistemas elétricos, no mundo a sua utilização se estende desde a década de 50, tornou-se mais utilizado no Brasil a partir da década de 90. O sistema mecânico de interrupção é composto por cargas explosivas e fusíveis. Além de ser um elemento compacto, quando instalado em redes elétricas não apresenta resistência em regime permanente, portanto não há perdas técnicas ou redução da corrente nominal do sistema. A figura 2.5 apresenta a composição mecânica do dispositivo limitador do tipo pirotécnico.

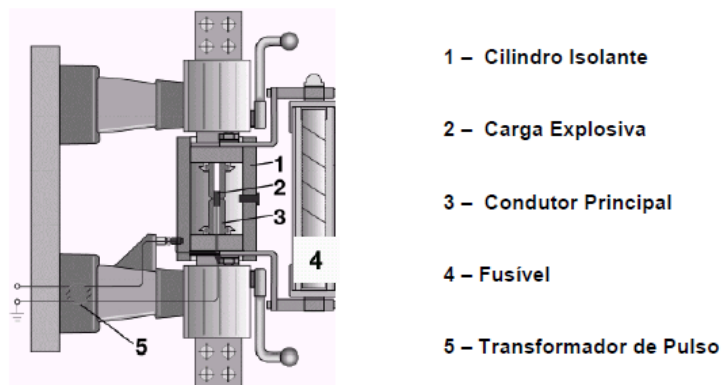


Figura 2.5 – Configuração mecânica do dispositivo limitador do tipo pirotécnico.

A característica mais marcante do dispositivo pirotécnico é a sua rapidez de atuação, capaz de interromper correntes de falta intensas em um curto prazo de tempo, estimado em menos de 1/4 de ciclo (45), atuando mais rápido que os disjuntores de potência, esse atributo aumenta a confiabilidade do sistema, proporciona proteção aos equipamentos ativos como transformadores, evitando que a corrente de falta atinja níveis muito elevados e danifique os equipamentos instalados nas subestações.

Uma característica negativa do dispositivo pirotécnico é a separação entre o montante e a jusante do local onde está instalado. Quando o equipamento atua extinguindo a corrente de falta, o restabelecimento da conexão é realizado somente com a substituição do fusível e da câmara do condutor principal do dispositivo. A figura 2.6 mostra um exemplo da rapidez de atuação do dispositivo e da interrupção do fornecimento de corrente à carga.

Durante o funcionamento nominal, a corrente de carga é conduzida pelo condutor de cobre principal, localizado em uma das câmaras do dispositivo. Sensores conectados a transformadores de corrente identificam a variação brusca de correntes de alta intensidade e enviam comandos para o dispositivo que aciona as suas cargas explosivas, desta forma a corrente de curto-circuito é interrompida e desviada para a segunda câmara. Nesta etapa

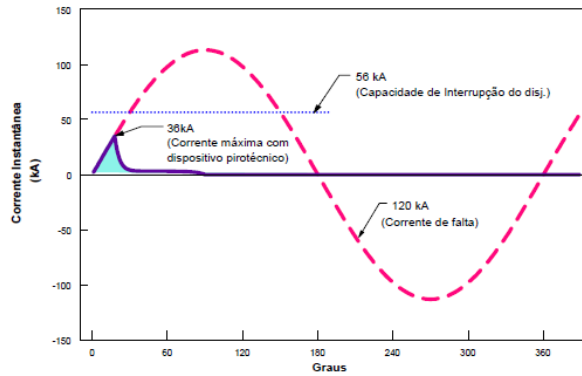


Figura 2.6 – Atuação do dispositivo pirotécnico.

do processo, a corrente de falta é extinta por meio do acionamento do elemento fusível. O passo a passo da atuação do dispositivo pirotécnico pode ser visualizado nas figuras 2.7 a 2.12.

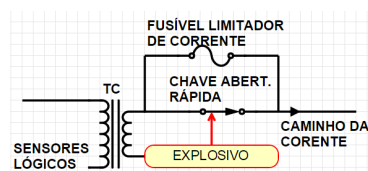


Figura 2.7 – Operação nominal.

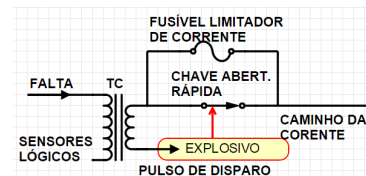


Figura 2.8 – Detecção da falta.

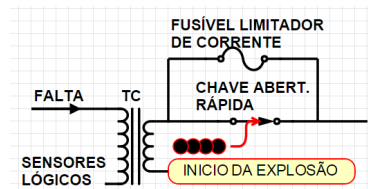


Figura 2.9 – Acionamento explosivo.

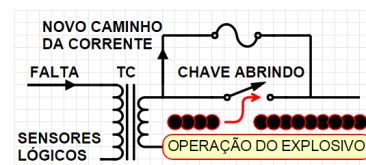


Figura 2.10 – Abertura da chave.

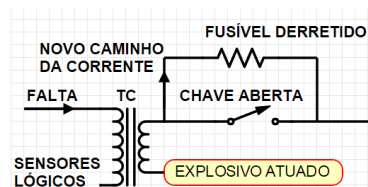


Figura 2.11 – Atuação do fusível.

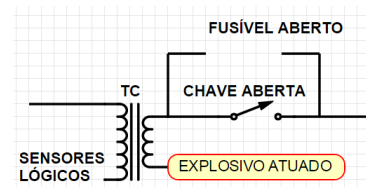


Figura 2.12 – Extinção da falta.

É válido ressaltar que o dispositivo pirotécnico atua em conjunto com os elementos de proteção. Os disjuntores são os principais equipamentos responsáveis pela extinção de correntes nocivas ao sistema, trabalhando em sintonia esses dois dispositivos podem aumentar significativamente a segurança da instalação, pois o disjuntor poderá interromper

correntes de falta com intensidades menores e o pirotécnico atuar em contingências mais intensas.

A modelagem matemática para projeto do dispositivo pirotécnico é feita em laboratório. Inicialmente, verifica-se a intensidade da corrente de falta e, em seguida, é utilizada a forma de onda da tensão para a determinação das características do dispositivo (16).

A economia de alguns empresas está integralmente ligada à continuidade do fornecimento de energia elétrica, empresas de distribuição de energia elétrica e indústrias que utilizam caldeiras são exemplos clássicos. Esses estabelecimentos sofrem com prejuízos significativos caso o fornecimento de energia seja interrompido. Os dispositivos pirotécnicos têm como uma das características a abertura do circuito onde ocorre a falta, portanto, nesses casos, devem ser usados em conjunto com outros equipamentos para solucionar o problema de interrupção no fornecimento de energia elétrica.

O dispositivo RLC pode atuar em conjunto com o pirotécnico em uma configuração em paralelo. Durante o regime permanente, a corrente de carga circula normalmente pelo PRTC (figura 2.13), que tem impedância nula ou muito pequena, de forma que não adiciona perdas técnicas em regime permanente. Na ocorrência de um curto-circuito, o PRTC abre seus contatos e a corrente de curto passa a circular pelo RLC, que, ao inserir uma impedância no sistema, limita a amplitude da corrente de defeito a valores menos nocivos para os demais equipamentos instalados na rede.

Na figura 2.13 está apresentado um exemplo da atuação desses elementos em conjunto e na figura 2.14 observa-se um diagrama que exhibe o arranjo dos equipamentos instalados em paralelo.

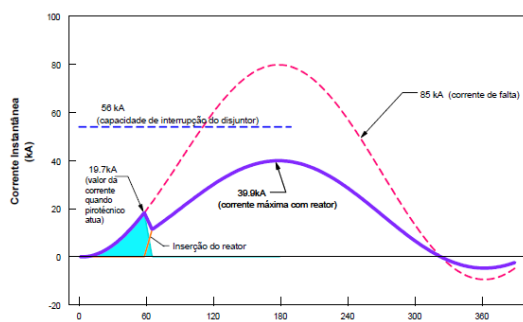


Figura 2.13 – Atuação dos dispositivos Pirotécnico e RLC em paralelo.

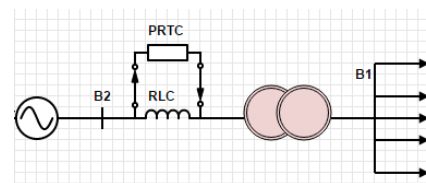


Figura 2.14 – Diagrama dos dispositivos Pirotécnico e RLC em paralelo.

Depois da atuação dos dispositivos limitadores, os disjuntores do sistema de proteção eliminam a falta e o RLC continuará mantendo o circuito fechado. Esta configuração será mantida até a substituição dos elementos explosivos e do condutor principal do limitador pirotécnico. Enquanto o PRTC não for restabelecido, a corrente de carga estará circulando normalmente pelo RLC, e o sistema continua protegido de correntes intensas, porém,

durante esse período de tempo, o RLC causa perdas por efeito Joule que podem interferir no sistema.

2.5 HVDC - Conversores de Fonte de Corrente

O crescimento acentuado da utilização de dispositivos semicondutores como controladores de sistemas de alta tensão continua tendo impacto significativo no desenvolvimento de aparelhos eletrônicos avançados, esses elementos são utilizados para apoiar a otimização das operações e a gestão eficiente de redes elétricas, que em muitos casos são totalmente ou parcialmente desreguladas. O contínuo desenvolvimento da eletrônica de potência apresenta oportunidades econômicas para empresas que utilizam essa tecnologia.

Em particular, o HVDC - *High Voltage Direct Current* pode resolver problemas de rede convencionais, tais como transmissão de grandes quantidades de energia, interconexões de redes assíncronas, estabilidade de redes elétricas e integração de fontes renováveis em grande escala com o sistema elétrico (46).

A primeira instalação comercial do HVDC foi realizada em 1954, época em que uma quantidade significativa de sistemas de transmissão utilizando o dispositivo HVDC foi instalada em todo o mundo. Existem justificativas diferentes a respeito do uso de HVDCs, algumas das razões são (47):

- Em Itaipu , Brasil, HVDC foi escolhido para fornecer energia de 50Hz em um sistema de 60 Hz e para transmitir de forma mais econômica 6300 MW gerados pela usina hidroelétrica ao longo 800 km;
- No *Project Leyte - Luzon* Filipinas, o dispositivo HVDC foi escolhido para permitir a transmissão de energia gerada pelas usinas geotérmicas através de uma interligação da ilha, contribuindo significativamente para a melhoria da estabilidade da rede elétrica.
- Em Queensland , Austrália, HVDC foi utilizado para interligar duas redes independentes, o sistema de New South Wales e a rede de Queensland, o objetivo principal era possibilitar o comércio de eletricidade entre os dois sistemas, incluindo mudança de direção do fluxo de potência.

O processo fundamental que ocorre em um sistema HVDC é a conversão de corrente elétrica de AC para DC. Os três elementos principais de um sistema HVDC são: a estação conversora, o meio de transmissão e os eletrodos. Conversores comutados são mais utilizados no HVDC, o componente que permite que este processo de conversão é o tiristor, elemento semicondutor controlável que pode transportar correntes muito altas, até 400 A, e é capaz de bloquear tensões muito intensas, de até 10 kV.

Por meio do chaveamento dos tiristores, é possível construir-se uma válvula de tiristores, o que faz com que o elemento consiga suportar tensões elevadas. Essa válvula de tiristor pode ser operada a uma frequência de 50 Hz ou 60 Hz, e por meio do ângulo de controle é possível alterar o nível de tensão. Essa habilidade é o caminho pelo qual a potência transmitida é controlada de forma rápida e eficiente. A figura 2.15 mostra de forma simplificada o circuito elétrico equivalente do HVDC e na figura 2.16 apresenta-se uma das configurações possíveis de instalação do dispositivo.

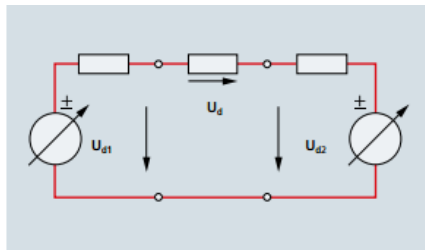


Figura 2.15 – Circuito simplificado do HVDC.

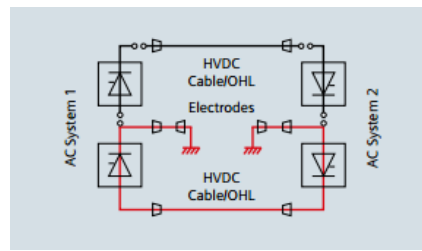


Figura 2.16 – Operação monopolar do HVDC.

O investimento para utilização do conversor HVDC em sistemas de potência são mais elevados do que em redes de alta tensão AC e em subestações. Em contrapartida, o custo médio de transmissão, cabos e linhas aéreas são mais baixos em sistemas elétricos que utilizam o dispositivo HVDC. Considerando os custos de operação e manutenção no caso de utilização do HVDC, os níveis de perdas iniciais são mais elevados, porém existe uma grande vantagem: as perdas não variam com o comprimento do circuito, o que não ocorre em sistemas AC, onde os níveis de perda aumentam com a distância.

2.6 IPC - Interphase Power Controllers

O IPC é uma tecnologia desenvolvida para a gestão dos fluxos de energia em sistemas de corrente alternada. Esse dispositivo é um controlador com duas impedâncias por fase, uma indutiva e uma capacitiva. Os valores dessas impedâncias são altos para que o IPC limite a contribuição de uma possível corrente de curto-circuito. O IPC pode assumir muitas formas, e, dependendo da aplicação e do método utilizado para implementar os deslocamentos de fase das tensões internas, pode ser adaptado para as necessidades de operação de aplicações mais específicas. Uma forma consiste em utilizar um único PST - *Phase-Shifting Transformers* em apenas um ramo reduzindo assim o seu custo (48). A figura 2.17 apresenta um diagrama simplificado do Interphase Power Controllers e a figura 2.18 apresenta o diagrama simplificado do IPC.

Apesar de não ter configuração fixa, algumas topologias se sobressaem na tecnologia IPC, sendo as principais: IPC 240 e IPC 120. Um diagrama simplificado do IPC 240

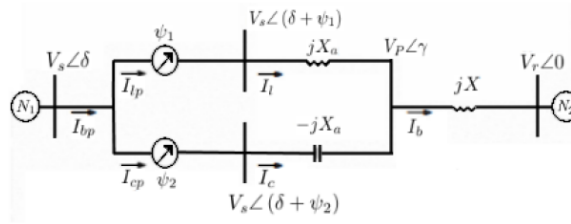


Figura 2.17 – Diagrama típico do IPC.

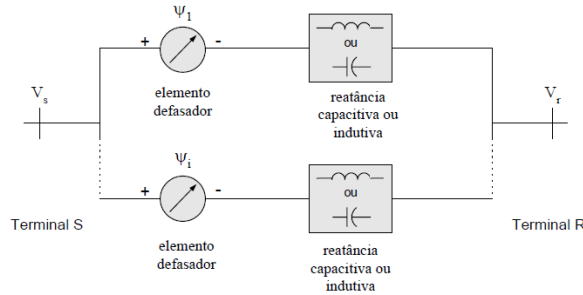


Figura 2.18 – Diagrama do IPC simplificado.

contendo apenas duas das suas seis reatâncias é mostrado na figura 2.19, onde sua defasagem é feita por conexão entre fases.

Suas reatâncias são conectadas nas tensões V_{Cs} e V_{Bs} que estão defasadas por um ângulo de 240. A corrente I_{Ar} é a soma das correntes I_{B1} e I_{B2} . Como essas correntes estão defasadas em 60° e -60° em relação a var , seu fator de potência é relativamente baixo.

Caso seja necessário, o fluxo de potência pode ser invertido com a troca das reatâncias em relação as suas fases (49).

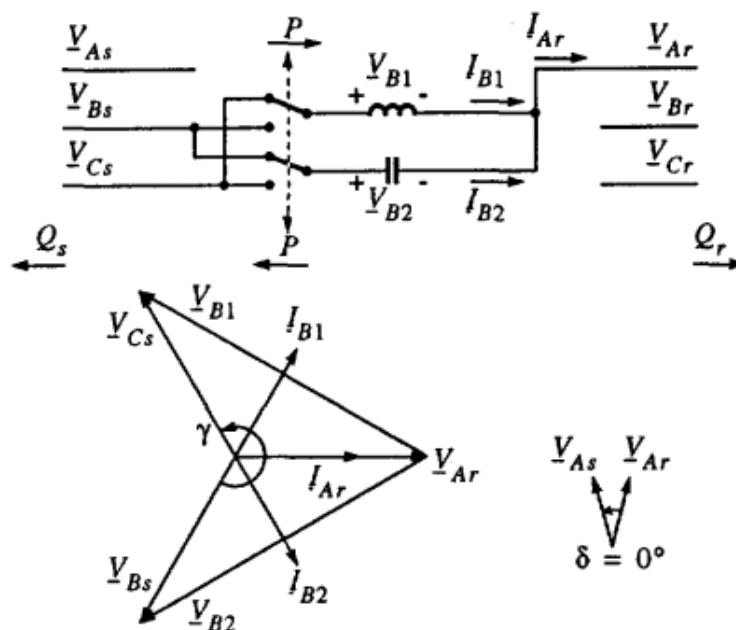


Figura 2.19 – Diagrama trifásico simplificado do IPC 240.

É possível usar a configuração IPC 120 para melhorar o fator de potência. Essa configuração utiliza um transformador defasador conectado em Y-Y não aterrado com 180° de defasagem. Suas reatâncias são conectadas conforme mostrado na figura 2.19 e seu princípio de funcionamento é semelhante à do IPC 240.

Para uma mesma potência, o que corresponde a uma mesma corrente I_{Ar} , as correntes que fluem através das reatâncias do IPC 120 são muito menores quando comparadas com as do IPC 240, ver figura 2.20, esse atributo se deve ao fato de que essas correntes possuem uma defasagem de 30° e -30° em relação a var , resultando em um melhor fator de potência.

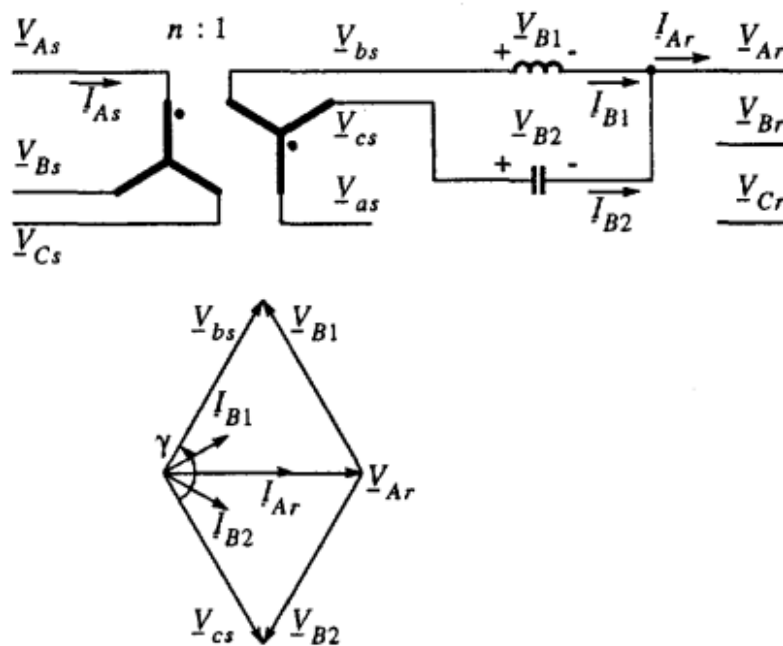


Figura 2.20 – Diagrama trifásico simplificado do IPC 120.

Atualmente a tecnologia utilizada nos IPCs dispõe de um número considerável de arranjos, são 9 no total, divididos em duas classes, síncronos e assíncronos. Os IPCs síncronos podem ser divididos em sintonizados e não sintonizados, a diferença consiste no circuito paralelo ressonante, elementos reativos sintonizados com frequência igual a do sistema, presente nos sintonizados. A utilização de IPCs em sistemas elétricos assíncronos ainda é muito restrita, os principais motivos são o valor de aquisição elevado e a confiabilidade do dispositivo neste tipo de sistema, a utilização ainda passa por fase de testes.

Existem pesquisas na literatura que descrevem de forma detalhada a modelagem matemática do IPC mostrado na figura 2.17. Destacam-se as seguintes publicações (11), (50), (51), (52) e (53).

Para aplicações de controle de fluxo de potência ou limitação de curto-circuito, a parametrização do IPC pode ser feita seguindo o algoritmo 1, proposto por (54).

Algoritmo 1 Algoritmo de Parametrização do IPC.

- 1: É realizada a análise do nível de curto-circuito no sistema;
- 2: Calcular a diferença entre a corrente de falta e a corrente de interrupção;
- 3: A linha com a maior contribuição para a falta é especificada;
- 4: Faz-se o fluxo de carga para os casos de máxima, média e mínima demanda;
- 5: Verifica-se qual a potência máxima da linha especificada;
- 6: O valor mínimo para χ_A é calculado por meio da inequação $\chi_A > 10Z_{Seen}$;
- 7: Calcula-se o ângulo mínimo;
- 8: A corrente de curto-circuito da linha é verificada;

Caso o nível desejado ainda não tenha sido atingido, pode-se: instalar um segundo IPC na segunda linha com maior contribuição para a falta, ou, se possível, seccionar a barra e instalar o IPC entre as duas partes.

As principais aplicações do IPC estão descritas em (55), são elas: Controle do fluxo de potência, interligação de subsistemas e conexão entre redes assíncronas. Uma das aplicações mais importantes é a de limitação de corrente de curto-circuito, o IPC usado com essa finalidade recebe uma denominação específica, é chamado de TLCC - *Transformador Limitador de Corrente de Curto-Circuito*, esse tipo de topologia faz parte do conjunto de IPCs utilizados em redes síncronas e utilizam como elementos defasadores capacitores e indutores, outros dois exemplos de IPCs síncronos são: TDA - *Transformador Defasador Assistido* e o ID - *Interligador de Desacoplamento*.

A configuração básica do IPC apresentada na figura 2.18 é composta por dois ramos em paralelo, quando utilizado como limitador de corrente de falta (TLCC) o IPC possui um diagrama mais simplificado, somente um dos ramos é necessário para atuação como DLCC. A instalação do TLCC é geralmente empregada em subestações que possuem mais de um transformador em paralelo, configuração muito comum em SEs do sistema elétrico brasileiro, retirando um dos elementos defasadores do TLCC e o reator, a impedância equivalente dos transformadores substituirá o ramo ausente de forma adequada. As figuras 2.21 e 2.22 os diagramas simplificados da instalação do TLCC.

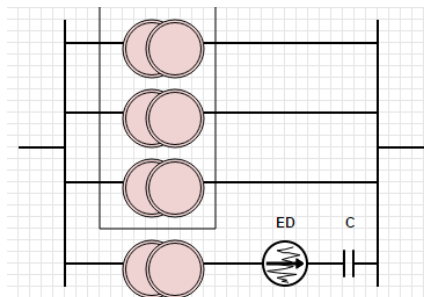


Figura 2.21 – TLCC instalado em um SE.

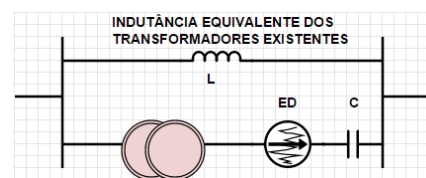


Figura 2.22 – Diagrama simplificado do TLCC.

O funcionamento do TLCC é exibido de forma simplificada nas figura 2.23 e no

conjunto de Equações (2.4)-(2.8).

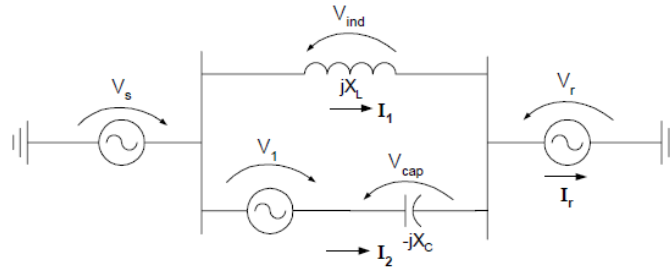


Figura 2.23 – Diagrama básico de funcionamento do TLCC.

Considerando que a corrente I_1 está 90° atrasada em relação à tensão V_{IND} , I_2 está 90° adiantada em relação à tensão V_{CAP} e V_1 corresponde a uma fonte de tensão controlável, temos:

$$V_{IND} = V_S - V_r \quad (2.4)$$

$$V_{CAP} = V_S - V_r + V_1 = V_{IND} + V_1 \quad (2.5)$$

$$I_1 = \frac{V_{IND}}{jX_L} \quad (2.6)$$

$$I_2 = \frac{V_{CAP}}{-jX_C} \quad (2.7)$$

$$I_r = I_1 + I_2 \quad (2.8)$$

No momento em que ocorre a falta o TLCC atua da seguinte forma, as tensões V_S e V_{IND} se igualam, nesta situação o controlador deve alterar o módulo da tensão V_1 com o objetivo de opor as fases das correntes I_1 e I_2 , assim a corrente I_r será limitada.

2.7 FACTS - Flexible AC Transmission System

A modernização dos sistemas elétricos de potência envolve, de forma geral, equipamentos de eletrônica de potência, o desenvolvimento destes dispositivos e utilização nas redes de alta tensão proporciona duas características desejáveis, controlabilidade e flexibilidade. Ainda é predominante a utilização de sistemas de controle eletromecânicos, contudo a tendência é que estes controladores sejam substituídos por elementos com tecnologias mais avançadas, como os dispositivos FACTS (56).

Dispositivos FACTS compõem um aglomerado de equipamentos de eletrônica de potência que proporciona a flexibilidade de controle em sistemas elétricos. A flexibilidade supracitada se refere a habilidade de alteração rápida e contínua dos parâmetros da rede elétrica que influenciam diretamente no seu funcionamento.

Segundo (56), os principais tipos de controladores FACTS são:

- Controladores série;
- Controladores paralelo;
- Controladores combinados série-série;
- Controladores combinados série-paralelo;

No que diz respeito aos dispositivos FACTS, abaixo estão descritos alguns destes equipamentos (57).

- Controlador universal de fluxo de potência – UPFC (Unified Power Flow Controller);
- Controlador de fluxo de potência da rede – GPFC (Grid Power Flow Controller);
- Capacitor série chaveado por tiristor – TSSC (Thyristor Series Switched Capacitor);
- Capacitor chaveado por tiristor – TSC (Thyristor Switched Capacitor);
- Capacitor série controlado por tiristor – TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor).
- Transformador defasador – PST (Phase Shift Transformer);
- Compensador síncrono estático – STATCOM (Static Synchronous Compensator);
- Compensador síncrono estático série – SSSC (Static Synchronous Series Compensator);
- Compensadores estáticos – SVC (Static Var Compensator);
- Reator controlado por tiristor – TCR (Thyristor Controlled Reactor);

Atualmente a tecnologia FACTS está sendo muito bem aceita, a utilização dos dispositivos depende da aplicação de destino, as principais atividades desenvolvidas por equipamentos com tecnologia FACTS são as de controle de fluxo de potência em sistemas elétricos, o objetivo deste tipo de aplicação é viabilizar a operação ótima e melhorar a estabilidade do sistema (56).

Dispositivos FACTS também são utilizados para amortecimento de oscilações eletromecânicas, aumento da capacidade de transmissão e limitação das correntes de curto-circuito (57).

Considerando o escopo deste trabalho, o dispositivo mais importante é o TCSC, este é consideravelmente o elemento FACTS mais propício para atuar como limitador de corrente de curto-circuito (58). A configuração básica do TCSC é composta por um reator controlado por tiristores (RCT), um para-raios (MOV-Metal Oxide Varistor) para proteção e um banco de capacitores série conectado em paralelo com o RCT, o diagrama simplificado do TCSC é mostrado na figura 2.24.

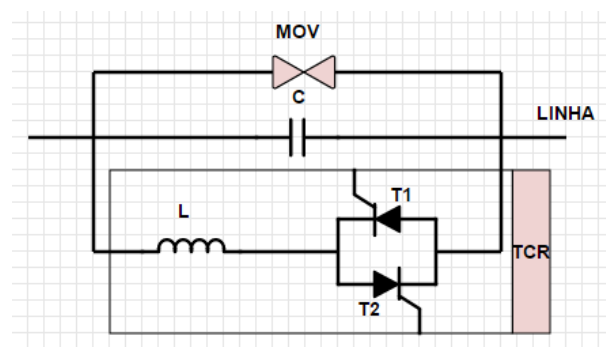


Figura 2.24 – Diagrama básico TCSC.

Segundo (58) o TCSC pode ser modelado como uma impedância de magnitude controlável, devido ao conjunto formado pelo capacitor e o reator controlado, a possibilidade de ajuste do valor da impedância deste dispositivo permite a sua utilização como dispositivo limitador de corrente de curto-circuito.

Para atuar como DLCC o TCSC deve sofrer algumas alterações na sua configuração natural, é necessário que o dispositivo seja dimensionado previamente para que não seja danificado pelas nocivas corrente de falta, para isso a impedância indutiva do elemento deve ser alta, as consequências desta modificação são a alteração do MOV e da frequência de ressonância do circuito indutivo-capacitivo, ambas precisam ser ajustadas para que atuação do dispositivo seja adequada.

O trabalho de Lerch (59) apresenta uma nova configuração de dispositivos FACTS utilizada para limitar corrente de curto-circuito, o TPSC - *Thyristor Protected Series Compensation* atuando em conjunto com um reator série, em regime permanente a impedância deste elemento é nula, no momento em que ocorre a falta o sistema reconhece a contingência e o dispositivo atua através do chaveamento dos componentes, fazendo com que o reator seja inserido no sistema, inserindo uma impedância em série e limitando a corrente de falta. O diagrama simplificado do TPSC é mostrado na figura 2.25.

Assim como o IPC o TCSC e o TPSC são dispositivos com custo de aquisição muito elevado, é inviável instalar esse tipo de equipamento na rede elétrica somente para

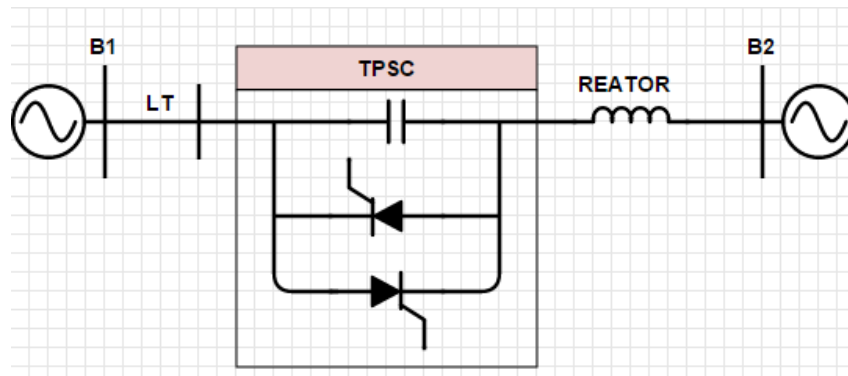


Figura 2.25 – Diagrama básico TPSC.

atuar como dispositivo limitador de corrente de falta, apesar de possuir características desejáveis como impedância nominal nula, a aplicação do TCSC precisa ser vinculada a outras atividades para que seja justificada a sua utilização.

2.8 Dispositivos Supercondutores

A partir do ano de 1986 a tecnologia dos dispositivos supercondutores foi aplicada em sistemas elétricos de potência, uma dessas aplicações é a utilização do dispositivo como limitador de corrente de falta (60). Simulações detalhadas mostram que o benefício do uso de dispositivos supercondutores são consideráveis, desta forma, a aplicação do mesmo como limitadores de corrente de curto-circuito ganha respaldo (61).

Atualmente existem três tipos de dispositivos supercondutores utilizados como limitador de corrente de curto-circuito é o (SLCC), resistivo, indutivo e tipo ponte. O SLCC resistivo será um dos dispositivos considerados nesta pesquisa, informações sobre os tipos indutivo e ponte de SLCCs podem ser encontradas em (62), (63), (64), (65) e (66).

Instalado diretamente em série com o ramo do circuito a ser protegido o SLCC resistivo apresenta características importantes, a impedância em regime permanente é nula, evitando perdas ou variações no fluxo de potência do sistema, o tempo de atuação é muito rápido, segundo (63) aproximadamente 1ms. O SLCC atua quando há variação nos seus parâmetros de referência, estes são os responsáveis por manter o dispositivo na região de supercondutividade, caso algum dos parâmetros seja alterado a resistência do SLCC varia, limitando a corrente de falta. Alguns dos parâmetros que controlam o SLCC são: Densidade de Corrente, Temperatura e Campo Elétrico (62). A figura 2.26 apresenta o dispositivo.

Quando o sistema está submetido a uma corrente de falta, a temperatura da linha onde ocorre a contingência aumenta, desta forma, o SLCC reconhece a alteração nos parâmetros iniciais, caso a temperatura atinja um limiar pré-definido o dispositivo atua limitando a corrente de curto-circuito. O SLCC resistivo é um dispositivo que atua somente

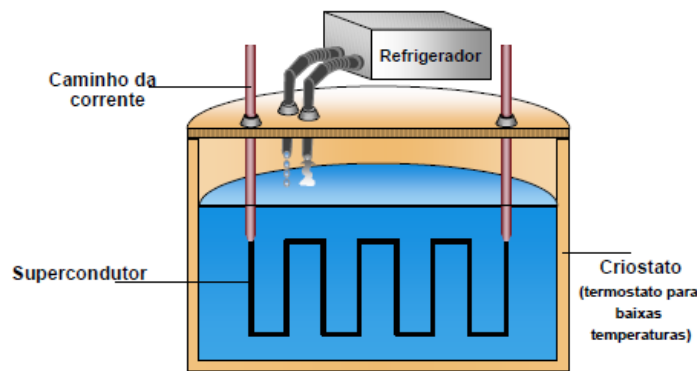


Figura 2.26 – Supercondutor do tipo resistivo.

limitando a corrente de contingência, não substitui os equipamentos de proteção, o valor do SLCC deve ser projetado para que a corrente de falta não seja reduzida a ponto dos disjuntores não reconheçam o defeito.

Segundo (64) uma desvantagem do SLCC resistivo é que durante a atuação o dispositivo sofre um aquecimento considerável, após solucionar a situação problemática é necessário desconectar o SLCC por um tempo para que o mesmo resfrie e retorne a sua condição de impedância nula, assim poderá ser novamente inserido no sistema.

2.9 Chaves Eletrônicas

Segundo (67) as chaves eletrônicas são componentes dos disjuntores de atuação rápida, novas tecnologias empregadas em disjuntores incluem chaves eletrônicas como tiristores, desta forma a atuação do equipamento é significativamente mais rápida, normalmente um disjuntor comum leva em média 4 ciclos para abrir o circuito defeituoso, utilizando chaves eletrônicas o tempo de abertura chega a diminuir para 1.5 ciclo.

O princípio de funcionamento consiste na atuação dos disjuntores rápidos antes da atuação dos disjuntores convencionais, no momento da falta as chaves eletrônicas reconhecem o defeito e rapidamente atuam permutando conexões do sistema ou interrompendo circuitos, a fim de limitar a corrente de falta, desta forma os disjuntores convencionais atuariam interrompendo uma corrente de curto-circuito menor do que a corrente de falta inicial(67).

A desvantagem mais evidente da utilização desse tipo de equipamento são as perdas técnicas em regime permanente, quando comparadas com as perdas causadas pelos disjuntores convencionais a diferença é muito grande, portanto sua utilização é restrita e estão sendo desenvolvidas pesquisas para encontrar formas melhores de uso desse equipamento(67).

2.10 Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo, foram apresentadas descrições dos DLCCs mais estudados atualmente. Alguns dispositivos possuem modelos matemáticos fundamentados, outros ainda em fase de desenvolvimento não possuem formulação matemática formalizada. A forma de utilização e as características dos dispositivos foram descritas de forma detalhada.

No próximo capítulo serão apresentados diversos conceitos sobre a teoria básica de curto-circuito, os tipos de curto-circuito e o modo como são calculados em sistemas elétricos.

3 Teoria Básica de Curto-Circuito e Fluxo de Potência

Uma *falta* ou *defeito* no sistema elétrico é qualquer distúrbio que afete a sua operação normal. Um curto-circuito é um tipo de falta, que pode ser definido como uma conexão provocada ou acidental, com impedância nula ou muito baixa, entre pontos do sistema com diferentes potenciais que em condições normais estariam separados (10) & (17). A consequência mais significativa da ocorrência de um curto-circuito é a elevação brusca da corrente que percorre o circuito. O valor da corrente de falta pode variar, dependendo do tipo de falta que ocorre (7).

Segundo (17) a corrente de curto-circuito pode ser fracionada em três períodos com relação ao tempo: sub-transitório, transitório e regime permanente. Durante os dois primeiros períodos a corrente de falta possui características assimétricas. Nesses períodos a componente contínua é mais intensa. O regime permanente caracteriza-se pela ausência da componente contínua, tornando a corrente de curto simétrica.

Na equação (3.1) está descrita uma formulação matemática simplificada que apresenta o comportamento da corrente de curto-circuito:

$$I_{CC} = I_{max} \cos(\omega t) + I_0 e^{-t/\tau} \quad (3.1)$$

em que I_{max} é o valor máximo da componente simétrica, I_0 é o valor inicial da componente contínua que decresce exponencialmente com o tempo t , τ é uma constante de tempo que depende dos parâmetros do sistema.

A Equação (3.1) pode ser escrita de forma simplificada como:

$$I_{CC} = I_S + I_C \quad (3.2)$$

em que I_S é a componente simétrica e I_C é a componente contínua da corrente de curto I_{CC} .

Na figura 3.1 é possível verificar o perfil gráfico dessas componentes em função do tempo.

Basicamente os curtos-circuitos são classificados em três grupos: Trifásicos, Bifásicos e Monofásicos. Os diagramas a seguir apresentam de forma simplificada como ocorre cada um dos curtos-circuitos. O mais comum dos tipos de curto-circuitos é o monofásico. Na figura 3.2 é apresentado o diagrama simplificado desse tipo de falta.

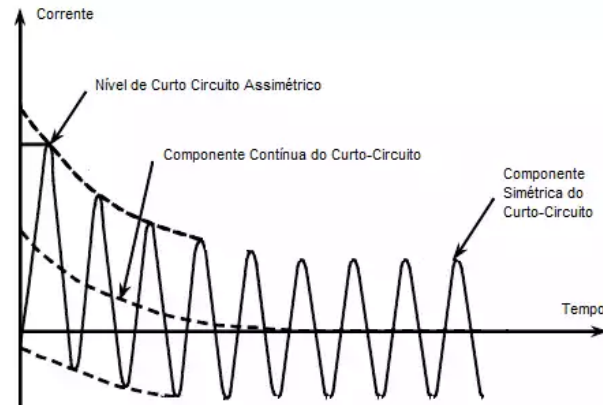


Figura 3.1 – Corrente de Curto-circuito e componentes simétrica e assimétrica.



Figura 3.2 – Curto-circuito Monofásico.

O curto bifásico pode ocorrer entre duas fases ou entre duas fases e a terra. Nas figuras 3.3 e 3.4 são apresentados diagramas com o curtos bifásicos. A impedância Z' é a impedância de falta entre fases.

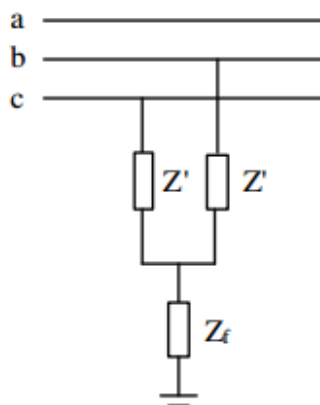


Figura 3.3 – Curto-circuito Bifásico entre fases e terra.

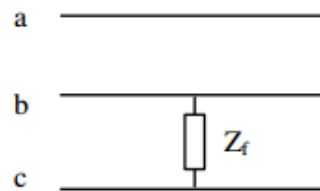


Figura 3.4 – Curto-circuito Bifásico entre fases.

A falta trifásica pode ocorrer entre as três fases ou entre as três fases e a terra. Nas figuras 3.5 e 3.6 são apresentados diagramas com o curtos trifásicos.

A modelagem matemática descrita neste capítulo prioriza dois tipos de falta, o curto-

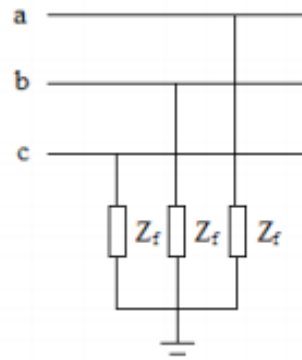


Figura 3.5 – Curto-circuito Trifásico entre fases e terra.

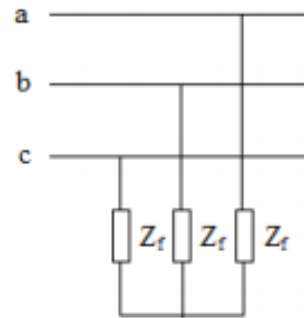


Figura 3.6 – Curto-circuito Trifásico entre fases.

circuito monofásico e o trifásico. Estudos estatísticos como (7), mostram a probabilidade de ocorrência de cada tipo de falta em sistemas elétricos de potência.

Em média as faltas ocorrem com a seguinte probabilidade:

- Trifásicos: 5%
- Bifásico - Aterrado: 15%
- Bifásico - Não Aterrado: 10%
- Monofásico: 70%

Eventos básicos causadores de curto-circuito em sistemas elétricos são: descargas atmosféricas, contato entre condutores causado pela força do vento, manobras de seccionamento inadequadas, ionização do ar entre fases, etc.

As consequências causadas por curtos-circuitos são variadas, mas ganham destaque: instabilidade dinâmica do sistema, distúrbios nos sistemas de controle e possíveis danos físicos à vida dos funcionários e à estrutura dos equipamentos.

Segundo (10) os cálculos de corrente de falta no sistema são utilizados para determinar a capacidade de proteção de disjuntores, coordenar proteções, avaliar a estabilidade dinâmica e dimensionar dispositivos de proteção como relés, transformadores de corrente e disjuntores.

Os quatro tipos de falta definidos podem ser classificados em dois grupos: faltas simétricas e assimétricas. A falta do tipo trifásica é considerada simétrica porque atinge as três fases do sistema ao mesmo tempo, e, desta forma, a corrente de falta é igualmente conduzida pelos três condutores. Os demais tipos de curto-circuito são considerados faltas

assimétricas porque não solicitam todas as fases igualmente, causando desequilíbrio entre as correntes nos condutores de fase.

3.1 Cálculo de Curto-Circuito utilizando a Matriz Z_{BARRA}

A representação do sistema elétrico utilizada neste trabalho é a BARRA-RAMO. Esse tipo de modelagem permite a visualização de um circuito equivalente ao sistema de potência. Cada uma das barras representa uma subestação e os ramos representam as linhas de transmissão do sistema. A figura 3.7 apresenta um diagrama de um sistema BARRA-RAMO.

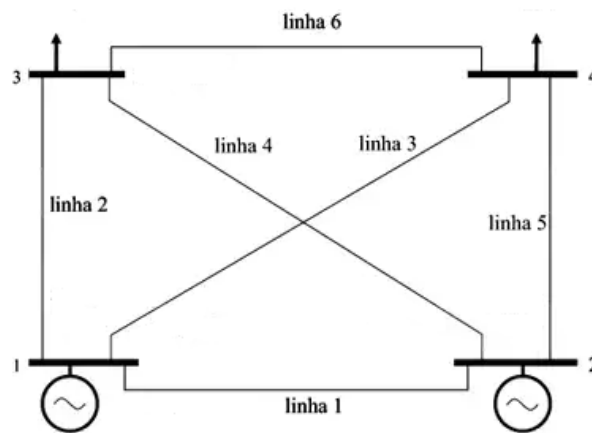


Figura 3.7 – Diagrama de um sistema BARRA-RAMO de 4 barras.

O cálculo do curto-circuito utilizado neste trabalho é baseado na modelagem de sistemas equilibrados. Aplicando a Lei de Kirchhoff a cada barra é possível obter um sistema matemático constituído por equações lineares, utilizando a forma matricial para manipulação do sistema de equações temos:

$$I = Y_{barra} * V \quad (3.3)$$

em que: I é um vetor de correntes $n \times 1$, Y_{barra} é a matriz admitância de barra $n \times n$ e V é o vetor de tensão de barra $n \times 1$.

Considerando a matriz impedância de barra Z_{barra} de dimensão $n \times n$, o sistema é solucionado por:

$$V = Z_{barra} * I \quad (3.4)$$

A matriz Z_{barra} , utilizada no cálculo de curto-circuito, pode ser obtida por meio da inversão da matriz Y_{barra} ou a partir de um algoritmo de construção desenvolvido por Brown (68) na década de 1960.

Resolvendo o sistema (3.4), temos:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Para que seja realizado o cálculo matricial de curto-circuito recomenda-se que um protocolo seja seguido. Este conjunto de procedimentos formaliza a modelagem BARRA-RAMO do sistema sob avaliação. No Algoritmo 2 estão descritos os procedimentos:

Algoritmo 2 Cálculo Matricial de Curto-Circuito.

- 1: Definir os sistemas que serão avaliados;
 - 2: Definir quais os tipos de falta serão calculados;
 - 3: Definir quais as condições iniciais do sistema;
 - 4: Ler e armazenar os dados do sistema;
 - 5: Construir da matriz Z_{BARRA} ;
 - 6: Calcular as correntes de falta nas barras do sistema;
 - 7: Avaliar as influências da correntes de falta no sistema.
-

O cálculo matricial de correntes de falta é baseado no *Teorema de Fortescue*. Trata-se de mecanismos matemáticos chamados **Componentes Simétricas**. São métodos de solução analíticos de circuitos elétricos desequilibrados, aplicados em cálculos envolvendo máquinas elétricas polifásicas, transformadores polifásicos e outros equipamentos. Formado por três grandezas: positivas, negativas e de seqüência-zero.

Teorema de Fortescue:

*"Qualquer sistema desequilibrado de n fasores concernentes pode ser dividido em n sistemas de fasores equilibrados intitulados **componentes simétricos** dos fasores originais. Os n fasores de cada grupo de componentes são iguais em módulo e os ângulos entre fasores vizinhos do conjunto são iguais". (69)*

Considerando um sistema elétrico trifásico desequilibrado, as correntes elétricas das fases são: I_a, I_b e I_c . Com base no Teorema de Fortescue, é possível transformar esse sistema desequilibrado em três outros sistemas equilibrados.

Seqüência positiva: formada por três fasores de mesmo módulo e defasados de 120° e na mesma seqüência de fases do sistema original.

Seqüência negativa: formada por três fasores de mesmo módulo e defasados de 120° e em seqüência de fases contrária à do sistema original.

Sequência zero: formada por três fasores de mesmo módulo e fase.

A representação matricial da relação entre as componentes simétricas e as correntes de fase pode ser vista em (3.6).

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

em que $\alpha = 1 \angle 120^\circ$ e I_{a0} , I_{a1} e I_{a2} são os fasores de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente.

O conceito de componentes simétricas também é aplicado nas tensões e impedâncias do sistema, desta forma, para que sejam calculados os diferentes tipos de corrente de falta, é necessária a obtenção das matrizes impedância de sequência positiva, negativa e zero.

Considerando o sistema mostrado na figura 3.7, as matrizes impedância de sequência zero, positiva e negativa, são (3.7) - (3.9).

$$Z_{barra(0)} = \begin{bmatrix} Z_{11(0)} & Z_{12(0)} & Z_{13(0)} & Z_{14(0)} \\ Z_{21(0)} & Z_{22(0)} & Z_{23(0)} & Z_{24(0)} \\ Z_{31(0)} & Z_{32(0)} & Z_{33(0)} & Z_{34(0)} \\ Z_{41(0)} & Z_{42(0)} & Z_{43(0)} & Z_{44(0)} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$Z_{barra(1)} = \begin{bmatrix} Z_{11(1)} & Z_{12(1)} & Z_{13(1)} & Z_{14(1)} \\ Z_{21(1)} & Z_{22(1)} & Z_{23(1)} & Z_{24(1)} \\ Z_{31(1)} & Z_{32(1)} & Z_{33(1)} & Z_{34(1)} \\ Z_{41(1)} & Z_{42(1)} & Z_{43(1)} & Z_{44(1)} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$Z_{barra(2)} = \begin{bmatrix} Z_{11(2)} & Z_{12(2)} & Z_{13(2)} & Z_{14(2)} \\ Z_{21(2)} & Z_{22(2)} & Z_{23(2)} & Z_{24(2)} \\ Z_{31(2)} & Z_{32(2)} & Z_{33(2)} & Z_{34(2)} \\ Z_{41(2)} & Z_{42(2)} & Z_{43(2)} & Z_{44(2)} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

3.2 Cálculo Matricial de Curto-Circuito Trifásico

O curto-circuito trifásico é classificado como uma falta equilibrada, logo, para realizar esse tipo de cálculo somente as componentes de sequência positiva são utilizadas.

O curto-circuito trifásico é calculado da seguinte forma:

$$I^f(1)_j = \frac{V_{Aj}^{pf}}{Z_{jj(1)}} \quad (3.10)$$

em que $I^f(1)_j$ é a corrente de falta na barra j , V_{Aj}^{pf} é a tensão de pré-falta na barra j e $Z_{jj(1)}$ é o elemento jj da matriz $Z_{barra(1)}$.

3.3 Cálculo Matricial de Curto-Circuito Monofásico-Terra

O curto-circuito monofásico é classificado como uma falta desequilibrada, assim, para realizar esse tipo de cálculo é necessário utilizar todas as componentes de sequência. O curto-circuito monofásico-terra é calculado da seguinte forma:

$$I^f(1)_{Aj} = \frac{V_{Aj}^{pf}}{Z_{jj(1)} + Z_{jj(2)} + Z_{jj(0)}} \quad (3.11)$$

$$I^f(1)_{Aj} = I^f(2)_{Aj} = I^f(3)_{Aj} \quad (3.12)$$

em que $I^f(1)_{Aj}$ é a corrente de curto-circuito de sequência positiva na barra j , referente a fase A, V_{Aj}^{pf} é a tensão pré-falta na barra j , $Z_{jj(1)}$ é o elemento jj da matriz $Z_{barra(1)}$, $Z_{jj(2)}$ é o elemento jj da matriz $Z_{barra(2)}$ e $Z_{jj(0)}$ é o elemento jj da matriz $Z_{barra(0)}$.

Para calcular as correntes de curto-circuito nas fases B e C do sistema pode-se utilizar o sistema (3.6) da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} I_{Aj}^f \\ I_{Bj}^f \\ I_{Cj}^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I^f(0)_{Aj} \\ I^f(1)_{Aj} \\ I^f(2)_{Aj} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

em que $I^f(2)_{Aj}$ é a componente de sequência negativa na barra j , referente a fase A e $I^f(0)_{Aj}$ é a componente de sequência zero na barra j , referente a fase A.

3.4 Fluxo de Potência

Na alocação do RLC, o dispositivo insere uma impedância no sistema elétrico que terá impacto nas perdas técnicas em regime permanente, o que não acontece com o RLC acoplado a um dispositivo pirotécnico. Desta forma, para avaliar o custo do RLC em situação de operação normal, é necessário fazer uma análise de fluxo de potência. Nesta seção será descrito o método de fluxo de potência utilizado nesta dissertação.

Segundo Stevenson (70), uma das mais importantes análises em sistemas de transmissão é o fluxo de potência. Os resultados obtidos neste tipo de estudo são usados em processos de planejamento, operação e projetos de um sistema de potência. De maneira geral, um dos objetivos do cálculo de fluxo de potência é determinar as gerações de potência ativa e reativa, considerando algumas recomendações:

1. Manter o perfil de tensão dentro dos limites considerados adequados;
2. Manter o sistema operando sem sobrecarga;
3. Atender a demanda solicitada pelas cargas consumidoras;
4. Manter o sistema com o mínimo possível de perdas ativas e reativas.

Os sistemas elétricos podem ser modelados por um conjunto de equações em que as linhas de transmissão são representadas por um circuito equivalente e as cargas e gerações por uma injeção de corrente equivalente. O fluxo de potência pode ser representado por uma solução do sistemas de equações que modela o sistema elétrico.

Na maioria dos casos, o conjunto de equações que representam o sistema é composto por equações não-lineares. A não-linearidade das equações decorre da formulação matemática que representa a injeção de corrente, Equação (3.14).

$$\mathbf{I}_i = \frac{\mathbf{S}_i^*}{\mathbf{V}_i^*} \quad (3.14)$$

em que o fasor de tensão \mathbf{V}_i^* é incógnito.

Para que o conceito de fluxo de potência seja melhor explorado, considere o diagrama unifilar mostrado na figura 3.8.

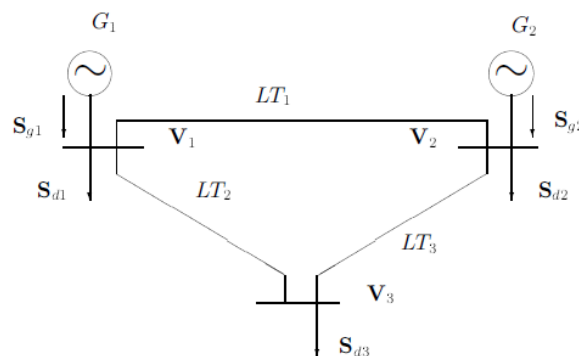


Figura 3.8 – Diagrama unifilar - Fluxo de potência.

Considerando o diagrama unifilar da figura 3.8, cada barra do sistema elétrico possui seis variáveis.

- Barra 1: $P_{g1}, P_{d1}, Q_{g1}, Q_{d1}, V_1, \delta_1$
- Barra 2: $P_{g2}, P_{d2}, Q_{g2}, Q_{d2}, V_2, \delta_2$
- Barra 3: $P_{g3}, P_{d3}, Q_{g3}, Q_{d3}, V_3, \delta_3$

Uma forma de simplificação da representação do sistema é a modelagem por injeção de potência da barra. Consiste em reduzir o número de variáveis associadas a cada barra por meio do agrupamento das potência de geração e demanda. O resultado desse processo está descrito no conjunto de equações listadas abaixo.

$$\mathbf{S}_1 = \mathbf{S}_{g1} - \mathbf{S}_{d1} = (\mathbf{P}_{g1} - \mathbf{P}_{d1}) + j(\mathbf{Q}_{g1} - \mathbf{Q}_{d1}) = \mathbf{P}_1 + j\mathbf{Q}_1 \quad (3.15)$$

$$\mathbf{S}_2 = \mathbf{S}_{g2} - \mathbf{S}_{d2} = (\mathbf{P}_{g2} - \mathbf{P}_{d2}) + j(\mathbf{Q}_{g2} - \mathbf{Q}_{d2}) = \mathbf{P}_2 + j\mathbf{Q}_2 \quad (3.16)$$

$$\mathbf{S}_3 = \mathbf{S}_{g3} - \mathbf{S}_{d3} = (\mathbf{P}_{g3} - \mathbf{P}_{d3}) + j(\mathbf{Q}_{g3} - \mathbf{Q}_{d3}) = \mathbf{P}_3 + j\mathbf{Q}_3 \quad (3.17)$$

Por sua vez, as injeções de potência podem ser simplificadas considerando as injeções de corrente do sistema. As injeções de corrente que correspondem a geração e demanda de potência em cada barra do sistema podem ser representadas da seguinte forma:

$$\mathbf{J}_1 = \mathbf{J}_{g1} - \mathbf{J}_{d1} \quad (3.18)$$

$$\mathbf{J}_2 = \mathbf{J}_{g2} - \mathbf{J}_{d2} \quad (3.19)$$

$$\mathbf{J}_3 = \mathbf{J}_{g3} - \mathbf{J}_{d3} \quad (3.20)$$

Assumindo as simplificações, é possível determinar um circuito equivalente para o sistema mostrado na figura 3.8. O circuito equivalente está representado na figura 3.9.

Os parâmetros $\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2$ e \mathbf{y}_3 incluem as susceptâncias shunt das respectivas linhas de transmissão.

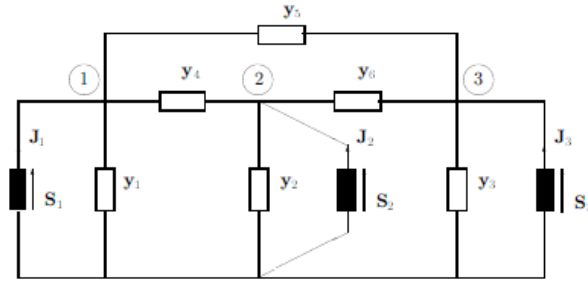


Figura 3.9 – Circuito equivalente - Fluxo de potência.

Aplicando o método dos nós ao circuito mostrado na figura 3.9, o sistema matricial (3.21) é obtido.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{J}_1 \\ \mathbf{J}_2 \\ \mathbf{J}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\mathbf{y}_1 + \mathbf{y}_4 + \mathbf{y}_5) & -\mathbf{y}_4 & -\mathbf{y}_5 \\ -\mathbf{y}_4 & (\mathbf{y}_2 + \mathbf{y}_4 + \mathbf{y}_6) & -\mathbf{y}_6 \\ -\mathbf{y}_5 & -\mathbf{y}_6 & (\mathbf{y}_3 + \mathbf{y}_5 + \mathbf{y}_6) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1 \\ \mathbf{V}_2 \\ \mathbf{V}_3 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

A forma compacta de representar o sistema matricial (3.21) está descrita em (3.22).

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_{barra} &= \mathbf{Y}_{barra} \mathbf{V}_{barra} \\ \mathbf{V}_{barra} &= \mathbf{Z}_{barra} \mathbf{J}_{barra} \end{aligned} \quad (3.22)$$

em que \mathbf{J}_{barra} representa o vetor de injeções de correntes nas barras do sistema, \mathbf{Y}_{barra} é a matriz admitância de barra do sistema, $\mathbf{Z}_{barra} = \mathbf{Y}_{barra}^{-1}$ é a matriz impedância de barra do sistema e \mathbf{V}_{barra} é o vetor de tensões de barra do sistema.

Na análise de fluxo de potência é possível verificar que o número de equações é menor do que o número de incógnitas, por exemplo, para o sistema de três barras mostrado anteriormente temos 6 equações e 18 incógnitas. Para que o sistema possa ser resolvido um conjunto de 12 variáveis deve ser definido previamente, esse problema pode ser resolvido considerando os tópicos abaixo:

- O valor do ângulo e da tensão da barra de referência pode ser especificados previamente;
- As demandas totais de potência ativa e reativa são variáveis conhecidas previamente.
- O módulo da tensão nas barras ou a geração de potência reativa das barras de geração são variáveis controladas, portanto conhecidas previamente.

3.4.1 Fluxo de Potência Generalizado

A análise do fluxo de potência pode ser generalizada para um sistema que contém i nós. Com base nas leis de Kirchoff,

$$\frac{\mathbf{S}_i^*}{\mathbf{V}_i^*} = \sum_{k=1}^n \mathbf{Y}_{ik} \mathbf{V}_k \quad (3.23)$$

reescrevendo (3.23), temos:

$$\mathbf{S}_i^* = \mathbf{V}_i^* \sum_{k=1}^n \mathbf{Y}_{ik} \mathbf{V}_k \quad (3.24)$$

escrevendo (3.24) em coordenadas polares, temos:

$$\mathbf{S}_i^* = (V_i \angle -\delta_i) \sum_{k=1}^n \mathbf{Y}_{ik} (V_k \angle \delta_k) \quad (3.25)$$

$$\mathbf{S}_i^* = V_i \sum_{k=1}^n \mathbf{Y}_{ik} (V_k \angle \delta_{ki}) \quad (3.26)$$

em que $\delta_{ki} = \delta_k - \delta_i$.

A variável \mathbf{S}_i^* é um número complexo que representa a potência aparente, desta forma, a parte real corresponde a potência ativa e a parte imaginária a potência reativa. Separando as partes real e imaginária de \mathbf{S}_i^* , temos:

$$P_i(\mathbf{V}, \delta) = V_i \sum_{k=1}^n (G_{ik} \cos(\delta_{ik}) + B_{ik} \sin(\delta_{ik})) V_k \quad (3.27)$$

$$Q_i(\mathbf{V}, \delta) = V_i \sum_{k=1}^n (G_{ik} \sin(\delta_{ik}) - B_{ik} \cos(\delta_{ik})) V_k \quad (3.28)$$

em que G_{ik} e B_{ik} são elementos da matriz admitância de barra.

A equação de tensão nodal complexa pode ser escrita em forma matricial, Equação (3.29).

$$\mathbf{YV} = \mathbf{I} \quad (3.29)$$

em que \mathbf{I} representa a matriz nodal de correntes injetadas, o calculo de \mathbf{I} está descrito na Equação (3.30).

$$\mathbf{I}_i = \frac{\mathbf{S}_i^*}{\mathbf{V}_i^*} \quad (3.30)$$

em que \mathbf{S}_i^* é a geração líquida de potência aparente na barra i , assim

$$\mathbf{S}_i^* = (P_{gi} - P_{di}) - j(Q_{gi} - Q_{di}) = P_i - jQ_i \quad (3.31)$$

O principal objetivo do estudo de fluxo de potência em sistemas elétricos é a obtenção das tensões complexas, módulo e ângulo, em cada barra do sistema, obtendo esses valores e considerando a topologia e os parâmetros característicos do sistema é possível calcular o fluxo de potência ativa e reativa nas linhas de transmissão.

3.4.2 Cálculo de Perdas de Potência Ativa e Reativa

Neste trabalho, o objetivo principal é selecionar e alocar DLCCs em sistemas elétricos. Sabe-se que a inserção de um dispositivo limitador influencia no fluxo de potência do sistema e nas perdas ativas e reativas das linhas de transmissão.

A análise de fluxo de potência foi integrada a um algoritmo evolucionário multiobjetivo para verificar qual o impacto, em termos de perdas ativas, da inserção de DLCCs no sistema, o objetivo é definir qual valor e configuração do dispositivo limitador é mais adequada para limitar a corrente de falta sem prejudicar significativamente o fluxo de potência e as perdas ativas.

Após a resolução do sistema de equações que definem o sistema elétrico, é possível calcular as perdas ativas e reativas usando as fórmulas (3.32) e (3.33). Considerando o fluxo de potência da barra k para a barra m .

$$P_{perdas} = P_{km} + P_{mk} = g_{km}(V_k^2 + V_m^2 - 2V_kV_m\cos\theta_{km}) \quad (3.32)$$

$$Q_{perdas} = Q_{km} + Q_{mk} = -b_{km}^{sh}(V_k^2 + V_m^2) - b_{km}(V_k^2 + V_m^2 - 2V_kV_m\cos\theta_{km}) \quad (3.33)$$

3.4.3 Método de NR aplicado ao Problema de Fluxo de Potência

O método de NR é uma técnica de cálculo numérico utilizada para determinar raízes reais de equações polinomiais lineares e não-lineares. Para isso, é definida uma aproximação inicial e calcula-se a derivada da função nesse ponto e a interseção com o eixo das abcissas, desta forma é possível encontrar boas aproximações para a raiz da função. Este processo é repetido num método iterativo, até que a raiz da função ou uma boa aproximação seja encontrada. O método de NR está descrito com detalhes em diversos trabalhos, alguns exemplos são Tjalling J. (71), Froberg (72) e George (73).

Sabe-se que os sistemas elétricos podem ser representados por um conjunto de equações não lineares. Para aplicar o método de NR no problema de fluxo de potência de

forma adequada, as equações que definem o sistema elétrico devem ser escritas da seguinte forma: $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$. Utilizar as equações do sistema elétrico na forma polar é mais adequado para aplicação do método de NR.

Na Equação (3.34) é apresentada a equação geral do método de NR aplicada ao problema de fluxo de potência. É importante ressaltar que o vetor que representa as incógnitas do sistema é representado por $\Delta \mathbf{V}/\mathbf{V}$ para as barras PQ , isso significa que cada elemento deste vetor é definido por $\Delta V_i/V_i$. O principal objetivo dessa mudança é facilitar o cálculo dos elementos da matriz Jacobiana.

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P}_{barras} & PV|PQ \\ \Delta \mathbf{Q}_{barras} & PQ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{N} \\ \mathbf{J} & \mathbf{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_{barras} & PV|PQ \\ \Delta \mathbf{V}/\mathbf{V}_{barras} & PQ \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

Os elementos das matrizes \mathbf{H} , \mathbf{N} , \mathbf{J} e \mathbf{L} são definidos da seguinte forma:

$$H_{ii} = \partial P_i / \partial \delta_i = -Q_i^{calc} B_{ii} \quad (3.35)$$

$$H_{ik} = \partial P_i / \partial \delta_k = V_i (G_{ik} \text{sen} \delta_{ik} - B_{ik} \text{cos} \delta_{ik}) V_k \quad (3.36)$$

$$J_{ii} = \partial Q_i / \partial \delta_i = P_i^{calc} - V_i^2 G_{ii} \quad (3.37)$$

$$J_{ik} = \partial Q_i / \partial \delta_k = -V_i (G_{ik} \text{cos} \delta_{ik} + B_{ik} \text{sen} \delta_{ik}) V_k \quad (3.38)$$

$$N_{ii} = V_i \partial P_i / \partial V_i = P_i^{calc} + V_i^2 G_{ii} \quad (3.39)$$

$$N_{ik} = V_k \partial P_i / \partial V_k = -J_{ik} \quad (3.40)$$

$$L_{ii} = V_i \partial Q_i / \partial V_i = Q_i^{calc} - V_i^2 G_{ii} \quad (3.41)$$

$$L_{ik} = H_{ik} \quad (3.42)$$

O método de NR foi adotado para este trabalho devido a sua taxa de convergência quadrática. Em geral essa técnica é mais rápida do que a maioria dos outros métodos. Outro fator significativo é a robustez do método, esta técnica é menos sensível a características que perturbam o sistema elétrico.

3.5 Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo foi apresentada a teoria básica de curto-circuito e a formulação matemática utilizada para o cálculo das correntes de falta em sistemas elétricos. Os conceitos sobre o cálculo de curto-circuito matricial foram destacados neste capítulo devido a sua importância para o desenvolvimento deste trabalho.

No próximo capítulo serão discutidos conceitos sobre métodos de busca heurísticos. O foco principal do capítulo seguinte é o estudo de algoritmos genéticos. Será feita uma descrição geral sobre os algoritmos genéticos e suas principais aplicações e características.

4 Algoritmos Genéticos

Algoritmos evolucionários usam modelos computacionais que simulam os processos naturais de evolução como uma ferramenta para solucionar problemas. Essa classe de algoritmos tem como objetivo comum a simulação da evolução das espécies através de seleção, mutação e reprodução, processos totalmente ligados ao desempenho dos indivíduos presentes em um espaço. Algoritmos Genéticos (AGs), são um conjunto específico dos algoritmos evolucionários. Trata-se de uma técnica heurística de busca baseada numa representação do processo biológico de evolução natural (74).

4.1 Heurística e Metaheurística

O problema de alocação de DLCCs é caracterizado como um problema de otimização combinatória. O objetivo principal é minimizar uma função de múltiplas variáveis, sujeita a restrições. Por ser um problema de otimização combinatória o espaço de soluções possíveis é finito e discreto. Por exemplo, uma quantidade finita de dispositivos a serem alocados em uma quantidade finita de barras da rede elétrica.

Os métodos de otimização clássicos utilizam derivadas para encontrar a solução ótima do sistema. Sabe-se que esse tipo de método consiste numa técnica muito confiável, sendo amplamente utilizados para resolver problemas de engenharia. Contudo a sua aplicação pode ser inadequada quando os problemas de otimização apresentam descontinuidades na função objetivo. Para resolução dos problemas com características discretas podem ser utilizados os métodos heurísticos.

Heurísticas podem ser definidas como algoritmos que não garantem que a solução encontrada será sempre a melhor entre todas, mas que sempre se aproximam ou encontram a melhor solução para o problema sob avaliação (75).

Os métodos meta-heurísticos utilizam critérios totalmente probabilísticos, desta forma podem trabalhar com qualquer problema de otimização. Alguns exemplos de meta-heurísticas são: Algoritmos Genéticos, Redes Neurais, Simulated Annealing e Colônia de Formigas (30).

4.2 Algoritmos Genéticos

Segundo (76) & (77) os algoritmos genéticos são mecanismos de busca inspirados na evolução das espécies. Combinam a sobrevivência dos melhores indivíduos com uma forma organizada e estruturada de troca de "informação" genética entre os indivíduos de

uma população. A estrutura genérica dos AGs permite a sua aplicação em diversas áreas da engenharia (78). Neste capítulo serão apresentados alguns conceitos básicos sobre os AGs.

Os AGs são capazes de encontrar a melhor solução considerando um grupo inicial de indivíduos como possíveis soluções (população inicial) (76). Desta forma, cada indivíduo representa uma solução para o sistema, a função do AG é avaliar cada uma dessas soluções e definir qual é a melhor considerando uma função-objetivo.

Segundo (74) as principais vantagens dos algoritmos genéticos sobre outras técnicas de busca e otimização são:

- Trabalham com funções discretas, contínuas ou mistas;
- Apropriados para resolver problemas de busca com espaços de busca muito grandes;
- Utilizam métodos de busca totalmente aleatórios;
- Apropriados para resolver problemas que utilizam funções descontínuas pois não utiliza derivadas para busca de soluções.
- Não usam os parâmetros originais do problema. Em vez disso, utilizam codificação de parâmetros para sua resolução.

Um AG é composto por várias etapas. Primeiro é formada a população inicial, composta por um conjunto de indivíduos escolhidos aleatoriamente e considerados como possíveis soluções para o sistema. A função-objetivo é a responsável por qualificar cada um dos indivíduos. Nesta etapa, cada uma das possíveis soluções recebe uma nota, denominada *fitness*. Traçando um paralelo com o processo natural, corresponde à capacidade de adaptação de cada indivíduo. Os indivíduos com as melhores notas são mantidos no processo evolutivo (76).

Os indivíduos selecionados para reprodução geram descendentes para a próxima geração por meio do operador *cruzamento*. A nova geração é composta por membros que são *filhos* dos indivíduos da população anterior. Alguns membros da nova geração podem sofrer mutações genéticas. Esse operador é aplicado para que o processo computacional seja muito semelhante ao processo evolutivo que ocorre na natureza. Ao sofrer mutação, o indivíduo ganha características diferentes das herdadas pelos pais. No processo de otimização, a mutação faz com que soluções que estejam convergindo para um ótimo local busquem outras direções(76)s.

No fluxograma apresentado na figura 4.1 é possível verificar as etapas de um AG básico.

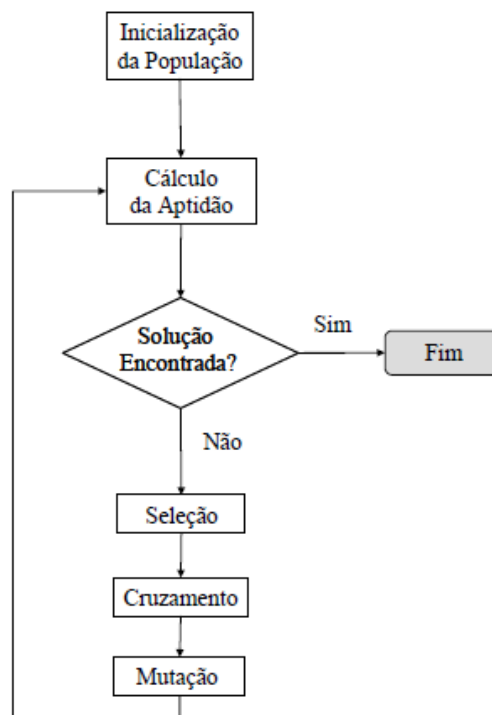


Figura 4.1 – Algoritmo Genético básico.

Para melhorar o desempenho do algoritmo genético é possível utilizar o operador elitismo, visto que essa ferramenta preserva os K indivíduos mais bem conceituados de cada geração, que são transferidos automaticamente para a próxima geração.

A seguir estão descritos alguns conceitos básicos sobre cada etapa do AG.

4.2.1 Codificação - Representação Cromossomial

É a forma utilizada pelo algoritmo genético para traduzir as informações do problema original de maneira viável para o processamento computacional. A codificação utilizada pelo AG é uma *string* de valores denominada cromossomo (74). O código binário é a forma mais simples de fazer a codificação, desta maneira cada um dos cromossomos é representado por uma sequência de zeros e uns. Esse tipo de codificação tem como principais benefícios a flexibilidade e a facilidade de variação dos parâmetros (79).

4.2.2 População Inicial

A população inicial é composta por um número predefinido N de indivíduos. Cada um dos membros da população inicial é formado aleatoriamente e o agrupamento desses indivíduos num grupo limitado é a população inicial (80). É possível adicionar algum conhecimento sobre o problema para a formação da população inicial, essa técnica é utilizada para que a codificação dos indivíduos esteja de acordo com os parâmetros originais do problema. Independente do método de formação escolhido, a população inicial

corresponde a um conjunto de soluções e, portanto, é importante que corresponda a uma região considerável do espaço de busca (81).

4.2.3 Função de Avaliação ou Função Aptidão

A função de avaliação é a forma utilizada pelos AGs para determinar a qualidade de um indivíduo como solução do problema. Trata-se da única ligação verdadeira do programa computacional com o problema real. Cada indivíduo das gerações é avaliado por essa função e recebe uma nota para o seu desempenho. Dependendo do valor *fitness* o indivíduo tem ou não maiores chances de influenciar nas próximas gerações (82).

É interessante ressaltar que a função de avaliação pode ser uma função discreta. A grande maioria dos problemas relacionados a engenharia estão sujeitos a restrições. Uma das formas de inserir restrições é a penalização, isto é, deve haver uma função que avalie se as restrições foram ou não violadas pela solução sob avaliação e, caso alguma restrição seja violada, a penalização é a soma (em problemas de minimização) ou subtração (em problemas de maximização) de um fator de penalidade à nota atribuída pela função-objetivo àquele indivíduo, fazendo com que esta solução se torne impraticável (74).

4.2.4 Operador Elitismo

Sistema de favorecimento das elites, em detrimento das outras camadas da sociedade.
MICHAELIS, H. (83)

O operador elitismo é uma operação básica realizada na população utilizada pelo AG. A implementação deste operador não é significativa no que diz respeito ao tempo de processamento, porém é muito significativa para o desempenho do algoritmo genético. O elitismo faz com que as soluções encontradas pelo AG, na geração sob avaliação, sejam sempre melhores que as soluções encontradas nas gerações anteriores(84).

O conceito básico de elitismo consiste na "sobrevivência" dos n indivíduos mais bem avaliados pela função-objetivo, ou seja, as melhores soluções da geração atual, desta forma, esses indivíduos devem ser transferidos automaticamente para a próxima geração, assim o material genético de boa qualidade será preservado (74).

Manter o melhor indivíduo da geração k na população da geração $k + 1$ proporciona a garantia de que o melhor indivíduo, avaliado pela função *fitness*, na geração $k + 1$ é pelo menos igual que o melhor indivíduo da geração atual (75).

4.2.5 Operador Seleção dos Pais

O método de seleção de pais simula o mecanismo de seleção natural. Basicamente, os indivíduos mais capazes são privilegiados e selecionados para gerar os filhos que compõem a próxima geração, isso não exclui os pais menos aptos: estes também podem gerar descendentes.

É importante destacar que indivíduos com avaliação ruim podem ter características genéticas que sejam promissoras e que podem ser combinadas na criação de indivíduos melhores (74).

Os métodos de seleção são utilizados para direcionar o processo do AG para o melhor espaço de busca, ou seja, é a forma que o AG utiliza para classificar as melhores soluções encontradas segundo a nota atribuída aos indivíduos pela função de avaliação (85). O desempenho obtido por cada membro da geração atual é o que o classifica como bom ou ruim.

Existem diversos tipos de seleção como, por exemplo:

- Seleção por Ranking;
- Método do Torneio;
- Método da Roleta Viciada;
- Método de Amostragem Estocástica Uniforme.

4.2.6 Operador Cruzamento

O operador cruzamento também é chamado de *crossover*. Após a seleção dos *pais* é necessário criar a nova população por meio do cruzamento dos indivíduos selecionados (86).

O objetivo desse operador é simular a reprodução sexuada dos indivíduos de uma espécie. A troca de material genético é feita de forma que os *filhos* recebam as características dos *pais* (87). Os tipos de cruzamentos mais utilizados são:

- Cruzamento de um ponto;
- Cruzamento de x pontos;
- Cruzamento Uniforme.

Informações e conceitos sobre os tipos de cruzamento podem ser encontradas em (86) e (88).

4.2.7 Operador Mutação

A nova geração é criada a partir do operador cruzamento. Depois do cruzamento, o operador mutação atua. Os indivíduos que compõem a nova população são submetidos a eventos de mutação.

O efeito do operador mutação sobre um cromossomo da nova geração é muito simples: é basicamente uma troca de um gene, correspondente a um *bit* na codificação do AG. Faz-se uma escolha aleatória de um membro da nova geração, aleatoriamente é selecionada uma posição no cromossomo desse indivíduo e o valor do bit é trocado: se é zero passa a ser um e vice-versa.

4.3 Considerações Finais do Capítulo

Foram descritos neste capítulo os conceitos e as características gerais dos algoritmos genéticos. O algoritmo genético proposto neste trabalho considera múltiplos objetivos a serem considerados para resolução do problema de alocação de DLCCs. No próximo capítulo serão apresentados os conceitos mais importantes sobre a otimização multiobjetivo.

5 Otimização Multiobjetivo

A otimização multiobjetivo é baseada na ideia de minimizar ou maximizar simultaneamente um grupo de objetivos, considerando as suas respectivas restrições. É importante destacar que o objetivo da otimização multiobjetivo é encontrar um conjunto de soluções, não somente uma única solução. Considerando todos os objetivos, as soluções que formam o conjunto solução não são melhores nem piores entre si, são diferentes umas das outras. Classificar uma solução como a mais adequada pode ser uma decisão com base em fatores externos ou ponderações que representem objetivos globais do problema proposto.

A definição de um problema de otimização multiobjetivo pode ser descrita da seguinte forma:

Maximizar ou minimizar

$$z = f(x) = (f_1(x), f_2(x), f_3(x) \dots f_r(x)) \quad (5.1)$$

Sujeito a

$$g(x) = (g_1(x), g_2(x), g_3(x) \dots g_p(x)) \leq b \quad (5.2)$$

em que $x = (x_1, x_2, x_3) \in X$ é o vetor de decisão, sendo X denominado *espaço de decisões*; o vetor $z = (z_1, z_2, z_3) \in Z$ é o vetor objetivo, em que Z é denominado *espaço objetivo*, constituindo a imagem de X . As restrições $g(x) \leq b, b \in \mathbb{R}^p$ e o espaço X definem o conjunto das soluções exequíveis: $X^* = (x \in X : g(x) \leq b)$.

5.1 Dominância de Pareto

Em geral, algoritmos de otimização multiobjetivo utilizam os conceitos de *dominância*. A metodologia consiste em comparar duas soluções e verificar se uma domina a outra. A definição a seguir apresenta os critérios utilizados para verificar a dominância entre soluções.

Definição 5.1 (Dominância de Pareto) *Considerando duas soluções, x_1 e x_2 , é possível afirmar que a solução x_1 domina a solução x_2 se as condições 1 e 2 são satisfeitas.*

1. A solução x_1 não é pior do que a solução x_2 em todos os objetivos;
2. A solução x_1 é estritamente melhor do que a solução x_2 em pelo menos um objetivo.

Considerando que qualquer uma das condições não foi satisfeita, é possível afirmar que a solução x_1 não domina a solução x_2 .

Para problemas de minimização com k funções-objetivo, sendo todos os objetivos problemas de minimização, é possível descrever a definição de dominância da seguinte forma:

Definição 5.2 (Dominância entre duas Soluções) Para qualquer $k \in (1, 2, 3, \dots, n)$, tal que $f_k(x_1) \leq f_k(x_2)$, existe $j \in (1, 2, 3, \dots, n)$, tal que $f_j(x_1) < f_j(x_2)$.

Ou seja, uma solução domina outra quando ela é menor ou igual (em um problema de minimização) com respeito a todos os seus objetivos, e é estritamente menor com respeito a pelo menos um deles (89).

As definições descritas anteriormente podem ser melhor entendidas considerando o exemplo discutido em (89). Na figura 5.1 é possível visualizar um conjunto de soluções e utilizar as definições anteriores para verificar quais são dominantes e quais são dominadas.

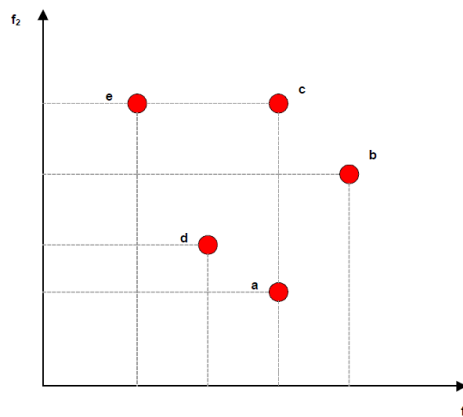


Figura 5.1 – Dominância entre soluções.

As soluções a , d e e formam um conjunto de soluções não-dominadas, este domina o conjunto de soluções formado por b e c . Pode-se verificar também que a solução a domina as soluções b e c . Desta forma, conclui-se que as soluções b e c são dominadas por uma das soluções do conjunto de soluções não-dominadas.

O conjunto de soluções de Pareto considera todo o espaço de busca. Considerando todas as possíveis soluções, caso seja definido um conjunto de soluções não-dominadas, este será o conjunto de Pareto-ótimo.

Na figura 5.2 é possível visualizar as definições discutidas para um problema de minimização com duas funções-objetivo.

Um dos maiores desafios dos problemas de otimização combinatória multiobjetivo é obter, como resultado final, um conjunto que contenha soluções executáveis, o mais

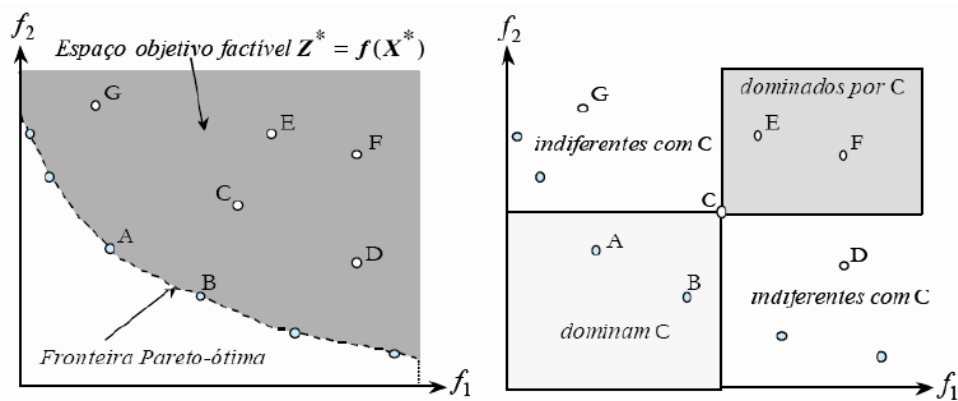


Figura 5.2 – Representação gráfica das definições de dominância de Pareto (3).

aproximado possível da fronteira Pareto-ótima, sem a obrigação de varrer todo o espaço de busca.

5.2 Classificação dos Métodos de Otimização Multiobjetivo

Os Métodos de Otimização Multiobjetivo podem ser classificados em três categorias. Estar enquadrado em umas das categorias depende do tamanho e complexidade do problema discutido, além disso depende do conhecimento do *projetista* sobre o problema. As categorias estão descritas a seguir.

- **Métodos a-priori:** Os critérios de busca são definidos antes de executar o algoritmo, são definidos parâmetros (pesos) para cada um dos objetivos, esses parâmetros são definidos pelo projetista de forma empírica. É um método que também pode ser executado em partes, cada parte da execução do algoritmo considera somente um objetivo, definindo o valor ótimo da etapa atual como o valor inicial da etapa seguinte.
- **Métodos a-posteriori:** O processo de busca é iniciado a fim de determinar o conjunto de soluções Pareto-ótimas. Obtido o conjunto-solução, o projetista é o responsável por definir qual das soluções é a melhor. Considerando problemas muito grandes, onde o espaço de busca é parcialmente ou totalmente desconhecido, esse método apresenta características adequadas para pesquisa de possíveis soluções.
- **Métodos interativos:** Esse tipo de método permite que o projetista interfira durante a execução do algoritmo. A finalidade é efetuar direcionamentos ao processo de busca. A intervenção do projetista pode levar o processo de busca a regiões específicas do espaço de busca, consideradas melhores para resolução do problema.

5.3 Métodos Clássicos de Otimização Multiobjetivo

Os métodos clássicos adicionam informações na formulação do algoritmo de busca. Os parâmetros adicionados são oriundos de informações que o projetista detém ou de prioridades que o mesmo deseja inserir no método de busca. A principal consequência dessa parametrização é a transformação do problema de otimização multiobjetivo em um problema mono-objetivo.

A vantagem mais significativa da utilização dos métodos clássicos é a garantia de que soluções de Pareto-ótimas serão encontradas, porém, os métodos clássicos transformam o problema de multiobjetivo original em um problema de otimização mono-objetivo. A introdução de ponderações interfere significativamente nos resultados obtidos, podendo fazer com que o algoritmo execute os procedimentos de busca de forma inadequada.

Os principais métodos clássicos podem ser vistos em (90), (91) e (92). A seguir, alguns deles estão brevemente descritos.

5.3.1 Método da Soma Ponderada.

Este método consiste em agrupar todas as funções-objetivo em uma única função, transformando o problema multiobjetivo em mono-objetivo. A nova função-objetivo é a soma ponderada das funções-objetivo que compõem o problema. A ponderação é feita utilizando multiplicadores (pesos) em cada uma das funções. O valor de cada multiplicador reflete a preferência por determinado objetivo. A função-objetivo do problema é expressa por:

$$F(x) = \sum_{k=1}^n w_k f_k(x) \quad (5.3)$$

em que:

$$\sum_{k=1}^n w_k = 1 \quad w_k \in [0, 1] \quad (5.4)$$

O método apresenta uma desvantagem significativa: o projetista deve atribuir os pesos que considere adequados aos objetivos. A finalidade é que os pesos w_k traduzam a importância de cada função-objetivo. Uma das exigências para executar o método adequadamente é que as funções-objetivo devem estar normalizadas.

Como exemplo, seja um problema de otimização multiobjetivo com duas funções-objetivo $f_1(x)$ e $f_2(x)$. Considere que o problema é de minimização e os pesos utilizados para as funções sejam w_1 e w_2 .

A função a ser minimizada tem a forma:

$$y = w_1 f_1(x) + w_2 f_2(x) \quad x \in S \quad (5.5)$$

A função-objetivo y pode ser escrita como uma combinação linear das funções $f_1(x)$ e $f_2(x)$. Assim:

$$f_2(x) = \frac{-w_1}{w_2} f_1(x) + \frac{y}{w_2} \quad (5.6)$$

A equação 5.6 é a equação de uma reta denominada L , com coeficiente angular $-w_1/w_2$ e coeficiente linear y/w_2 . As soluções do problema estão necessariamente ao longo da reta L .

Se as ponderações w_i estiverem corretas, a reta L será tangente a y^* em pontos que pertencem à fronteira de Pareto, e, desta forma, as soluções podem ser consideradas ótimas, conforme pode ser visto na figura 5.3.

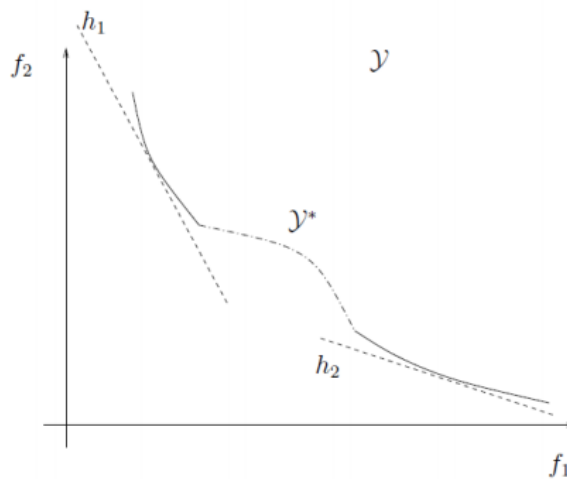


Figura 5.3 – Análise gráfica de espaço de busca não convexo.

De modo geral, nem todos os pontos Pareto-ótimos pertencem a uma reta de suporte. Na figura 5.3 é possível verificar essa afirmação, concluindo-se, portanto, que esses pontos não serão encontrados no processo de minimização da função-objetivo y .

Caso as ponderações w_i não sejam adequadas, a reta L passará dentro do espaço-solução y . Como as soluções do problemas devem estar necessariamente ao longo de L , conclui-se que essas soluções não são Pareto-ótimas de acordo com a definição. Na figura 5.4 estão apresentados exemplos de retas suporte com ponderações diferentes.

Na figura 5.4 é possível visualizar diferentes retas suporte, a reta h^* é um exemplo de ponderações adequadas, interceptando o campo de busca no ponto ótimo y^* , a reta h_1 cruza o espaço de busca internamente, esta é um exemplo de ponderações inadequadas.

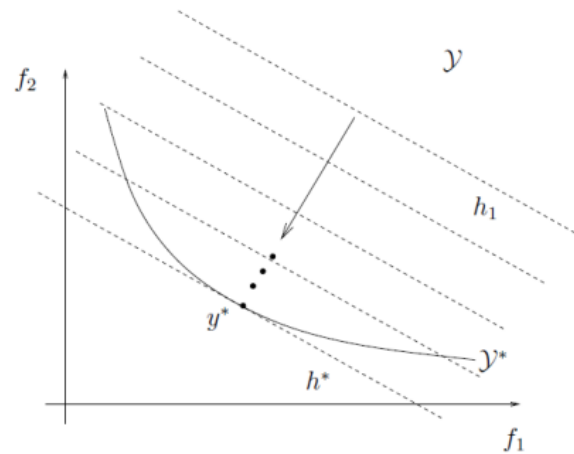


Figura 5.4 – Análise gráfica de retas suporte .

O processo de minimização faz a busca da reta que se encontra a mínima distância da origem do espaço dos objetivos. Dependendo das ponderações utilizadas essa reta pode estar ou não próxima da fronteira de Pareto.

O Método da Soma Ponderada possui excelente desempenho quando o espaço de busca é convexo na fronteira de Pareto (92). Observe na figura 5.5 que todos os pontos que pertencem a fronteira de Pareto podem ser interceptados por uma reta suporte, portanto, o método da soma ponderada possui um número maior de combinações das ponderações w_1 e w_2 que resultam em pontos pertencentes a fronteira de Pareto, soluções consideradas ótimas.

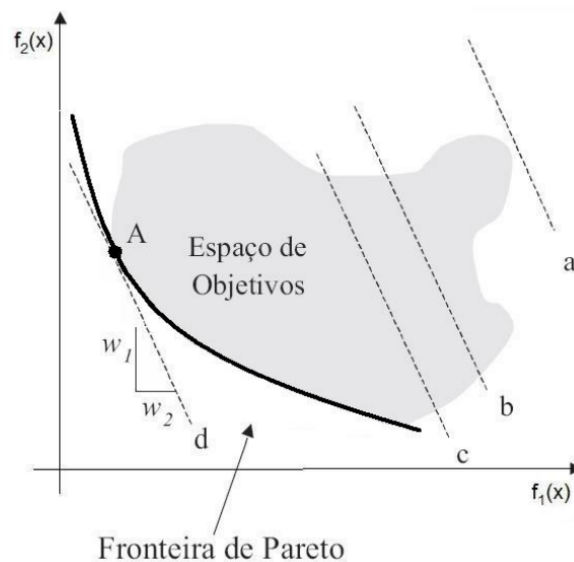


Figura 5.5 – Análise gráfica de retas suporte em espaço de busca convexo.

Na figura 5.5 é possível observar que a reta d intercepta o espaço de busca no ponto A , desta forma, o mesmo é uma solução ótima para o problema de minimização proposto. Na mesma figura é possível verificar exemplos de ponderações inadequadas, o resultados dessas ponderações são as retas a , b e c , retas suporte que interceptam o espaço de busca

em locais muito distantes do mínimo, encontrando soluções ruins para o problema de minimização proposto.

5.3.2 Método da Restrição - ε

O método da restrição - ε consiste em otimizar o objetivo considerado mais importante, sujeito a limitação dos demais objetivos do problema sob avaliação. Desta forma, a formulação matemática do método da restrição - ε é dada por:

$$\begin{aligned} &\text{Minimize } f_1(x) \\ &\text{sujeito a } f_i(x) \leq \varepsilon_i, \quad i = 2, 3, 4 \dots r \quad x \in X^* \end{aligned} \quad (5.7)$$

em que: ε_i são os limites superiores das funções objetivo $f_i(x)$, $i = 2, 3, 4 \dots r$.

Uma das vantagens do método da restrição - ε é a possibilidade de trabalhar em espaços de busca não convexos. Considerando variações adequadas para os limites ε_i , é possível encontrar um conjunto de soluções Pareto-ótimas. Para melhor entendimento do método da restrição - ε , (3) apresenta em seu trabalho um exemplo deste método considerando um problema com dois objetivos. Na figura 5.6 é possível verificar o espaço de busca do problema proposto.

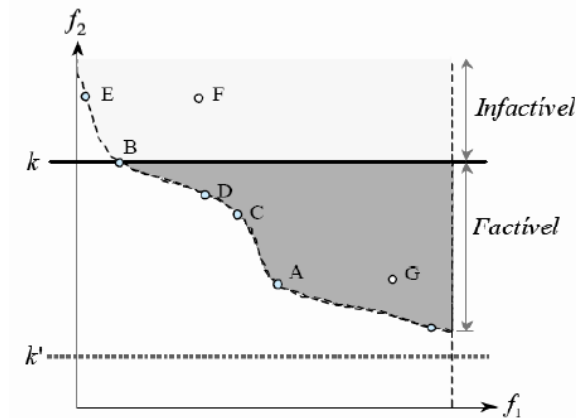


Figura 5.6 – Análise gráfica do método da restrição - ε (3).

O problema apresenta a minimização do objetivo $f_1(x)$ sujeito à restrição ε_2 . Neste caso, o espaço de busca é reduzido e possui as soluções A, B, C, D e G, portanto, é possível que o algoritmo determine um conjunto de soluções adequadas para o problema proposto. Assumindo que a restrição ε_2' não foi escolhida adequadamente, o espaço de busca pode ser vazio, desta forma, o algoritmo de busca não será capaz de encontrar soluções factíveis.

Com a finalidade de encontrar os valores adequados de ε_i , (90) apresenta um algoritmo para obtenção de valores de ε_i adequados para problemas de otimização.

Métodos de Programação por Metas

Basicamente os métodos de programação por metas são: Método de Programação por Metas Ponderado, Lexicográfico e Min-Max.

A base desse método é a busca por soluções que estejam próximas ou sejam iguais a uma referência pré-definida, que pode estar baseada em um ou mais objetivos. Caso o algoritmo de busca não consiga encontrar soluções iguais à referência, serão classificadas como mais adequadas as soluções mais semelhantes à solução referência. Caso o algoritmo encontre a solução referência, o objetivo é identificar a solução.

No trabalho de (92) estão apresentados detalhadamente os três tipos de programação por metas.

5.4 Algoritmos Genéticos Multiobjetivo

Os algoritmos genéticos são projetados para trabalhar com múltiplas soluções. Considerando uma população inicial como um conjunto de possíveis soluções para o problema, os AGs processam as informações de cada uma das soluções e verificam quais podem ser consideradas boas ou ruins para resolver o problema proposto. Essa característica é muito adequada para problemas com várias soluções possíveis, que é o caso dos problemas de otimização multiobjetivo (3).

Comparando os algoritmos evolucionários, principalmente os AGs, com os métodos clássicos de otimização multiobjetivo, é possível notar a vantagem de utilizar algoritmos genéticos. A otimização multiobjetivo possui dois objetivos principais: definir um conjunto solução que esteja o mais próximo possível da fronteira de Pareto e as soluções devem ser bem distribuídas, ou seja, devem estar bem espaçadas ao longo da fronteira (93).

Os AGs trabalham com uma população de soluções que possivelmente contêm informações sobre várias regiões do espaço de busca, desta forma, a possibilidade de encontrar o conjunto Pareto-ótimo ou uma aproximação dele é maior.

Outra vantagem é a não utilização de parâmetros (pesos) que transformam o problema multiobjetivo em mono-objetivo, além de não ser necessário o processo repetitivo utilizado em problemas mono-objetivo, obtendo um conjunto de soluções ótimas e não somente uma solução ótima para o problema proposto (94).

É importante destacar que na resolução de problemas multiobjetivo o conjunto de soluções encontrado deve ser bem distribuído, ou seja, as soluções contidas neste conjunto devem estar bem espaçadas. Esse fator é relevante porque considerando um conjunto solução bem distribuído na fronteira de Pareto, obtêm-se mais alternativas para a escolha da solução ótima.

Na literatura existem descrições de algoritmos capazes de garantir a maior diversidade de soluções no conjunto solução ótimo, esses algoritmos são capazes de avaliar a densidade de soluções por região no espaço de buscas e, desta forma, considerar mais adequadas para resolver o problema as soluções que ocupam regiões menos densas no espaço de busca (87).

Descrições e discussões sobre os algoritmos evolucionários multiobjetivo são encontrados com facilidade na literatura. Os algoritmos evolucionários mais importantes são:

VEGA - (*Vector Evaluated Genetic Algorithm*): Um tipo especial de operador *seleção* diferencia o VEGA do AG convencional. Os resultados obtidos com este algoritmo foram satisfatórios, porém algumas deficiências foram notadas no método de *seleção* utilizado. A *seleção* utilizada pelo VEGA classifica como melhores as soluções localizadas nos extremos da fronteira de Pareto, desta forma, as soluções estarão concentradas em regiões pequenas do espaço de busca, atestando a falta de diversidade do conjunto solução (95).

MOGA – (*Multiobjective Genetic Algorithm*): A metodologia adotada no MOGA aplica um processo de classificação. Cada indivíduo é classificado segundo o número de indivíduos que o dominam (94).

NPGA – (*Niched Pareto Genetic Algorithm*): A relação de dominância das soluções é o critério utilizado no operador seleção. É importante destacar que o método de seleção é o Torneio de k indivíduos, em geral $k = 10$. Além do critério de dominância é avaliado o critério de densidade de soluções, em caso de "empate" no primeiro critério o indivíduo com menor número de soluções vizinhas é considerado mais apto. A velocidade é um dos destaques do NPGA, a seleção é direcionada a uma subpopulação, portanto o processo é mais rápido. Uma desvantagem é a escolha do tamanho do torneio, isso pode afetar significativamente o desempenho do algoritmo (96).

NSGA – (*Nondominated Sorting Genetic Algorithm*): Inicialmente a população P é classificada em K subpopulações de acordo com a dominância de cada uma das soluções. O mesmo potencial de reprodução é atribuído a cada solução de uma dada fronteira. A preservação da diversidade genética é obtida da seguinte forma: as soluções que estão muito próximas umas das outras são penalizadas. O operador seleção prioriza as soluções dominantes, portanto a busca é direcionada a regiões dominantes. A convergência prematura da população poderia ser um problema nesta situação. A metodologia de diversificação é aplicada para distribuir da melhor forma as soluções sobre as regiões dominantes no espaço de busca (97).

NSGA II – (Nondominated Sorting Genetic Algorithm II): O NSGA II é um algoritmo baseado em ordenamento elitista por não-dominância. Inicialmente é gerada uma população P_o de tamanho N , os indivíduos são ordenados pelo critério de não-dominância. Assim cada uma das soluções recebe um rótulo que traduz a sua aptidão, soluções classificadas no nível 1 são as melhores (39).

Os indivíduos da população P_o são classificados em grupos, denominados frentes de Pareto F_k . As soluções pertencentes a cada conjunto possuem o mesmo nível de dominância. Um valor r , denominado grau de dominância, é atribuído a cada solução dos conjuntos F_k , de modo que as soluções com maior aptidão possuam maiores valores *fitness*, soluções que compõem uma frente F_k possuem o mesmo valor de r . A diversidade da população é preservada na atribuição do valor *fitness*. A aptidão de cada solução depende também do número de soluções localizadas ao redor da solução sob avaliação, essa medida é denominada de distância de *crowding*, também chamado na literatura de distância de aglomeração.

A aptidão das soluções pode ser descrita de modo genérico pela seguinte equação (39):

$$AP_i = \frac{1}{r_i} + d_i \quad (5.8)$$

em que r_i é o índice k da frente de Pareto a qual a solução pertence e d_i é a distância de aglomeração da solução sob avaliação.

A partir da população P_o uma nova população Q_o é formada utilizando os operadores *seleção* e *cruzamento*, segundo os critérios citados no parágrafo anterior, Q_o também é de tamanho N . A união das populações P_o e Q_o formam a população $R_o = P_o \cup Q_o$, de tamanho $2N$. Os critérios de classificação de soluções em frentes F_k e distância de *crowding* são aplicados na população R_o , desta forma as soluções estarão classificadas segundo a sua aptidão. A população de descendentes é formada pelas N melhores soluções de R_o . As N soluções menos aptas são descartadas e o processo é repetido até que o critério de parada seja atingido (39).

SPEA – (Strength Pareto Evolutionary Algorithm): O SPEA é um algoritmo elitista que constrói uma população externa P_{nd} de tamanho N_{max} , composta por soluções não-dominadas, a finalidade é fazer com que P_{nd} participe do processo de reprodução a cada geração. O cálculo do valor de aptidão de cada solução é proporcional ao número de soluções que certo indivíduo domina. Este método de atribuir o *fitness* das soluções garante que a busca seja direcionada às regiões das soluções dominantes (98).

Uma população inicial aleatória P_{op} de tamanho N é criada, em seguida é criada uma população externa P_{nd} inicialmente vazia. Os indivíduos classificados como dominantes da população P_{op} são copiados para a população P_{nd} . A união das populações P_{op} e P_{nd} formam a população $Q = P_{op} \cup P_{nd}$. A aptidão de Q é calculada em várias etapas,

inicialmente é verificado o valor *count*, número de indivíduos de P_{op} dominados por cada um dos indivíduos de P_{nd} .

$$s_i = \frac{count}{|P_{op}|} \quad (5.9)$$

Depois, o valor s_i é calculado, denominado *strength fitness*, é dado por:

$$s_j = 1 + \sum_{i \leq j} s_i \quad (5.10)$$

O que corresponde a soma de todos os valores *strength* de todos os indivíduos não-dominantes que dominam a solução sob avaliação. O valor atribuído a aptidão de cada indivíduo da população Q será igual a $1/s_j$. O valor N_{max} interfere diretamente no processo evolutivo. O número de indivíduos da população externa não pode ser muito grande, existem métodos que reduzem o número de soluções mantendo a diversidade da população. Uma dessas técnicas é o *Clustering*, também chamada de método médio de enlace, o objetivo é penalizar as soluções mais próximas. Essa técnica garante uma melhor propagação das soluções não-dominadas seja obtida (98).

SPEA 2 – (*Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2*): Assim como no SPEA, uma população externa é criada para armazenar as soluções não-dominadas. A população inicial P_o é composta por indivíduos formados aleatoriamente, N é o tamanho de P_o , e a população externa P_t inicialmente é vazia, com tamanho $N*$. Os indivíduos da população P_o são avaliados segundo o critério de dominância, as soluções não-dominadas são transferidas para a população P_t . A união das populações P_{op} e P_t formam a população $Q = P_{op} \cup P_t$. A aptidão das soluções da população Q é calculada em etapas. Primeiro é necessário determinar qual o valor *strength fitness* s_i , que corresponde ao número de soluções que a solução i domina em Q . Depois, o valor *raw fitness* é calculado, de acordo com a equação (38):

$$r_i = \sum_{j \in Q, j < i} s_j \quad (5.11)$$

O valor *raw fitness* é a soma das s_j das soluções j que dominam i na população Q , para as soluções não-dominadas tem-se $r_i = 0$. É possível afirmar que as soluções com um r_i elevado são dominadas por muitas soluções da população Q . Para casos em que existem muitas soluções não-dominantes, o SPEA2 pode ter dificuldades para definir a preferência por uma ou outra solução, devido a proximidade e semelhança das soluções não-dominadas. É possível resolver esse problema utilizando a informação de densidade *k-vizinhos*, em que a densidade em qualquer ponto do espaço de busca é definida como uma função decrescente em relação ao *k-ésimo* ponto mais próximo. A técnica funciona da seguinte

forma, para cada solução i da população Q são calculadas as distâncias para os $|Q| - 1$ indivíduos da população Q . As distâncias calculadas são ordenadas de forma crescente. A densidade d_i é calculada de acordo com a seguinte equação:

$$d_i = \frac{1}{\sigma_i^k + 2} \quad (5.12)$$

em que σ_i^k é a distância para seu k -vizinho mais próximo e $k = \sqrt{|Q|}$. A aptidão de cada solução de Q é calculada conforme equação:

$$F_i = r_i + d_i \quad (5.13)$$

Considerando que as soluções não-dominadas possuem $d_i < 1$ e $r_i = 0$, as mesmas terão $F_i < 1$, diferente das soluções dominadas que terão $F_i > 1$.

A seleção dos indivíduos que irão formar a população externa da nova geração é chamada de *environmental selection*. Esse processo copia as soluções não-dominadas para a geração P_{t+1} . Dependendo do número de indivíduos não-dominados da geração corrente pode haver incompatibilidade com o tamanho N^* da população externa da geração seguinte. Para resolver esse problema são consideradas três situações.

1. O número de soluções não-dominadas é igual ao tamanho de N^* . Neste caso, basta transferir os indivíduos para a população externa P_{t+1} .
2. O número de soluções não-dominadas é menor do que o tamanho de N^* . Nesta situação, a população externa P_{t+1} é preenchida com as melhores soluções dominadas de Q .
3. O número de soluções não-dominadas é maior ao tamanho de N^* . Neste caso, é necessário utilizar o algoritmo de corte do SPEA2 para eliminar as soluções excedentes.

O algoritmo de corte pode ser consultado em (99). O operador seleção por torneio é aplicado na população P_{t+1} para formar a população intermediária. Em seguida os operadores cruzamento e mutação são aplicados para formar a população normal de tamanho N , da próxima geração P_{t+1} (38).

5.5 Considerações Finais do Capítulo

Foram descritos neste capítulo conceitos, aplicações e características de otimização multiobjetivo e dos algoritmos genéticos multiobjetivo. O capítulo seguinte apresenta a formulação do problema e o método de solução utilizado para resolução do problema de alocação de DLCCs em sistemas elétricos.

Parte III

Formulação do Problema e Resultados

6 Formulação do Problema

O problema de seleção e alocação de DLCCs compreende a instalação dos dispositivos no sistema elétrico de forma a alcançar a minimização da corrente de curto-circuito, considerando também os custos referentes às perdas técnicas e o preço do dispositivo a ser instalado.

Para alcançar os objetivos, este trabalho propõe a resolução de um problema de otimização combinatória a ser solucionado por um algoritmo genético multiobjetivo. Solucionar o problema envolve determinar qual DLCC será instalado e a barra onde será alocado, possibilitando ao sistema condições de funcionamento mais adequadas que as condições originais.

Considerando que os sistemas utilizados para testes são grandes e que o número de combinações possíveis é muito elevado, avaliar todas as alternativas individualmente é inviável e demandaria muito tempo. Utilizando algoritmos genéticos, é possível avaliar diversas alternativas e escolher a mais adequada dentre as avaliadas. Essa metodologia auxilia na solução do problema.

Todo problema de engenharia considera restrições operacionais, assim, este trabalho adotou as seguintes premissas:

- Quanto menor o nível da corrente de curto-circuito e de perdas técnicas no sistema melhor será a solução;
- O número de DLCCs instalados deve ser no máximo cinco;
- O custo de instalação dos DLCCs deve estar de acordo com as limitações técnicas;
- O valor da corrente de curto-circuito nas barras do sistema não deve ser muito baixo, para que os disjuntores reconheçam que há uma contingência.

O algoritmo genético multiobjetivo proposto utilizado para resolução do problema possui funções específicas, capazes de realizar o cálculo de curto-circuito e fluxo de potência no sistema sob avaliação. Inicialmente é calculado o nível das correntes de curto-circuito nas barras e o fluxo de potência utilizando os parâmetros originais do sistema. Inicia-se o processo de busca utilizando um conjunto inicial de indivíduos, escolhidos aleatoriamente e considerados como "possíveis soluções", cada indivíduo é testado e o resultado obtido é comparado com o resultado dos parâmetros originais.

6.1 Análise Preliminar do Sistema

Os dados utilizados neste trabalho são oriundos de dois sistemas (100): IEEE 30 BUS e IEEE 57 BUS. Inicialmente foi realizado um estudo dos parâmetros originais do sistema para identificar quais barras do sistema estão sujeitas a problemas de superação por corrente de curto-circuito. Nesta análise foram verificados os níveis de superação por corrente de falta das barras.

Na avaliação de superação foram consideradas as seguintes situações na simulação de curto-circuito:

- Curto-circuito trifásico nas barras do sistema;
- Curto-circuito monofásico nas barras do sistema;
- Todas as barras com tensão de pré-falta iguais a 1 pu.

Para obter uma avaliação prévia do espaço de busca também foi utilizada a análise de sensibilidade do sistema. Essa técnica, chamada de técnica de sensibilidade, foi utilizada com sucesso por (36) para restringir o espaço de busca e aumentar a eficácia do processo de otimização. A metodologia consiste em realizar uma análise prévia de todos os locais onde é possível instalar os DLCCs e ordenar as barras do sistema mais sensíveis à minimização das correntes de falta.

As barras dos sistemas são os locais sob avaliação. É possível determinar quais barras do sistema são mais sensíveis e organizá-las em um "*ranking*".

A técnica é aplicada da seguinte forma: a corrente de curto-circuito do sistema é calculada sem que nenhum dispositivo limitador esteja instalado. A relação de sensibilidade é dada por ΔI_{cc}^l e corresponde à variação da corrente de falta antes e depois da instalação de um DLCC genérico. O dispositivo genérico inserido no sistema para avaliar a sensibilidade das barras corresponde a uma impedância de 1 pu. Todas as barras do sistemas são avaliadas e a relação de sensibilidade é dada por 6.1:

$$\Delta I_{cc}^l = [\Delta I_{cc(l)} \quad \Delta I_{cc(l+1)} \quad \cdots \quad \Delta I_{cc(l+10)} \quad \cdots \quad \Delta I_{cc(l^*)}] \quad (6.1)$$

em que:

$$\Delta I_{cc}^l = I_{cc(l)} - I_{cc(l)}^D, \quad l = 1, \dots, l^* \quad (6.2)$$

sendo:

ΔI_{cc}^l é o vetor relação de sensibilidade das correntes de falta em cada barra, quando alocada uma impedância na barra l ;

$\Delta I_{cc(l)}$ é a variação da corrente de curto-circuito na barra l , sendo l^* a última barra do sistema;

$I_{cc(l)}$ é a corrente de falta na barra l , antes da alocação da impedância de 1 pu;

$I_{cc(l)}^D$ é a corrente de falta na barra l , depois da alocação da impedância de 1 pu.

A equação 6.3 classifica de forma ordenada os locais mais sensíveis do sistema sob avaliação.

$$S_i = [s_i(1) \quad s_i(2) \quad s_i(3) \quad \cdots \quad s_i(10) \quad \cdots \quad s_i(l^*)]^T \quad (6.3)$$

em que:

S_i é o vetor em ordem decrescente de sensibilidade dos locais mais sensíveis a redução de corrente de falta;

$s_i(1)$ é o local mais sensível do sistema a redução de corrente de falta;

$s_i(l^*)$ é o local menos sensível do sistema a redução de corrente de falta;

Para cada sistema avaliado neste trabalho são classificados os k locais mais sensíveis à redução da corrente de curto-circuito. As barras selecionadas mais adequadas para instalação dos DLCCs são selecionadas, em seguida é feita a comparação entre as barras escolhidas pelo algoritmo genético para alocação e as barras mais sensíveis, obtidas na análise de sensibilidade.

6.2 Algoritmo Genético NSGA II

Para resolver o problema de minimização proposto neste trabalho foi implementado o algoritmo multiobjetivo NSGA II. Na figura 6.1 é apresentado um fluxograma do NSGA-II com as principais etapas.

Algumas premissas adotadas para o desenvolvimento do algoritmo estão descritas abaixo:

1. A quantidade de bits do cromossomo foi definida de acordo com o tamanho do sistema sob avaliação;
2. A quantidade de indivíduos da população inicial é 100;
3. O critério de parada é a quantidade de iterações.

As principais características dos operadores utilizados no algoritmo NSGA II estão descritas a seguir.

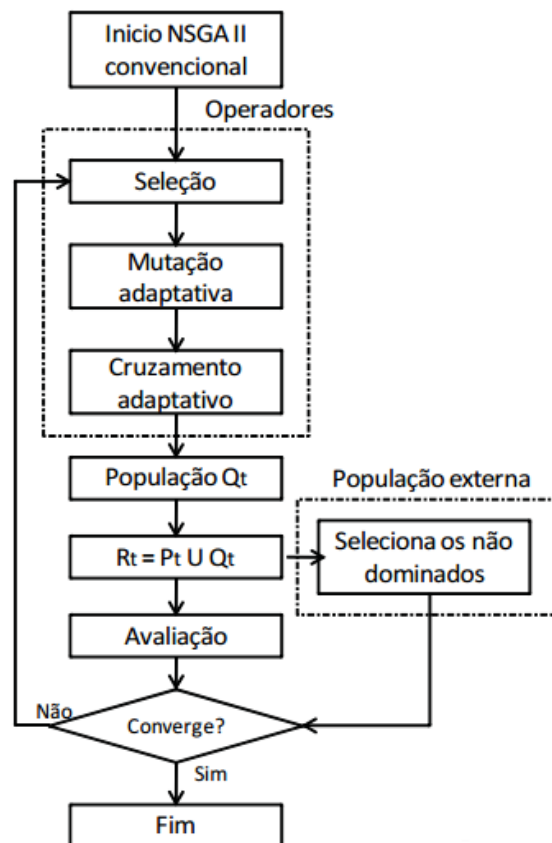


Figura 6.1 – Fluxograma do NSGA-II. (4)

6.2.1 População Inicial

A população inicial utilizada neste trabalho foi gerada aleatoriamente. Inicialmente são gerados N indivíduos de forma aleatória, estatisticamente os indivíduos são independentes, portanto não há qualquer relação ou influência na criação dos membros da população.

O desempenho do algoritmo genético está muito conectado ao tamanho da população inicial utilizada. Utilizando a inicialização aleatória, é possível obter uma boa disposição das soluções no espaço de busca. Porém, se o número de indivíduos for pequeno, a variedade genética da população também será pequena e, portanto, não haverá uma exploração adequada no espaço de busca.

A aptidão de cada elemento da população é baseada no conceito de classificação por não-dominância. Essa técnica classifica os indivíduos da população inicial em diferentes níveis. Comparando cada indivíduo da população com os demais, é possível determinar quais são os dominantes e os dominados. O conjunto de indivíduos não-dominados forma a primeira frente, este conjunto é separado da população inicial e o critério é novamente aplicado nos indivíduos restantes, desta forma os níveis de dominância são formados. Na figura 6.2 é apresentada uma ilustração do processo de classificação por não-dominância.

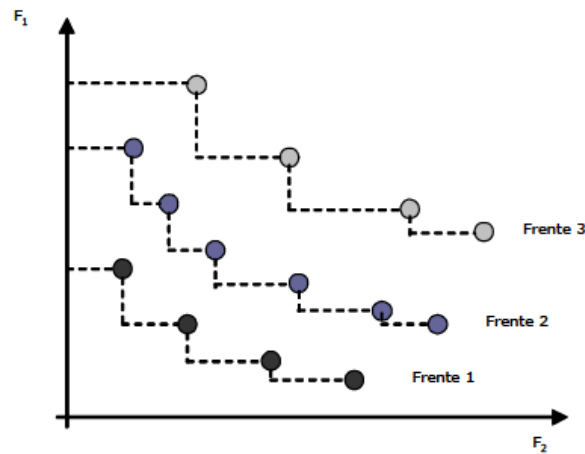


Figura 6.2 – Frentes de não-dominância.

No tópico a seguir é descrita a forma como o NSGA II calcula a aptidão de cada indivíduo da população.

6.2.2 Função Objetivo

A função objetivo é utilizada pelo algoritmo genético para qualificar cada um dos indivíduos como possível solução do problema proposto. A qualificação das soluções é dada pelo atributo *fitness* que cada indivíduo recebe, dependendo do valor atribuído o indivíduo possui ou não maiores chances de sobrevivência.

Durante o processo de busca é desejável que a população possua grande diversidade de elementos. Para alcançar esse objetivo o NSGA II utiliza uma técnica chamada *crowded-comparison*, essa técnica tem como base o conceito de densidade conhecido como *density-estimation metric*.

Para calcular a *density-estimation metric* de cada indivíduo da população calcula-se a distância média entre a solução sob avaliação e as duas soluções vizinhas, utilizando o valor de suas funções objetivo como pontos de interesse. O valor obtido com esse cálculo traduz uma estimativa de um cuboide sendo o vértice o ponto da solução vizinha mais próxima, como se mostra na figura 6.3.

Com base na figura 6.3 é possível verificar que o valor denominado distância de agrupamento (*crowding distance*) é o comprimento médio dos lados do cuboide. Para que esse procedimento seja executado é necessário calcular o valor de f_1 e f_2 para cada um dos indivíduos da população e ordená-los de forma ascendente. O cálculo de distância de agrupamento é o seguinte:

1. $l = |P_i| \rightarrow$ Número de indivíduos da população;

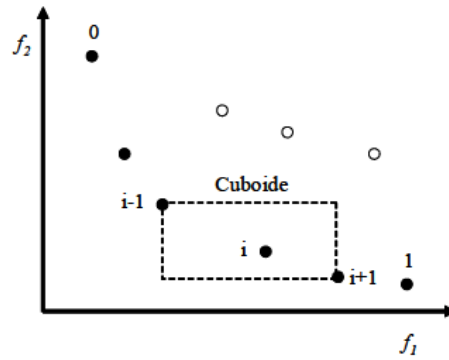


Figura 6.3 – Distância de agrupamento.

2. Inicialmente a distância de agrupamento dos indivíduos é zero $dag_i = 0$ para cada objetivo k ;
3. $P = \text{ordena}(P, k)$ Ordena-se a população usando os valores de cada função objetivo;
4. $dag_1 = \infty$ e $dag_l = \infty$ Definido o intervalo para valores extremos;
5. Para os indivíduos $i = 2 \dots l$ calcula-se a distância de agrupamento;
6. $dag_i = dag_i + \frac{P(i+1)_k - P(i-1)_k}{f_k^{\max} - f_k^{\min}}$

em que $P(i)_k$ é o valor de um indivíduo i que pertence à população P na função-objetivo k e f_k^{\max} e f_k^{\min} são os valores de máximo e mínimo da função-objetivo k .

Depois de calculada a distância de agrupamento para cada indivíduo é possível comparar dois integrantes da população que estejam na mesma frente não dominada ou dominada. O indivíduo com maior distância de agrupamento possui menos soluções em sua vizinhança e, portanto, é mais desejável.

A função-objetivo utilizada neste trabalho está representada na Equação 6.4:

$$FO = [f_1, f_2] \quad (6.4)$$

em que:

FO: é a função objetivo a ser minimizada;

f_1 : representa o nível de curto-circuito no sistema;

f_2 : representa o custo total da instalação do(s) dispositivo(s);

A representação matemática das funções que compõem FO estão descritas em 6.5 e 6.6.

$$f_1 = \sum_{i=1}^b ICC_{b(i)} \quad (6.5)$$

em que b é o número de barras do sistema e $ICCb_{(i)}$ é a corrente de curto-circuito na barra i .

$$f_2 = \sum_{i=1}^b Custo_{TOTAL} \quad (6.6)$$

A função f_2 é composta por duas parcelas, são estas:

$$f_{21} = \sum_{i=1}^k CustoDispositivo \quad (6.7)$$

em que k é o número de dispositivos instalados no sistema.

$$f_{22} = \sum_{i=1}^b CustoPerdasTecnicas \quad (6.8)$$

A FO utilizada neste trabalho considera a minimização da corrente de curto-circuito em conjunto com a minimização do custo total de instalação e minimização das perdas técnicas. Por esse motivo, um algoritmo multiobjetivo foi utilizado, o NSGA II.

6.2.3 Seleção dos Pais com base na Distância de Aglomeração

O método do Torneio é amplamente utilizado, devido à sua simplicidade e eficiência (23). Neste trabalho foi aplicado o método do torneio de tamanho dois ($T = 2$), pois segundo (75), de modo geral, os resultados obtidos com este método são melhores do que os do método da Roleta Viciada, também largamente utilizado.

O método do Torneio no algoritmo NSGA-II funciona da seguinte forma: são selecionados aleatoriamente e com probabilidades iguais 2 indivíduos da população atual, o membro que possuir a melhor avaliação segundo a função aptidão é selecionado para ser um dos "pais" que vão gerar os indivíduos da geração seguinte (23).

É importante ressaltar que a aptidão dos indivíduos é avaliada com base no seu valor *fitness*, este é composto por dois parâmetros, o índice da frente de dominância a qual o indivíduo pertence e a distância de aglomeração do mesmo (93). Um indivíduo localizado numa frente de dominância de baixo índice e distância de aglomeração alta possui maiores chances de ser selecionado. A definição abaixo descreve de forma simplificada o método de seleção citado(92).

Definição 6.1 *Uma solução k vence uma solução j se qualquer umas das seguintes condições é verdadeira:*

1. *Se a solução k está em uma frente de dominância com índice menor. Por exemplo, se $Ind_k = 1$ e $Ind_j = 2$ a solução k domina a solução j e portanto é a melhor escolha.*

2. Se $Ind_k = Ind_j$, vence o torneio a solução com maior distância de aglomeração.

O processo de seleção é repetido até que se obtenha um número de "pais" igual à metade do número de indivíduos da população atual. Cada "par de pais" gera dois novos filhos para a população posterior, desta forma as gerações possuem tamanhos fixos (74).

6.2.4 Cruzamento

Neste trabalho foi adotado o Cruzamento uniforme. Este método consiste em atribuir os genes aos indivíduos descendentes copiando o gene de um dos pais selecionados. O gene a ser transferido de pai para filho é escolhido com base em uma Máscara de Cruzamento, definida de forma aleatória.

A Máscara de Cruzamento possui o mesmo tamanho do cromossomo de um indivíduo. Percorrem-se todas as posições da máscara, se o valor da posição corrente é 0, o gene do primeiro pai é copiado para o descendente, caso o valor corrente da máscara seja 1, o gene do segundo pai será copiado para o descendente. Na figura 6.4 é possível visualizar o processo de cruzamento uniforme.

Máscara de Cruzamento	0	1	0	1	0	0	1
Pai [1]	1	1	0	1	1	0	1
Pai[2]	0	0	0	1	1	1	0
Filho	1	0	0	1	1	0	0

Figura 6.4 – Cruzamento uniforme.

6.2.5 Mutação

Neste trabalho foi utilizada a mutação por troca de bit. O processo pode ser visualizado na figura 6.5.

Indivíduo.							
1	1	0	1	0	1	0	1
Indivíduo após a mutação.							
1	1	0	0	0	1	0	1

Figura 6.5 – Mutação por troca de bit.

Deb e Goyal em (101) apresentaram uma metodologia diferenciada para o cálculo da taxa de mutação, chamada Mutação Adaptativa, que foi utilizada neste trabalho.

A mutação adaptativa utiliza parâmetros do algoritmo NSGA-II para aumentar o desempenho do algoritmo. O conceito de distância de aglomeração utilizado no NSGA-II é importante para a aplicação da mutação adaptativa. Sabe-se que no início do processo de busca as soluções estão espalhadas aleatoriamente no espaço de soluções, e, por

consequência, distantes da fronteira ótima de Pareto. Soluções muito dispersas no espaço de busca possuem distâncias de aglomeração grandes e, à medida que as gerações vão passando, as soluções se aproximam da fronteira de Pareto, fazendo com que as distâncias de aglomeração sejam menores.

Segundo Deb e Goyal (101), a aplicação de altas taxas de mutação no início do processo resultaria num acréscimo de velocidade no processo de aproximação da fronteira de Pareto. Considerando as etapas medianas e finais do processo de busca, é recomendado que a taxa de mutação seja suave, evitando que soluções muito boas sejam perdidas e proporcionando uma aproximação mais suave da fronteira de Pareto.

O NSGA-II possui uma técnica própria para manutenção da diversidade de soluções, a distância de aglomeração. Esse parâmetro pode ser utilizado para conduzir as variações na taxa de mutação ao longo do processo. O valor inicial da taxa de mutação adotado neste trabalho foi de 1%, na literatura observa-se taxas de mutação entre 0.5% e 5%.

6.2.6 Formação da População de Descendentes

O processo de formação da população de descendentes é iniciado com a avaliação da população de pais. É importante ressaltar que a população inicial é formada por indivíduos escolhidos aleatoriamente. A partir dos resultados obtidos pelos operadores Seleção, Torneio, Cruzamento e Mutação é formada a população de descendentes. O NSGA-II é um algoritmo elitista, os indivíduos da população de descendentes são formados com as informações genéticas dos indivíduos dominantes da população de pais.

Depois de formada a população de descendentes (D), ao invés de aplicar os operadores do NSGA-II e distribuir os indivíduos em suas respectivas frentes, primeiramente a população de pais (P) é unida à população de filhos (D), formando uma única população (T) de tamanho $2N$. Em seguida, os operadores do algoritmo NSGA-II atuam e a população inteira (T) é ordenada em frentes de dominância.

A vantagem em utilizar essa técnica é a obtenção de uma certificação global de dominância ou não-dominância entre os indivíduos da população de pais e da população de filhos. A desvantagem é o maior esforço para ordenar uma população de tamanho $2N$.

As populações utilizadas no NSGA-II devem ter tamanho N . Para que a população de descendentes esteja em conformidade com o processo é necessário eliminar os N indivíduos excedentes. O processo de eliminação ocorre após o processo de classificação dos indivíduos em frentes de dominância. Os indivíduos classificados nas melhores frentes e com maior distância de aglomeração são os primeiros a serem inseridos na população final de descendentes. Este procedimento é repetido até que a população final de descendentes tenha tamanho N , os demais indivíduos são eliminados do processo. Na figura 6.6, é possível visualizar o procedimento de formação da população de descendentes no NSGA-II.

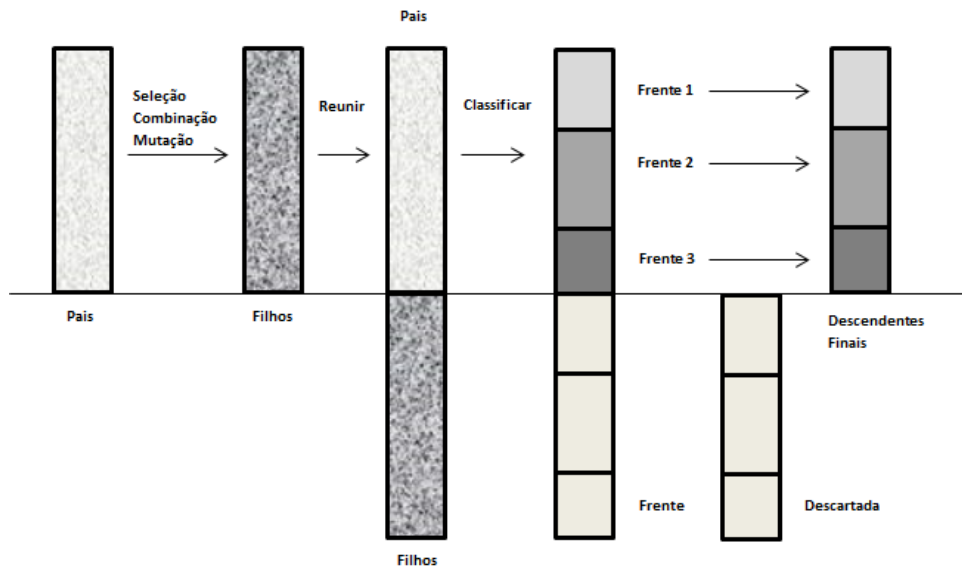


Figura 6.6 – Forma o da popula o de descendentes - NSGA-II . (5)

6.2.7 Codifica o

Os cromossomos s o formados por um conjunto de bits que representam os par metros originais do sistema. A maneira como   feita a codifica o est  totalmente conectada ao problema a ser resolvido. Devido a simplicidade de implementa o, a representa o bin ria foi adotada nesta pesquisa. Cada cromossomo representa um indiv duo e   composto por um n mero finito de genes, representados computacionalmente por bits.

A codifica o utilizada neste trabalho foi adotada para atender os requisitos exigidos pelo sistema sob avalia o, portanto cada um dos sistemas tem uma codifica o espec fica, que ser o apresentadas a seguir.

6.2.8 Codifica o do cromossomo para o sistema de 30 barras.

- N mero de barras do sistema: 30;
- N mero de DLCCs dispon veis para instala o: 5;
- Tipos de DLCCs dispon veis: 2.

O cromossomo que representa um indiv duo   composto por cinco partes, cada parte possui configura o semelhante a apresentada na figura 6.7.

CROMOSSOMO 30 BUS.									
Barra					Imped.			Tipo	
1	0	0	1	0	1	1	0	1	

Figura 6.7 – Parte 1 do cromossomo - Sistema 30 barras.

Os cinco primeiros bits representam a barra onde o DLCC será alocado. É possível representar 32 barras diferentes ($2^5 = 32$). O sistema sob avaliação possui 30 barras, portanto a codificação usando cinco bits é adequada. Os três bits seguintes podem representar até oito valores diferentes de impedância ($2^3 = 8$). O último bit representa o tipo do dispositivo a ser instalado no sistema. Neste trabalho foram considerados dois tipos com preços diferentes, assim, utilizando 1 bit, é possível representar dois valores, $2^1 = 2$.

É importante lembrar que o conjunto de 9 bits apresentado na figura 6.7 representa uma parte do cromossomo utilizado pelo algoritmo genético. Para que um indivíduo seja completamente codificado são necessárias cinco partes semelhantes a apresentada acima. Um indivíduo completo é apresentado de forma genérica na figura 6.8.

CROMOSSOMO COMPLETO				
Parte 1	Parte 2	Parte 3	Parte 4	Parte 5

Figura 6.8 – Cromossomo completo.

6.2.9 Codificação do cromossomo para o sistema de 57 barras.

- Número de barras do sistema: 57;
- Número de DLCCs disponíveis para instalação: 5;
- Tipos de DLCCs disponíveis: 2.

O cromossomo que representa um indivíduo é composto por cinco partes, cada parte possui configuração semelhante a apresentada na figura 6.9.

CROMOSSOMO 57 BUS									
Barra						Imped.		Tipo	
1	0	0	1	0	1	1	0	1	0

Figura 6.9 – Parte 1 do cromossomo - Sistema 57 barras.

A única diferença entre o cromossomo do sistema de 30 barras e o do sistema de 57 barras é a adição de mais um bit na representação das barras. O sistema possui 57 barras, portanto são necessários seis bits, $2^6 = 64$, desta forma é obtida a quantidade de combinações suficiente para representar todas as barras do sistema. O indivíduo completo utilizado no sistema de 57 barras foi apresentado de forma genérica na figura 6.8.

6.2.10 Recontagem

A codificação binária pode sofrer com um tipo de problema chamado cromossomos imperfeitos, esse defeito ocorre quando a quantidade de representações possíveis com a

codificação é maior do que o espaço de busca do problema. A técnica de recontagem é utilizada para solucionar o problema de cromossomos imperfeitos, essa ferramenta consiste em verificar se a representação do parâmetro escolhida pelo AG está fora do campo real de busca e transforma-la em um valor que pertence ao campo de busca real (74).

Considerando o sistema de 30 barras, temos 32 representações de barras possíveis, desta maneira, caso o AG escolha as barras 31 ou 32 estará trabalhando com valores impraticáveis, pois as barras 31 e 32 não existem nesse sistema. Para resolver o problema no sistema de 30 barras foi aplicada a recontagem cíclica, caso a barra escolhida seja 31, o algoritmo transforma esse valor em 1, a barra 1 faz parte do campo de busca, caso o valor escolhido seja 32, a interpretação para esta escolha será a barra 2, também pertencente ao campo de busca.

No caso do sistema de 57 barras, temos 64 representações possíveis, desta forma, existem 7 possibilidades de cromossomos imperfeitos, barras 58,59,60,61,62,63 e 64. Para solucionar este problema também foi aplicada a recontagem cíclica, desta forma, a codificação das barras inexistentes no campo de busca real foram transformadas da seguinte forma: 58 = 1, 59 = 2, 60 = 3, 61 = 4, 62 = 5, 63 = 6 e 64 = 7.

6.2.11 Codificação dos DLCCs

A codificação dos valores de impedância utiliza três bits. Na figura 6.10 está descrita a codificação escolhida.

Impedância do RLC [Ω]	5	10	12	15	18	20	25	30
Representação binária	000	001	010	011	100	101	110	111

Figura 6.10 – Codificação dos valores de impedância.

Foram adotados dois tipos de DLCCs, RLC e RLC + Pirotécnico. O que os diferencia é o valor comercial e o custo das perdas técnicas. Os valores dos dispositivos foram estimados com base o preço do RLC, devido ao acesso a esses dados ser muito restrito.

6.3 Algoritmo Proposto

Para solucionar o problema de seleção e alocação de DLCCs em sistemas elétricos propõe-se utilizar o algoritmo multiobjetivo NSGA-II. O algoritmo proposto nesta pesquisa está descrito em 3.

As características dos sistemas avaliados nesta pesquisa direcionaram a definição dos parâmetros utilizados no NSGA-II. O critério de parada utilizado em todos os testes foi a quantidade de iterações.

Algoritmo 3 Algoritmo Proposto.

- 1: Gerar uma população inicial aleatória de tamanho N ;
 - 2: Calcular o valor das funções aptidão para cada indivíduo;
 - 3: Classificar os indivíduos em frentes de dominância;
 - 4: Aplicar o operador Seleção;
 - 5: Aplicar o operador Cruzamento;
 - 6: Aplicar o operador Mutação;
 - 7: Repetir os passos 5, 6 e 7, até obter uma nova população de tamanho N ;
 - 8: Unir a população de pais e a população de filhos, criando uma população P de tamanho $2N$;
 - 9: Classificar os indivíduos da população P em frentes de dominância;
 - 10: Criar a nova geração selecionando os N indivíduos mais bem classificados da população P ;
 - 11: Repetir os passos 2 a 11 até que a quantidade máxima de iterações seja alcançada.
-

6.4 Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo foi apresentada a metodologia utilizada neste trabalho para solucionar o problema de alocação e seleção de DLCCs em sistemas elétricos. O problema foi tratado como um problema de otimização combinatória e resolvido por um método de busca heurístico, um algoritmo evolucionário multiobjetivo.

No capítulo a seguir serão apresentados os resultados obtidos e as análises dos casos estudados.

7 Análise de Resultados

Este capítulo aborda a descrição das simulações realizadas, os parâmetros utilizados para desenvolvimento do algoritmo proposto e os resultados obtidos nas simulações. O algoritmo proposto para seleção e alocação DLCC foi implementado no programa MATLAB (versão R2013a).

7.1 Sistemas Elétricos de Teste

Os sistemas utilizados para testar o algoritmo proposto foram: IEEE30 barras e IEEE57 barras. As características e parâmetros dos sistemas avaliados podem ser encontradas em (100).

O objetivo principal dos testes é avaliar as soluções obtidas pelo algoritmo genético para minimização da corrente de curto-circuito no sistema, considerando o custo dos dispositivos instalados e o custo das perdas técnicas adicionais, provocadas pela instalação do dispositivo. As grandezas utilizadas nas simulações estão em pu, a tensão pré-falta adotada para todos os sistemas foi de 1 pu. O valor da tarifa de energia utilizada para calcular o custo de perdas técnicas adotado pode ser visto em (102). Todos os sistemas foram simulados na situação de curto-circuito monofásico, tipo de falta mais comum nos sistemas elétricos de potência. Os custos de RLC adotados neste trabalho estão descritos na tabela 7.1 em unidade monetária (UM). Esses valores foram encontrados em (31).

Tabela 7.1 – Custos dos RLCs utilizados [UM $\times 10^3$].

[Ω] / Tensão	765 kV	500 kV	345 kV	230 kV	138 kV	69 kV
5	31,4	26,2	21,8	16,8	12,0	10,0
10	37,7	31,4	26,2	20,2	14,4	12,0
12	40,3	33,5	28,0	21,5	15,4	12,8
15	44,0	36,7	30,6	23,5	16,8	14,0
18	47,8	39,8	33,2	25,5	18,2	15,2
20	50,3	41,9	34,9	26,9	19,2	16,0
25	56,6	47,2	39,3	30,2	21,6	18,0
30	62,9	52,4	43,7	33,6	24,0	20,0

Estes valores correspondem ao dispositivo RLC, contudo esta pesquisa considera duas configurações possíveis, são estas:

- Instalação do RLC;

- Instalação do RLC + PRTC (RLC com dispositivo pirotécnico).

É importante destacar que os valores descritos na tabela 7.1 foram estimados por (31) utilizando como referência os custos aproximados de alguns dispositivos utilizados pela empresa ELETROBRÁS. Para obtenção dos valores reais dos dispositivos é necessário executar um levantamento de dados com os fabricantes.

As diferenças nas configurações estão relacionadas ao custo do acréscimo das perdas técnicas em regime permanente adicionadas pela instalação do dispositivo, quando houver, e o custo do próprio dispositivo. Nesta pesquisa, consideraram-se os custos do RLC descritos na tabela 7.1. Além disso, são somados os custos por acréscimo de perdas técnicas, visto que o RLC acrescenta perdas em regime permanente. Considerando a configuração RLC + PRTC, os custos da instalação correspondem a 150% do custo adotado para o RLC.

É importante ressaltar que o método de busca utilizado neste trabalho é probabilístico, portanto, o valor obtido como melhor solução nas simulações não necessariamente é um ótimo global. Quando são utilizados métodos de busca heurísticos, é muito comum que as simulações sejam executadas várias vezes. Destas, o melhor resultado é armazenado e apresentado como o melhor encontrado nos testes.

7.2 Resultados com IEEE 30 Barras

Inicialmente, utilizou-se a técnica de análise de sensibilidade com objetivo de verificar no sistema de 30 barras quais são os locais mais sensíveis para alocação dos DLCCs. Para este sistema, considerou-se que o vetor relação de sensibilidade teria dimensão 1×15 , portanto, as quinze barras mais sensíveis do sistema foram listadas para análise prévia do espaço de busca.

O resultado da análise de sensibilidade para o sistema de 30 barras pode ser visto na tabela 7.2.

Tabela 7.2 – Resultado da análise de sensibilidade.

Ordem das barras mais sensíveis do sistema.															
Barra	26	30	29	25	14	18	23	19	11	20	27	13	24	16	15

Desta forma, é possível inferir do resultado apresentado na tabela 7.2 que o conjunto espaço de busca possui um subconjunto contendo as barras mais adequadas para alocação dos dispositivos limitadores.

Em seguida foram realizadas as simulações utilizando o algoritmo NSGA-II proposto no sistema de 30 barras. Os parâmetros do AG adotados para este teste são:

- População: 100 indivíduos;

- Método de Seleção: Torneio de tamanho 2;
- Pontos de corte: Uniforme;
- Taxa de Cruzamento: 90%
- Taxa de Mutação: Adaptativa;
- Codificação: Binária;
- Uso de elitismo: Sim;
- Critério de parada: Número de iterações.

Na figura 7.1 é apresentada a curva de Pareto contendo as soluções obtidas pelo NSGA-II para o sistema de 30 barras.

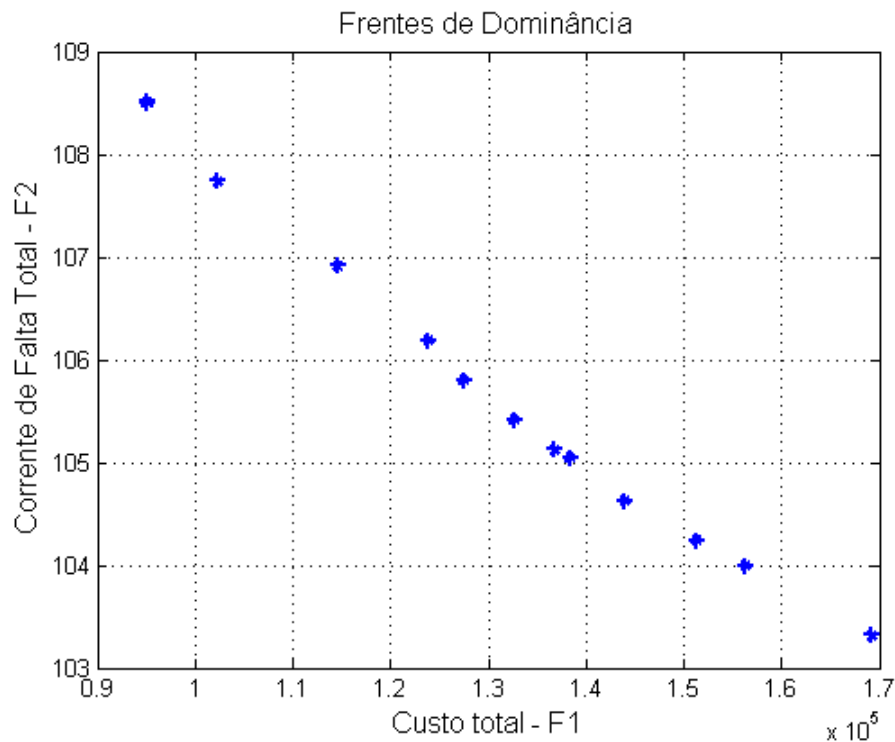


Figura 7.1 – Curva de Pareto - IEEE 30 Barras.

Observa-se, na figura 7.1, que o NSGA-II obteve uma boa distribuição das soluções no espaço de busca. O resultado dispõe de configurações de alocação bem espaçadas e contempla diversas possíveis soluções. Neste trabalho, foi adotado que a escolha da melhor solução é responsabilidade do projetista, portanto é uma decisão tomada após a apresentação da curva de Pareto. O indivíduo pode escolher a solução que mais se adequa à sua situação, considerando variáveis técnicas e financeiras.

A solução escolhida como a melhor está descrita na tabela 7.3. Na tabela 7.4 está apresentado um resumo da melhor solução encontrada.

Tabela 7.3 – Melhor solução escolhida - IEEE30

Barra	Impedância [Ω]	Custo [UM]
25	30	36,0
26	25	32,4
27	25	32,4
29	30	36,0
30	25	32,4

Tabela 7.4 – Resumo da melhor solução.

Custo Total [UM]	Quant. de Dispositivos	Tipo
169,2	5	RLC + PRTC

A solução encontrada pelo algoritmo indica a alocação de cinco dispositivos limitadores. Comparando o conjunto de barras escolhido pelo NSGA-II para alocação dos dispositivos, é possível verificar que a solução encontrada é muito boa, os dispositivos foram alocados nas barras [25 - 26 - 27 - 29 - 30], que fazem parte do conjunto de barras mais sensíveis do sistema.

Analisando o efeito da instalação do dispositivo limitador em cada uma das barras, é possível verificar a intensidade da redução da corrente de curto-circuito. A tabela 7.5 apresenta a redução percentual da corrente de falta monofásica (I_{CC}) em cada uma das barras escolhidas pelo algoritmo proposto.

Tabela 7.5 – Redução percentual de I_{CC} por barra - Falta Monofásica.

Barra	25	26	27	29	30
Redução (%)	34,3	36,18	27,0	41,21	34,28

As reduções percentuais apresentam resultados que confirmam a análise prévia de sensibilidade do sistema. O algoritmo obteve reduções muito significativas nas barras onde foram alocados os dispositivos. Pesquisas desenvolvidas sobre redução de corrente de curto-circuito apresentaram resultados semelhantes da redução percentual de I_{CC} nas barras onde DLCCs são alocados.

Na figura 7.2 estão apresentados os níveis de corrente de falta monofásica nas barras do sistema, antes e depois da instalação dos DLCCs.

Nota-se na figura 7.2 que a redução significativa da corrente de falta deve-se à sua sensibilidade à alocação do dispositivo. Apesar da grandeza da redução, nenhuma das barras do sistema possui corrente de falta inferior a 2 pu, o que significa que os dispositivos de proteção reconhecerão o nível inadequado de corrente circulante no sistema.

É possível verificar na figura 7.3 o efeito da instalação dos dispositivos na redução

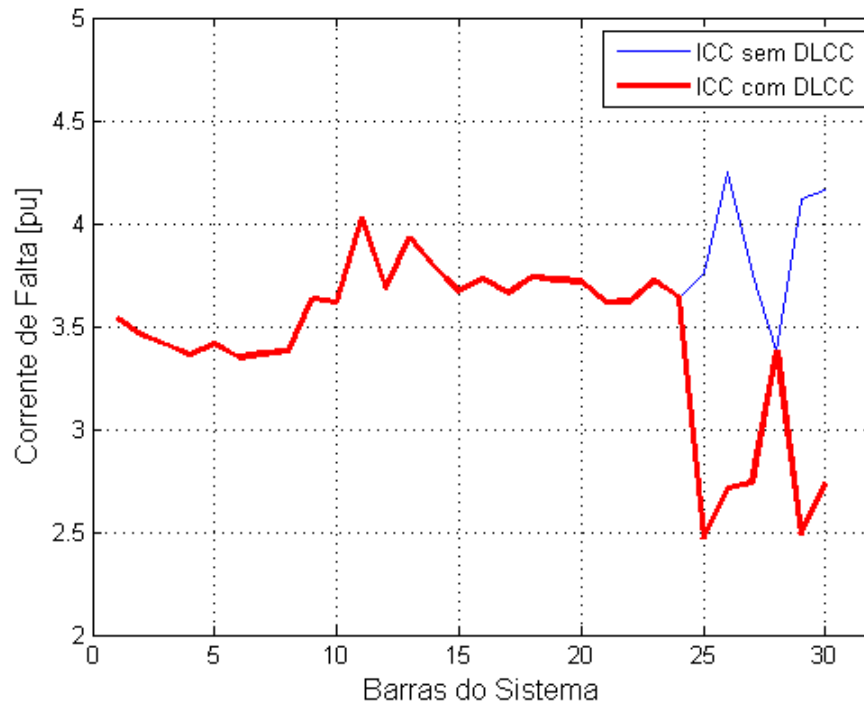


Figura 7.2 – Correntes de Falta Monofásica - IEEE 30 Barras.

da corrente de falta trifásica.

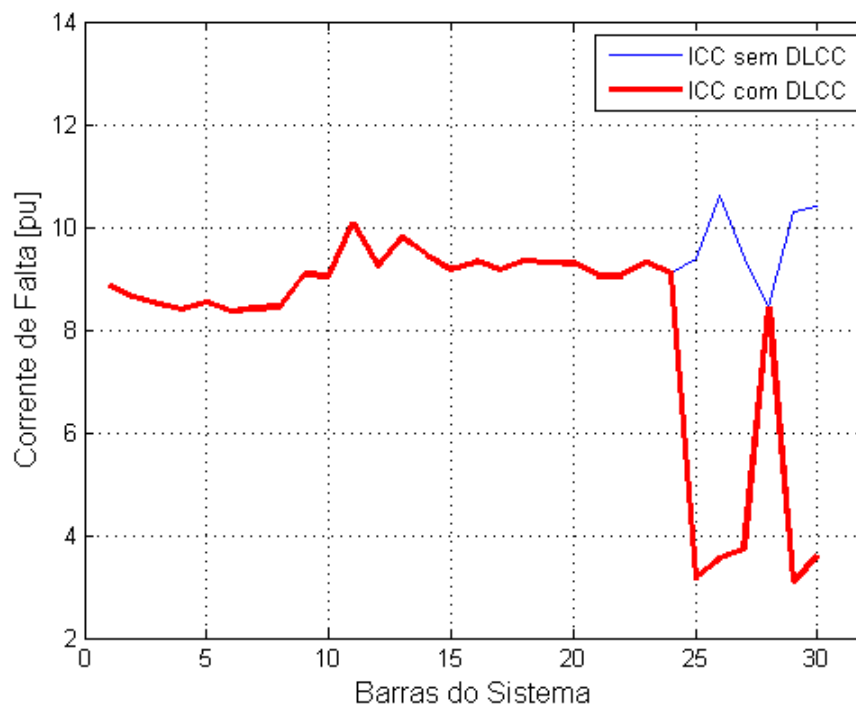


Figura 7.3 – Correntes de Falta Trifásica - IEEE 30 Barras.

Considerando o curto-circuito trifásico (figura 7.3), verifica-se a intensidade da redução da corrente de falta. A tabela 7.6 apresenta a redução percentual da corrente de

falta trifásica em cada uma das barras escolhidas pelo algoritmo proposto.

Tabela 7.6 – Redução percentual de I_{CC} por barra - Falta Trifásica.

Barra	25	26	27	29	30
Redução (%)	66,48	66,5	60,3	69,9	65,53

As reduções percentuais considerando a falta do tipo trifásica também confirmam a análise preliminar de sensibilidade do sistema. Quando comparados os percentuais de redução das faltas monofásica e trifásica, é possível notar a diferença significativa entre os valores de redução para cada barra. Esse resultado é uma consequência da intensidade da corrente, dependendo do tipo de falta, quanto maiores o módulo da corrente de curto-circuito e a sensibilidade de barra, mais acentuada será a redução da corrente de falta devido à instalação do dispositivo limitador.

O NSGA-II é um algoritmo multiobjetivo, assim, o resultado obtido no processo de busca é um conjunto de soluções equivalentes entre si, ou seja, as soluções apresentadas estão todas dispostas na melhor frente de dominância e portanto, não há dominância entre as mesmas. Na tabela 7.7 estão apresentadas outras soluções encontradas pelo NSGA-II que podem ser aplicadas ao sistema.

Tabela 7.7 – Soluções alternativas - 30 Barras.

Solução	Barras	Impedâncias [Ω]	Custo [UM]
A1	26 - 26 - 29 - 29 - 30	12 - 25 - 12 - 18 - 25	138,3
A2	26 - 29 - 29 - 30 - 30	12 - 12 - 10 - 5 - 20	114,6
A3	26 - 26 - 29 - 30 - 30	25 - 10 - 30 - 10 - 15	136,8

Algumas das soluções descritas na tabela 7.7 possuem características distintas da solução descrita na tabela 7.3. A primeira diferença é a quantidade de barras onde os dispositivos foram alocados: o NSGA-II encontrou soluções com alocação em três barras e soluções com alocação em cinco barras.

A segunda é a disposição de valores distintos de impedâncias nas barras do sistema, característica que interfere diretamente no custo da instalação dos dispositivos.

Por fim, a terceira diferença é a redução percentual do nível de curto-circuito em cada barra, o projetista deve avaliar se o dispositivo alocado em determinada barra do sistema provoca uma redução significativa da corrente de falta na respectiva barra.

A solução descrita na tabela 7.3 foi definida como a melhor solução com base nos seguintes critérios:

1. Dispositivos alocados em cinco barras diferentes do sistema;

2. As barras escolhidas pertencem ao vetor de barras sensíveis do sistema;
3. As impedâncias alocadas provocam reduções percentuais significativas nas respectivas barras;

A solução escolhida pelo projetista pode ser aplicada de forma parcelada. Considerando uma situação na qual uma empresa não possui condições técnicas ou financeiras para utilização dos cinco dispositivos limitadores, a mesma poderá utilizar um número menor de dispositivos. Suponhamos que seja possível instalar apenas três DLCCs. Com base na tabela 7.3 e nas reduções descritas nas tabelas 7.5 e 7.6, uma solução viável para a esta situação pode ser vista na tabela 7.8.

Tabela 7.8 – Solução escolhida - 3 DLCCs - IEEE30.

Barra	Impedância [Ω]	Custo [UM]
26	25	32,4
29	30	36
30	25	32,4

Foram escolhidas as três barras que apresentaram maior redução percentual das correntes de falta monofásica e trifásica. Posteriormente os outros dois dispositivos poderão ser instalados e a configuração escolhida inicialmente pelo NSGA-II estará completa.

7.3 Resultados com IEEE 57 Barras

A análise do sistema de 57 barras é semelhante à aplicada no sistema de 30 barras. Para o sistema de 57 barras, foi considerado que o vetor relação de sensibilidade teria dimensão 1×15 , portanto, as quinze barras mais sensíveis do sistema foram listadas para análise prévia do espaço de busca.

O resultado da análise de sensibilidade do sistema de 57 barras pode ser visto na tabela 7.9.

Tabela 7.9 – Resultado da análise de sensibilidade.

Ordem das barras mais sensíveis do sistema.															
Barra	32	25	33	30	20	19	31	57	42	56	34	18	53	54	35

Em seguida foram realizadas as simulações utilizando o algoritmo NSGA-II proposto no sistema de 57 barras. Os parâmetros do AG adotados para este teste são:

- População: 100 indivíduos;

- Método de Seleção: Torneio de tamanho 2;
- Pontos de corte: Uniforme;
- Taxa de Cruzamento: 90%
- Taxa de Mutação: Adaptativa;
- Codificação: Binária;
- Uso de elitismo: Sim;
- Critério de parada: Número de iterações.

Na figura 7.4 é apresentada a curva de Pareto contendo as melhores soluções obtidas pelo NSGA-II para o sistema de 57 barras.

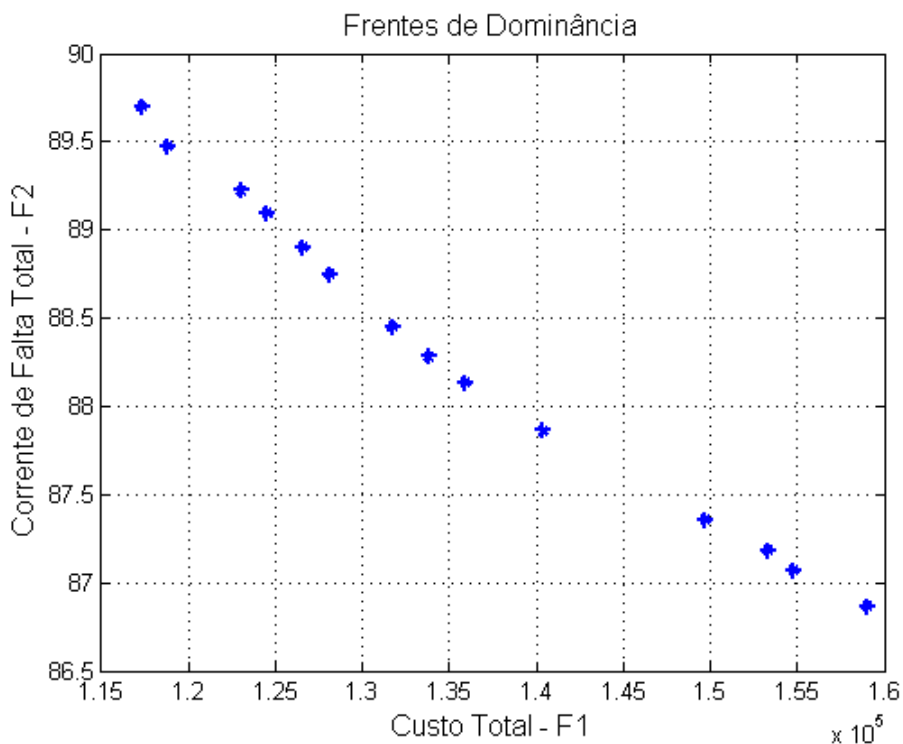


Figura 7.4 – Curva de Pareto - IEEE 57 Barras.

É possível observar na figura 7.4 que o NSGA-II obteve uma boa distribuição das soluções na fronteira de Pareto. Comparando com o resultado obtido no sistema de 30 barras, a fronteira de Pareto do sistema de 57 barras possui disposição semelhante, o que é um resultado esperado devido à quantidade de opções que os sistemas dispõem. É importante ressaltar que cada sistema possui características específicas, portanto os conjuntos de soluções são diferentes.

A solução escolhida como a melhor está descrita na tabela 7.10, com custos em Unidade Monetária (UM). Na tabela 7.11 está apresentado um resumo sobre a melhor solução encontrada.

Tabela 7.10 – Melhor solução escolhida - IEEE57.

Barra	Impedância [Ω]	Custo [UM]
20	15	25,2
25	25	32,4
30	12	23,1
32	18	27,3
33	25	32,4

Tabela 7.11 – Resumo da melhor solução.

Custo Total (UM)	Quant. de Dispositivos	Tipo
140,4	5	RLC + PRTC

O NSGA-II sugere a alocação de cinco dispositivos limitadores. Comparando o conjunto de barras escolhido pelo NSGA-II e o conjunto de barras sensíveis do sistema, a solução encontrada é excelente, pois os dispositivos foram alocados nas barras [20 - 25 - 30 - 32 - 33], que são as barras mais sensíveis do sistema de 57 barras.

A intensidade da redução da corrente de curto-circuito monofásico em cada uma das barras que recebeu um dispositivo limitador está descrita na tabela 7.12. É possível verificar a redução percentual da corrente de falta monofásica em cada uma das barras escolhidas pelo NSGA-II.

Tabela 7.12 – Redução percentual de I_{CC} por barra - Falta Monofásica.

Barra	20	25	30	32	33
Redução (%)	26,29	50,27	25,59	46,71	49,25

Assim como no sistema de 30 barras as reduções percentuais confirmaram a análise de sensibilidade do sistema. O algoritmo obteve reduções muito significativas nas barras onde foram alocados os dispositivos.

Na figura 7.5 estão apresentados os níveis de corrente de falta assimétrica nas barras do sistema, antes e depois da instalação dos DLCCs.

O algoritmo NSGA-II funcionou muito bem, os resultados obtidos demonstram uma variedade significativa de possíveis soluções.

A corrente de falta trifásica também foi analisada no sistema de 57 barras. Na figura 7.6 estão apresentados os níveis de corrente de falta trifásica nas barras do sistema, antes e depois da instalação dos DLCCs.

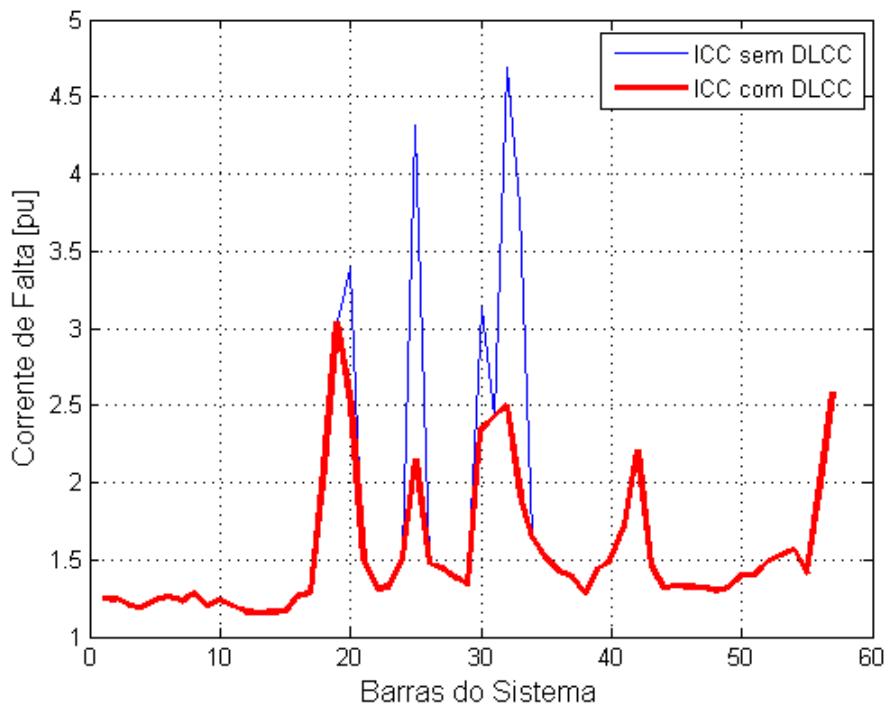


Figura 7.5 – Correntes de Falta Monofásica - IEEE 57 Barras.

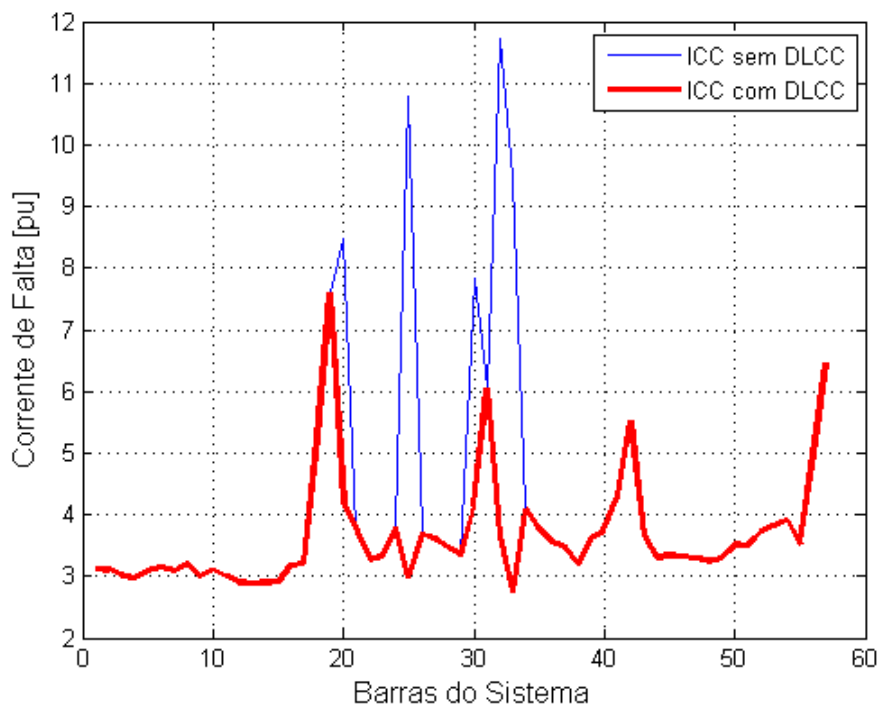


Figura 7.6 – Correntes de Falta Trifásica - IEEE 57 Barras.

Considerando o curto-circuito trifásico (figura 7.6), a tabela 7.13 apresenta a redução percentual deste tipo de contingência em cada uma das barras escolhidas pelo algoritmo proposto.

Tabela 7.13 – Redução percentual de I_{CC} por barra - Falta Trifásica.

Barra	20	25	30	32	33
Redução (%)	50,9	72,41	47,21	68,8	71,07

A intensidade das reduções percentuais em cada barra que recebeu um DLCC confirma a análise preliminar de sensibilidade do sistema.

Na tabela 7.14 são apresentadas outras soluções encontradas pelo NSGA-II que podem ser aplicadas ao sistema.

Tabela 7.14 – Soluções alternativas - 57 Barras.

Solução	Barras	Impedâncias [Ω]	Custo [UM]
A1	20 - 25 - 30 - 32 - 33	18 - 25 - 30 - 18 - 30	159
A2	20 - 25 - 30 - 32 - 33	30 - 25 - 30 - 18 - 30	149,7
A3	20 - 25 - 30 - 32 - 33	15 - 25 - 30 - 18 - 25	153,3

As soluções alternativas descritas na tabela 7.14 possuem a mesma configuração de barras da melhor solução escolhida (tabela 7.10). Esse fator é atribuído à homogeneidade do resultado obtido pelo NSGAI no sistema de 57 barras. O que diferencia as soluções encontradas pelo algoritmo são os valores de impedância alocados nas barras do sistema. É importante ressaltar que outras configurações de barras foram encontradas.

Assim como no sistema de 30 barras, o processo de busca executado pelo NSGA-II foi naturalmente conduzido à alocação de DLCCs nas barras mais sensíveis do sistema. Para o sistema de 57 barras foram alocados dispositivos nas cinco barras mais sensíveis, diferente do sistema de 30 barras, cujo resultado foi a alocação em cinco barras das quais quatro fazem parte do grupo de cinco mais sensíveis.

Diante dos resultados obtidos, é possível concluir que o processo de busca executado pelo NSGA-II foi executado de maneira correta, apresentando soluções compatíveis com a análise de sensibilidade do sistema. Pode-se afirmar que o processo heurístico de busca apresenta resultados compatíveis com a avaliação determinística de sensibilidade dos sistemas.

A situação hipotética apresentada no tópico anterior, empresas com limitações técnicas ou financeiras, pode ser analisada também no sistema de 57 barras. O método de seleção dos dispositivos e barras é o mesmo e, desta forma, é possível sugerir com segurança a instalação dos dispositivos apresentados na tabela 7.15.

O critério para escolha das barras foi mantido, as três barras que apresentaram maior redução percentual das correntes de falta monofásica e trifásica. Posteriormente os outros dois dispositivos poderão ser instalados e a configuração escolhida inicialmente pelo NSGA-II estará completa.

Tabela 7.15 – Solução escolhida - 3 DLCCs - IEEE57.

Barra	Impedância [Ω]	Custo [UM]
25	25	32,4
32	18	27,3
33	25	32,4

O percentual de redução é maior no curto-circuito do tipo trifásico, comportamento apresentado pelos dois sistemas estudados. O elevado percentual de redução está diretamente ligado à intensidade da corrente de falta e ao nível de sensibilidade das barras. Reduções significativas foram obtidas em barras com altas correntes de curto-circuito e localizadas no início do vetor de sensibilidade, resultado coerente e observado em todos os sistemas estudados.

As barras mais sensíveis e com correntes de falta elevadas são as principais candidatas para alocação do DLCC. Com base nesta observação, é importante ressaltar que o processo de busca realizado pelo NSGA-II desenvolvido nesta pesquisa foi naturalmente direcionado às barras candidatas. O algoritmo proposto não possui nenhum mecanismo de restrição de campo de busca ou informações predefinidas sobre as possíveis soluções do sistema, portanto, os resultados obtidos pelo NSGA-II podem ser considerados satisfatórios.

A homogeneidade das soluções apresentou novamente a capacidade do algoritmo de buscar as barras mais sensíveis do sistema, assim como variações muito apropriadas dos valores de impedância alocados em cada barra. Desta forma, é possível encontrar soluções adequadas a diversas situações técnicas e financeiras.

7.4 Análise dos Resultados

Os resultados obtidos têm uma característica em comum, todos obtiveram soluções que utilizam a configuração RLC + PRTC. É importante destacar que a configuração RLC + PRTC é 50% mais cara do que o RLC. O que justifica a presença da configuração RLC + PRTC nas soluções dos sistemas testados é a diferença entre o custo total em regime permanente. O RLC, quando inserido no sistema, provoca perdas técnicas em regime permanente, pois se trata de uma impedância, desta forma, o custo da instalação de um RLC se torna inviável ao longo do tempo. O RLC + PRTC não provoca perdas técnicas ao sistema, assim, apesar de mais caro, é um tipo de configuração que não provocará despesas adicionais vinculadas a perdas técnicas.

Para demonstrar o impacto da instalação do RLC no sistema, foi realizada uma análise das perdas de potência ativa com o sistema no estado original e após a inserção dos dispositivos. Os DLCCs inseridos no sistema estão descritos nas tabelas 7.3 e 7.10, o resultado está descrito na tabela 7.16.

Tabela 7.16 – Perdas de potência ativa nos sistemas - MW.

Sistema	Sem RLC (Caso Base)	Com RLC	Aumento (%)
30 barras	18,4965	18,8956	2,15
57 barras	29,1266	29,2715	0,5

Na tabela 7.16 verifica-se o aumento das perdas de potência em regime permanente. Na análise foi considerado um período de tempo de 365 dias.

A função-objetivo do algoritmo desenvolvido neste trabalho considera o nível de corrente de curto-circuito e o custo de instalação dos DLCCs. Para demonstrar que o processo de escolha das soluções realizado pelo NSGA-II foi executado de forma correta, é necessário analisar os custos referentes às soluções escolhidas em cada sistema. Na tabela 7.17 estão descritos os custos provocados pelo acréscimo de perdas técnicas adicionadas pelo dispositivo RLC em regime permanente.

Tabela 7.17 – Custo do Acréscimo de Perdas Técnicas [UM].

Sistema	Custo
30 barras	$517,03 \times 10^3$
57 barras	$187,72 \times 10^3$

Na tabela 7.18 é possível verificar o custo total de cada solução, considerando as configurações RLC e RLC + PRTC. Esta análise tem como objetivo comparar o impacto financeiro dos DLCCs, considerando o preço do dispositivo, encontrado na tabela 7.1, e o custo do acréscimo de perdas técnicas, tabela 7.17, caso existam.

Tabela 7.18 – Custo Total [UM] - Preço do DLCC + Custo de Perdas Técnicas.

Sistema	RLC + Perdas	RLC + PRTC	Config. de menor custo
30 barras	$629,83 \times 10^3$	$169,2 \times 10^3$	RLC + PRTC
57 barras	$281,32 \times 10^3$	$140,4 \times 10^3$	RLC + PRTC

A partir da tabela 7.18 pode-se concluir que os custos totais das soluções escolhidas como melhores em cada sistema é menor quando utilizada a configuração RLC + PRTC, considerando um período de 365 dias. Esta análise é coerente com as soluções encontradas pelo NSGA-II nesta pesquisa e demonstram que o processo de busca executado pelo algoritmo foi satisfatório.

A instalação de RLCs nas barras do sistema também podem alterar o perfil de tensão do mesmo. Para demonstrar esse fato, está exibido na figura 7.7 o perfil de tensão do sistema de 30 barras antes e depois da alocação dos dispositivos descritos na tabela 7.3.

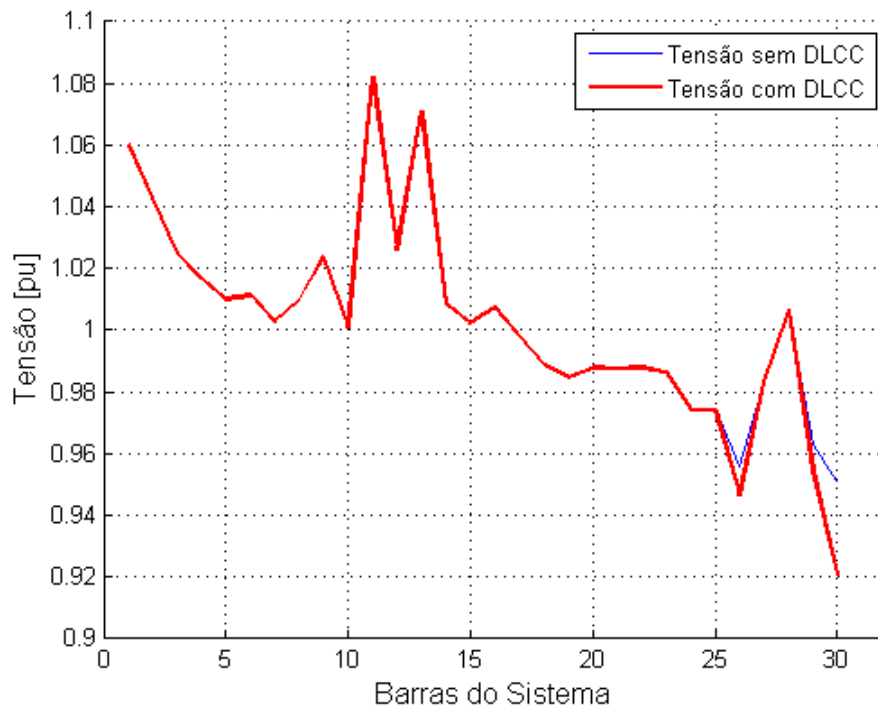


Figura 7.7 – Perfil de Tensão - IEEE 30 Barras.

Na figura 7.7 é possível observar que o perfil de tensão do sistema foi alterado devido a instalação dos DLCCs. Para visualizar de forma mais adequada, na figura 7.8 está apresentado o perfil de tensão nas barras que receberam DLCCs.

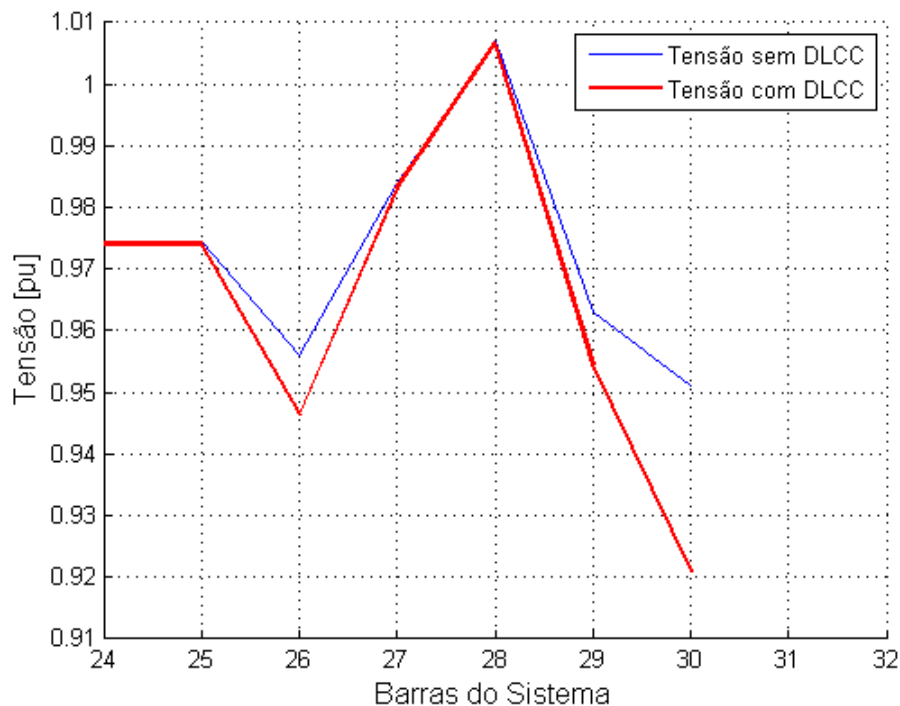


Figura 7.8 – Perfil de Tensão Parcial - IEEE 30 Barras.

É importante observar o perfil do sistema para verificar se os níveis de tensão nas barras estão adequados, não é recomendado que o sistema funcione com níveis de tensão muito baixos ou muito elevados. A instalação do RLC pode levar o sistema a um modo de operação inadequado, acarretando prejuízos técnicos e financeiros. A configuração RLC + PRTC não provoca alteração no perfil de tensão do sistema, isso ocorre porque o dispositivo permanece "invisível" em regime permanente, atuando somente quando uma situação de contingência é caracterizada.

7.5 Considerações Finais

Os testes utilizando o NSGA-II demonstraram que o algoritmo utilizado foi capaz de selecionar e alocar dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito reduzindo a corrente de falta, considerando os custos de instalação e os custos provocados por perdas técnicas.

A fronteira de Pareto de cada sistema avaliado demonstrou características satisfatórias, o número de soluções encontradas e a distância de aglomeração apresentaram resultados capazes de englobar diversas condições técnicas e financeiras.

Os resultados das simulações demonstraram que a configuração RLC + PRTC é a mais adequada para instalação, pois, apesar do seu custo mais elevado, não interfere no funcionamento do sistema em regime permanente, sendo a configuração mais recomendada para aplicação em sistemas de potência. Os resultados demonstraram reduções significativas nas barras onde DLCCs foram alocados, confirmando a análise de sensibilidade dos sistemas avaliados. Além disso, mesmo com a redução dos níveis de curto-circuito, houve também a preocupação em observar se as correntes de falta ainda seriam detectadas pelos disjuntores de proteção.

No próximo capítulo serão apresentadas as principais conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Parte IV

Conclusões e Trabalhos Futuros

8 Conclusões

Neste trabalho, foi desenvolvida uma metodologia para seleção e alocação de DLCCs em sistemas elétricos utilizando um algoritmo evolucionário multiobjetivo, o NSGA-II. Foi realizada uma verificação sobre o estado-da-arte da utilização de algoritmos multiobjetivos para alocação de dispositivos limitadores de corrente. É possível encontrar na literatura trabalhos que utilizam algoritmos genéticos básicos para alocação dos dispositivos. A utilização de algoritmos multiobjetivos ainda é incipiente, visto que poucos trabalhos utilizam essa metodologia. A aplicação de um algoritmo verdadeiramente multiobjetivo foi a motivação e o diferencial para estudar e desenvolver este trabalho.

O NSGA-II utilizado neste trabalho teve como objetivos a minimização da corrente de curto-circuito nas barras do sistema e do custo de instalação dos dispositivos limitadores, tendo a preocupação de manter as correntes de curto-circuito em uma magnitude que possa ser detectada pelos equipamentos de proteção.

À medida que as simulações foram executadas, notou-se que o funcionamento do NSGA-II está totalmente vinculado ao ajuste dos parâmetros utilizados. O desempenho do algoritmo está vinculado ao tamanho da população inicial, número de gerações, probabilidade de mutação e de cruzamento. O tamanho do sistema avaliado e as variáveis consideradas na função objetivo influenciam diretamente no ajuste dos parâmetros.

Nas simulações foram utilizados dois sistemas: o IEEE 30 barras e o IEEE 57 barras. Os sistemas foram escolhidos devido a disponibilidade das informações e a quantidade de barras disponíveis. A utilização de sistemas diferentes exigiu ajustes na codificação dos parâmetros do NSGA-II e influenciou diretamente no tempo de simulação.

Os resultados obtidos nas simulações são animadores e demonstraram que o problema de alocação e seleção de DLCCs possui soluções variadas, a robustez do algoritmo tem como maior benefício a diversidade das soluções encontradas, as mesmas atendem a um considerável conjunto de possíveis situações técnicas e financeiras.

Pode-se citar como uma das principais dificuldades deste trabalho a escassez de informação sobre os preços dos dispositivos limitadores de corrente. Empresas fabricantes e utilizadoras foram contactadas e não se dispuseram a fornecer os valores. Este problema foi resolvido utilizando os valores disponíveis na literatura, onde alguns trabalhos apresentam valores aproximados para os dispositivos e estes foram adotados nesta pesquisa. É importante ressaltar que os valores utilizados são coerentes com os tipos e valores de impedância de cada dispositivo limitador.

Neste trabalho optou-se por solucionar o problema proposto utilizando um algoritmo

evolucionário multiobjetivo, o motivo principal é a robustez e capacidade de encontrar um conjunto de soluções equivalentes para o problema. A quantidade de soluções encontradas fornece ao projetista opções factíveis e adequadas para aplicar nos sistemas elétricos.

Para validação do método, aplicou-se uma análise de sensibilidade gerando um *ranking* das barras mais afetadas por um curto-circuito. Aquelas com sensibilidade mais elevada seriam as melhores candidatas à instalação de um dispositivo limitador de corrente.

O algoritmo desenvolvido neste trabalho demonstrou coerência na busca pelas soluções do problema, apresentando resultados compatíveis com a análise de sensibilidade efetuada, de maneira que pode-se afirmar que esta dissertação alcançou os objetivos pretendidos de maneira satisfatória.

8.1 Perspectivas de Trabalhos Futuros

Esta pesquisa, ao propor a utilização do algoritmo multiobjetivo NSGA-II para alocação de DLCCs, não visa esgotar o assunto, portanto, estão listados a seguir sugestões para trabalhos futuros:

- Utilização de algoritmos multiobjetivos diferentes do NSGA-II, por exemplo, o algoritmo SPEAII, para resolver o problema proposto, assim seria possível realizar uma comparação entre o desempenho de diferentes metodologias multiobjetivo;
- Utilização de técnicas de processamento paralelo ou influência no direcionamento da busca, a fim de diminuir o tempo de processamento;
- Consideração de outros dispositivos limitadores ou configurações, além do RLC e do RLC + Pirotécnico, e a utilização de sistemas elétricos reais e de maior porte.

Referências

- 1 ENERGIA, E. E. de Pesquisa Energética Ministério de Minas e. *Projeção da demanda de energia elétrica*. 2015. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/mercado/Paginas/EPEpublicaestudosobeproje%C3%A7%C3%A3odademandadeenergiael%C3%A9tricaanospr%C3%B3ximos10anos.aspx?CategoriaID=>>>. Citado 3 vezes nas páginas 15, 31 e 32.
- 2 H., S. Fault current limiters report on activities of cigre working group a3.10. *CIGRE WG 13.10*, CIGRE. Citado 3 vezes nas páginas 15, 34 e 44.
- 3 ARROYO, J. E. C. Heurísticas e metaheurísticas para otimização combinatória multiobjetivo. Biblioteca Digital da Unicamp, 2002. Citado 4 vezes nas páginas 16, 85, 89 e 90.
- 4 BARBOSA, A. M.; RIBEIRO, L. de C.; ARANTES, J. M. de O. Algoritmo genético multiobjetivo: Sistema adaptativo com elitismo. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 100.
- 5 SOLTEIRA-SP, I. *Algoritmo Genético Especializado na Resolução de Problemas com Variáveis Contínuas e Altamente Restritos*. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 106.
- 6 ELÉTRICO, O.-O. N. do S. *Plano de Ampliações e Reforços nas Instalações de Transmissão do SIN*. 2015. Disponível em: <http://www.ons.org.br/plano_ampliacao/plano_ampliacao.aspx>. Citado na página 33.
- 7 ALMEIDA W. G., F.-F. D. *Circuitos Polifásicos*. [S.l.]: Finatec, Brasília, 1995. Citado 3 vezes nas páginas 34, 63 e 65.
- 8 MATHEWS, J. H.; FINK, K. D. *Numerical methods using MATLAB*. [S.l.]: Prentice hall Upper Saddle River, NJ, 1999. v. 31. Citado na página 34.
- 9 GREWAL, M. S.; ANDREWS, A. P. *Kalman filtering: theory and practice using MATLAB*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. Citado na página 34.
- 10 GRAINGER, J.; STEVENSON, W. *Power system analysis*. McGraw-Hill, 1994. (McGraw-Hill series in electrical and computer engineering: Power and energy). ISBN 9780070612938. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=NBiOQAAMAAJ>>. Citado 3 vezes nas páginas 34, 63 e 65.
- 11 MAIA, M. A. *Um estudo de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito com ênfase no IPC (Interphase Power Controller)*. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, 2005. Citado 3 vezes nas páginas 34, 38 e 54.
- 12 PINTO, L. C.; PINTO, A. B. Limitação dos níveis de curto-circuito em uma usina de cogeração utilizando o equipamento is-limiter – estudo de caso. *XVIII SNPTEE*, 2005. Citado na página 34.
- 13 LEE, B. W. e. a. Practical application issues of superconducting fault current limiters for electric power systems. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 18, n. 2, p. 620–623, 2008. Citado na página 34.

- 14 SOUSA, W. T. B. de et al. Limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores: principais conceitos e testes. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 34, n. 4, p. 4313, 2012. Citado na página 34.
- 15 PAUL, W. et al. Fault current limiter based on high temperature superconductors—different concepts, test results, simulations, applications. *Physica C: Superconductivity*, Elsevier, v. 354, n. 1, p. 27–33, 2001. Citado na página 34.
- 16 JR, L. Z. et al. *Aplicação de Dispositivos para Limitação de Correntes de Curto-Circuito*. [S.l.], 2007. Citado 3 vezes nas páginas 34, 46 e 50.
- 17 KINDERMANN, G. *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*. [S.l.]: UFSC - EEL - LabPlan, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 63.
- 18 BARTHOLD L. O., R. N. D. H. D. E. *Análise de Circuitos de Sistemas de Potência Curso de Engenharia em Sistemas Elétricos de Potência série P.T.I.* [S.l.]: Convênio Eletrobrás/UFMS, Volume 1 , 2a Edição, Santa Maria, 1983. Citado na página 34.
- 19 MELLO, F. P. *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência – Curso de Engenharia em Sistemas Elétricos de Potência*. [S.l.]: Convênio Eletrobrás/UFMS, Volume 7 , Santa Maria, 1979. Citado na página 34.
- 20 CARVALHO, A. C. *Disjuntores e Chaves - Aplicação em Sistemas de Potência*. [S.l.]: EDUFF, Niterói, 1995. Citado na página 34.
- 21 D’AJUZ, A.; ELETRICAS, F. C.; FLUMINENSE, U. F. *Equipamentos eletricos: especificação e aplicação em subestações de alta tensão*. FURNAS, 1985. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=HcZ2kgEACAAJ>>. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 46.
- 22 FUCHS, E.; MASOUM, M. A. *Power quality in power systems and electrical machines*. [S.l.]: Academic press, 2011. Citado na página 34.
- 23 TELES, M. L.; GOMES, H. M. Comparação de algoritmos genéticos e programação quadrática seqüencial para otimização de problemas em engenharia. *Teoria e Prática na Engenharia Civil*, v. 10, n. 15, p. 29–39, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 103.
- 24 ALVES, N. A hybrid algorithm for optimal placement of switches devices in electric distribution systems. *IEEE Latin America Transactions*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 3 Park Avenue, 17 th Fl New York NY 10016-5997 United States, v. 10, n. 6, p. 2218–2223, 2012. Citado na página 35.
- 25 ALMEIDA, A. M. F. D. Algoritmos genéticos para localização e ajustes Ótimos de reguladores de tensão em sistemas de distribuição. (*Dissertação de Mestrado*) - *Universidade Federal de Campina Grande*, 2004. Citado na página 35.
- 26 ALMEIDA, Â. M. F. d. Otimização multiobjetivo e lógica fuzzy aplicados ao planejamento integrado de bancos de capacitores e reguladores de tensão em redes de distribuição. 2009. Citado na página 35.
- 27 FARIAS C. M.; DE ALMEIDA, K. C. D. Alocação Ótima de equipamentos facts via algoritmo genético multiobjetivo e fluxo de potência ótimo. In: *Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Automática*. Bonito, MS: [s.n.], 2010. Citado na página 35.

- 28 TORTELLI, O. L. *Alocação e Operação de Controladores FACTS em Sistemas Elétricos de Potência*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2010. Citado na página 35.
- 29 S.SARDA, J. e. a. Optimal location of multi-types of facts devices using genetic algorithm. *International Journal of Research in Computer Science*, v. 2, n. 3, p. 11–15, May 2012. Citado na página 35.
- 30 ARAÚJO, R. D. Alocação e ajuste de dispositivos facts em sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando algoritmos genéticos. *Universidade Federal de Sergipe*, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 77.
- 31 SANTOS, F. C. *Alocação Ótima de Dispositivos Limitadores de Corrente de Curto-Circuito em Redes de Energia Elétrica utilizando Algoritmos Genéticos*. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, 2006. Citado 3 vezes nas páginas 35, 111 e 112.
- 32 SHAHRIARI, S.; YAZDIAN, A.; HAGHIFAM, M.-R. Fault current limiter allocation and sizing in distribution system in presence of distributed generation. In: IEEE. *Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES'09. IEEE*. [S.l.], 2009. p. 1–6. Citado na página 35.
- 33 SHAHRIARI, S. A. A.; VARJANI, A. Y.; HAGHIFAM, M. R. Cost reduction of distribution network protection in presence of distributed generation using optimized fault current limiter allocation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 43, n. 1, p. 1453–1459, 2012. Citado na página 35.
- 34 KOMSAN, K. et al. Allocation and circuit parameter design of superconducting fault current limiters in loop power system by a genetic algorithm. *IEEJ Transactions on Power and Energy*, v. 123, n. 9, p. 1054–1063, 2004. Citado na página 35.
- 35 YE, C.; HUANG, M. Multi-objective optimal configuration of current limiting strategies. *Science China Technological Sciences*, Springer, v. 57, n. 9, p. 1738–1749, 2014. Citado na página 36.
- 36 TENG, J.-H.; LU, C.-N. Optimum fault current limiter placement. In: IEEE. *Intelligent Systems Applications to Power Systems, 2007. ISAP 2007. International Conference on*. [S.l.], 2007. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 98.
- 37 ZITZLER, E.; DEB, K.; THIELE, L. Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: Empirical results. *Evolutionary computation*, MIT Press, v. 8, n. 2, p. 173–195, 2000. Citado na página 36.
- 38 ZITZLER, E. et al. *SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm*. [S.l.]: Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH), Institut für Technische Informatik und Kommunikationsnetze (TIK), 2001. Citado 3 vezes nas páginas 36, 93 e 94.
- 39 DEB, K. et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-ii. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 6, n. 2, p. 182–197, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 92.

- 40 ELÉTRICO, O.-O. N. do S. *Dispositivos Limitadores de Corrente de Curto-Circuito - DLCC - Estado da Arte e Aplicações nas Redes Elétricas*. 2002. Disponível em: <http://www.ons.org.br>. Citado na página 38.
- 41 CIGRÉ. Fault current limiters in electrical medium and high voltage systems. *CIGRÉ Journal Paris, França*, França Paris, 2003. Citado na página 45.
- 42 EPRI. Fault current management guidebook - updated. *California, Estados Unidos*, 2006. Citado na página 45.
- 43 YU QIN E SEBO, S. A. Simplificado modelagem campo magnético e cálculo de grandes bobinas de ar-núcleo do reator. *Magnetics, IEEE Transactions on*, v. 32, n. 5. Citado na página 47.
- 44 JI JUAN E YU, J.-H. e. Y. Y.-F. e. Y. G. e. E. J. Pesquisa da distribuição do campo magnético e corpo de protecção ajuste para air-core reactor [j]. Citado na página 47.
- 45 COSTA, P. F.; SANTOS, I. M. Vantagens do protetor por limitação de corrente-clip. *Revista Eletricidade Moderna*, p. 52–57, 1990. Citado na página 48.
- 46 ARRILLAGA, J. *High voltage direct current transmission*. [S.l.]: Iet, 1998. Citado na página 51.
- 47 RUDERVALL, R.; CHARPENTIER, J.; SHARMA, R. High voltage direct current (hvdc) transmission systems technology review paper. *Energy week*, v. 2000, 2000. Citado na página 51.
- 48 BROCHU, J. et al. Interphase power controller adapted to the operating conditions of networks. *Power Delivery, IEEE Transactions on, IEEE*, v. 10, n. 2, p. 961–969, 1995. Citado na página 52.
- 49 BROCHU, J. e. a. The interphase power controller - a new concept for managing power flow within ac networks. *Power Delivery, IEEE Transactions on, IEEE*, v. 9, n. 2, 1994. Citado na página 53.
- 50 LEMAY, J.; BROCHU, J.; BEAUREGARD, F. Interphase power controllers. *ABB Review*, p. 65, 2000. Citado na página 54.
- 51 BROCHU, J. et al. The interphase power controller: a new concept for managing power flow within ac networks. *Power Delivery, IEEE Transactions on, IEEE*, v. 9, n. 2, p. 833–841, 1994. Citado na página 54.
- 52 BEAUREGARD, F. et al. Interphase power controller with voltage injection. *Power Delivery, IEEE Transactions on, IEEE*, v. 9, n. 4, p. 1956–1962, 1994. Citado na página 54.
- 53 BROCHU, J. et al. Application of the interphase power controller technology for transmission line power flow control. *Power Delivery, IEEE Transactions on, IEEE*, v. 12, n. 2, p. 888–894, 1997. Citado na página 54.
- 54 FARMAD, M. et al. An efficient algorithm for determining the values of elements of interphase power controller as a fault limiter. In: IEEE. *Power Systems Conference and Exposition, 2006. PSCE'06. 2006 IEEE PES*. [S.l.], 2006. p. 1493–1497. Citado na página 54.

- 55 SYBILLE, G. et al. Simulator demonstration of the interphase power controller technology. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 11, n. 4, p. 1985–1992, 1996. Citado na página 55.
- 56 HINGORANI, N. G.; GYUGYI, L.; EL-HAWARY, M. *Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems*. [S.l.]: IEEE press New York, 2000. v. 1. Citado 2 vezes nas páginas 56 e 57.
- 57 SONG, Y.-H.; JOHNS, A. *Flexible ac transmission systems (FACTS)*. [S.l.]: IET, 1999. Citado 2 vezes nas páginas 57 e 58.
- 58 JENKINS, A. R. M. T. e N. *Explorando o TCSC como Limitador de Corrente de Curto em Sistemas de Transmissão*. [S.l.]: XIII ERLAC, CE-13, Ciudad de Leste, Paraguai, 1999. Citado na página 58.
- 59 GOR, V. et al. Sccl—a new type of facts based short-circuit current limiter for application in high-voltage systems. In: *Proceedings of CIGRE, session*. [S.l.: s.n.], 2004. v. 2004, p. B4–209. Citado na página 58.
- 60 FISCHER, S.; POVH, D.; SCHMITT, H. Superconducting fault current limiters—getting a grip to short-circuit currents’. In: *Proc. 1999 International Conference on Electricity Distribution-CIRED, Sess.* [S.l.: s.n.], 1999. v. 1. Citado na página 59.
- 61 CHEN, M. et al. High temperature superconductors for power applications. *Journal of the European ceramic society*, Elsevier, v. 24, n. 6, p. 1815–1822, 2004. Citado na página 59.
- 62 PAUL, W.; CHEN, M. Superconducting control for surge currents. *Spectrum, IEEE*, IEEE, v. 35, n. 5, p. 49–54, 1998. Citado na página 59.
- 63 FISCHER, S. et al. System requirements and test of superconducting fault current limiters. *CIGRE Session 2000*, n. 13-207, 2000. Citado na página 59.
- 64 AMON, J.; HARTUNG, K. 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. *Anais do XVI SNPTEE*, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 59 e 60.
- 65 HASSENZAHL, W. V. et al. Electric power applications of superconductivity. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 92, n. 10, p. 1655–1674, 2004. Citado na página 59.
- 66 ROGERS, J. et al. Superconducting fault current limiter and inductor design. *Magnetics, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 19, n. 3, p. 1054–1058, 1983. Citado na página 59.
- 67 MEYER, J.-M.; RUFER, A. A dc hybrid circuit breaker with ultra-fast contact opening and integrated gate-commutated thyristors (igcts). *Power Delivery, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 21, n. 2, p. 646–651, 2006. Citado na página 60.
- 68 BROWN, H.; PERSON, C. Short circuit studies of large systems by the impedance matrix method. In: *Proceedings IEEE PICA Conf., Pittsburgh, PA*. [S.l.: s.n.], 1967. p. 335–342. Citado na página 66.

- 69 OLIVIEIRA, C. et al. Introdução a sistemas elétricos de potência—componentes simétricas, 2ª edição. *São Paulo*, 1996. Citado na página 67.
- 70 GRAINGER, J. J.; STEVENSON, W. D. *Power system analysis*. [S.l.]: McGraw-Hill New York, 1994. v. 31. Citado na página 70.
- 71 YPMA, T. J. Historical development of the newton-raphson method. *SIAM review*, SIAM, v. 37, n. 4, p. 531–551, 1995. Citado na página 74.
- 72 FROBERG, C.-E.; FRHOBERG, C. E. *Introduction to numerical analysis*. [S.l.]: Addison-Wesley Reading, Massachusetts, 1969. Citado na página 74.
- 73 WHITTAKER, E. T.; ROBINSON, G. *The calculus of observations*. [S.l.]: Blackie London, 1924. Citado na página 74.
- 74 LINDEN, R. *Algoritmos genéticos (2a edição)*. [S.l.]: Brasport, 2008. Citado 7 vezes nas páginas 77, 78, 79, 80, 81, 104 e 108.
- 75 LINDEN, R. *Algoritmos genéticos (2a edição)*. [S.l.]: Ciência Moderna LTDA, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 77, 80 e 103.
- 76 GOLDBERG, D. E.; HOLLAND, J. H. Genetic algorithms and machine learning. *Machine learning*, Springer, v. 3, n. 2, p. 95–99, 1988. Citado 2 vezes nas páginas 77 e 78.
- 77 PINHO, A. F. de et al. Algoritmos genéticos: Fundamentos e aplicações. Citado na página 77.
- 78 GEN, M.; CHENG, R. *Genetic algorithms and engineering optimization*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2000. v. 7. Citado na página 78.
- 79 ALMEIDA, L. F. et al. Otimização de alternativas para o desenvolvimento de campos de petróleo. *Gestao & Produção*, SciELO Brasil, v. 14, n. 3, p. 489–503, 2007. Citado na página 79.
- 80 SOARES, M. M. *Análise do Uso de Algoritmos Genéticos na Otimização do Planejamento Mestre da Produção*. Tese (Doutorado) — Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2006. Citado na página 79.
- 81 TORABI, S. A.; GHOMI, S. F.; KARIMI, B. A hybrid genetic algorithm for the finite horizon economic lot and delivery scheduling in supply chains. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 173, n. 1, p. 173–189, 2006. Citado na página 80.
- 82 BARBOZA, A. O. Simulação e técnicas da computação evolucionária aplicadas a problemas de programação linear inteira mista. Curitiba, 2010. Citado na página 80.
- 83 SILVA, A. P. e; MICHAELIS, H. *Michaelis: moderno dicionário da língua portuguesa*. [S.l.]: Melhoramentos, 1998. Citado na página 80.
- 84 BENTO, E.; KAGAN, N. Algoritmos genéticos e variantes na solução de problemas de configuração de redes de distribuição. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica*, SciELO Brasil, v. 19, n. 3, p. 302–315, 2008. Citado na página 80.
- 85 HICKS, C. A genetic algorithm tool for optimising cellular or functional layouts in the capital goods industry. *International Journal of Production Economics*, Elsevier, v. 104, n. 2, p. 598–614, 2006. Citado na página 81.

- 86 CHIPPERFIELD, A.; FLEMING, P.; FONSECA, C. Genetic algorithm tools for control systems engineering. In: *Proceedings of Adaptive Computing in Engineering Design and Control*. [S.l.: s.n.], 1994. p. 128–133. Citado na página 81.
- 87 KONAK, A.; COIT, D. W.; SMITH, A. E. Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial. *Reliability Engineering & System Safety*, Elsevier, v. 91, n. 9, p. 992–1007, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 81 e 91.
- 88 CHIPPERFIELD, A.; FLEMING, P. The matlab genetic algorithm toolbox. In: IET. *Applied control techniques using MATLAB, IEE Colloquium on*. [S.l.], 1995. p. 10–1. Citado na página 81.
- 89 BARDANACHVILI, C. A. *Otimização Multiobjetivo com Estratégias Evolutivas Aplicada a Projetos Estruturais*. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, 2006. Citado na página 84.
- 90 COHON, J. L. *Multiobjective programming and planning*. [S.l.]: Courier Corporation, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 86 e 89.
- 91 STEUER, R. E. *Multiple criteria optimization: theory, computation, and applications*. [S.l.]: Wiley, 1986. Citado na página 86.
- 92 DEB, K. *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2001. v. 16. Citado 4 vezes nas páginas 86, 88, 90 e 103.
- 93 DEB, K. et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-ii. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 6, n. 2, p. 182–197, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 90 e 103.
- 94 FONSECA, C. M.; FLEMING, P. J. et al. Genetic algorithms for multiobjective optimization: Formulation discussion and generalization. In: CITESEER. *ICGA*. [S.l.], 1993. v. 93, p. 416–423. Citado 2 vezes nas páginas 90 e 91.
- 95 SCHAFFER, J. D. Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Genetic Algorithms, Pittsburgh, PA, USA, July 1985*. [S.l.: s.n.], 1985. p. 93–100. Citado na página 91.
- 96 HORN, J.; NAFPLIOTIS, N.; GOLDBERG, D. E. A niched pareto genetic algorithm for multiobjective optimization. In: IEEE. *Evolutionary Computation, 1994. IEEE World Congress on Computational Intelligence., Proceedings of the First IEEE Conference on*. [S.l.], 1994. p. 82–87. Citado na página 91.
- 97 SRINIVAS, N.; DEB, K. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. *Evolutionary computation*, MIT Press, v. 2, n. 3, p. 221–248, 1994. Citado na página 91.
- 98 ZITZLER, E.; THIELE, L. Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength pareto approach. *evolutionary computation, IEEE transactions on*, IEEE, v. 3, n. 4, p. 257–271, 1999. Citado 2 vezes nas páginas 92 e 93.
- 99 ZITZLER, E.; LAUMANN, M.; BLEULER, S. A tutorial on evolutionary multiobjective optimization. In: *Metaheuristics for multiobjective optimisation*. [S.l.]: Springer, 2004. p. 3–37. Citado na página 94.

- 100 (ICSEG), I. C. for a S. E. G. *Benchmarks Systems IEEE*. 2015. Disponível em: <http://publish.illinois.edu/smartergrid>. Citado 2 vezes nas páginas 98 e 111.
- 101 DEB, K.; GOYAL, M. A combined genetic adaptive search (geneas) for engineering design. *Computer Science and Informatics*, Citeseer, v. 26, p. 30–45, 1996. Citado 2 vezes nas páginas 104 e 105.
- 102 ELÉTRICA, A. N. de E. *Tarifas de Aplicação e Base Ecocômica*. 2015. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/atosdodia_Reduc%CC%83oTarifaria/atosREH_1416_24012013_ANEXO_DIR.pdf. Citado na página 111.

Anexos

ANEXO A – Redes de Sequência

As redes de sequência equivalentes dos elementos do circuito podem ser verificadas abaixo. Neste trabalho foram calculados dois tipos de falta: trifásica e monofásica.

O curto-circuito trifásico é denominado simétrico porque não provoca desequilíbrio no sistema. Considera-se que todos os condutores da rede são solicitados de modo equivalente e conduzem o mesmo valor eficaz da corrente de falta. Para realização do cálculo de curto-circuito trifásico considera-se o circuito equivalente de sequência positiva, independente se o curto envolve ou não a terra. O circuito equivalente para o curto-circuito trifásico pode ser visto em [A.1](#).

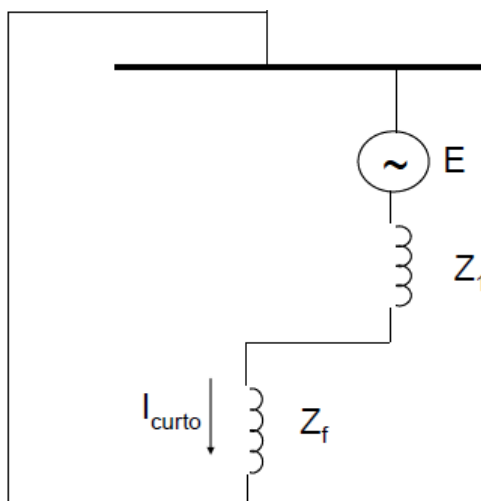


Figura A.1 – Circuito equivalente para curto-circuito trifásico.

em que: E é a tensão de curto-circuito, Z_1 é a impedância de sequência positiva e Z_f é a impedância de falta.

O curto-circuito monofásico é denominado assimétrico porque provoca desequilíbrio no sistema. Para que esse tipo de cálculo seja realizado é necessário o uso de componentes simétricas, teoria descrita no tópico **Teoria Básica de Curto-Circuito e Fluxo de Potência**.

O circuito equivalente para o curto-circuito monofásico pode ser visto em [A.2](#).

em que: E é a tensão de curto-circuito, Z_1 é a impedância de sequência positiva, Z_2 é a impedância de sequência negativa, Z_0 é a impedância de sequência zero e Z_f é a impedância de falta.

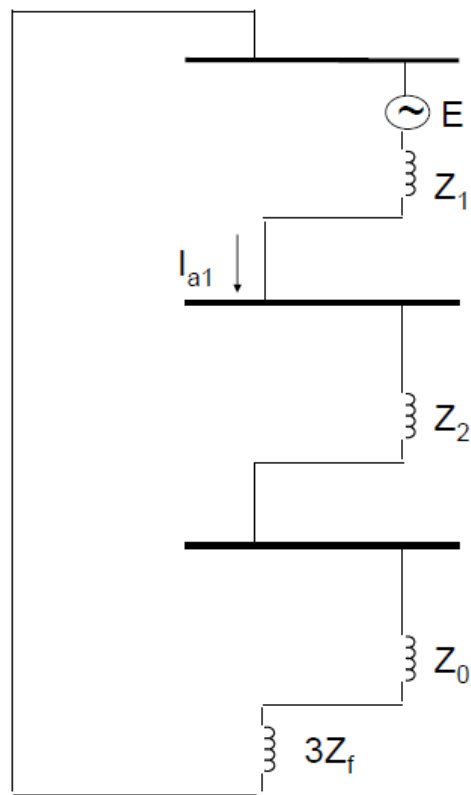


Figura A.2 – Circuito equivalente para curto-circuito monofásico.