

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

IGOR BRANDÃO MACHADO MATSUO

**OTIMIZAÇÃO DO AJUSTE DE RELÉS DE SOBRECORRENTE DIRECIONAIS EM
REDES ELÉTRICAS NÃO RADIAIS**

São Paulo
2012

IGOR BRANDÃO MACHADO MATSUO

**OTIMIZAÇÃO DO AJUSTE DE RELÉS DE SOBRECORRENTE DIRECIONAIS EM
REDES ELÉTRICAS NÃO RADIAIS**

Projeto de Formatura apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, como exigência para a conclusão do curso de Engenharia Elétrica com ênfase em Energia e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Cesar Senger

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

São Paulo
2012

IGOR BRANDÃO MACHADO MATSUO

**OTIMIZAÇÃO DO AJUSTE DE RELÉS DE SOBRECORRENTE DIRECIONAIS EM
REDES ELÉTRICAS NÃO RADIAIS**

Projeto de Formatura apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, como exigência para a conclusão do curso de Engenharia Elétrica com ênfase em Energia e Automação.

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

São Paulo
2012

IGOR BRANDÃO MACHADO MATSUO

**OTIMIZAÇÃO DO AJUSTE DE RELÉS DE SOBRECORRENTE DIRECIONAIS EM
REDES ELÉTRICAS NÃO RADIAIS**

Projeto de Formatura apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, como exigência para a conclusão do curso de Engenharia Elétrica com ênfase em Energia e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Cesar Senger

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

São Paulo
2012

*A meus familiares e aos
meus amigos,
os quais me incentivam e me
mantêm firme nessa caminhada.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, minha mãe Maluh, meu pai Nelson e meus irmãos Marcel e Eric, que vêm me acompanhando por uma vida com total apoio e incentivos.

A minha nova sobrinha Claire, que me trouxe muita alegria e força no final dessa etapa de minha caminhada, e sua mãe, Tatiana, minha cunhada e especial membro de minha família há muitos anos.

A minha namorada, Livia, pelo apoio e amor incondicional, e também pelos constantes incentivos, sejam na vida pessoal, sejam na vida profissional.

A meus amigos, pelos momentos e alegrias que sempre me trazem.

Aos meus colegas de faculdade, em especial do PEA, que sempre demonstraram espírito de união e ajuda.

Ao professor Eduardo Cesar Senger, pela orientação e por acreditar em meu potencial.

Aos professores da POLI-USP, que foram essenciais para o meu desenvolvimento profissional, em especial os professores do PEA, que sempre foram muito abertos para/com os alunos, demonstrando especial preocupação com o desenvolvimento de todos.

*"Não faz mal que seja pouco,
O que importa é que o avanço de hoje
Seja maior que o de ontem
Que nossos passos de amanhã
Sejam mais largos que os de hoje
Atuem agora e vivam o presente
Com a certeza de que neste exato instante
Está se erguendo o futuro
Deixem seus méritos gravados
Na história de suas contínuas vitórias!
A dificuldade no momento presente
Será a glória em seu futuro!"*

(Daisaku Ikeda)

RESUMO

Redes de subtransmissão podem ter como principal proteção o uso de relés de sobrecorrente direcionais, os quais podem ainda ser usados como proteção de backup em linhas de transmissão. Em condições de curto-circuito, deve-se fazer com que os tempos de atuação dos relés sejam os menores possíveis garantindo, contudo, a correta coordenação entre os relés da rede a fim de evitar falhas de operação dos relés de retaguarda. Este trabalho objetiva a formulação de um método de otimização para o problema do ajuste dos parâmetros de relés de sobrecorrente direcionais, sobretudo em redes não radiais e/ou com mais de uma fonte geradora, as quais apresentam maior complexidade quando do tratamento das lógicas de coordenação entre os tempos de atuação dos relés. Há diversos métodos de otimização que dependem das estimativas iniciais (como o método de Newton-Raphson), as quais, dada a complexidade de redes malhadas, são difíceis de serem obtidas. Outros métodos não permitem uma vasta procura da solução global no espaço de busca possível, podendo resultar em ótimos locais. Propõe-se aqui um método baseado em algoritmo genético (AG), que busca evitar ambos esses problemas.

Palavras-chave: relé de sobrecorrente, proteção direcional, coordenação, redes não radiais, otimização, algoritmo genético.

ABSTRACT

Subtransmission Networks can have directional overcurrent relays as the main protection devices, which can also be used as backup protection in transmission lines. Therefore, one should set the relays parameters in order to have the shortest possible operating times when there is a short-circuited line, ensuring, nevertheless, the correct coordination between the relays of the network in order to prevent misoperation of the backup relays. This present study aims at formulating an optimization method for the problem of adjusting the parameters of directional overcurrent relays, especially in non-radial networks, which present greater complexity when dealing with the logic of coordination between the operating times of the relays. There are many optimization methods that depend on the initial estimates (like the method of Newton-Raphson), which, given the complexity of looped networks, are difficult to be obtained. Other methods do not allow an extensive search of the global solution in all the possible search space, which may result in local optima. A method based on genetic algorithm (GA) is proposed herein, which seeks to avoid both of these problems.

Key-words: overcurrent relays, directional protection, coordination, looped networks, optimization, genetic algorithm.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1:	Curvas Características genéricas de um relé para um mesmo MT	22
Figura 2.2:	Efeito do multiplicador de tempo em curvas genéricas com mesmo $K1$ e $K2$..	22
Figura 2.3:	Esquema genérico de ligação usando uma tensão proveniente das linhas como grandeza polarização e uma corrente de uma das linhas como grandeza de operação.....	25
Figura 2.4:	Diagrama Fasorial genérico das grandezas de polarização e operação.	25
Figura 2.5:	Diagramas Fasoriais dos tipos de conexões em relés direcionais.	26
Figura 3.1:	Curva temporizada inversa e coordenação em rede radial.	30
Figura 3.2:	Fasores em condição pré-falta.	31
Figura 3.3:	Fasores em condição de falta dupla-fase ab	32
Figura 3.4:	Fasores das grandezas de polarização e operação pré e durante a falta dupla-fase ab com a característica direcional ajustada.....	32
Figura 3.5:	Rede não radial. (fonte: Protective Relaying: Principles and Applications – J. Lewis Blackburn and Thomas J. Domin).....	34
Figura 3.6:	Curto-circuito na linha entre relés 5 e 6.	35
Figura 4.1:	Fluxograma geral do Simulated Annealing.	41
Figura 4.2:	Exemplo de cromossomo com 6 genes.....	43
Figura 4.3:	Cromossomos escolhidos para a operação de cruzamento.	44
Figura 4.4:	Após a operação, o 3º, 5º e 6º genes cruzaram.....	44
Figura 4.5:	Cromossomo escolhido para a operação de mutação.....	44
Figura 4.6:	Após a operação, o 2º e 4º genes sofreram mutação.	44
Figura 4.7:	Fluxograma de um Algoritmo Genético.	45
Figura 5.1:	Cromossomo para codificação real.....	50
Figura 5.2:	Cromossomo para codificação binária.....	51
Figura 5.3:	O primeiro gráfico é o <i>fitness</i> cru. O segundo é a nota uniformizada por <i>scaled fitness</i>	59
Figura 5.4:	Roleta ponderada antes da aplicação do <i>scaled fitness</i>	60
Figura 5.5:	Roleta ponderada após a aplicação do <i>scaled fitness</i> . Se o número 0,55 for sorteado, o indivíduo B é selecionado.	60

Figura 5.6:	Para cada par de indivíduos formado, aplica-se a probabilidade pc para decidir se haverá cruzamento ou não. Neste caso haverá cruzamento, pois o número sorteado foi menor que pc .	61
Figura 5.7:	Par de cromossomos de dez bits antes (a) e depois (b) do Cruzamento de Um Ponto a partir do 7º bit.	62
Figura 5.8:	Par de cromossomos de dez bits antes (a) e depois (b) do Cruzamento de Dois Pontos do 7º bit ao 3º bit.	63
Figura 5.9:	Par de cromossomos de dez bits antes (a) e depois (b) do Cruzamento de Dois Pontos do 7º bit ao 3º bit mostrando a característica circular do cromossomo.	63
Figura 5.10:	Cromossomo de dez bits em codificação binária antes (a) e depois (b) de mutação no 8º bit.	66
Figura 5.11:	Cromossomo de dez bits em codificação real antes (a) e depois (b) de mutação no 2º bit.	66
Figura 5.12:	Fluxograma geral do algoritmo genético aplicado no problema de proteção.	68
Figura 6.1:	Rede exemplo para simulação.	71
Figura 6.2:	Valor médio da função objetivo e valor máximo do <i>fitness</i> na população em função das gerações.	77
Figura C.1:	Fasores de corrente e tensão no relé 1 (na fase B) para falta dupla-fase (fases BC) no ponto 1 (a) e no ponto 2 (b).	99
Figura C.2:	Fasores de corrente e tensão no relé 6 (na fase B) para falta dupla-fase (fases BC) no ponto 5.	100
Figura C.3:	Fasores de corrente e tensão no relé 1 (na fase B) para falta dupla-fase-terra (fases BC) no ponto 1 (a) e no ponto 2 (b).	100
Figura C.4:	Fasores de corrente e tensão no relé 1 (neutro) para falta dupla-fase-terra (fases BC) no ponto 1 (a) e no ponto 2 (b).	101
Figura C.5:	Fasores de corrente e tensão no relé 6 (na fase B) para falta dupla-fase-terra (fases BC) no ponto 5.	101
Figura C.6:	Fasores de corrente e tensão no relé 6 (neutro) para falta dupla-fase-terra (fases BC) no ponto 5.	102
Figura C.7:	Fasores de corrente e tensão no relé 1 (fase A) para falta monofásica (fase A) no ponto 1 (a) e no ponto 2 (b).	102

Figura C.8: Fasores de corrente e tensão no relé 1 (neutro) para falta monofásica (fase A) no ponto 1 (a) e no ponto 2 (b).....	103
Figura C.9: Fasores de corrente e tensão no relé 6 (fase A) para falta monofásica (fase A) no ponto 5.	103
Figura C.10: Fasores de corrente e tensão no relé 6 (neutro) para falta monofásica (fase A) no ponto 5.	104
Figura C.11: Fasores de corrente e tensão no relé 1 (fase A) para falta monofásica (fase A) com resistência de falta de 20Ω no ponto 1 (a) e no ponto 2 (b).....	104
Figura C.12: Fasores de corrente e tensão no relé 1 (neutro) para falta monofásica (fase A) com resistência de falta de 20Ω no ponto 1 (a) e no ponto 2 (b).....	105
Figura C.13: Fasores de corrente e tensão no relé 1 (fase B) para falta trifásica no ponto 2.	105
Figura C.14: Fasores de corrente e tensão no relé 6 (fase B) para falta trifásica no ponto 5.	106
Figura D.1: Primeira rede radial para testes.....	107
Figura D.2: Segunda rede radial para testes.....	107
Figura D.3: Primeira rede malhada para testes.....	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1: Parâmetros no Algoritmo Genético e no Problema de Proteção.	52
Tabela 5.2: Formato da tabela de dados de módulos ou de fases das correntes de curtos-circuitos para m relés e n pontos de falta.	69
Tabela 5.3: Formato da tabela de dados de módulos ou de fases das tensões de curtos-circuitos para o barras e n pontos de falta.	69
Tabela 5.4: Formato da tabela de dados da localização dos relés em relação às barras.	69
Tabela 6.1: Dados da fonte equivalente de 138kV.	71
Tabela 6.2: Dados das linhas – cabos 336.4 MCM.	71
Tabela 6.3: Equivalente a 138kV dos geradores mais transformadores (os transformadores não são representados na Figura 6.1) nas barras J e L.	72
Tabela 6.4: Coordenações entre relés na rede exemplo.	72
Tabela 6.5: Dados do problema de proteção.	72
Tabela 6.6: Parâmetros do algoritmo genético.	73
Tabela 6.7: Resultado dos multiplicadores de tempo para codificação real.	74
Tabela 6.8: Tempos de atuação (s) para faltas trifásicas com e sem os geradores nas barras J e L.	74
Tabela 6.9: Tempos de atuação (s) para faltas dupla-fase com e sem os geradores nas barras J e L.	75
Tabela 6.10: Tempos de atuação (s) para faltas dupla-fase-terra com e sem os geradores nas barras J e L.	76
Tabela 6.11: Tempos de atuação (s) para faltas monofásicas com e sem os geradores nas barras J e L.	76
Tabela 6.12: Resultado dos multiplicadores de tempo para codificação binária com dez bits.	79
Tabela 6.13: Resultado dos multiplicadores de tempo para codificação binária com sete bits.	79
Tabela 7.1: Metodologia, implementações e melhorias.	82
Tabela A.1: Resultado dos multiplicadores de tempo para codificação binária com dez bits.	93

Tabela A.2: Tempos de atuação (s) para faltas trifásicas com e sem os geradores nas barras J e L.....	93
Tabela A.3: Tempos de atuação (s) para faltas dupla-fase com e sem os geradores nas barras J e L.....	94
Tabela A.4: Tempos de atuação (s) para faltas dupla-fase-terra com e sem os geradores nas barras J e L.....	94
Tabela A.5: Tempos de atuação (s) para faltas monofásicas com e sem os geradores nas barras J e L.....	95
Tabela B.1: Resultado dos multiplicadores de tempo para codificação binária com sete bits.	96
Tabela B.2: Tempos de atuação (s) para faltas trifásicas com e sem os geradores nas barras J e L.....	96
Tabela B.3: Tempos de atuação (s) para faltas dupla-fase com e sem os geradores nas barras J e L.....	97
Tabela B.4: Tempos de atuação (s) para faltas dupla-fase-terra com e sem os geradores nas barras J e L.....	97
Tabela B.5: Tempos de atuação (s) para faltas monofásicas com e sem os geradores nas barras J e L.....	98

SUMÁRIO

1	Introdução.....	16
1.1	Contexto	16
1.2	O sistema de proteção por relés.....	16
1.3	Estrutura do trabalho	18
2	Relés	19
2.1	Introdução	19
2.2	Relés de sobrecorrente.....	20
2.2.1	Unidades instantâneas (função ANSI 50)	20
2.2.2	Unidades temporizadas (função ANSI 51).....	20
2.3	Relés direcionais (função ANSI 67)	23
2.4	Transformador de Corrente (TC)	26
2.4.1	Corrente nominal secundária	27
2.4.2	Corrente nominal primária.....	27
3	Proteção, coordenação e seletividade	29
3.1	Introdução	29
3.2	Coordenação e seletividade em redes radiais.....	29
3.3	Proteção direcional.....	31
3.4	Proteção, coordenação e seletividade em redes não radiais.....	33
4	Métodos de otimização.....	37
4.1	Introdução	37
4.2	Programação linear.....	37
4.3	Programação não linear com base em trajetórias de estado.....	38
4.3.1	Método de Newton	38
4.3.2	Método do gradiente	39
	Este método segue funções do tipo:.....	39
4.3.3	Estocasticidade	39
4.4	Simulated Annealing (Recozimento Simulado)	39
4.5	Tabu Search	41
4.6	Algoritmo genético	42
4.7	Método escolhido.....	45
5	Algoritmo Genético aplicado ao problema de proteção.....	46

5.1	Introdução	46
5.2	Entendimento básico acerca de Algoritmos Genéticos.....	46
5.3	Formulação do problema	48
5.4	Determinação do cromossomo	50
5.4.1	Codificação real	50
5.4.2	Codificação binária	51
5.5	Etapas do AG.....	53
5.5.1	Geração da população inicial.....	53
5.5.2	Avaliação (<i>fitness</i>).....	53
5.5.3	Seleção.....	58
5.5.4	Cruzamento	60
5.5.5	Mutação.....	65
5.5.6	Elitismo	67
5.5.7	Condições de parada	67
5.6	Dados necessários para início do processamento do AG.....	69
6	Estudo de caso	70
6.1	Introdução	70
6.2	Rede exemplo	70
6.3	Dados referentes ao problema de proteção	72
6.4	Dados referentes ao algoritmo genético	73
6.5	Resultados obtidos com codificação real	73
6.6	Codificação real x codificação binária.....	78
6.7	Codificação binária com 7 bits x codificação binária com 10 bits	79
6.8	Variação dos parâmetros do algoritmo genético	80
6.8.1	Probabilidade de mutação	80
6.8.2	Probabilidade de cruzamento	80
6.8.3	Tamanho da população	81
6.8.4	Porcentagem de elitismo.....	81
7	Observações sobre o desenvolvimento do algoritmo e testes.....	82
7.1	Introdução	82
7.2	Etapas de desenvolvimento do algoritmo.....	82
7.3	Problemas, soluções e aperfeiçoamentos.....	83
8	Conclusão	86
8.1	Método desenvolvido.....	86

8.2	Possibilidades para o futuro	87
8.2.1	Algoritmo genético	87
8.2.2	Problema de Proteção e Coordenação.....	89
9	Referências bibliográficas	91
	APÊNDICE A - Resultados para codificação binária com dez bits.....	93
	APÊNDICE B - Resultados para codificação binária com sete bits.....	96
	APÊNDICE C - Fasores de corrente de operação e tensão de polarização em condições de curto-circuito e região de torque da característica direcional	99
	APÊNDICE D - Redes para testes iniciais	107

1 Introdução

1.1 Contexto

O recente crescimento econômico no Brasil tem levado à expansão do Sistema Elétrico Brasileiro, abrangendo a geração de energia, com a construção de centrais hidrelétricas, como a Usina Hidrelétrica de Belo Monte, no Pará, e a Usina Hidrelétrica Santo Antônio, na Rondônia, usinas termelétricas, como a recente Usina Termelétrica Porto do Pecém, no Ceará, e também a inserção de diversas usinas eólicas. Juntamente, há a necessidade de expansão da rede elétrica, o que compreende desde sistemas de transmissão, passando pela subtransmissão até a distribuição de energia. É cada vez mais essencial que essas redes tenham altos índices de confiabilidade, exigindo um sistema de proteção cada vez mais confiável e seguro, de forma a garantir a continuidade no fornecimento de energia elétrica.

Há, porém, um problema que muitas vezes não é possível evitar, que é a ocorrência de curtos-circuitos, os quais resultam em valores elevados de sobrecorrente e podem danificar sistemas e equipamentos/componentes, além de promover riscos à segurança pessoal e interrupções no fornecimento de energia elétrica. Se algumas vezes não podemos evitá-los, devemos então fazer o possível para isolar o defeito rapidamente e garantir a maior continuidade possível no fornecimento de energia, cuidando sempre da garantia da segurança pessoal. Nesse contexto entram os relés de proteção, os quais possuem papel essencial na isolação rápida da falta.

1.2 O sistema de proteção por relés

Relés são responsáveis por proteger os equipamentos/componentes existentes na rede, como por exemplo, linhas de transmissão, subtransmissão e distribuição, transformadores de potência, máquinas elétricas de potência; além daqueles em subestações, indústrias e outros consumidores. Um sistema de proteção por relés pode ser considerado de baixíssimo custo frente ao custo dos equipamentos que protege, provendo alto índice de retorno de investimento. Se por um lado eles são responsáveis pela isolação de defeitos, por outro

acabam causando interrupções desnecessárias no fornecimento de energia quando ocorrem atuações indevidas, o que também pode resultar em grandes prejuízos para as indústrias por paradas na produção e para as concessionárias/permissionárias, as quais podem ser multadas pelos órgãos reguladores e ter perda de receita por energia não fornecida. Deve-se, portanto, garantir um bom funcionamento e uma boa parametrização dos relés de proteção a fim de evitar tanto a permanência de curtos-circuitos quanto atuações indevidas.

Estuda-se no presente trabalho os relés de sobrecorrente direcionais, os quais devem atuar levando em conta a seletividade e a temporização para coordenação da proteção de backup com as demais proteções, de forma a isolar uma falta rapidamente ao mesmo tempo em que interrompe o menor trecho de rede possível, garantindo assim o fornecimento de energia na maior parte possível do sistema. Esses relés podem ser utilizados como proteção principal em redes de subtransmissão ou como proteção de backup em redes de transmissão, sobretudo em redes malhadas ou com mais de uma fonte geradora. Uma mesma parametrização dos relés deve assegurar a proteção da rede em diversas condições e situações operativas, como por exemplo, os diversos tipos de falta e topologias da rede, dando atuação prioritária aos relés de proteção primária e atuação dos relés de proteção de retaguarda em caso de falha na operação daqueles.

Até recentemente, os cálculos para a parametrização dos sistemas de proteção eram feitos manualmente, porém, dependendo da complexidade da rede elétrica, a tarefa de realizar o estudo de coordenação pode se tornar trabalhosa. Com o avanço da tecnologia e das ferramentas computacionais, essa tarefa foi sendo facilitada. Há atualmente alguns programas para a determinação dos ajustes de coordenações de relés, mas grande parte usa técnicas complicadas e não eficientes, não fornecendo resultados ótimos das parametrizações dos relés. Há ainda outros que nem sequer consideram otimização. Este trabalho trata da parametrização de relés de sobrecorrente direcionais temporizados, sobretudo quando em redes não radiais, que possuem grande complexidade nas lógicas de parametrização. O método desenvolvido busca maior eficiência na otimização a fim de melhorar tanto a convergência dos resultados quanto as parametrizações dos relés, de forma a minimizar os impactos decorrentes de curtos-circuitos.

1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho é dividido em nove capítulos, sendo que o corrente capítulo aborda aspectos gerais sobre o sistema de proteção por relés de sobrecorrente direcionais e suas necessidades. O capítulo 2 aborda alguns conceitos a respeito de relés de sobrecorrente direcionais para dar a base teórica necessária para o entendimento do trabalho, tendo especial importância a característica direcional. O capítulo 3 trata de aspectos importantes a respeito de sistemas de proteção por relés de sobrecorrente direcionais, em que se deve buscar a seletividade e a coordenação, sobretudo em redes não radiais, onde a característica direcional se torna essencial e as lógicas para se obter a correta coordenação entre os diversos relés de uma rede são mais complexas. Este trabalho não busca apenas um ajuste do sistema de proteção que forneça uma correta coordenação, mas também aquele que otimize o desempenho desse sistema. Para isso, deve-se dispor de um método de otimização que se adapte não simplesmente ao problema de proteção e coordenação, mas que também possua um bom desempenho para um objetivo que se queira alcançar. O capítulo 4 é o resultado de pesquisas acerca de métodos de otimização mostrando diversos métodos existentes e dando elementos para a escolha daquele que possa satisfazer da melhor forma possível as necessidades do problema. O capítulo 5 mostra o desenvolvimento do método de otimização escolhido, o algoritmo genético, aplicado ao problema de proteção, e detalhando suas características. Para testar o desempenho do método proposto, faz-se um estudo de caso no capítulo 6, onde o algoritmo implementado é aplicado em uma rede exemplo e os resultados são discutidos. O capítulo 7 aborda como foram algumas etapas durante a implementação do algoritmo, assim como alguns problemas, soluções e aperfeiçoamentos ao longo dela. O trabalho é finalizado com as conclusões e possibilidades para o futuro, no capítulo 8, e as referências bibliográficas utilizadas para o desenvolvimento do presente, no capítulo 9.

2 Relés

2.1 Introdução

Apresentam-se neste capítulo alguns aspectos importantes relacionados a relés, especificamente relés de sobrecorrente direcionais, os quais devem ser entendidos antes de se começar a entrar nos detalhes do tema do trabalho relacionados ao problema de otimização da proteção e coordenação.

O relé é um dispositivo por meio do qual um equipamento elétrico é operado quando se produzem variações nas condições deste ou do circuito em que ele está ligado, ou em outro equipamento ou circuito associado. Esta é a definição que a ABNT fornece a respeito do relé. Enquanto isso há outras normas que o definem como um dispositivo cuja função é detectar nas linhas ou equipamentos faltosos, condições perigosas ou indesejáveis do sistema, de forma a iniciar manobras convenientes de chaveamento ou fornecer aviso adequado.

Os relés podem ser classificados de diversas formas, como segundo as grandezas de atuação (elétricas, térmicas, mecânicas, ópticas, entre outras), segundo a natureza das grandezas a que respondem (corrente, tensão, potência, frequência, temperatura, entre outras), segundo o tipo construtivo (eletromecânicos, mecânicos, eletrônicos, estáticos, digitais, entre outros), segundo a função (sobrecorrente, subcorrente, sobrecorrente direcional, sobretensão, subtensão, potência, diferencial, distância, entre outros), segundo a forma de conexão com o sensor (no circuito primário; no circuito secundário do transformador de medição), segundo a fonte para atuação do sensor (corrente alternada ou contínua), quanto ao grau de funcionamento (primário, secundário, etc), segundo o posicionamento dos contatos (normalmente aberto ou fechado), segundo a aplicação (geradores, motores, transformadores, barramento, linhas, equipamentos) e quanto à temporização (instantâneos ou temporizados).

2.2 Relés de sobrecorrente

Este trabalho visa à otimização no ajuste de relés de sobrecorrente direcionais. O termo sobrecorrente indica que a sua grandeza de atuação é a corrente elétrica, e que o relé deve atuar quando aquela atinge ou supera um valor pré-ajustado conhecido como corrente de pickup.

2.2.1 Unidades instantâneas (função ANSI 50)

Atuam sem atraso intencional e se a corrente atingir um valor pré-ajustado $I_{p_{ins}}$. Costuma-se parametrizá-las ajustando $I_{p_{ins}}$ para um valor em torno de 25 a 35% maior que a magnitude da máxima corrente simétrica de falta (falta trifásica para relés de fase) no fim do trecho protegido (ou início do trecho seguinte). Dessa forma, a unidade operará para condições de curto-circuito máximo a até 70% da linha protegida, mantendo a seletividade sem atuar indevidamente para faltas em trechos posteriores, ou seja, evitará sobrealcance, CAMINHA [11].

2.2.2 Unidades temporizadas (função ANSI 51)

São configuradas para atuar com uma temporização que segue critérios estabelecidos por norma (este trabalho se baseia na IEC 60255).

i. Tempo definido

Atuam com um tempo definido de atraso de forma que coordenem com outros dispositivos de proteção com menor tempo de atuação.

ii. Tempo inverso

No lugar de se parametrizar um tempo de atuação, parametriza-se uma curva característica com relação inversa do tempo com a intensidade da corrente, conforme a seguinte equação (IEC 60255):

$$T = K_1 \frac{MT}{\left[\left(\frac{I}{I_p}\right)^{K_2} - 1\right]} \quad (2-1)$$

onde:

T é o tempo de atuação do relé;

MT é o multiplicador de tempo relacionado à posição da curva do relé;

I é a corrente de curto-circuito referida ao secundário do TC;

I_p é a corrente pré-ajustada de pickup no secundário do TC;

K_1 e K_2 são constantes relacionadas à característica inversa da curva utilizada.

As constantes K_1 e K_2 definem a característica tempo corrente do relé, a qual costuma ser classificada em normal inversa, muito inversa e extremamente inversa. Seus valores variam de acordo com a norma usada, sendo as seguintes equações as mais usuais segundo a norma IEC 60255 para relés de sobrecorrente:

$$\begin{array}{l} \text{Normal} \\ \text{Inversa} \end{array} \quad T = 0,14 \frac{MT}{\left[\left(\frac{I}{I_p}\right)^{0,02} - 1\right]} \quad (2-2)$$

$$\begin{array}{l} \text{Muito} \\ \text{Inversa} \end{array} \quad T = 13,5 \frac{MT}{\left[\left(\frac{I}{I_p}\right) - 1\right]} \quad (2-3)$$

$$\begin{array}{l} \text{Extremamente} \\ \text{Inversa} \end{array} \quad T = 80 \frac{MT}{\left[\left(\frac{I}{I_p}\right)^2 - 1\right]} \quad (2-4)$$

Usavam-se antigamente os relés de disco de indução, em que as constantes K_1 e K_2 eram inerentes ao relé comprado, ou seja, não havia a possibilidade de mudança após a compra. Atualmente fabricam-se majoritariamente os relés digitais, os quais permitem o ajuste de tais constantes de forma a alterar a característica tempo versus corrente. A Figura 2.1 mostra graficamente os três tipos de curva.

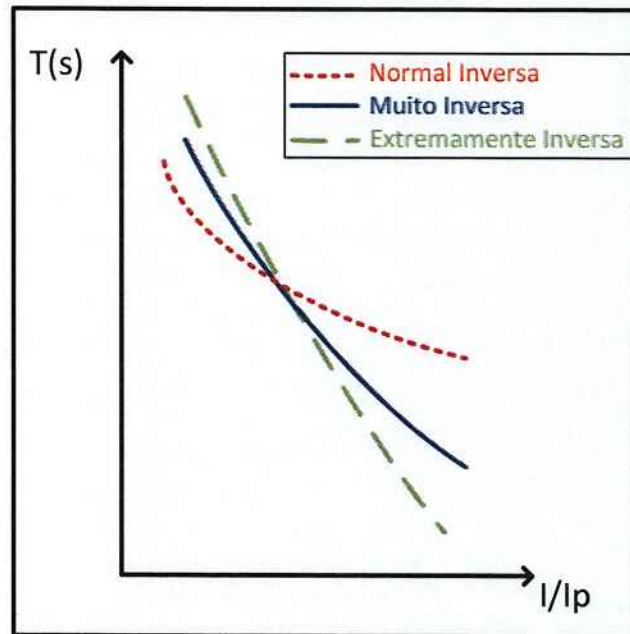


Figura 2.1: Curvas Características genéricas de um relé para um mesmo MT .

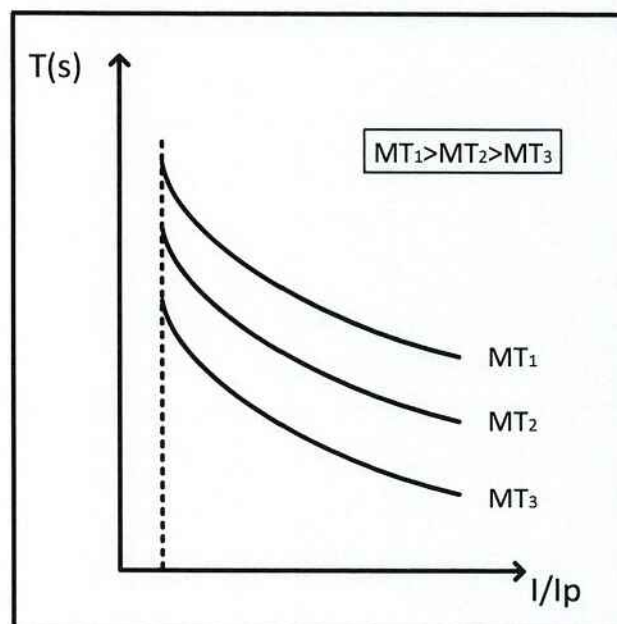


Figura 2.2: Efeito do multiplicador de tempo em curvas genéricas com mesmo K_1 e K_2 .

Comparando-se as curvas genéricas de um relé de sobrecorrente para um mesmo multiplicador de tempo (Figura 2.1) é possível perceber que a característica normal inversa é rápida para correntes menores e lenta para correntes elevadas, enquanto a extremamente inversa é lenta para baixas correntes e bastante rápida para correntes altas. A muito inversa é intermediária entre essas duas. Na Figura 2.2 percebe-se o efeito do multiplicador de tempo MT . Quanto mais alto seu valor, mais lenta é a operação do relé. É bom observar que tais curvas são, por norma, traçadas em eixos log x log e com I/I_p variando de 1,5 a 20.

As correntes de pickup, I_p , são as mínimas correntes de curto-circuito que devem passar pelos relés para resultar na atuação dos mesmos, sendo geralmente escolhidas seguindo-se os critérios estabelecidos na inequação (2-5) para os relés de fase, que leva em conta que deve estar acima da corrente de carga máxima que passa pelo relé, para evitar atuações indevidas, e abaixo da corrente mínima de curto-circuito que passa pelo relé, para ter sensibilidade o suficiente para responder a todos os curtos-circuitos. As constantes k_{p1} e k_{p2} são valores que devem ser maiores do que a unidade para dar uma margem de segurança nas restrições. Tem-se normalmente k_{p1} e k_{p2} em torno de 1,5.

$$k_{p1} * I_{carga\ máxima} \leq I_{p\ fase} \leq \frac{I_{curto-circuito\ mínimo}}{k_{p2}} \quad (2-5)$$

Para os relés de neutro, costuma-se ajustar a corrente de pickup para aproximadamente 10 a 20% da corrente nominal de carga, podendo atuar inclusive para condições de alto desequilíbrio de cargas no sistema trifásico, conforme a inequação (2-6).

$$0,1 * I_{carga\ nominal} \leq I_{p\ neutro} \leq 0,2 * I_{carga\ nominal} \quad (2-6)$$

2.3 Relés direcionais (função ANSI 67)

Relés com a característica direcional operam segundo uma direção preestabelecida. Para se obter o ajuste direcional usam-se grandezas de polarização e de operação e um ajuste de

ângulo de torque de máxima sensibilidade, conforme a seguinte equação genérica de um relé direcional:

$$H = E_1 E_2 \cos(\theta - \tau) \quad (2-7)$$

onde:

- H é a sensibilidade do relé;
- E_1 é a grandeza de polarização;
- E_2 é a grandeza de operação;
- θ é o ângulo entre as grandezas E_2 e E_1 ;
- τ é o ângulo de máxima sensibilidade.

As grandezas E_1 e E_2 podem ser tensões e/ou correntes. O mais comum é ter uma tensão como a grandeza de polarização e, sendo relés de sobrecorrente, uma corrente como a grandeza de operação.

A Figura 2.3 mostra um esquema de uma ligação genérica de um relé direcional de sobrecorrente na rede. A Figura 2.4 mostra os fasores da tensão de polarização e da corrente de operação. O ângulo τ de sensibilidade máxima para atuação do relé é ajustado em relação à tensão de polarização, onde é formado um vetor que, se o vetor da corrente de operação apresentar mesma direção, fornecerá torque máximo ao relé, permitindo sua atuação. Tomando 90° no sentido positivo e 90° no sentido negativo a partir do vetor de sensibilidade máxima, é formada uma linha a qual chamamos de linha de sensibilidade nula. A partir dessa linha são formadas duas regiões: uma de atuação do relé ($H > 0$) e outra de não atuação ($H < 0$). Nota-se a linha de sensibilidade nula (em linha cheia), onde há a transição entre as duas regiões.

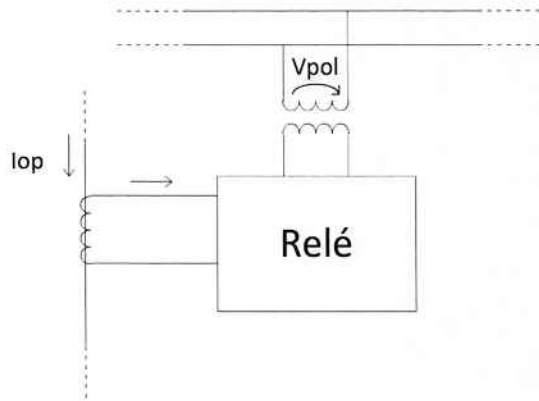


Figura 2.3: Esquema genérico de ligação usando uma tensão proveniente das linhas como grandeza polarização e uma corrente de uma das linhas como grandeza de operação.

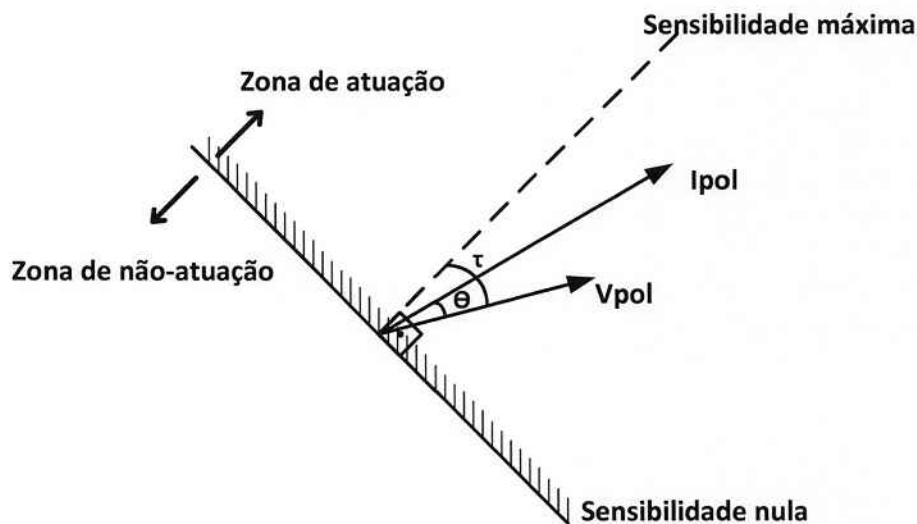


Figura 2.4: Diagrama Fasorial genérico das grandezas de polarização e operação.

A Figura 2.5 mostra as conexões comumente utilizadas nos relés direcionais. Se utilizarmos I_a como a corrente de operação, a conexão 90° (quadratura) pode ser obtida com a tensão V_{bc} como polarização, a conexão 30° (adjacente) com a tensão V_{ac} , a conexão 60° com a tensão $V_{ac} + V_{bc}$ e a conexão 0° com a tensão V_a . A primeira é a mais utilizada e costuma ser uma boa parametrização nos relés de sobrecorrente direcionais para que não haja atuações indevidas. Ressalta-se o fato de que tais nomes são provenientes dos ângulos formados entre a tensão de polarização e a corrente de operação de fator de potência unitário, ambas em condição pré-falta, mas durante a falta (situação na qual deve ser feita a análise para determinação do torque e sensibilidade máxima para estabelecer a região de atuação) os fasores se deslocaram e também mudaram de módulo. Atualmente, com a inserção dos

relés digitais, há maior flexibilidade quanto à escolha das grandezas de polarização e operação, sendo possível também o uso de combinações a partir das componentes simétricas das tensões e correntes.

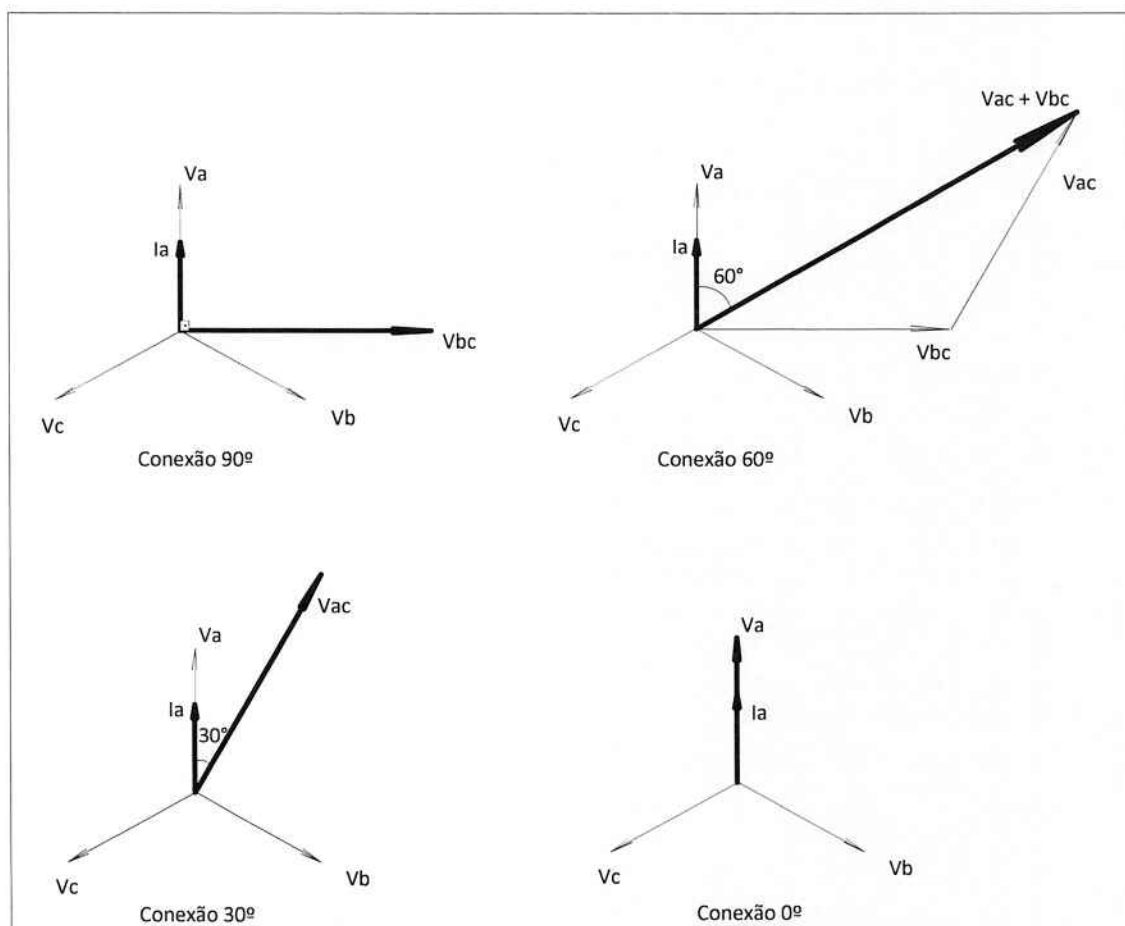


Figura 2.5: Diagramas Fasoriais dos tipos de conexões em relés direcionais.

2.4 Transformador de Corrente (TC)

São apresentados aqui os principais aspectos considerados para a escolha das correntes nominais e das relações de transformação de Transformadores de Corrente, sem entrar em detalhes, pois, sendo o foco principal neste trabalho a coordenação da proteção, está sendo admitido que os TC's da rede utilizada neste trabalho estão dimensionados adequadamente.

2.4.1 Corrente nominal secundária

É normalmente de 5A ou, menos frequentemente, 1A, conforme padrões usuais.

2.4.2 Corrente nominal primária

A corrente nominal primária deve ser especificada considerando os seguintes pontos:

2.4.2.1 Corrente de regime permanente

O TC deve suportar a corrente primária máxima de regime permanente sem exceder os seus limites de temperatura. Leva-se em consideração o Fator Térmico (fator pelo qual deve ser multiplicada a corrente primária nominal do TC) e toma-se como base a máxima corrente de demanda ou a corrente nominal do circuito de potência, considerando as diferentes condições operativas possíveis.

2.4.2.2 Corrente de curto-circuito máxima

O TC, com a sua carga conectada ao seu terminal secundário, deve ser capaz de manter (no terminal secundário) uma tensão eficaz sem que exceda o erro especificado (geralmente de 10% ou 2,5%). A verificação é feita para a condição mais severa, que é a de corrente de curto-circuito máxima.

Considera-se que o erro máximo especificado pode ser atendido para uma faixa que abrange desde a corrente nominal (I_n) até o valor correspondente ao fator de sobrecorrente FS (geralmente $20 * I_n$).

Devem ser também respeitados os limites de corrente de curta duração para efeito térmico e para efeito mecânico.

2.4.2.3 Carga do TC

A exatidão do TC está condicionada à carga (“burden”, dada em VA ou em Ω) ligada no secundário. A carga total ($Z_t = R + j * X$), incluindo a carga do relé e a carga imposta pela fiação, deve ser tal que o TC possa manter uma tensão secundária, para a condição de curto-circuito máxima, sem que a exatidão seja comprometida (não deve entrar na região de saturação). Para evitar saturação por componente contínua é comum especificar um “ponto-de-jelho” mínimo (PJ_{min}) seguro tomando um fator de segurança de 100% sobre o cálculo de $FS * I_n * Z_t$, ou seja, o ponto de joelho seja tal que:

$$PJ_{min} = 2 * 20 * I_n * Z_t, \text{ para TC com } FS = 20 \quad (2-8)$$

3 Proteção, coordenação e seletividade

3.1 Introdução

Este capítulo abordará conceitos sobre o problema de proteção, em especial os relacionados à seletividade e à coordenação entre os diversos relés de uma rede elétrica. Primeiramente, discutirá tais conceitos em redes radiais, estendendo posteriormente para aplicações em redes não radiais, onde a característica direcional dos relés que a necessitarem terão grande importância para o funcionamento correto do sistema de proteção.

3.2 Coordenação e seletividade em redes radiais

Deve-se entender por ação seletiva aquela que visa isolar apenas o trecho defeituoso em uma rede elétrica ou então o menor trecho possível, de forma que se tenha a maior continuidade possível no fluxo de energia. Para tal, é necessário obter uma efetiva coordenação entre os diversos dispositivos de proteção em uma rede de forma a garantir suas atuações apenas quando realmente necessárias, mas obtendo ainda uma proteção de retaguarda (*backup*) para caso de falha de algum dispositivo.

Na rede da Figura 3.1 temos uma rede radial onde o relé A tem como zona primária de proteção o trecho AB e como zona para a qual fornece retaguarda o trecho BC. O relé B tem como zona primária de proteção o trecho BC e como zona de backup o trecho seguinte. Para uma falta no trecho AB, o relé A será o responsável por atuar e isolar a falta. Para uma falta no trecho BC, o relé B é o responsável por atuar, garantindo a seletividade. Porém, caso haja falha na atuação do relé B, o relé A deverá atuar como proteção de *backup*. Para isso, deve-se obter correta coordenação entre esses relés de forma que o relé A (retaguarda) não atue antes ou junto com o relé B (principal¹), ou seja, o relé A deve ter tempo de atuação maior que o relé B para faltas no trecho BC. Isso é obtido através das curvas temporizadas e através de um intervalo de tempo de coordenação ΔT_{coord} entre os tempos de atuação, o que garante a correta coordenação.

¹ Utiliza-se neste trabalho o termo “relé principal” para se referir ao relé de proteção de zona primária (como ilustrado na Figura 3.1).

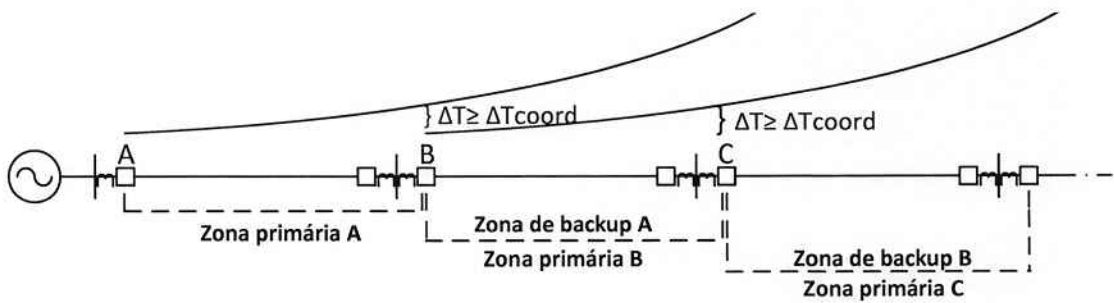


Figura 3.1: Curva temporizada inversa e coordenação em rede radial.

Tem-se então a seguinte condição de coordenação em termos dos tempos de atuação dos relés:

$$T_{A_{fBC}} \geq T_{B_{fBC}} + \Delta T_{coord} \quad (3-1)$$

onde:

$T_{A_{fBC}}$ é o tempo de atuação do relé A para um ponto de falta na linha BC;

$T_{B_{fBC}}$ é o tempo de atuação do relé B para o mesmo ponto de falta na linha BC;

ΔT_{coord} é o tempo de coordenação.

O tempo de coordenação é calculado levando em conta alguns fatores, conforme a seguir:

- Tempo de extinção da passagem de corrente pelo disjuntor, que leva em conta desde os tempos de operação da bobina de disparo, liberação da mola e a real abertura mecânica dos contatos elétricos, o que compõe um tempo de até 100ms quando em 60Hz (equivalente a 6 ciclos) geralmente, até a extinção do arco elétrico após a abertura do disjuntor;
- Tempo de sobrepercurso (*overshoot*), que é apenas levado em conta em relés eletromecânicos de disco de indução, estando relacionado à inércia que estes apresentam no movimento do disco;

- Tempo de segurança, que procura compensar erros provenientes do cálculo das correntes de falta, do ajuste dos relés e do TC, assim como das estimativas dos tempos dos itens anteriores.

O tempo total de coordenação costuma variar de 0,2 a 0,3 segundos para relés digitais. Em relés eletromecânicos de disco de indução, deve-se ainda considerar um tempo de sobrepercurso de aproximadamente 0,2 a 0,25 segundos.

3.3 Proteção direcional

Veamos como funciona a característica direcional em condições de falta. Para isso, usaremos a ligação 90° entre as grandezas de polarização e operação, que é a mais usada. Na Figura 3.2 temos os fasores das tensões V_a , V_b e V_c de uma rede trifásica equilibrada, o fasor da tensão V_{bc} e o fasor da corrente I_a com fator de potência unitário, todos em condições pré-falta. Analisando o relé A, temos I_a como grandeza de operação e V_{bc} como grandeza de polarização. Quando uma falta dupla-fase ab ocorre, os fasores assumem aproximadamente o representado na Figura 3.3.

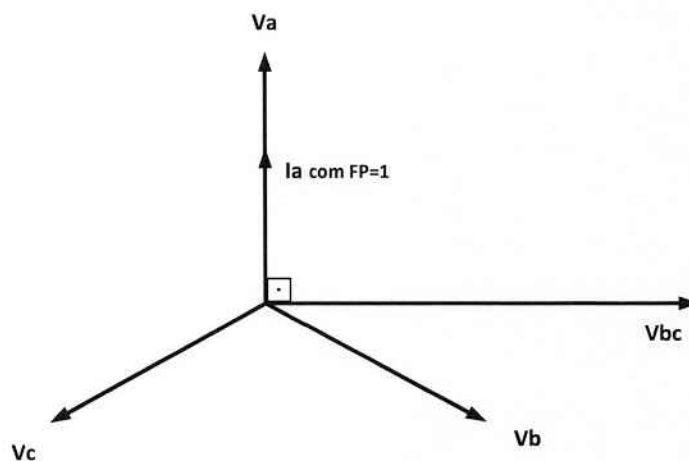


Figura 3.2: Fasores em condição pré-falta.

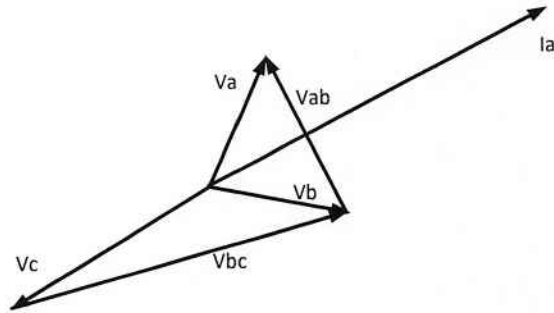


Figura 3.3: Fasores em condição de falta dupla-fase **ab** a jusante.

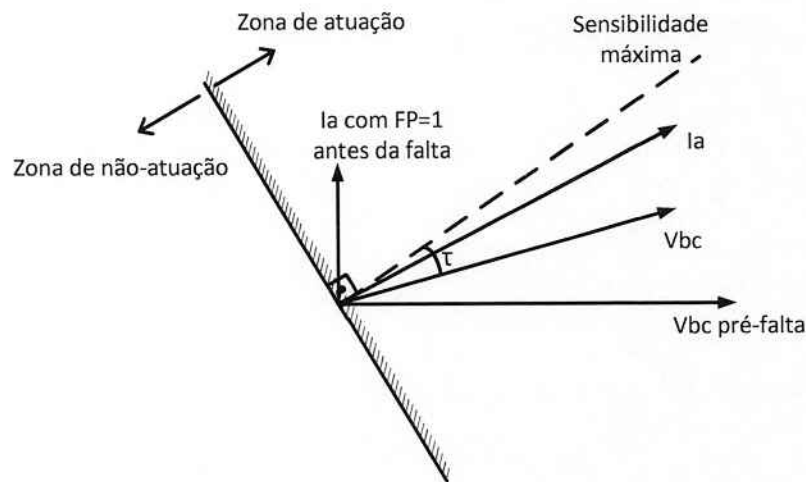


Figura 3.4: Fasores das grandezas de polarização e operação pré e durante a falta dupla-fase **ab** a jusante com a característica direcional ajustada.

Na Figura 3.4 vemos que, com o ângulo τ de sensibilidade máxima ajustado em relação à tensão de polarização V_{bc} , a corrente de operação I_a está dentro da região de atuação (inclusive com um ângulo próximo ao de máxima sensibilidade), ou seja, o relé deve atuar neste caso. Se a falta ocorresse entre as fases b e c o raciocínio seria o mesmo, mas quem atuaria agora seria o relé B, que usa I_b como grandeza de operação e V_{ca} como grandeza de polarização. O raciocínio é análogo para o relé C. Dessa forma, não importa quais fases estiverem em curto-circuito, algum dos relés nas fases atuará e mandará o sinal para os disjuntores correspondentes abrirem o circuito.

A intenção é fazer com que, nas faltas em que o relé a ser ajustado tenha que atuar, o fasor da grandeza de operação esteja dentro da região de atuação para o ângulo τ ajustado em

relação à grandeza de polarização. Quanto mais perto do ângulo de sensibilidade máxima a grandeza de operação estiver, menor a chance de falha do relé, pois isso significa que o relé estará mais propenso a atuar em condição de falta. Deve-se atentar ao fato de que, em condições de falta, os fasores de polarização e de operação foram deslocados quando comparados aos fasores em condição pré-falta, como exemplificado acima. As três figuras utilizadas nesse exemplo apresentam mesma referência angular e estão com os módulos (tamanhos dos vetores) compatíveis uma com a outra (não em relação a valores reais, e sim entre as figuras) para podermos visualizar melhor as condições dos fasores nas duas situações.

Nos ajustes do relé de neutro, a diferença fica no fato de que, além do ajuste ser feito considerando apenas as faltas que envolvem o terra, ou seja, faltas monofásicas e dupla-fase-terra, as grandezas de polarização e operação costumam ser $-3V_0$ e $3I_0$ respectivamente².

3.4 Proteção, coordenação e seletividade em redes não radiais

Veremos agora o funcionamento geral em uma aplicação em rede malhada e com mais de uma fonte geradora. Para isso dispomos da rede exemplo na Figura 3.5.

Nesta rede é possível observar a presença de mais de um gerador, o que, em condições de curto-circuito, pode levar a diversos caminhos possíveis da corrente, ainda mais quando se está em uma rede malhada, resultando inclusive correntes diferentes entre relés de proteção primária e seus backups para uma dada falta, tornando o processo de coordenação e ajuste dos parâmetros dos relés mais difícil.

Dado que a corrente de falta pode fluir em ambas as direções nas linhas dependendo do local de falta, deve ser inserida a característica direcional em alguns relés para que sejam evitadas atuações indevidas. Normalmente os relés são ajustados para operarem “olhando” para dentro da linha protegida, ou seja, devem atuar quando a corrente passa por ele alimentando uma falta no interior da linha protegida. Dessa forma, sempre que houver a

² Lembrando que $-3V_0 = -(V_a + V_b + V_c)$ e $3I_0 = I_a + I_b + I_c$

possibilidade de fluir corrente de falta no sentido que o relé não deve atuar, deve-se inserir a unidade direcional. No caso dessa rede, os relés 1 ao 7 devem dispor da característica direcional. Os relés 8 ao 13 não têm essa necessidade, pois não há situações em que eles sentirão corrente de falta sem precisar atuar, já que o fluxo de corrente pode apenas fluir no sentido da geração para a carga nestes casos, ou seja, o fluxo de corrente é sempre para dentro da linha protegida.

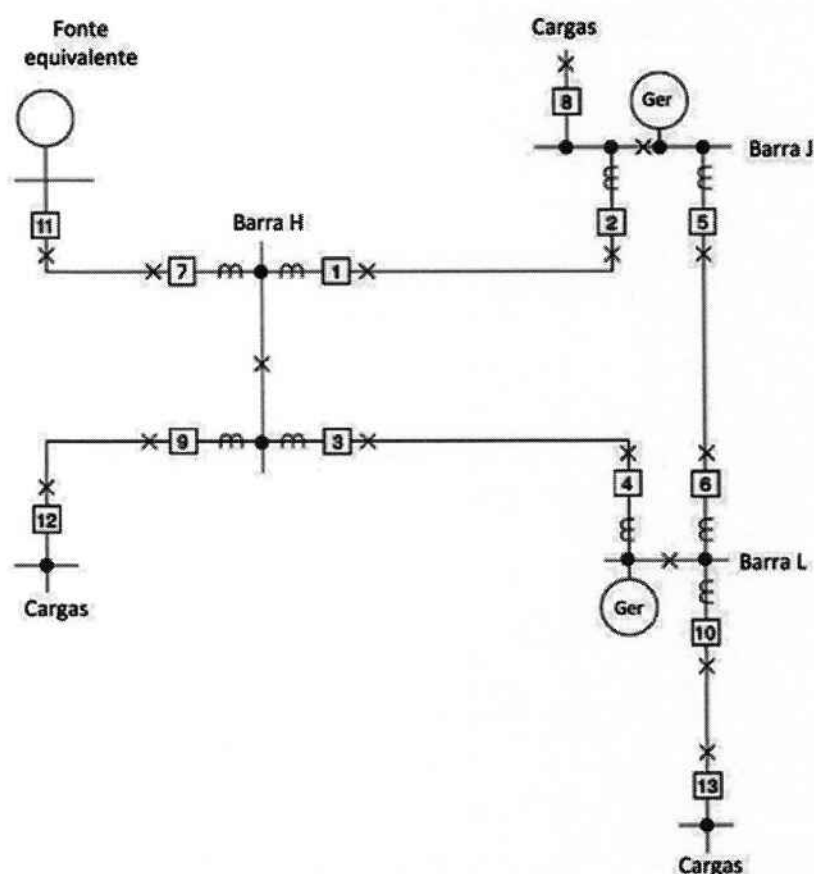


Figura 3.5: Rede não radial. (fonte: Protective Relaying: Principles and Applications – J. Lewis Blackburn and Thomas J. Domin).

A coordenação deve ser obtida tanto no sentido horário quanto no sentido anti-horário. No primeiro caso temos o relé 1 coordenando com o 5 e o 8, o relé 5 coordenando com o 4 e o 10 e o relé 4 coordenando com o 1, 7 e 9. No segundo caso teremos o relé 3 coordenando com o 6 e o 10, o relé 6 coordenando com o 2 e o 8 e o relé 2 coordenando com o 3, 7 e 9. Percebe-se que um mesmo relé pode aparecer em mais de um caso de coordenação, sendo

necessário que os ajustes sejam feitos levando em conta os outros subcircuitos, o que torna o cálculo mais complexo.

Analisemos um caso mais específico para entender como funciona a coordenação, a seletividade e a direcionalidade, levando em conta a característica temporizada dos relés. Supondo uma falta na linha entre o relé 5 e o relé 6 com ou sem os geradores nas barras J e L ligados (se estiverem desligados, $I_{cc1} = I_{cc2}$ e $I_{cc3} = I_{cc4}$) e que todas as correntes de falta são maiores que a corrente de pickup dos relés em que passam, temos:

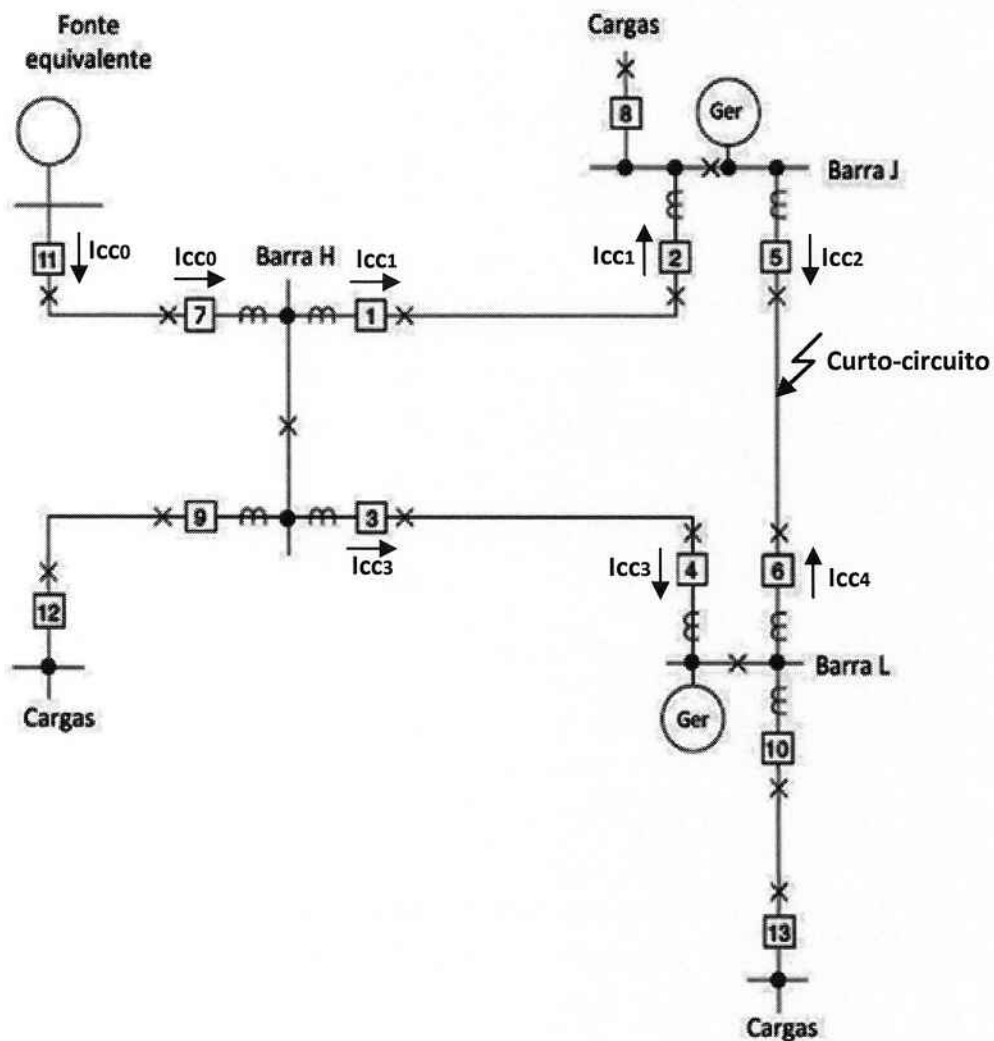


Figura 3.6: Curto-circuito na linha entre relés 5 e 6.

✓ Quanto à seletividade:

A melhor seletividade possível é obtida atuando apenas os relés necessários para isolar a linha em questão. A corrente pelo relé 5 passará no sentido horário, enquanto a no relé 6 passará no sentido anti-horário. Devem atuar então apenas esses dois relés para isolar o menor trecho possível da rede e garantir a continuidade na alimentação dos demais trechos do sistema.

✓ Quanto à direcionalidade:

Na Figura 3.6 é possível perceber os sentidos das correntes passando pelos relés. Lembrando que os relés direcionais são ajustados para atuar apenas para correntes passando através deles para dentro da linha protegida, os relés 2, 4 e 7 não deverão atuar, ao passo que os relés 1, 3, 5, 6 e 11 poderão atuar. O fato de estes últimos relés poderem atuar não implica diretamente em atuação, mas simplesmente no fato de que as correntes estão na direção de atuação. Sua atuação ou não ainda dependerá da corrente de pickup ajustada e, conseqüentemente, com o multiplicador de tempo ajustado, da temporização a que estiverem submetidos.

✓ Quanto à coordenação:

Se houver falha na atuação de algum dos relés principais (5 e/ou 6), os relés de retaguarda deverão atuar, ou seja, o relé 1 deverá atuar em caso de falha do 5, e o 3 deverá atuar em caso de falha do 6. Porém, deve-se garantir que os relés de retaguarda atuem se, e somente se, for verificada a falha de atuação dos relés principais. Ajustam-se então tais relés de forma que sejam pelo menos Δt_{coord} mais lentos que os principais para garantir a coordenação.

4 Métodos de otimização

4.1 Introdução

Neste capítulo falaremos sobre alguns métodos possíveis de otimização que podem ser aplicados, dando apenas os aspectos gerais, assim como algumas características relacionadas a cada método. No final do capítulo é apresentada a escolha do método para aplicação no problema de proteção.

4.2 Programação linear

É possível reduzir problemas de otimização a problemas lineares, ou seja, com apenas funções lineares tanto na função objetivo quanto nas restrições. Quando possível, sendo a função objetivo linear, consegue-se atingir o ótimo global.

Em geral, consiste na determinação de valores não negativos para as variáveis do problema de forma a solucionar um sistema de equações e/ou inequações lineares que otimizem a função objetivo, conforme descrito genericamente a seguir:

otimizar cx

sujeito às restrições:

$$Ax \leq b$$

$$x \geq 0$$

onde:

c é o vetor linha de coeficientes da função objetivo;

x é o vetor coluna das variáveis de solução do problema pertencentes aos números reais;

A é o vetor linha de coeficientes das restrições incorporadas ao problema;

B é o vetor coluna de termos conhecidos das restrições.

Deve-se atentar quanto à linearização feita ao problema, não importa qual seja, pois linearizações são sempre aproximações da função original que, se mal formuladas, podem levar a resultados não ótimos e até completamente errôneos.

4.3 Programação não linear com base em trajetórias de estado

São métodos que se utilizam de estados, ou seja, um conjunto de valores das variáveis do problema, e suas trajetórias rumo a um ponto ótimo determinadas pelo algoritmo usado.

De forma geral, seguem a seguinte forma:

$$\tilde{x}_{k+1} = \tilde{x}_k + \tilde{\mathfrak{S}}_k * \tilde{\mathfrak{G}}_k, \quad (4-1)$$

onde:

\tilde{x}_k é o vetor coluna correspondente às variáveis de estado na iteração k ;

$\tilde{\mathfrak{S}}_k$ é o valor do parâmetro de controle das correções na iteração k ;

$\tilde{\mathfrak{G}}_k$ é o vetor coluna da direção da trajetória no passo k .

4.3.1 Método de Newton

Procura o próximo estado a partir do estado atual e da derivada da função neste.

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f'(x_k)}{f''(x_k)}, \quad (4-2)$$

onde:

$f(x)$ é a função a ser otimizada;

$f'(x_k)$ é a derivada da função a ser otimizada;

$f''(x_k)$ é a segunda derivada da função a ser otimizada.

Tal método nem sempre é eficaz em se tratando de encontrar o ótimo global ao invés de um ótimo local. Sua eficácia e eficiência dependem da estimativa inicial. Se esta for bem feita,

convergir rapidamente e terá melhor probabilidade de achar um ótimo global; se não for, será lenta podendo inclusive não achar um ótimo global.

4.3.2 Método do gradiente

Este método segue funções do tipo:

$$x_{k+1} = x_k - n * \nabla E(x_k), \quad (4-3)$$

onde:

$E(x_k)$ é a função a ser otimizada;

k é a iteração atual;

n é o parâmetro de controle (passo).

Este método apresenta uma velocidade de convergência dependente do parâmetro de controle n . O gradiente $\nabla E(x_k)$ direciona ao maior crescimento da função a ser otimizada. Também não é sempre eficaz para encontrar o ótimo global.

4.3.3 Estocasticidade

Com o intuito de evitar ótimos locais, pode-se utilizar métodos estocásticos em adição a outros métodos, como os anteriores já explicados, em que se inserem mudanças aleatórias no vetor direção e, assim, no vetor gradiente, diminuindo a probabilidade de parar em pontos locais.

4.4 Simulated Annealing (Recozimento Simulado)

Também apresenta estocasticidade e vem de uma analogia com o processo de recozimento de sólidos para cristalização, onde se busca a energia interna mínima através de uma gradual diminuição da temperatura a partir da temperatura de fusão do sólido.

Pode-se descrever tal método da seguinte forma geral:

$$P(\Delta E) = e^{-\frac{\Delta E}{T}} \quad (4-4)$$

$$\Delta E = f(x_k + \Delta x) - f(x_k) \quad (4-5)$$

$$T_{k+1} = \alpha * T_k \quad (4-6)$$

onde:

$P(\Delta E)$ é a probabilidade de aceitar novas funções;

ΔE é a “variação de energia”;

Δx é um incremento aleatório;

$f(x)$ é a função que se quer otimizar;

T é a “temperatura” atual;

α é uma constante menor mas próxima de 1.

Pode-se verificar o funcionamento geral do processo através do fluxograma Figura 4.1. A estocasticidade do método não garante que o ótimo global seja alcançado, mas pode-se provar que a probabilidade de encontrá-lo é elevada [2]. Conforme a temperatura diminui a probabilidade de aceitar movimentos para soluções piores diminui (mas estes são permitidos, o que diminui as chances de parar em ótimos locais). Para conduzir a uma boa eficácia, é necessário que o processo de diminuição da temperatura seja lento, o que aumenta o tempo de processamento. Além disso, é limitado a apenas variações na função objetivo e há muitos parâmetros a serem calibrados.

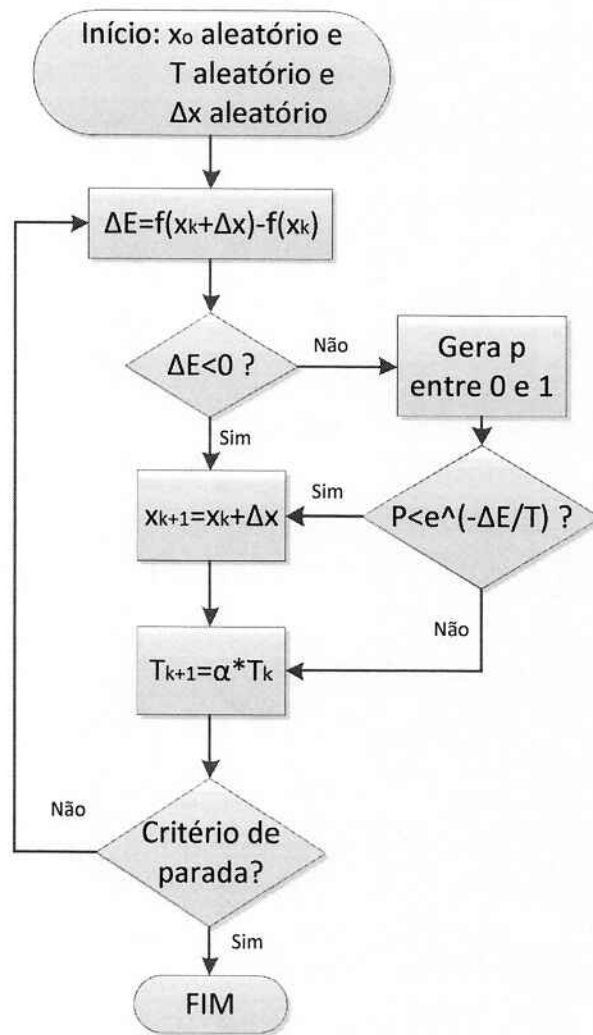


Figura 4.1: Fluxograma geral do Simulated Annealing.

4.5 Tabu Search

Assim como o Simulated Annealing, é um processo meta-heurístico que apresenta estocasticidade a fim de evitar ótimos locais. Sua ideia geral consiste em, dentro de um espaço selecionado, procurar o melhor vizinho em relação a um ponto-solução atual que não esteja na *lista tabu* e não ande por *movimentos tabu*. A *lista tabu*, lista proibida, é imposta através de restrições de memória de procura local, mudando os espaços de procura e, assim, evitando ótimos locais. Essas listas também são formadas por outras restrições relacionadas ao problema em questão. Uma característica inerente a este método é o fato de deixar de explorar muitos espaços de procura, já que grande parte do método se restringe à procura local.

4.6 Algoritmo genético

O algoritmo genético é um ramo que parte dos algoritmos evolutivos, os quais se baseiam na evolução biológica e na teoria de que a Natureza é capaz de otimizar seus mecanismos a fim de resolver problemas complexos. Um dos principais pontos favoráveis aos algoritmos evolutivos é a capacidade de trabalhar com problemas complexos que não podem ser resolvidos por outras técnicas ou que demandariam um tempo de processamento muito grande nestas. Apresentam grande adaptabilidade a diversos tipos de problemas e, o mais importante, grande simplicidade, não sendo baseados no cálculo de derivadas como em muitos outros métodos, mas sim no uso de informações de uma função objetivo.

O algoritmo genético, em especial, utiliza princípios de Teoria da Evolução e da Genética. Uma das características principais é a de trabalhar com uma população de soluções ao mesmo tempo ao invés de uma única solução por iteração (como nos algoritmos mais clássicos). Sendo assim, passam por um processo de seleção natural dado pelas condições do ambiente, que pode incluir a **reprodução**, o **cruzamento** e a **mutação** de indivíduos da população, sendo os mais bem adaptados (decidido através de uma função de avaliação) utilizados para formar a população da próxima iteração.

Por trabalhar com populações de soluções, esse método de otimização promove uma maior varredura no espaço de busca possível. Além disso, possui modelos de estocasticidade e aleatoriedade, que visam principalmente evitar a prisão em ótimos locais, e também de modelos de probabilidade, que visam principalmente à ponderação das possíveis soluções, que terão maiores ou menores chances de sobrevivência. Outro fator importante é o fato de não depender de estimativas iniciais, o que representa um grande ganho quando se trata de problemas complexos onde é difícil obter uma boa estimativa que garanta futura convergência.

Nos algoritmos genéticos (AG), não há a necessidade de se conhecer a formulação matemática do problema a ser otimizado, pois não trabalha com os parâmetros do problema, mas com uma codificação de um conjunto de parâmetros. Para se ter o elo entre os indivíduos usados no problema e a solução real deve-se estabelecer a relação

codificação/decodificação entre os cromossomos e os parâmetros reais do problema. Outro elo entre o problema e o mundo externo é a função *fitness* (de avaliação), a qual avalia os indivíduos da população para escolher os que vão para a próxima iteração, sendo feita de acordo com o problema real também.

As soluções usadas no problema de otimização são os **cromossomos**, que são os indivíduos que formam uma população de soluções. Um cromossomo é uma sequência de valores formada a partir de uma codificação (que deve seguir uma regra de formação estabelecida) que faz a relação com os parâmetros reais. Cada valor do cromossomo é um **gene**, que representa uma dada característica do indivíduo.

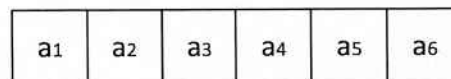


Figura 4.2: Exemplo de cromossomo com 6 genes.

O processo de evolução é então feito por operadores genéticos. Primeiramente há a **seleção** dos indivíduos através de uma ponderação para cada um, em que recebem maior probabilidade de serem selecionados para serem reproduzidos para a geração seguinte aqueles que estiverem melhor adaptados. Isso pode ser feito através de uma função de avaliação (*fitness function*) que deve ser adequadamente elaborada. Em um problema de minimização, podemos fazer com que a função de avaliação esteja relacionada com o inverso da função objetivo e cada indivíduo receba uma ponderação, conforme a seguinte equação:

$$fit(x_i) = \frac{1}{f_{obj}(x_i) + z * f_{pen}(x_i)} \quad (4-7)$$

onde:

$fit(x_i)$ é o valor de *fitness* (avaliação) do indivíduo i ;

f_{obj} é a função objetivo;

f_{pen} é uma penalidade imposta para o caso de o indivíduo sair dos limites aceitáveis;

z é uma constante heurística alta para a penalidade pesar suficientemente.

A equação (4-7) faz com que um indivíduo que tenha um valor muito alto na função objetivo tenha um *fitness* baixo (lembrando que o problema é de minimização, ou seja, deve ter valor baixo na função objetivo). A função de penalidade visa diminuir o *fitness* para aqueles que saírem das faixas aceitáveis ao problema. Sendo assim, a **seleção** pode ser feita proporcionalmente ao valor $fit(x_i)$, ou seja, quanto maior este valor, maior a probabilidade de o indivíduo ser escolhido para ser reproduzido na geração seguinte. Existem outros processos possíveis de reprodução, que podem ser estudados nas referências HOPGOOD [2], GOLDBERG [3] e RAWLINS [4], para o leitor mais interessado.

A partir daí, os indivíduos passam por um processo de **cruzamento** (ou *crossover*), onde pares de indivíduos são escolhidos aleatoriamente com uma probabilidade p_c de cruzar e fazem novos descendentes através da troca de material genético, estes quais terão características genéticas de ambos os cromossomos pais. A Figura 4.3 e a Figura 4.4 ilustram um método geral para esse operador.

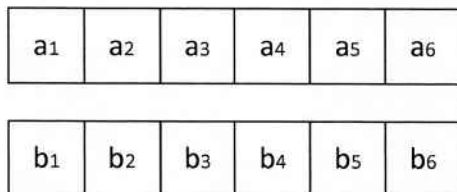


Figura 4.3: Cromossomos escolhidos para a operação de cruzamento.

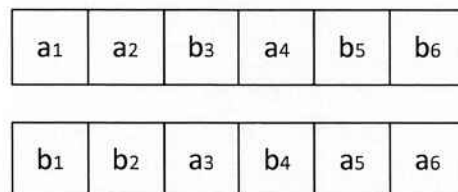


Figura 4.4: Após a operação, o 3º, 5º e 6º genes cruzaram.

O último operador genético é o de **mutação**, que visa explorar melhor o espaço de busca, diminuindo as chances de estancar-se em ótimos locais. Cada gene da população tem uma probabilidade p_m de sofrerem mutação. A Figura 4.5 e a Figura 4.6 ilustram tal procedimento.

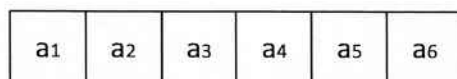


Figura 4.5: Cromossomo escolhido para a operação de mutação.

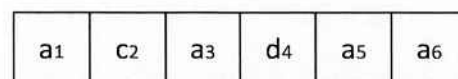


Figura 4.6: Após a operação, o 2º e 4º genes sofreram mutação

É representado na

Figura 4.7 o fluxograma geral de um algoritmo genético. Este método será mais detalhado no capítulo 5.

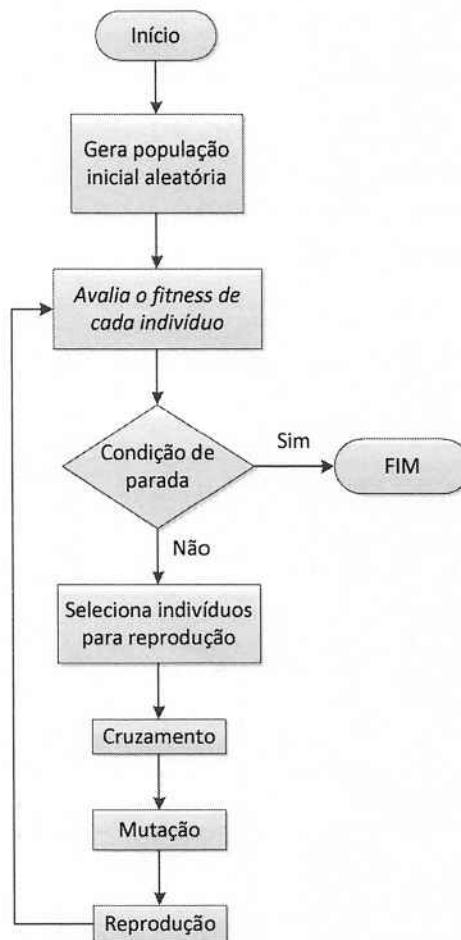


Figura 4.7: Fluxograma de um Algoritmo Genético.

4.7 Método escolhido

O método escolhido para aplicação no problema de proteção e coordenação de relés em redes não radiais foi o Algoritmo Genético, visto que tem uma alta capacidade de adaptação para diversos problemas, não necessitando uma formulação muito complicada quanto ao equacionamento da otimização, necessitando apenas de uma boa parametrização e uma boa formulação da função de avaliação de acordo com a aplicação. Além disso, a principal característica que chamou atenção é a de não depender de uma estimativa inicial para que haja convergência, sendo ideal na aplicação do problema de coordenação de relés em redes não radiais, as quais apresentam grande complexidade para a parametrização dos relés e grande dificuldade para se ter uma estimativa inicial.

5 Algoritmo Genético aplicado ao problema de proteção

5.1 Introdução

Neste capítulo será apresentado o problema de proteção, assim como os métodos usados para a codificação do algoritmo genético e para os operadores genéticos.

A proposta consiste na elaboração de um método de otimização e coordenação de relés de sobrecorrente direcionais em redes não radiais. O uso do algoritmo genético permite a otimização do problema sem a necessidade de partir de uma solução inicial, possibilitando uma vasta procura no espaço de busca. O leitor que queira obter maior conhecimento a respeito de algoritmos genéticos pode consultar as referências HOPGOOD [2], GOLDBERG [3] e BEDEKAR et al [8], as quais forneceram a base para a construção dos códigos e diversas funções utilizados neste trabalho.

5.2 Entendimento básico acerca de Algoritmos Genéticos

Há diversos métodos de otimização que o homem tem criado baseando-se em analogias com outros tipos de processo, os quais podem ser naturais ou criados. A ideia é achar um método de otimização computacional a partir de processos de otimização naturais ou para outros fins. Um dos exemplos é o Simulated Annealing, mencionado no capítulo 4, que se baseia no processo de recozimento de sólidos para cristalização, no qual o objetivo é alcançar a menor energia interna possível por meio de uma diminuição gradual da temperatura a partir da temperatura de fusão do sólido. O algoritmo genético também veio de uma analogia, dessa vez com a Teoria da Evolução de Darwin.

O Darwinismo enuncia que, em um ambiente qualquer, aqueles indivíduos que estiverem mais bem adaptados terão maiores chances de sobrevivência, tendo então maiores chances de se reproduzirem e gerarem filhos cada vez mais adaptados. Em uma analogia com o processo de seleção natural, o operador de seleção de um AG tem o objetivo de selecionar indivíduos que estejam mais bem adaptados ao ambiente.

Mas não basta apenas selecionar indivíduos se estes não puderem evoluir com as gerações. Ao longo do tempo, a teoria de Darwin foi introduzida nos conhecimentos da genética que estavam em desenvolvimento. Surgiu então o Neodarwinismo. Essa teoria diz que evolução é a mudança das características hereditárias de uma população de geração para geração, ou seja, há mudanças nas características dos indivíduos ao longo do tempo. Fazendo essa analogia, surgem então os operadores de cruzamento (*crossing over* em inglês) e mutação em algoritmos genéticos.

Deve-se fazer com que os indivíduos evoluam e estejam cada vez mais adaptados ao ambiente. Em suma, o ambiente requer que tais indivíduos, no nosso caso o conjunto dos relés de uma rede, tenham baixos valores dos multiplicadores de tempo para que ocorra a minimização dos tempos de atuação. Dessa forma, eles devem se adaptar a esse ambiente desenvolvendo características que lhes permitam sobreviver, ou seja, aqueles que tiverem menores *MTs* têm maiores chances de sobreviver.

O processo de cruzamento funciona com a escolha randômica de dois indivíduos denominados pais, os quais se cruzam gerando filhos com o intuito de combinar características que possibilitem que tais filhos sejam melhores que os pais, ou seja, é análogo a um processo de reprodução na evolução natural, onde há hereditariedade entre gerações. Haverá algumas vezes em que os filhos serão menos adaptados que os pais, mas terão menores chances de sobrevivência quando houver a aplicação do operador de seleção. Os filhos mais bem adaptados que surgirem terão maiores chances de sobreviver para as gerações seguintes, sendo os principais responsáveis pela evolução do algoritmo. O cruzamento é considerado o principal operador de um algoritmo genético, pois é ele que procura as melhores combinações possíveis de características para um cromossomo.

Assim como acontece em reproduções naturais, há uma pequena probabilidade de um gene de um indivíduo sofrer mutação, produzindo novas características e resultando em diferenças hereditárias entre gerações. O processo de mutação funciona com a escolha randômica de um indivíduo e um loco (posição) de gene deste, alterando seu valor, o alelo. Em um algoritmo genético, isso corresponde à possibilidade de varrer todo o espaço de busca possível a fim de não se obter um ótimo local, mas sim o global.

Resumindo, o objetivo do algoritmo genético é aplicar transformações nas populações ao longo das gerações até que se obtenha um indivíduo adaptado que corresponda ao ótimo global.

5.3 Formulação do problema

O problema de otimização da coordenação de relés de sobrecorrente direcionais levará em conta a diminuição do stress térmico nos equipamentos ligados à rede (desde relés e transformadores até os próprios cabos das linhas), que pode ser genericamente calculado utilizando a energia dissipada conforme o seguinte:

$$\varepsilon_{dis} = R * I^2 * \Delta T \quad (5-1)$$

Não temos controle direto sobre a resistência e as correntes de curto-circuito, mas podemos diminuir os tempos ΔT a partir da redução dos tempos de atuação dos relés da rede, conforme a seguinte função objetivo:

$$\min\left[\sum_j \sum_k (\omega_j * T_{jk})\right] \quad (5-2)$$

onde:

ω_j é um fator de ponderação relacionado à probabilidade de ocorrer dada falta na zona primária do relé j ;

T_{jk} é o tempo de atuação do relé principal j para falta no ponto k .

Para o cálculo dos tempos, usa-se a equação já mostrada no capítulo 2, mas que é a seguir repetida:

$$T = K_1 \frac{MT}{\left[\left(\frac{I}{I_p}\right)^{K_2} - 1\right]} \quad (5-3)$$

Ressalta-se o fato de que a notação aqui utilizada faz uso de numeração dos relés - j - com números inteiros e que os pontos de falta - k - são aqueles situados logo à frente do relé de numeração correspondente (marcados com uma cruz na Figura 3.5).

Poder-se-ia utilizar na função objetivo os tempos de atuação de todos os relés relevantes associados a cada falta. Pode-se, porém e justificadamente, simplificar a função usando-se os tempos apenas dos relés principais, pois, já que serão simulados curtos-circuitos em todas as linhas da rede, todos os relés serão principais em algum momento, havendo conseqüentemente a minimização do ajuste relacionado a todos os relés.

Para se ter a diminuição dos tempos de atuação dos relés, é necessária a otimização de algum parâmetro ajustável do relé. Pode-se obter tal resultado com o ajuste do parâmetro multiplicador de tempo, MT , como pode ser visto na equação (2-1). É possível também obter o ajuste otimizado da corrente de pickup, I_p , e do ângulo de torque máximo, τ , mas eles podem ser calculados uma única vez levando-se em conta os critérios apresentados no capítulo 2 e as correntes de falta. Além disso, o MT nos possibilita uma maior flexibilidade quanto à temporização dos relés, como mostrado na Figura 2.2, sendo então um bom alvo para a otimização. Os multiplicadores de tempo resultantes devem satisfazer condições de falta trifásica, dupla-fase, dupla-fase-terra e monofásica, ou seja, as condições devem ser verificadas para todas as situações possíveis. É de extrema importância ressaltar que, se houver mais de uma situação operativa relevante da rede, deve-se também verificar todas as condições para todas as configurações.

Considerou-se que, com faltas no começo e no final da linha, já é possível obter valores extremos de correntes que resultam em condições limite a ponto de se conseguir uma boa parametrização dos relés, ou seja, teremos os dados de máxima corrente que passa por cada relé para cada tipo de falta, que é uma condição em que a coordenação entre relé principal e relé de retaguarda é mais crítica. Tem-se então o critério de coordenação:

$$T_{backup} \geq T_{prim} + \Delta T_{coord} \quad (5-4)$$

Além disso, deve-se também respeitar os seguintes limites nas configurações:

$$\begin{aligned} MT_{j \min} &\leq MT_j \leq MT_{j \max} \\ T_{j \min} &\leq T_{jk} \leq T_{j \max} \end{aligned} \quad (5-5)$$

Os limites de MT são impostos levando-se em conta a norma usada. No caso da IEC 60255, o MT pode variar de 0,05 até 1,00 usando-se a equação (2-1). O limite inferior de T_{jk} deve ser escolhido levando-se em conta o tempo mínimo necessário para os relés direcionais terem resposta da característica direcional (se o relé a tiver), verificando se a corrente está na mesma direção da atuação ou não e também para evitar atuação indevida do relé de sobrecorrente durante correntes transitórias de magnetização de transformadores (correntes de *inrush*). Não é necessário ser rígido na escolha do limite superior de T_{jk} , pois, tratando-se de um problema de minimização desses tempos, o algoritmo automaticamente buscará o menor tempo possível.

5.4 Determinação do cromossomo

Como explicado anteriormente, um cromossomo representa uma solução, ou seja, ele terá que abranger todos os parâmetros que se queira ajustar segundo a codificação usada. O parâmetro a ser aqui ajustado é o multiplicador de tempo MT . Os ajustes da faixa de ângulo dos relés direcionais e da corrente de pickup é feita apenas uma vez no início do programa (antes do AG), sendo mantidos fixos durante o algoritmo genético. Sendo assim, foram feitas duas codificações, conforme a seguir:

5.4.1 Codificação real

Essa codificação representa o MT de cada relé com um gene em números reais e em sistema decimal. Para a otimização de m relés, temos o seguinte cromossomo:

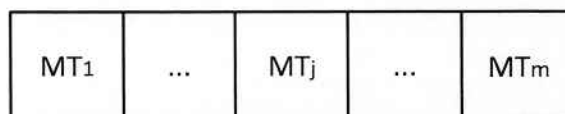


Figura 5.1: Cromossomo para codificação real.

Sua decodificação para parâmetros MT reais é direta, pois é igual à representação, ou seja, o valor do gene, alelo, representa diretamente o valor de MT no mundo externo, em números decimais. Cabe esclarecer que a expressão “codificação real” é comumente utilizada na literatura sobre algoritmos genéticos tratando-se da representação de números reais diretamente no sistema decimal, em oposição à “codificação binária”.

5.4.2 Codificação binária

Essa codificação representa cada MT com uma quantidade q de bits. A Figura 5.2 ilustra o MT de um relé com sete bits. Teremos então, os genes 1 ao 7 para representar o MT do relé 1, os genes 8 ao 14 para representar o MT do relé 2 e assim por diante. Sendo assim, o cromossomo terá um comprimento igual a sete vezes o comprimento do cromossomo em codificação real.

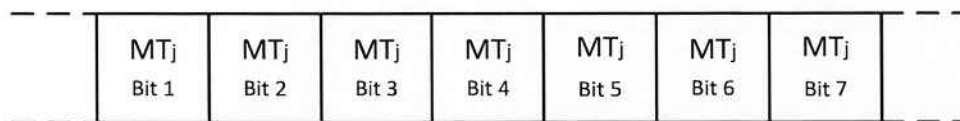


Figura 5.2: Cromossomo para codificação binária.

Sua decodificação é feita conforme a equação (5-6) a cada sete genes. Teremos então a informação dos MT s reais a cada sete alelos.

$$MT_{decimal} = \left(\sum_{p=1}^7 MT_{bit\ p} * 2^{7-p} \right) / 100 \quad (5-6)$$

A escolha de sete bits foi feita em decorrência do fato de que, com essa quantidade, é possível obter uma precisão de duas casas decimais para o parâmetro MT a ser ajustado. A divisão por 100 permite que se obtenha uma gama de números entre 0,00 e 1,00, como requerido para aplicar a equação (2-1) segundo a IEC 60255. Dessa forma, teremos uma faixa possível de busca conforme em (5-7), mas que, se o cromossomo tiver um ou mais MT s fora da faixa estabelecida em (5-5), sofrerá penalização.

$$0,00 \leq MT \leq \frac{2^7}{100} = 1,28 \quad (5-7)$$

Foi usada também, como alternativa, uma codificação binária em 10 bits que possibilita uma precisão de 3 casas decimais, exigindo porém maior tempo de processamento no algoritmo. Suas equações ficam como em (5-8) e (5-9). Nota-se que agora é necessária uma divisão por 1000.

$$MT_{decimal} = \left(\sum_{p=1}^{10} MT_{bit\ p} * 2^{10-p} \right) / 1000 \quad (5-8)$$

$$0,00 \leq MT \leq \frac{2^{10}}{1000} = 1,024 \quad (5-9)$$

A combinação de características nos cromossomos, ou seja, dos genes, é denominada genótipo. Cada genótipo provê uma resposta quando em um dado ambiente externo, a qual é denominada fenótipo. No nosso problema específico, a visão seria a seguinte: para se obter baixos tempos de atuação dos relés (fenótipo) frente a curtos-circuitos (ambiente externo), deve-se ter baixos valores para os multiplicadores de tempo segundo sua codificação no cromossomo (genótipo). O processo codificação/decodificação é a ligação entre o cromossomo e o mundo externo.

Agora já é possível fazer um resumo dos parâmetros envolvidos no algoritmo genético e no problema de proteção. Tal resumo é feito na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Parâmetros no Algoritmo Genético e no Problema de Proteção.

Algoritmo Genético	Significado no Problema de Proteção
Gene	Característica codificada do problema
Alelo	Valor do gene em representação decimal ou binária
Cromossomo	Conjunto (vetor) de genes; indivíduo; solução

Loco	Posição de um gene no cromossomo
Genótipo	Característica do cromossomo representando os multiplicadores de tempo MT segundo a codificação usada
Ambiente Externo	Diversas condições de curtos-circuitos em diferentes configurações da rede elétrica
Fenótipo	Tempos de atuação T dos relés
População	Conjunto de soluções em dada iteração

5.5 Etapas do AG

5.5.1 Geração da população inicial

Uma das principais características dos algoritmos genéticos é a possibilidade de lidar com diversas soluções ao mesmo tempo ao invés de apenas uma. Uma população pode ter dezenas de indivíduos. Deve-se achar um número N de indivíduos tal que possibilite uma boa varredura no espaço possível de busca sem que, no entanto, exija tempos de processamento muito grandes.

Tendo-se estabelecido a quantidade N de cromossomos, deve-se gerar uma população inicial de forma randômica (no MATLAB pode-se usar a função *rand*). Para a codificação real, sorteiam-se todos os valores dos genes de todos os indivíduos de forma que os MT s estejam dentro das restrições estabelecidas em (5-5). Para a codificação binária, basta sortear valores 0 ou 1 para todos os alelos de todos os indivíduos.

5.5.2 Avaliação (*fitness*)

A função de avaliação tem o papel de ponderar os diversos indivíduos da população de forma que seja possível uma ordenação dos mais bem adaptados, ou seja, no caso do problema de proteção, aqueles que proporcionarem menores tempos de atuação aos relés e que estiverem dentro das restrições do problema terão melhores notas, tendo então maiores chances de evoluírem e serem selecionados para as próximas gerações.

Deve-se então criar uma função que avalie cada indivíduo da população levando em conta tanto a função objetivo em (5-2) quanto as restrições do problema proposto em (5-4) e (5-5). Não estando de acordo com estas restrições, o indivíduo deverá ser penalizado. A função de avaliação, muitas vezes denominada *fitness function*, costuma ser determinada de forma empírica, dependendo da experiência do programador para formulá-la. Funções distintas podem obter resultados otimizados do problema, mas certamente terão desempenhos diferentes. Neste trabalho, foi usada a seguinte função:

$$fit(i) = \frac{1}{f_{penalizações}(i) * \sum_j \sum_k (\omega_j * T_{ijk})} \quad (5-10)$$

sendo:

$$f_{penalizações}(i) = pen_{T\ tot}(i) * pen_{MT\ tot}(i) * pen_{coord\ tot}(i) \quad (5-11)$$

onde:

$pen_{T\ tot}$, $pen_{MT\ tot}$ e $pen_{coord\ tot}$ são os fatores de penalidade totais referentes ao não atendimento das restrições de coordenação e dos limites das configurações;

(*i*) se refere ao indivíduo *i* da população.

Os fatores de penalidade totais acima mencionados são calculados para cada configuração topológica relevante da rede (*C*) e para cada tipo de falta (*F*), conforme as seguintes equações de penalizações:

$$pen_{T\ tot}(i) = \prod_{C=1}^{C_{tot}} \prod_{F=1}^{F_{tot}} (1 + pen_T(i, C, F))$$

$$pen_{MT\ tot}(i) = (1 + pen_{MT}(i)) \quad (5-12)$$

$$pen_{coord\ tot}(i) = \prod_{C=1}^{C_{tot}} \prod_{F=1}^{F_{tot}} (1 + pen_{coord}(i, C, F))$$

sendo:

C_{tot} a quantidade total de configurações topológicas relevantes da rede;

F_{tot} a quantidade total de tipos de falta.

Nota-se nas equações em (5-12) que cada fator de penalização é somado a 1. Este fator unitário é importante para evitar que fatores de penalização menores que a unidade façam o fator de penalidade total diminuir de valor quando da efetuação das multiplicações dos produtórios. Em outras palavras, a constante 1 somada a cada fator evita que os termos dentro dos produtórios tenham valores menores que 1, resultando em multiplicações que sempre aumentam ou mantêm o fator de penalidade total. Outra observação é que a equação referente ao MT não tem os produtórios pelo fato de cada multiplicador de tempo ser o mesmo para qualquer topologia e qualquer tipo de falta da rede, ou seja, é uma configuração inerente ao relé.

Prosseguindo, as penalidades são proporcionais à distância a que os valores estiverem da faixa aceitável, conforme as equações (5-13) e (5-14).

$$pen_T(i, C, F) = pen_{T>}(i, C, F) + pen_{T<}(i, C, F) \quad (5-13)$$

$$pen_{MT}(i) = pen_{MT>}(i) + pen_{MT<}(i)$$

sendo, para uma quantidade m de relés a serem otimizados e uma quantidade n de pontos de falta simulados, as seguintes penalizações para cada C e cada F .

$$\begin{aligned}
 pen_{T>}(i, C, F) &= \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n k_{T>} * (T_{ijk}(C, F) - T_{j \max}) && \text{se } T_{ijk}(C, F) > T_{j \max} \\
 pen_{T<}(i, C, F) &= \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n k_{T<} * (T_{j \min} - T_{ijk}(C, F)) && \text{se } T_{ijk}(C, F) < T_{j \min} \\
 pen_{MT>}(i) &= \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n k_{MT>} * (MT_{ij} - MT_{j \max}) && \text{se } MT_{ij} > MT_{j \max} \\
 pen_{MT<}(i) &= \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n k_{MT<} * (MT_{j \min} - MT_{ij}) && \text{se } MT_{ij} < MT_{j \min} \\
 pen_{coord}(i, C, F) &= \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n k_{coord} * (T_{ik \ j \ prim}(C, F) && \text{se } T_{ik \ backup \ de \ j}(C, F) < \\
 &+ \Delta T_{coord} - T_{ik \ backup \ de \ j}(C, F)) && T_{ik \ j \ prim}(C, F) + \Delta T_{coord}
 \end{aligned} \tag{5-14}$$

onde:

$k_{T>}$, $k_{T<}$, $k_{MT>}$, $k_{MT<}$ e k_{coord} são fatores de penalização maiores do que a unidade para assegurar a penalização do indivíduo em (5-10); $j \ prim$ indica relé j quando este é de proteção primária.

Essas penalidades podem também levar em conta ponderações dependendo da distância a que os valores estiverem da faixa aceitável, ou seja, penalizarão mais rigidamente aqueles indivíduos que tiverem características muito longe das faixas aceitáveis, procurando não agredir tanto os indivíduos que estão próximos dessas faixas. Isso pode ser feito conforme

mostrado na equação (5-15), que demonstra esse método com a formação de 2 equações a partir da primeira equação mostrada em (5-14).

$$pen_{T_>}(i, C, F) = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n k_{T_{1>}} * (T_{ijk}(C, F) - T_{j\ max}) \quad \text{se } T_{ijk}(C, F) > T_{j\ max} \quad (5-15)$$

$$pen_{T_>}(i, C, F) = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n k_{T_{2>}} * (T_{ijk}(C, F) - T_{j\ max}) \quad \text{se } T_{ijk}(C, F) > T_{j\ max} + c_{T_{2>}}$$

onde:

$k_{T_{2>}} > k_{T_{1>}}$, que são as constantes de penalização;

$c_{T_{2>}}$ é um acréscimo no limite para acima do qual é criticamente inaceitável.

Esse método pode ser aplicado para todas as equações em (5-14), tendo-se somente que escolher valores consistentes para os fatores de penalização e para as constantes c de acordo com a equação e a variável que se está manipulando. No caso do problema de proteção deste trabalho, recomenda-se que os fatores de penalização referentes às coordenações sejam mais altos que os referentes aos tempos e aos multiplicadores de tempo, já que uma falha na coordenação dos relés é criticamente inaceitável. Pode-se também, ao invés de quebrar uma equação em duas como feito acima, quebrar em três ou mais equações.

Percebe-se então que, para cada penalidade encontrada para um indivíduo, os fatores pen vão aumentando para esse indivíduo, o que conseqüentemente aumenta $f_{penalizações}$, resultando em um pior $fitness$ (vide equação (5-10)), o que dá menores chances de ser selecionado para gerações futuras. Nota-se que, dessa forma, quanto menores os tempos de atuação dos relés e menores as violações às restrições, maior será o $fitness$ do indivíduo, e maior a chance de ser selecionado para gerações futuras.

5.5.3 Seleção

Como dito anteriormente, este operador surgiu de uma analogia com a teoria da seleção natural de Darwin, onde indivíduos melhores adaptados ao ambiente têm maiores chances de sobrevivência. No caso do nosso problema, o ambiente é uma rede elétrica sujeita a curtos-circuitos, onde o conjunto de relés (que forma um indivíduo) deve ter o menor tempo de atuação possível para cada um, o que é obtido minimizando-se os multiplicadores de tempo, e deve estar dentro das leis da natureza (neste caso são as restrições do problema). Dessa forma, se o ambiente requer que os *MTs* sejam os menores possíveis, terão maiores chances de sobrevivência aqueles indivíduos que melhor atenderem a essas necessidades.

Existem diversos métodos para a seleção de indivíduos que formarão uma nova população. Não apenas após o operador de seleção, mas após qualquer outro operador do AG, as populações resultantes devem permanecer com o mesmo tamanho N , a não ser que se estabeleça uma regra que permita sua variação e que seja justificável.

Para exemplificar, um possível método é a realização do chamado torneio estocástico, onde se sorteia uma quantidade q de indivíduos quaisquer (por exemplo, $q = 3$) e, dentre estes, sorteia-se um para fazer parte da próxima população a partir de ponderações provenientes do *fitness* recebido na função de avaliação para cada indivíduo, sendo todo esse processo repetido até que se obtenham N indivíduos novamente. As referências HOPGOOD [2], GOLDBERG [3] e RAWLINS [4] mostram diversos outros métodos de seleção para o leitor mais interessado. O método usado neste trabalho é uma junção do chamado *scaled fitness* com a roleta ponderada, conforme será explicado a seguir.

Há diversas maneiras de se obter um *scaled fitness*, mas aqui foi usado o *rank selection*. Essa operação tem a função de diminuir as disparidades de *fitness* entre diferentes indivíduos para evitar convergência precoce, além de garantir uma melhor procura em todo o espaço de busca, usando, ao invés do valor cru do *fitness*, um valor baseado no ranking dos indivíduos, no tamanho da população e nos valores máximo e mínimo dos *fitness* existentes para os indivíduos. Usou-se a seguinte forma de nota por ranking, HOPGOOD [2]:

$$nota(i) = Min(fit) + [Max(fit) - Min(fit)] * \frac{N - rank(i)}{N - 1} \quad (5-16)$$

A Figura 5.3 mostra o efeito da aplicação do *scaled fitness*.

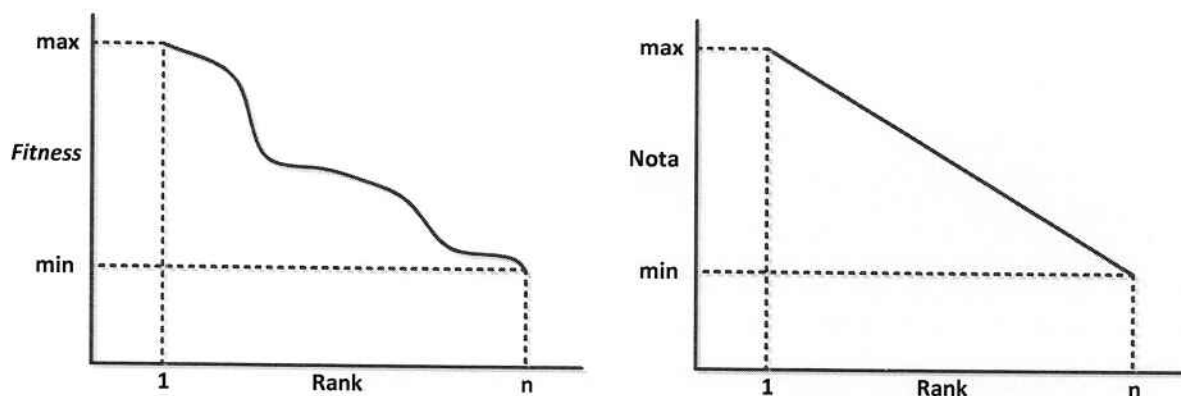


Figura 5.3: O primeiro gráfico é o *fitness* cru. O segundo é a nota uniformizada por *scaled fitness*.

Procede-se então à normalização da nota de cada indivíduo, conforme segue:

$$nota\ normalizada(i) = nota(i) / Max(nota) \quad (5-17)$$

A seguir, parte-se para a roleta, que tem a função de sortear uma nova população de tamanho N a partir dos indivíduos ponderados com suas notas normalizadas na população atual.

Supondo-se que se esteja obtendo a otimização de quatro relés cujas notas normalizadas antes da aplicação do *scaled fitness*, ou seja, os valores crus normalizados de *fitness* provenientes da função de avaliação em (5-10), sejam 0,4; 0,39; 0,16 e 0,05 respectivamente para os indivíduos A, B, C e D. A roleta ficaria como na Figura 5.4. Aplicando-se o *scaled fitness* conforme equação (5-16) e normalizando, a roleta ficará como na Figura 5.5, onde os números dentro do círculo são as probabilidades de cada indivíduo ser selecionado, e os números fora do círculo são as probabilidades acumuladas na roleta ponderada normalizada. Observa-se que, a menos do indivíduo A, que tem o maior *fitness* e que continua tendo um alto valor na nota após a aplicação do *scaled fitness*, a aplicação

deste último faz com que as probabilidades relacionadas a cada indivíduo (as notas) fiquem mais bem distribuídas, diminuindo disparidades entre os indivíduos. É claro que este exemplo foi apenas para explicar o funcionamento do *scaled fitness* usando-se apenas quatro indivíduos. Em uma população com dezenas de indivíduos o balanceamento se torna ainda mais uniforme.

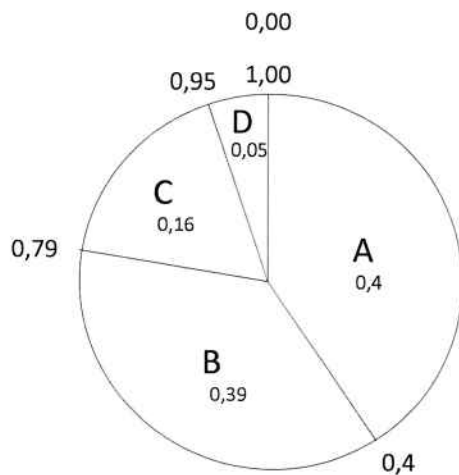


Figura 5.4: Roleta ponderada antes da aplicação do *scaled fitness*.

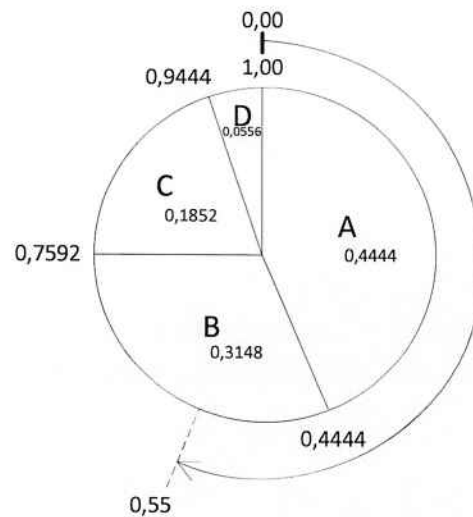


Figura 5.5: Roleta ponderada após a aplicação do *scaled fitness*. Se o número 0,55 for sorteado, o indivíduo B é selecionado.

A seleção em si se dará girando-se a roleta e verificando-se qual indivíduo foi sorteado. Se a roleta cair em 0,55, por exemplo, na Figura 5.5, isso corresponderia à seleção do indivíduo B. Deve-se proceder com N giros da roleta até que se forme uma nova população com o tamanho definido.

Percebe-se aqui que indivíduos com valores mais altos de nota terão maiores chances de seguir para a próxima geração, podendo inclusive ser selecionados mais de uma vez, quando sorteados mais de uma vez, ou seja, pode haver repetição de indivíduos.

5.5.4 Cruzamento

O processo de cruzamento buscará as melhores combinações de características entre diferentes indivíduos ao longo das gerações. Se houver produção de indivíduos mal

adaptados, estes terão menores chances de serem selecionados. Havendo produção de indivíduos mais bem adaptados, estes terão maiores chances de serem selecionados para as próximas gerações.

Esse operador pode ser implementado de diversas maneiras. O leitor mais interessado pode consultar as referências GOLDBERG [3] e RAWLINS [4]. Não importa a maneira que seja feito, o sorteio de dois indivíduos pais para se cruzarem é o mesmo. Sorteia-se, sem repetição, um par qualquer de cromossomos e aplica-se a probabilidade p_c de cruzamento. Isso se dá pelo sorteio de um número de 0 a 1 (sendo que temos $0 \leq p_c \leq 1$) e, se o número sorteado for menor ou igual a p_c , este par cruzará; se for maior que p_c , não haverá cruzamento. Essa probabilidade costuma variar de 50 a 90 %. A Figura 5.6 ilustra melhor tal processo usando uma analogia com a roleta usada no operador de seleção.

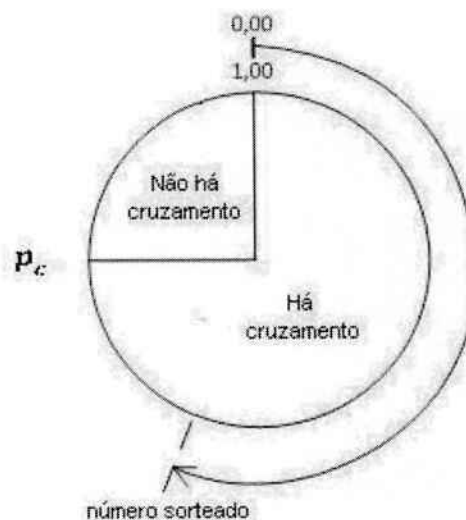


Figura 5.6: Para cada par de indivíduos formado, aplica-se a probabilidade p_c para decidir se haverá cruzamento ou não. Neste caso haverá cruzamento, pois o número sorteado foi menor que p_c .

Os pares escolhidos para cruzar passam por um dos processos que serão descritos a seguir, enquanto os que não cruzarem são simplesmente copiados. Esse processo é repetido até que se forme uma nova população de tamanho N .

O cruzamento pode ser feito por diversos métodos. Este trabalho optou pelos seguintes métodos quando do uso de codificação binária.

Cruzamento de Um Ponto: Após a escolha randômica de dois cromossomos pais, geram-se dois cromossomos filhos conforme os seguintes passos:

- Sorteio de um loco no cromossomo;
- Os genes anteriores a este loco permanecem inalterados;
- Os genes a partir deste loco são trocados entre os cromossomos.

A Figura 5.7 ilustra esse procedimento. Supondo que, para dois cromossomos de dez bits, o loco sorteado seja o 7º, teremos o processo de cruzamento como segue:

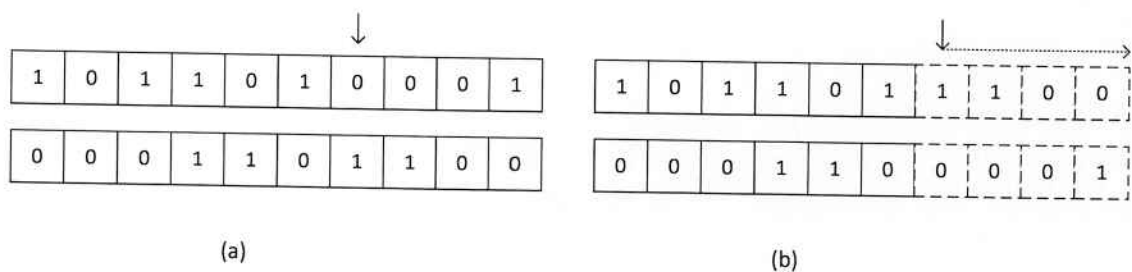


Figura 5.7: Par de cromossomos de dez bits antes (a) e depois (b) do Cruzamento de Um Ponto a partir do 7º bit.

Cruzamento de Dois Pontos: Ao invés do sorteio de um loco, sorteiam-se dois locos, o que dá uma formação circular ao cromossomo, onde o cromossomo não tem um começo e um fim definidos. Procede-se então da seguinte forma:

- Sorteio de dois locos no cromossomo;
- Os genes entre os locos são trocados entre os cromossomos.

Supondo que, para dois cromossomos de dez bits, os locos sorteados foram o 7º e o 3º, teremos o processo de cruzamento como segue na Figura 5.8. A Figura 5.9 mostra o mesmo exemplo com a representação circular dos cromossomos, onde o que seria o 1º bit está destacado na figura, seguindo-se para os demais bits no sentido horário.

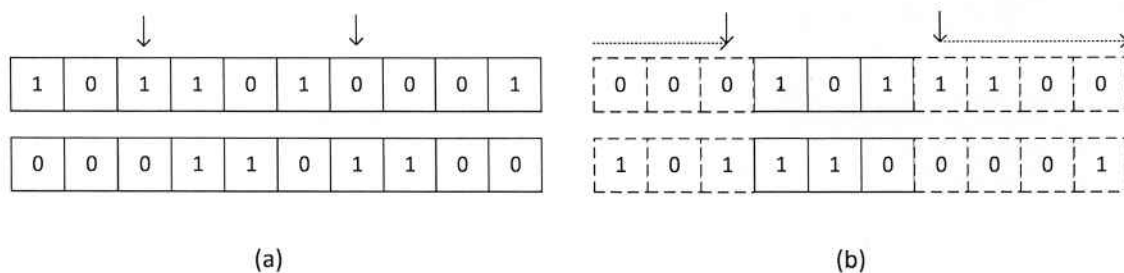


Figura 5.8: Par de cromossomos de dez bits antes (a) e depois (b) do Cruzamento de Dois Pontos do 7º bit ao 3º bit.

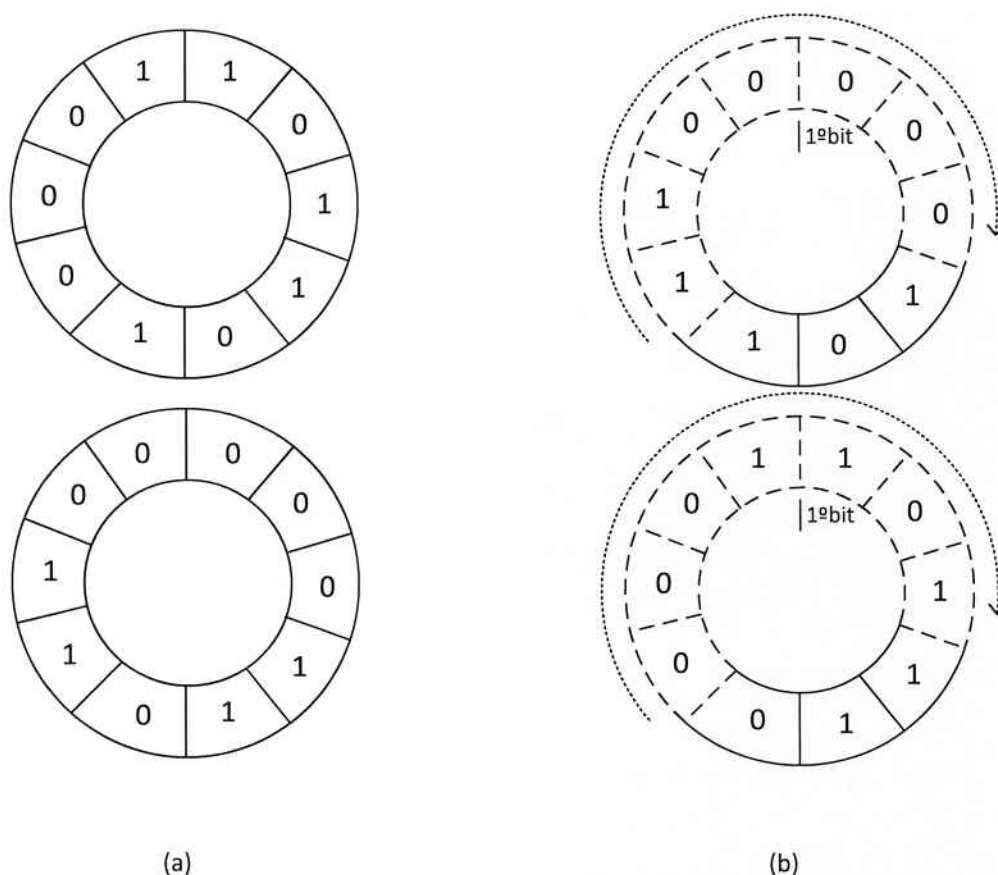


Figura 5.9: Par de cromossomos de dez bits antes (a) e depois (b) do Cruzamento de Dois Pontos do 7º bit ao 3º bit mostrando a característica circular do cromossomo.

Esse tipo de cruzamento possibilita o agrupamento de diferentes pedaços dos cromossomos, promovendo a igualdade nas probabilidades relacionadas a cada gene de sofrer cruzamento. O Cruzamento de Um Ponto nada mais é que um caso específico do Cruzamento de Dois Pontos, onde é sorteado um primeiro loco e o segundo loco é sempre o último possível dos cromossomos, tendo então um grau de liberdade a menos.

Cruzamento de Quatro Pontos: É uma variante do Cruzamento de Dois Pontos. Ao invés do sorteio de dois locos, sorteiam-se quatro locos. Sendo assim, tem-se:

- Sorteio de quatro locos no cromossomo;
- Colocação em ordem crescente dos locos escolhidos;
- Os genes anteriores ao primeiro loco, entre o segundo e terceiro locos e após o quarto loco não sofrem alteração;
- Os genes entre o primeiro e segundo locos e entre o terceiro e quarto locos são trocados entre os cromossomos.

Se no Cruzamento de Dois Pontos há o ganho de um grau de liberdade, no de Quatro Pontos há um ganho adicional de dois graus de liberdade, totalizando quatro. É claro que se deve atentar ao tamanho dos cromossomos. Se cada cromossomo tiver apenas quatro genes, não é justificável o uso de quatro graus de liberdade. Se um cromossomo tiver dezenas de genes, esse ganho de graus já é justificável.

Na codificação binária, quando há troca de material genético no meio dos sete genes que correspondem a um *MT*, seu valor real se altera, promovendo uma melhoria na varredura no espaço de busca possível. Quando se usa a codificação real, os operadores acima mencionados resultam na simples troca de valores de *MT* de um cromossomo para outro, não permitindo a entrada de informações novas. Uma forma de contornar esse problema é através do uso de operadores aritméticos.

Cruzamento Média Aritmética: Neste caso, dois cromossomos pais geram apenas um filho, sendo necessário um maior número de pares até que se complete uma quantidade *N* de indivíduos na nova população.

$$i_{novo} = \frac{i_1 + i_2}{2} \quad (5-18)$$

sendo:

i_1 e i_2 os indivíduos pais;

i_{novo} o indivíduo filho.

Cruzamento Média Geométrica: Ao invés de usar a média aritmética, usa a média geométrica.

$$i_{novo} = \sqrt{i_1 * i_2} \quad (5-19)$$

Cruzamento BLX- α : Neste caso dois filhos são gerados. Os cruzamentos Média Aritmética e Média Geométrica têm um problema relacionado à variação quanto ao espaço de busca possível, tendo normalmente a tendência de varrer mais ao centro dos intervalos possíveis. O cruzamento BLX- α visa melhorar essa questão, sendo dado pelas seguintes equações:

$$\begin{aligned} i_{novo\ 1} &= i_1 + \beta(i_2 - i_1) \\ i_{novo\ 2} &= i_2 + \beta(i_1 - i_2) \end{aligned} \quad (5-20)$$

onde:

$\beta \in [-\alpha, 1 + \alpha]$, e α é um valor baixo que estende a varredura no espaço de busca possível, sendo geralmente 0,5.

5.5.5 Mutação

O operador de mutação visa expandir a varredura no espaço de busca possível, tendo a função de evitar ótimos locais, mudando a direção da busca para alguns indivíduos, e de aumentar a probabilidade de que todas as regiões nos intervalos possíveis sejam analisadas. O processo de determinar se um gene mudará ou não de valor é análogo ao da roleta para o cruzamento mostrada na Figura 5.6, porém, além de agora ser aplicada uma probabilidade p_m , esta é aplicada em cada gene de cada cromossomo da população. Usa-se p_m com valor

bem baixo, geralmente entre 0,1 e 10 %, de forma que possibilite uma boa varredura sem, no entanto, tornar a busca excessivamente aleatória.

Para os genes escolhidos para sofrer mutação, procede-se da seguinte maneira:

- Para codificação binária: Altera-se o valor 0 para 1 e vice-versa;
- Para codificação real: Sorteia-se um novo valor segundo os limites de MT estabelecidos em (5-5).

A Figura 5.10 mostra, para um cromossomo de dez genes em codificação binária, uma mutação ocorrida no 8º bit. A Figura 5.11 mostra, para um cromossomo de dez genes em codificação real (mostrando até duas casas decimais), uma mutação ocorrida no 2º bit quando os limites para os alelos variam de 0,00 a 1,00, tendo-se sido sorteado um valor qualquer neste intervalo para a troca de valores.

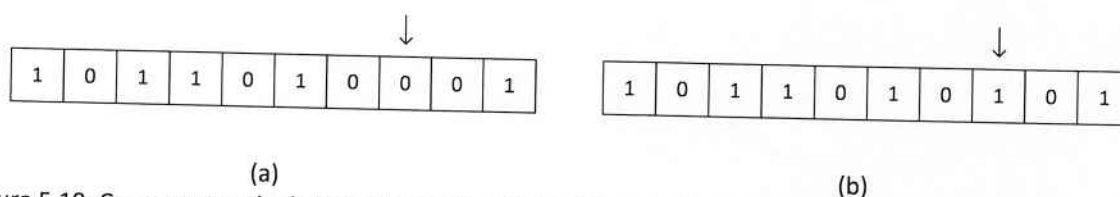


Figura 5.10: Cromossomo de dez bits em codificação binária antes (a) e depois (b) de mutação no 8º bit.

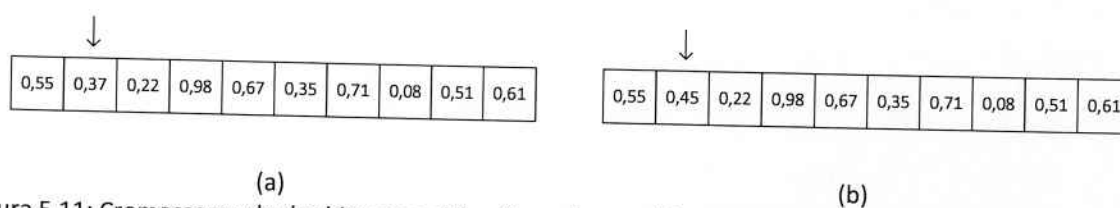


Figura 5.11: Cromossomo de dez bits em codificação real antes (a) e depois (b) de mutação no 2º bit.

Após cada operador (seleção, cruzamento e mutação), deve-se sempre ter uma população de N indivíduos e, após o último processo, ela será avaliada e passará pelo loop do algoritmo genético novamente. Há alguns métodos diferentes para mutação, conforme se pode verificar em GOLDBERG [3] e RAWLINS [4], para o leitor mais interessado.

5.5.6 Elitismo

Nota-se que, após a aplicação dos operadores genéticos já mencionados, quase toda a população pode acabar sendo substituída por uma nova população, ainda mais quando são utilizadas altas probabilidades de cruzamento. Mesmo assim, não há controle sobre quais indivíduos não sofrerão alterações, podendo, conseqüentemente, resultar na perda de indivíduos com alto valor de *fitness*. Para evitar esse problema, aplica-se o elitismo, onde uma porcentagem p_{elite} dos melhores indivíduos da população antes de passar pelo ciclo do AG é diretamente reproduzida na geração seguinte.

5.5.7 Condições de parada

A condição de parada do AG pode depender de diversas condições. Aqui foi usada uma junção de algumas delas, conforme listadas a seguir:

- A. É determinado um número máximo n_{max} de iterações;
- B. É determinado um número n_{min} de iterações;
- C. Estando entre os limites dispostos em A e B acima, é determinada uma porcentagem mínima para o indivíduo que mais se repete conforme este é majoritariamente selecionado para as próximas gerações, que é um sinal de que esta é a solução para a qual o algoritmo está convergindo;
- D. Estando entre os limites dispostos em A e B, é determinada uma variância máxima var_{max} , que deve ser verificada entre os cromossomos para cada gene (verifica-se o primeiro gene de todos os cromossomos, depois o segundo gene de todos os cromossomos, e assim por diante). Estar abaixo deste valor significa que o algoritmo já atingiu a convergência. Pode-se colocar uma variância específica para cada gene se necessário. Esta condição pode ser adaptada em termos de desvio padrão, como será feito a seguir.

Para melhor visualização, se as condições forem escritas como a seguir, a parada ocorrerá se a expressão (5-21), representada na forma booleana, resultar VERDADEIRO.

- A. $n > n_{max}$
- B. $n > n_{min}$
- C. *Maior taxa de repetição* > *Taxa mínima de repetição*
- D. desvio padrão por gene < *desvio padrão*_{max}

$$A + B \cdot (C + D)$$

(5-21)

Tendo-se atingido a condição de parada, a solução final será dada pelo melhor indivíduo da população final.

O fluxograma da Figura 5.12 representa o funcionamento geral do algoritmo genético aplicado ao problema de proteção, conforme implementado neste trabalho.

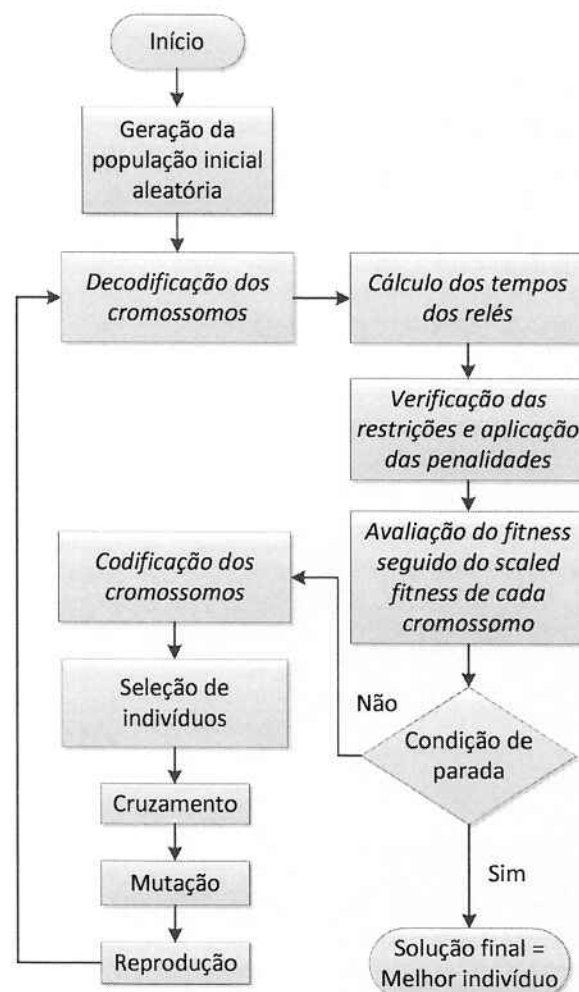


Figura 5.12: Fluxograma geral do algoritmo genético aplicado no problema de proteção.

5.6 Dados necessários para início do processamento do AG

Primeiramente, deve-se proceder à inserção dos dados de curtos-circuitos simulados no começo e no fim das linhas (correspondentes a curtos nas cruzes representadas logo à frente dos relés na Figura 3.5). Simulam-se então nesses pontos as faltas trifásicas, dupla-fase, dupla-fase-terra e monofásicas para cada configuração que se deseja levar em conta. Para cada configuração e tipo de falta, deve-se gerar duas tabelas para correntes e duas para tensões como as apresentadas na Tabela 5.2 e na Tabela 5.3.

Tabela 5.2: Formato da tabela de dados de módulos ou de fases das correntes de curtos-circuitos para m relés e n pontos de falta.

Tipo de falta e configuração		Ponto de falta				
		1	...	k	...	n
Relé	1					
	:					
	j					
	:					
	m					

Tabela 5.3: Formato da tabela de dados de módulos ou de fases das tensões de curtos-circuitos para o barras e n pontos de falta.

Tipo de falta e configuração		Ponto de falta				
		1	...	k	...	n
Barra	1					
	:					
	l					
	:					
	o					

Como os dados das tensões de curtos-circuitos são dados em relação às barras, deve-se inserir outra tabela que mostre em qual barra está cada relé, como na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Formato da tabela de dados da localização dos relés em relação às barras.

Tipo de falta e configuração	Relé				
	1	...	j	...	m
	nº barra	nº barra	nº barra	nº barra	nº barra

Além disso, devem ser também dados os limites válidos para os tempos de atuação e os multiplicadores de tempo.

6 Estudo de caso

6.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados a rede exemplo testada e os resultados da otimização segundo o método apresentado neste trabalho para o problema de proteção e coordenação de relés de sobrecorrente direcionais em rede não radial. Quando se trata de algoritmos genéticos, sendo muitos parâmetros determinados de forma empírica, deve-se buscar a melhor parametrização para o problema específico, e haverá um item neste capítulo especificamente para analisar o efeito de parametrizações diferentes, assim como outro item comparando as codificações real e binária.

6.2 Rede exemplo

Optou-se por simular a rede apresentada na Figura 3.5, mas que será aqui repetida na Figura 6.1, e que já foi anteriormente analisada para facilitar o entendimento do trabalho como um todo. Para essa rede, foram otimizados os parâmetros multiplicadores de tempo dos relés 1 ao 10. Os relés 11 ao 13 não farão parte do nosso escopo do problema de proteção, podendo ser utilizados outros tipos de proteção, por exemplo, proteção diferencial. Serão levadas em conta duas configurações relevantes para a simulação, sendo uma com os geradores nas barras J e L ligados e a outra com os geradores desligados. A parametrização resultante para os multiplicadores de tempo deve atender às duas configurações da rede e a todos os tipos e pontos de falta.

Ressalta-se que os curtos-circuitos foram simulados em ATP (*Alternative Transients Program*), tendo sido desenvolvida uma rotina para deixar os valores no formato de entrada de dados especificado no capítulo anterior.

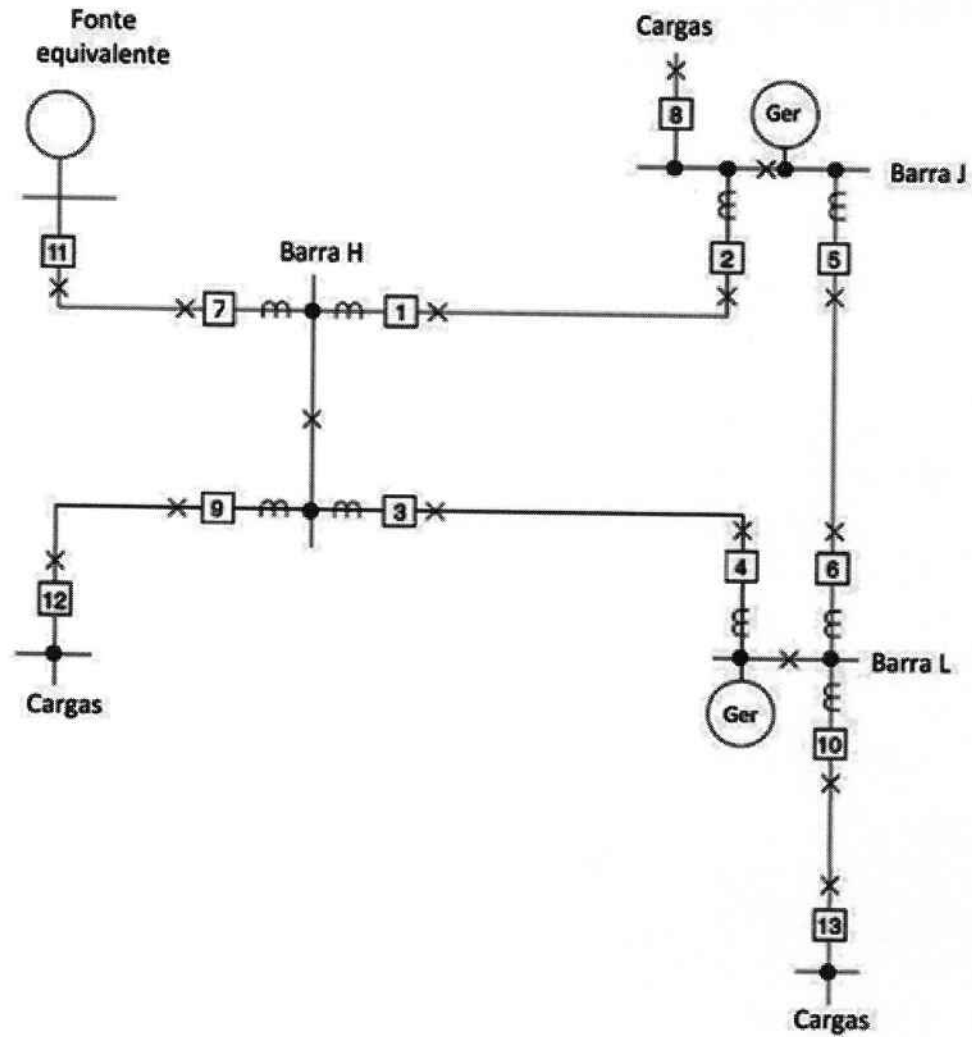


Figura 6.1: Rede exemplo para simulação.

Os parâmetros da rede exemplo estão apresentados nas tabelas a seguir:

Tabela 6.1: Dados da fonte equivalente de 138kV.

$SCC_{3\phi}$	1500 MVA / 89°
$SCC_{\phi T}$	1000 MVA / 80°
Z_1	$0,222 + j12,694 \Omega$
Z_0	$9,478 + j30,876 \Omega$

Tabela 6.2: Dados das linhas – cabos 336.4 MCM.

z_1	$0,1748 + j0,4841 \Omega/\text{km}$
z_0	$0,4370 + j1,6463 \Omega/\text{km}$

Linha	11-7	1-2	3-4	5-6	8-	9-12	10-13
Comprimento (km)	6	5	7	10	-	2	3
Corrente de carga (A)	250	200	150	150	100	180	200

Tabela 6.3: Equivalente a 138kV dos geradores mais transformadores (os transformadores não são representados na Figura 6.1) nas barras J e L.

Na barra J	$Z = 1,11 + j 63,47 \Omega$ Equivalente a gerador de 60MVA; $Z_{equi} = 20 \%$)
Na barra L	$Z = 2,22 + j 126,94 \Omega$ Equivalente a gerador de 30MVA; $Z_{equi} = 20 \%$)

Nessa rede exemplo, verifica-se que as coordenações necessárias serão conforme a Tabela 6.4.

Tabela 6.4: Coordenações entre relés na rede exemplo.

Relé de retaguarda	Relé principal
4	1
6	2
2	3
5	4
1	5
3	6
2 e 4	7
1 e 6	8
2 e 4	9
3 e 5	10

6.3 Dados referentes ao problema de proteção

Os dados usados referentes ao problema formulado de proteção e coordenação são dados na Tabela 6.5. Foram considerados os mesmos valores para todos os relés da rede e, sendo o objetivo principal neste trabalho a proposta de um método de otimização para o problema de coordenação, foram utilizados fatores de ponderação ω_j unitários. Foi considerado que os relés utilizam curva muito inversa, conforme equação (2-3).

Tabela 6.5: Dados do problema de proteção.

T_{max} (s)	2,5
T_{min} (s)	0,1
MT_{max}	1,00
MT_{min}	0,05
ΔT_{coord} (s)	0,3
ω	1

6.4 Dados referentes ao algoritmo genético

Os dados usados para os parâmetros do algoritmo genético referentes aos resultados que serão apresentados nos próximos itens são apresentados na Tabela 6.6. Ressalta-se que haverá um item no capítulo atual que abordará os efeitos quando variamos tais parâmetros, conforme simulações também feitas.

Tabela 6.6: Parâmetros do algoritmo genético.

N (tamanho da população)	150
p_c (probabilidade de cruzamento)	60%
α (para cruzamento BLX- α)	0,5
p_m (probabilidade de mutação)	5%
p_{elite} (porcentagem elitismo)	10%
n_{min}	300
n_{max}	3000
$desvio\ padrão_{max}$	0,05
Taxa mínima de repetição	50%
$k_{T1>}$	1
$k_{T2>}$	3
$c_{T2>}$	0,6
$k_{T<}$	30
$k_{MT1>}$	1
$k_{MT2>}$	10
$c_{MT2>}$	0,25
$k_{MT<}$	5
$k_{coord1>}$	1200
$k_{coord2>}$	2400
$c_{coord2>}$	0,15
$k_{coord3>}$	3600
$c_{coord3>}$	0,30

6.5 Resultados obtidos com codificação real

A Tabela 6.7 mostra todos os multiplicadores de tempo resultantes do processamento do AG implementado para a codificação real e cruzamento BLX- α , que foram as parametrizações que apresentaram os melhores resultados. Para chegar a tal resultado, o programa realizou 1486 iterações, o que correspondeu a um tempo de simulação de 9 minutos e 28 segundos em um computador com processador Intel Core 2 Duo a 2 GHz e memória RAM de 2,0 GB. O

processamento alcançou o resultado com uma precisão de três casas decimais com 878 iterações em 5 minutos e 37 segundos, correspondente ao final da subida mais brusca no gráfico do *fitness* na Figura 6.2. Da Tabela 6.8 até a Tabela 6.11 é possível verificar todos os tempos de atuação para os relés liberados pela característica direcional (se a tiver) e pela corrente de pickup para todos os pontos de falta, os quatro tipos de faltas e as configurações levadas em conta. Pode-se verificar que as coordenações (vide Tabela 6.4) estão sendo satisfeitas considerando o tempo de coordenação de 0,3 segundos entre relé de backup e relé principal. Verificou-se também que a função objetivo, relativa à soma dos tempos dos relés principais, resultou 55,589 segundos.

Tabela 6.7: Resultado dos multiplicadores de tempo para codificação real.

Relé	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>MT</i>	0,4222	0,1331	0,5505	0,1080	0,2523	0,2752	0,0500	0,3048	0,1822	0,1419

Tabela 6.8: Tempos de atuação (s) para faltas trifásicas com e sem os geradores nas barras J e L.

CC3Ø com geradores		Relé									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ponto de falta	1	0,3120	0,6494		0,7045						
	2	0,4977	0,2356	3,1179			0,7531				
	3		0,6494	0,2790	0,7045						
	4	2,9620		0,5191	0,1381	0,4381					
	5	0,4977		3,1179		0,1610	0,7531				
	6	2,9620		0,5191		0,4381	0,2173				
	7		0,6494		0,7045			0,1751			
	8	0,4977		3,1179			0,7531		0,1000		
	9		0,6494		0,7045					0,1000	
	10	2,9620		0,5191		0,4381					0,1000
	11		0,7104		0,7771			0,1902			
	12		0,7280		0,7984					0,1090	
	13	3,5075		0,5829		0,4953					0,1121

CC3Ø sem geradores		Relé										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Ponto de falta	1	0,3569										
	2	0,5339	0,7382	2,0768			1,0382					
	3			0,3437								
	4	1,5461		0,5999	0,2778	0,6491						
	5	0,5339		2,0768		0,2339	1,0382					
	6	1,5461		0,5999		0,6491	0,2999					
	7											
	8	0,5339		2,0768			1,0382		0,1408			
	9										0,1377	
	10	1,5461		0,5999		0,6491						0,1395
	11											
	12										0,1470	
	13	1,7141		0,6544		0,7147						0,1521

Tabela 6.9: Tempos de atuação (s) para faltas dupla-fase com e sem os geradores nas barras J e L.

CC2Ø com geradores		Relé										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Ponto de falta	1	0,3633	0,7943		0,8792							
	2	0,5826	0,2777	3,8501			0,8977					
	3		0,7943	0,3240	0,8792							
	4	3,7193		0,6059	0,1618	0,5161						
	5	0,5826		3,8501		0,1872	0,8977					
	6	3,7193		0,6059		0,5161	0,2532					
	7		0,7943		0,8792			0,2106				
	8	0,5826		3,8501			0,8977		0,1159			
	9		0,7943		0,8792						0,1162	
	10	3,7193		0,6059		0,5161						0,1164
	11		0,8737		0,9780			0,2296				
	12		0,8968		1,0072						0,1267	
	13	4,4763		0,6813		0,5851						0,1306

CC2Ø sem geradores		Relé										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Ponto de falta	1	0,4161										
	2	0,6255	0,9103	2,5064			1,2530					
	3			0,3997								
	4	1,8635		0,7015	0,3305	0,7723						
	5	0,6255		2,5064		0,2729	1,2530					
	6	1,8635		0,7015		0,7723	0,3507					
	7											
	8	0,6255		2,5064			1,2530		0,1635			
	9										0,1604	
	10	1,8635		0,7015		0,7723						0,1630
	11											
	12										0,1713	
	13	2,0759		0,7661		0,8530						0,1778

Tabela 6.10: Tempos de atuação (s) para faltas dupla-fase-terra com e sem os geradores nas barras J e L.

CC2ØT com geradores		Relé										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Ponto de falta	1	0,3340	0,6577		0,7137							
	2	0,5405	0,2478	3,4803			0,8203					
	3		0,6577	0,2977	0,7137							
	4	3,3118		0,5637	0,1475	0,4750						
	5	0,5405		3,4803		0,1725	0,8203					
	6	3,3118		0,5637		0,4750	0,2344					
	7		0,6577		0,7137			0,1771				
	8	0,5405		3,4803			0,8203		0,1071			
	9		0,6577		0,7137					0,1064		
	10	3,3118		0,5637		0,4750					0,1078	
	11		0,7340		0,8051			0,1959				
	12		0,7519		0,8267					0,1170		
	13	3,9841		0,6386		0,5430					0,1220	

CC2ØT sem geradores		Relé									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ponto de falta	1	0,3831									
	2	0,5799	0,8224	2,2893			1,1445				
	3			0,3685							
	4	1,7070		0,6522	0,3047	0,7120					
	5	0,5799		2,2893		0,2535	1,1445				
	6	1,7070		0,6522		0,7120	0,3260				
	7										
	8	0,5799		2,2893			1,1445		0,1522		
	9									0,1478	
	10	1,7070		0,6522		0,7120					0,1516
	11										
	12									0,1586	
	13	1,9101		0,7159		0,7901					0,1663

Tabela 6.11: Tempos de atuação (s) para faltas monofásicas com e sem os geradores nas barras J e L.

CCØT com geradores		Relé									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ponto de falta	1	0,4424	0,6836		0,7424						
	2	0,7337	0,2759	7,4558			1,0756				
	3		0,6836	0,3836	0,7424						
	4	10,8780		0,7514	0,1736	0,6058					
	5	0,7337		7,4558		0,2099	1,0756				
	6	10,8780		0,7514		0,6058	0,2935				
	7		0,6836		0,7424			0,1834			
	8	0,7337		7,4558			1,0756		0,1305		
	9		0,6836		0,7424					0,1334	
	10	10,8780		0,7514		0,6058					0,1348
	11		0,8167		0,9035			0,2158			
	12		0,8005		0,8835					0,1501	
	13	17,8170		0,8813		0,7192					0,1573

CCØT sem geradores		Relé									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ponto de falta	1	0,5785									
	2	0,8996	1,5526	3,9608			1,9801				
	3			0,5518							
	4	2,9472		1,0068	0,5007	1,1700					
	5	0,8996		3,9608		0,3880	1,9801				
	6	2,9472		1,0068		1,1700	0,5033				
	7										
	8	0,8996		3,9608			1,9801		0,2288		
	9									0,2224	
	10	2,9472		1,0068		1,1700					0,2330
	11										
	12									0,2405	
	13	3,3916		1,1162		1,3235					0,2580

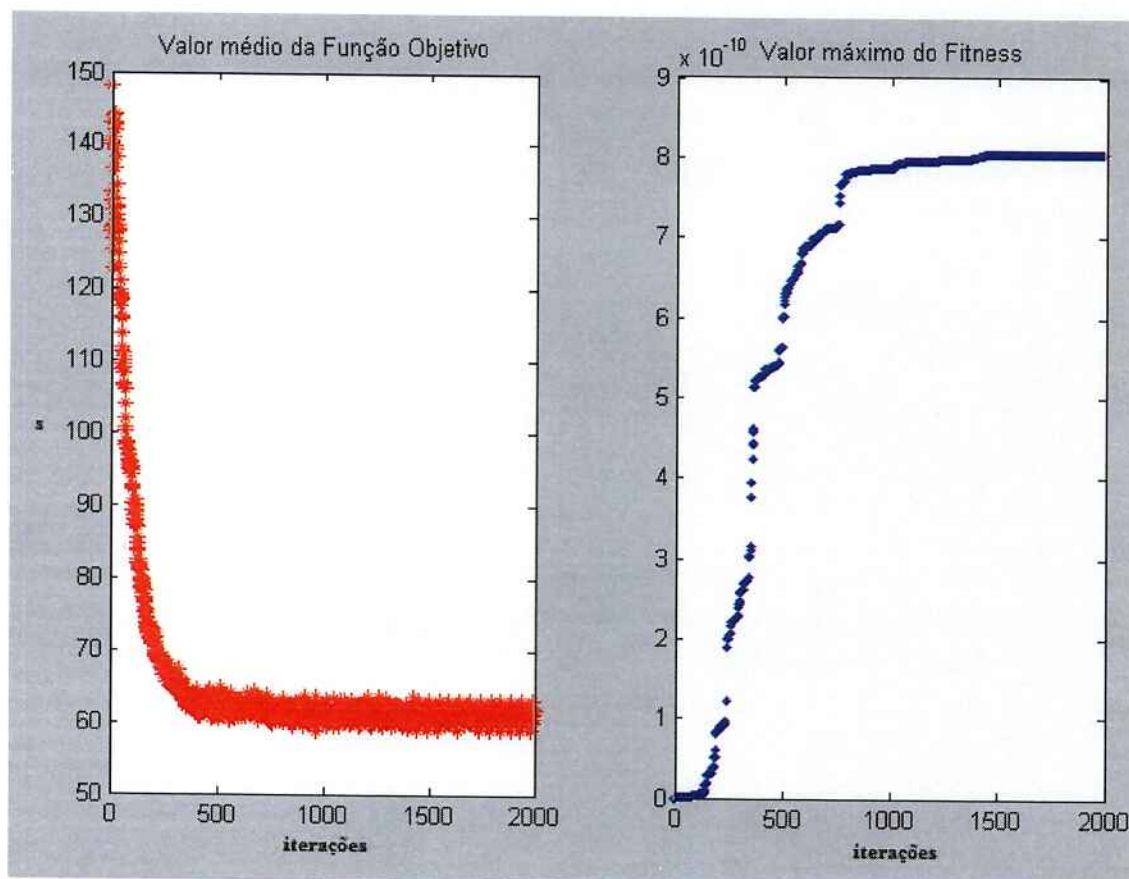


Figura 6.2: Valor médio da função objetivo e valor máximo do *fitness* na população em função das gerações.

A Figura 6.2 mostra como a média da função objetivo e o valor máximo de *fitness* evoluem com o decorrer das iterações. Apesar de a condição de parada ter sido atingida antes, o

programa foi deixado rodando até a iteração 2000 para que pudéssemos visualizar a evolução no gráfico e mostrar que após a 1486ª iteração não há mais evolução. A função objetivo é a soma dos tempos (em segundos) dos relés principais para os diversos pontos de falta, tipos de falta e configurações, sendo justificável o uso de seu valor médio em relação aos indivíduos para a plotagem do gráfico, mostrando de forma realista a tendência do algoritmo como um todo, já que o valor mínimo estaria sujeito a soluções (indivíduos) não aceitáveis, ou seja, fora das restrições em (5-4) e (5-5), principalmente nas primeiras iterações do algoritmo. O gráfico do *fitness* pode ser feito em relação ao valor máximo deste, o qual leva em conta as restrições, mostrando de forma realista a tendência do melhor indivíduo de geração para geração. Neste último gráfico, percebe-se a presença de alguns patamares antes do último patamar mais alto. Tais fatos se devem à presença de ótimos locais, o que justifica a importância do operador de mutação, que expande a varredura pelo resto do espaço de busca, até que se encontre o ótimo global. A dispersão no primeiro gráfico se deve ao aparecimento e posterior eliminação de indivíduos fora da tendência frente ao operador de mutação.

Verificou-se assim que o AG desenvolvido fornece bons resultados na determinação de *MT*s dos relés da rede considerada.

Para esta aplicação foi considerada a coordenação entre os relés de fase, mas o algoritmo genético desenvolvido pode ser aplicado incluindo os relés de neutro utilizando-se as grandezas de sequência zero, como explicado no item 3.3, "Proteção direcional", e configurando os parâmetros do AG conforme esta especificidade.

6.6 Codificação real x codificação binária

A Tabela 6.12 mostra o resultado da parametrização otimizada quando se usa codificação binária de 10 bits. Verificou-se que as coordenações foram satisfeitas, conforme pode ser visto no APÊNDICE A . Os resultados dos multiplicadores de tempo estão agora com três casas decimais pelo fato de terem sido usados dez bits para a representação de cada *MT*, conforme mostrado no item 5.4.

Tabela 6.12: Resultado dos multiplicadores de tempo para codificação binária com dez bits.

Relé	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>MT</i>	0,448	0,137	0,576	0,128	0,268	0,288	0,064	0,305	0,184	0,142

Com codificação binária, verificou-se que a função objetivo resultou 59,094 segundos. Frente aos 55,589 segundos da codificação real, verifica-se que a codificação real apresentou resultados mais otimizados, o que leva à conclusão de que, para este problema, a resposta do algoritmo foi melhor para a codificação real. Entretanto, sendo muitos parâmetros do algoritmo genético determinados de forma empírica, deve-se procurar ajustá-los de forma a melhorar sua resposta de acordo com o problema específico, e, dependendo da parametrização usada, as respostas frente aos diferentes tipos de codificação apresentarão variações.

6.7 Codificação binária com 7 bits x codificação binária com 10 bits

A Tabela 6.13 mostra o resultado da parametrização otimizada quando se usa codificação binária de 7 bits. Verifica-se no APÊNDICE B que as coordenações foram satisfeitas. Os resultados têm agora duas casas de precisão.

Tabela 6.13: Resultado dos multiplicadores de tempo para codificação binária com sete bits

Relé	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>MT</i>	0,48	0,16	0,64	0,12	0,32	0,32	0,08	0,31	0,18	0,14

Usando-se codificação com sete bits por *MT*, verificou-se que a função objetivo atingiu o valor de 64,92 segundos. Isso nos leva à conclusão de que a resposta do algoritmo quando a codificação é feita em dez bits foi melhor. Isso não quer dizer diretamente que o fato de a precisão ter aumentado de duas casas decimais para três casas decimais quando se aumenta de sete para dez bits tenha sido o fator decisivo para uma melhor otimização, mas simplesmente que o algoritmo respondeu melhor à codificação de dez bits. De fato, percebe-se que a diferença entre os resultados das duas codificações não se dá por um pequeno ajuste na segunda casa decimal, mas chegou a até 0,06 de diferença no relé 3.

Pode haver diversos motivos para tais acontecimentos, como, por exemplo, o fato de o cruzamento de quatro pontas ser mais eficaz quando o cromossomo é mais comprido (no caso de dez bits, o cromossomo tem $10 \text{ relés} * 10 \text{ bits por relé} = 100 \text{ bits}$ de comprimento, contra 70 quando se usam sete bits), ou então a taxa de mutação deve ser alterada para a nova quantidade de bits total. O mais provável é que será necessário um ajuste ou até uma adaptação do algoritmo levando em conta diversos parâmetros para que se obtenha uma boa resposta usando-se sete bits.

6.8 Variação dos parâmetros do algoritmo genético

Foram feitos testes variando alguns parâmetros do AG e verificando a diferença nos resultados finais e no processamento. As seguintes conclusões foram tiradas das análises:

6.8.1 Probabilidade de mutação

Probabilidades mais baixas de mutação fazem o sistema convergir mais lentamente, o que se dá pela menor variação no espaço de busca, ou seja, para se analisar um mesmo espaço de busca, foram necessárias mais iterações. Deve-se atentar para a presença de ótimos locais, sendo que o gráfico do *fitness* fica mais sujeito a patamares mais longos. Usando-se probabilidades muito altas, a variação entre os indivíduos foi muito grande, tornando a busca predominantemente aleatória, o que dificultou a convergência e a otimização.

6.8.2 Probabilidade de cruzamento

Probabilidades muito baixas de cruzamento forneceram resultados menos precisos para os multiplicadores de tempo e, muitas vezes, mais longe do ótimo global, o que é consequência de uma estagnação na busca. Além disso, por haver menor introdução de novos indivíduos na população, o algoritmo se tornou mais lento. Probabilidades muito altas também causaram problemas, visto que o operador de seleção não consegue selecionar com a mesma rapidez em que são introduzidos novos indivíduos. Observa-se que um indivíduo com

bom *fitness* tem grandes chances de sofrer cruzamento sem ter sido igualmente copiado para a próxima geração.

6.8.3 Tamanho da população

Quanto maior o tamanho da população, maiores são as possibilidades de soluções a serem testadas e evoluírem, o que permitiu uma maior varredura no espaço de busca e maior facilidade para encontrar o ótimo global. No entanto, deve-se atentar ao fato de que, quanto maior o tamanho da população, maior é o tempo de processamento. Populações pequenas forneceram resultados menos precisos por não terem tantas possibilidades de soluções a serem testadas e evoluídas. Na parametrização do algoritmo genético, deve-se inserir o tamanho da população de forma que forneça resultados com a precisão desejada, mas que não demande maior tempo de processamento do que o desejado.

6.8.4 Porcentagem de elitismo

Uma porcentagem muito alta de elitismo resultou em convergência precoce para ótimos locais já que, ao longo do algoritmo, reproduziram-se diretamente nas novas gerações indivíduos próximos de ótimos locais, que dominaram a população com uma maior rapidez que a capacidade da mutação de mudar a direção de busca. Porcentagens muito baixas diminuíram o desempenho da otimização, já que há menor taxa de reprodução dos melhores indivíduos para as gerações seguintes.

7 Observações sobre o desenvolvimento do algoritmo e testes

7.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentadas observações sobre algumas etapas de desenvolvimento e alguns problemas e suas soluções durante a implementação do algoritmo genético. Consideraram-se essas questões importantes para esclarecer alguns problemas que possam aparecer durante o desenvolvimento de um algoritmo e também para mostrar alguns pensamentos quando do desenvolvimento de melhorias no algoritmo.

7.2 Etapas de desenvolvimento do algoritmo

O desenvolvimento do algoritmo se deu a vários passos exploratórios desde as primeiras tentativas com uma rede radial até a implementação na rede exemplo final não radial. A Tabela 7.1 fornece uma visão geral do processo de desenvolvimento do algoritmo genético descrito neste trabalho, mostrando as implementações realizadas.

Tabela 7.1: Metodologia, implementações e melhorias.

Etapa	Implementações							
	Rede	Codificação	Funções do AG	Cruzamento	Condição de parada	Configurações	Tipos de falta	OUTROS
1	Redes radiais	Números reais	Funções de <i>fitness</i> e de penalidades	Cruzamento de uma ponta e Mutação	Número máximo de iterações	Apenas uma configuração (e um gerador)	Apenas falta trifásica	
2				Cruzamento de duas pontas	Adição de número mínimo de iterações e taxa de repetição			
3	Rede malhada simples (6 relés)							
4		Adição de codificação binária		Cruzamento de quatro pontas				
5	Rede exemplo final					Com geradores nas barras J e L		

6						Com e sem os geradores nas barras J e L	Todos os tipos de falta	Rotina para verificações final e intermediárias dos resultados dos tempos, <i>MT's</i> , da função objetivo e, principalmente, das coordenadas
7			Adaptação das funções de <i>fitness</i> e de penalidades					
8				Cruzamento BLX- α para codificação real				
9			Elitismo					
10					Adição do desvio padrão			
11								Simulações variando os parâmetros do AG

7.3 Problemas, soluções e aperfeiçoamentos

Nos primeiros testes, ainda em uma rede radial (vide APÊNDICE D), já foi possível a implementação de um algoritmo genético que produzisse resultados viáveis (etapa 1). Foi percebido, porém, que o cruzamento de uma ponta utilizado até então não promovia equilíbrio nas probabilidades de cada gene do cromossomo de sofrer cruzamento. Inseriu-se então o cruzamento de duas pontas (etapa 2), com o qual foi possível uma melhoria nos resultados. O cruzamento de uma ponta levava a resultados viáveis, os quais eram, no entanto, ótimos locais, problema que o cruzamento de duas pontas resolveu. Posteriormente foi inserido o cruzamento de quatro pontas (etapa 4). Na rede malhada inserida na etapa 3 (vide APÊNDICE D), que ainda era simples, com um gerador antes de duas linhas em paralelo seguida de uma linha radial, não representou nenhuma melhoria significativa. Na rede exemplo final, no entanto, percebeu-se que esse cruzamento dava resultados melhores na codificação binária de dez bits do que na de sete bits, ou seja, cada tipo de codificação requer um tipo de operador diferente. Isso vale não só para o operador de cruzamento, mas quaisquer outros existentes (mutação, elitismo, etc). O fato é que,

sendo o cruzamento o principal operador em algoritmos genéticos, ele terá maior influência na determinação dos resultados finais, e aperfeiçoamentos nesse operador podem representar grandes melhoras no algoritmo como um todo.

As etapas anteriores em redes radiais e malhadas mais simples foram importantes para implementar as diversas funções do algoritmo genético e parametrizá-los de forma a obter resultados viáveis. Com isso foi possível inserir a rede exemplo final para testar o algoritmo (etapa 5) e fazer algum ajuste que fosse necessário. Felizmente, essa etapa mostrou que o AG desenvolvido funcionava sem a necessidade de nenhuma adaptação, o que mostra que pode ser usado para o ajuste otimizado de relés de sobrecorrente direcionais no problema de coordenação em redes elétricas diferentes. Daqui para frente o que seria feito seriam apenas aperfeiçoamentos no AG a fim de obter resultados cada vez melhores.

Na etapa 6 já estava-se testando a rede exemplo levando em conta os quatro tipos de falta e duas configurações diferentes. Foi percebido, após a inserção de rotina para verificação dos resultados intermediários, que apareciam alguns indivíduos que estavam levemente fora das restrições de MT ou T (por exemplo, sendo o limite inferior de MT igual a 0,0500, aparecia um indivíduo com o MT de um dos relés igual a 0,0490) que tinha um *fitness* muito próximo de indivíduos melhores e dentro das restrições. Essa rotina de verificação ajudou a obter uma melhor parametrização do algoritmo genético. Neste caso, foi possível a obtenção de melhores resultados através do balanceamento dos fatores de penalidade. Os fatores relativos às restrições de coordenação devem ser maiores, já que é a condição mais crítica do problema de proteção em questão. Porém, valores exageradamente altos quando comparados aos fatores de penalidade relativos às restrições de MT e T produzem desequilíbrio na função de avaliação, dando notas parecidas para indivíduos viáveis e, algumas vezes, mesmo que por uma pequena violação às restrições, não viáveis. Após o ajuste desses parâmetros (etapa 7), os resultados nas simulações posteriores apresentaram valores totalmente viáveis e que satisfizeram todas as restrições.

Até a etapa 7 o algoritmo convergia e eram obtidos resultados razoavelmente bons para o problema. Entretanto, o problema da não inserção de novos indivíduos quando são usados os cruzamentos convencionais (até então o último era o de quatro pontas) com codificação

em números reais era um fato que estava freando a otimização. Esse tipo de cruzamento não provê a expansão necessária na varredura do espaço de busca, restringindo a precisão dos resultados finais, os quais serão praticamente uma combinação dos melhores valores inicialmente gerados na população inicial, com exceção de algumas mutações durante o algoritmo. Aplicou-se então o cruzamento BLX- α (etapa 8), que possibilita a introdução de novos indivíduos na população. Surgiu, porém, um problema relacionado à quantidade de iterações para fazer o algoritmo convergir, o que demanda um maior tempo de processamento. Foram estudadas algumas possibilidades para resolver o problema e uma alternativa viável era a aplicação do elitismo (etapa 9), que seleciona uma porcentagem dos melhores indivíduos de cada geração e reproduz diretamente na geração seguinte, tornando mais fácil a convergência e fazendo com que o algoritmo analise melhor o espaço de busca ao redor dessas soluções (enquanto isso o cruzamento BLX- α e a mutação evitam que a busca seja feita única e somente nestas regiões, evitando ótimos locais). Esse operador representava então, além de melhorias no tempo de processamento, melhorias nos resultados finais, pois garantia que os melhores indivíduos de cada geração não desaparecessem na próxima. Mais do que resolver o problema da demora na convergência pela adição do cruzamento BLX- α , o algoritmo se tornou muito mais rápido quando comparado inclusive às versões anteriores ao cruzamento inserido, com tempos de processamento cerca de seis a sete vezes mais curtos. Essa combinação de cruzamento BLX- α com elitismo foi o suficiente para melhorar os resultados finais em torno de 10% quando analisada a função objetivo, sendo o elitismo responsável pelos ajustes mais grossos e o cruzamento pelos ajustes mais finos.

Dos parágrafos anteriores e da Tabela 7.1 percebe-se o que já foi comentado frente às diversas adaptações ocorridas no operador de cruzamento. Sendo o principal operador em algoritmos genéticos, seu aperfeiçoamento pode representar grandes melhoras nos resultados finais do algoritmo.

8 Conclusão

8.1 Método desenvolvido

Este trabalho apresentou como ponto principal o desenvolvimento de um método de otimização por meio de algoritmo genético para a determinação dos ajustes de relés de sobrecorrente direcionais em redes não radiais, mostrando que é possível atingir bons resultados com o método proposto, obtendo tempos de atuação minimizados e garantindo-se a correta coordenação entre os diversos relés de uma rede. Para isso, foi levado em conta que a coordenação deve ser garantida para todos os tipos de curtos-circuitos, sendo eles trifásico, dupla-fase-terra, dupla-fase e monofásicos, e em todos as extremidades das linhas, onde podemos obter os valores máximos das correntes que passam em cada relé, fato que deixa o sistema em condições em que as coordenações entre relés principais e relés de retaguarda são mais críticas. Além disso, inseriu-se a possibilidade de fazer a otimização levando em conta mais de uma configuração topológica da rede para a correta parametrização dos diversos relés, de forma que a mesma parametrização dos multiplicadores de tempo resultante satisfaça todas as configurações relevantes.

Foi mostrado também que diferentes parametrizações do algoritmo genético podem levar a resultados diferentes, sejam elas relacionadas à codificação do cromossomo usada, às probabilidades de cruzamento e mutação, aos métodos de cruzamento e mutação, e até à função de *fitness*, a qual desempenha papel crucial para a convergência do algoritmo, entre outros. Dessa forma, para se alcançar uma boa parametrização dos multiplicadores de tempo dos relés de sobrecorrente da rede, deve-se buscar previamente uma boa parametrização do AG levando em conta todos os fatores acima mencionados.

Finalmente, verificou-se que os resultados satisfizeram todas as restrições impostas ao problema minimizando os tempos de atuação de todos os relés que se procurou otimizar, mostrando sucesso do método proposto para o problema de proteção e coordenação.

8.2 Possibilidades para o futuro

Apesar do sucesso no trabalho desenvolvido, serão destacadas ainda algumas possibilidades para testes e aperfeiçoamentos futuros no algoritmo desenvolvido de forma a melhorar seu desempenho.

8.2.1 Algoritmo genético

- Auto-adaptação

Esta é uma poderosa ferramenta para aumentar a eficiência de um AG. Usando-se as variáveis utilizadas na condição de parada (desvio padrão, número de iterações e taxa de repetição do melhor indivíduo), formula-se outro critério (que também pode variar com base nos resultados na iteração atual ou na tendência dos resultados até a iteração atual) para, quando atingi-lo, promover alguma mudança no AG. Esta mudança pode ser:

- Renovação de uma porcentagem da população (que pode abranger os indivíduos com piores *fitness*) de forma a expandir a varredura no espaço de busca;
- Mudar a quantidade de indivíduos em uma população. Conforme o algoritmo converge, o número de indivíduos pode diminuir para uma porcentagem contendo apenas os com maior *fitness*, os quais estarão mais próximos da solução otimizada, promovendo maior velocidade ao algoritmo e menor influência de indivíduos com baixo *fitness*. Porém, dependendo da situação dos resultados no AG, pode-se fazer com que a população aumente de forma a promover a entrada de indivíduos diferentes e, assim, expandir a busca, evitando ótimos locais;
- Alteração nos parâmetros do AG de forma a tornar o algoritmo mais eficiente baseado na situação atual da população. Tais parâmetros podem ser as probabilidades de cruzamento e mutação, porcentagem de elitismo, os fatores de penalização, entre outros.

- Adição de novos mecanismos no AG

Outra opção é adição de novos mecanismos que, se bem formulados e parametrizados para o problema de proteção e coordenação, podem melhorar o desempenho do algoritmo como um todo. Algumas possibilidades são:

- Seleção Steady State, onde não há a “morte” de toda a geração anterior e o “nascimento” de uma inteiramente nova (e assim os indivíduos elitistas não serão simplesmente copiados da geração anterior, mas sim filhos iguais aos pais em que todos podem estar vivos). Neste caso, assim como no mundo real, há a possibilidade de procriação entre indivíduos de gerações diferentes, ou seja, há um nascimento gradual de indivíduos, assim como uma morte gradual dos indivíduos mais velhos;
- Seleção $(\mu+\lambda)$, onde a seleção para a próxima geração é feita através de competição entre os pais, μ , e os filhos, λ .
- Mutação por permutação, onde há troca de informação entre genes de um mesmo indivíduo (neste caso é possível, pois todos os genes possuem espaços de busca iguais; em números reais variam continuamente entre 0 e 1; em números binários assumem valor 0 ou 1);
- Cruzamento uniforme (no caso de codificação binária), onde é sorteado um string binário com o mesmo comprimento dos indivíduos e, para cada loco que assumir valor 1, procede-se à troca de informação nos locos correspondentes entre os indivíduos do par que está cruzando.
- Cruzamento Heurístico (no caso de codificação real), onde nasce um filho conforme a seguinte equação:

$$i_{novo} = i_1 + r * (i_1 - i_2)$$

onde:

$fitness(i_1) > fitness(i_2)$ e $r \in [0,1]$, sendo r um número aleatório.

8.2.2 Problema de Proteção e Coordenação

- Otimização de outros parâmetros ajustáveis dos relés

Neste trabalho optou-se pelo desenvolvimento de um método de otimização do ajuste de relés de sobrecorrente direcionais em redes não radiais por meio da minimização da soma dos tempos de atuação dos relés principais para cada tipo e ponto de falta e em cada configuração. Para a redução dos tempos de atuação, foi considerada a minimização dos multiplicadores de tempo, *MTs*, que fornecem maior flexibilidade no ajuste dos relés. Fica, porém, a possibilidade de adicionar na otimização outros parâmetros ajustáveis nos relés, como a corrente de pickup, I_p , o ângulo de torque, τ , ou até o tipo de curva utilizada (normal inversa, muito inversa ou extremamente inversa), sendo necessário adicionar as restrições necessárias, elaborar uma codificação para esses parâmetros e adaptar a função de avaliação principalmente.

- Análise do efeito de estados transitórios durante a atuação do sistema de proteção

Fica como possibilidade de estudos futuros a análise do efeito de estados transitórios quando, para um curto-circuito qualquer, um dos relés principais atuou e o outro ainda não atuou (por ter um tempo de atuação maior). Após a atuação do relé mais rápido, o circuito é aberto na extremidade correspondente do trecho de linha, mudando a configuração da rede e, conseqüentemente, mudando o caminho das correntes de falta antes que o outro relé principal atue. Pode-se, então, haver mudança na corrente vista pelo outro relé principal e seu backup, onde pode ser necessário verificar a coordenação novamente.

- Sistema de proteção misto com relés de distância

Como dito anteriormente, relés de sobrecorrente direcionais são usados como proteção principal em redes de subtransmissão, e também são usados como proteção de backup em redes de transmissão. Neste último caso, costuma-se usar como proteção principal os relés de distância. Fica como sugestão para trabalhos futuros elaborar um esquema misto de relés de sobrecorrente direcionais com relés de distância de forma a minimizar os efeitos das

correntes de curto-circuito nas redes e, ao mesmo tempo, manter a coordenação entre ambos os elementos de proteção, ou seja, mantendo a coordenação dos: relés de sobrecorrente com relés de sobrecorrente; relés de distância com relés de distância; e relés de sobrecorrente com relés de distância.

9 Referências bibliográficas

- [1] BLACKBURN, L. J; DOMIN J. T., *Protective Relaying: Principles and Applications*. 3rd ed.: WILLIS, H. LEE series editor, CRC Press, 2006.
- [2] HOPGOOD, Adrian A., *Intelligent Systems for Engineers and Scientists*. 2nd ed.: CRC Press, 2001.
- [3] GOLDBERG, D. E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. 20th ed., 1999.
- [4] RAWLINS, Gregory J. E. (Ed.), *Foundations of Genetic Algorithms*. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann Publishers, 1991.
- [5] PAITHANKAR, Y. G.; BHIDE, S.R., *Fundamentals of Power System Protection*, New Delhi: Prentice-Hall of India Private Limited, 2003.
- [6] ALMEIDA, Marcos, *Apostila de Proteção de Sistemas Elétricos*. Departamento. de Engenharia Elétrica/UFRN, 2000.
- [7] FELIZ, Emmanuel J. de O., *Aplicação de Algoritmos Genéticos Para Convergência de Fluxo de Potência em Sistemas de Energia*. 2009. 107p. Tese Mestrado em Computação Aplicada – UNIVALI, São José, SC.
- [8] PACHECO, Marco A. C., *Algoritmos Genéticos: Princípios e Aplicações*. 1999. . Número de folhas ou volumes. Laboratório de Inteligência Computacional Aplicada. PUC-RJ, Rio de Janeiro.
- [9] URDANETA, Alberto; NARIDA, Ramón; JIMÉNEZ; Luis G. Pérez, *Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays in Interconnected Power System*. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 3, Nº 3, p. 903-911, Julho. 1988.
- [10] BEDEKAR, Prashant; BHIDE, Sudhir R.; KALE Vijay S., *Optimum Time Coordination of Overcurrent Relays using Two Phase Simplex Method*. International Journal of Electrical and Computer Engineering., Dezembro. 2009.
- [11] CAMINHA, A. C., *Introdução à Proteção dos Sistemas Elétricos*. 1^a ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.
- [12] SOUZA, Silvio Aparecido de, *Algoritmos Genéticos Aplicados à Proteção e Estimação de Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência*. 2008. 229 p. Dissertação Doutorado em Engenharia Elétrica – EESC-USP, São Carlos, SP.
- [13] MORRISON, Ronald W.; JONG Kenneth A. De, *Measurement of Population Diversity*. Department of Computer Science – George Mason University, Fairfax, VA. 2001.
- [14] MASON, C. Russel, *The Art & Science of Protective Relaying*. New York: Ed. John Willey & Sons, 1964.

- [15] GLOVER, Fred, Tabu Search: A Tutorial. Center for Applied Artificial Intelligence – University of Colorado, Boulder, CO. 2001.
- [16] KAGAN, Nelson et al, *Métodos de Otimização Aplicados a Sistemas Elétricos de Potência*, 1ª ed. São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 2009.

APÊNDICE A - Resultados para codificação binária com dez bits

Valor final da função objetivo = 59,094 segundos.

Tabela A.1: Resultado dos multiplicadores de tempo para codificação binária com dez bits.

Relé	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>MT</i>	0,448	0,137	0,576	0,128	0,268	0,288	0,064	0,305	0,184	0,142

Tabela A.2: Tempos de atuação (s) para faltas trifásicas com e sem os geradores nas barras J e L.

CC3Ø com geradores		Relé									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ponto de falta	1	0,3311	0,6685		0,8351						
	2	0,5282	0,2425	3,2621			0,7881				
	3		0,6685	0,2919	0,8351						
	4	3,1434		0,5431	0,1637	0,4653					
	5	0,5282		3,2621		0,1710	0,7881				
	6	3,1434		0,5431		0,4653	0,2274				
	7		0,6685		0,8351			0,2241			
	8	0,5282		3,2621			0,7881		0,1001		
	9		0,6685		0,8351					0,1010	
	10	3,1434		0,5431		0,4653					0,1001
	11		0,7312		0,9212			0,2434			
	12		0,7493		0,9464					0,1101	
	13	3,7222		0,6099		0,5260					0,1122

CC3Ø sem geradores		Relé									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ponto de falta	1	0,3787									
	2	0,5665	0,7599	2,1729			1,0865				
	3			0,3596							
	4	1,6407		0,6277	0,3293	0,6894					
	5	0,5665		2,1729		0,2484	1,0865				
	6	1,6407		0,6277		0,6894	0,3138				
	7										
	8	0,5665		2,1729			1,0865		0,1409		
	9									0,1391	
	10	1,6407		0,6277		0,6894					0,1396
	11										
	12									0,1485	
	13	1,8191		0,6847		0,7591					0,1522

Tabela A.3: Tempos de atuação (s) para faltas dupla-fase com e sem os geradores nas barras J e L.

CC2∅ com geradores		Relé										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Ponto de falta	1	0,3855	0,8176		1,0422							
	2	0,6182	0,2858	4,0282			0,9395					
	3		0,8176	0,3390	1,0422							
	4	3,9470		0,6340	0,1918	0,5482						
	5	0,6182		4,0282		0,1989	0,9395					
	6	3,9470		0,6340		0,5482	0,2650					
	7		0,8176		1,0422				0,2696			
	8	0,6182		4,0282			0,9395		0,1160			
	9		0,8176		1,0422						0,1174	
	10	3,9470		0,6340		0,5482						0,1165
	11		0,8993		1,1593				0,2939			
	12		0,9231		1,1939						0,1280	
	13	4,7503		0,7129		0,6214						0,1307

CC2∅ sem geradores		Relé										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Ponto de falta	1	0,4416										
	2	0,6638	0,9370	2,6224			1,3112					
	3			0,4182								
	4	1,9775		0,7339	0,3917	0,8202						
	5	0,6638		2,6224		0,2899	1,3112					
	6	1,9775		0,7339		0,8202	0,3670					
	7											
	8	0,6638		2,6224			1,3112		0,1636			
	9										0,1621	
	10	1,9775		0,7339		0,8202						0,1631
	11											
	12										0,1731	
	13	2,2030		0,8016		0,9059						0,1780

Tabela A.4: Tempos de atuação (s) para faltas dupla-fase-terra com e sem os geradores nas barras J e L.

CC2∅T com geradores		Relé										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Ponto de falta	1	0,3545	0,6770		0,8459							
	2	0,5736	0,2551	3,6413			0,8584					
	3		0,6770	0,3115	0,8459							
	4	3,5146		0,5898	0,1749	0,5045						
	5	0,5736		3,6413		0,1832	0,8584					
	6	3,5146		0,5898		0,5045	0,2453					
	7		0,6770		0,8459				0,2267			
	8	0,5736		3,6413			0,8584		0,1072			
	9		0,6770		0,8459						0,1075	
	10	3,5146		0,5898		0,5045						0,1079
	11		0,7555		0,9543				0,2508			
	12		0,7739		0,9799						0,1182	
	13	4,2280		0,6681		0,5767						0,1221

CCØT sem geradores		Relé									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ponto de falta	1	0,4066									
	2	0,6154	0,8465	2,3953			1,1976				
	3			0,3856							
	4	1,8115		0,6823	0,3611	0,7561					
	5	0,6154		2,3953		0,2692	1,1976				
	6	1,8115		0,6823		0,7561	0,3412				
	7										
	8	0,6154		2,3953			1,1976		0,1524		
	9									0,1493	
	10	1,8115		0,6823		0,7561					0,1517
	11										
	12									0,1602	
	13	2,0270		0,7490		0,8391					0,1664

Tabela A.5: Tempos de atuação (s) para faltas monofásicas com e sem os geradores nas barras J e L.

CCØT com geradores		Relé									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ponto de falta	1	0,4695	0,7036		0,8800						
	2	0,7786	0,2840	7,8009			1,1255				
	3		0,7036	0,4013	0,8800						
	4	11,5440		0,7861	0,2057	0,6434					
	5	0,7786		7,8009		0,2229	1,1255				
	6	11,5440		0,7861		0,6434	0,3071				
	7		0,7036		0,8800			0,2347			
	8	0,7786		7,8009			1,1255		0,1306		
	9		0,7036		0,8800					0,1347	
	10	11,5440		0,7861		0,6434					0,1349
	11		0,8406		1,0710			0,2762			
	12		0,8240		1,0472					0,1516	
	13	18,9080		0,9221		0,7638					0,1575

CCØT sem geradores		Relé									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ponto de falta	1	0,6140									
	2	0,9547	1,5981	4,1441			2,0720				
	3			0,5774							
	4	3,1276		1,0534	0,5935	1,2426					
	5	0,9547		4,1441		0,4121	2,0720				
	6	3,1276		1,0534		1,2426	0,5267				
	7										
	8	0,9547		4,1441			2,0720		0,2290		
	9									0,2247	
	10	3,1276		1,0534		1,2426					0,2332
	11										
	12									0,2429	
	13	3,5992		1,1679		1,4057					0,2582

APÊNDICE B - Resultados para codificação binária com sete bits

Valor final da função objetivo = 64,92 segundos.

Tabela B.1: Resultado dos multiplicadores de tempo para codificação binária com sete bits.

Relé	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>MT</i>	0,48	0,16	0,64	0,12	0,32	0,32	0,08	0,31	0,18	0,14

Tabela B.2: Tempos de atuação (s) para faltas trifásicas com e sem os geradores nas barras J e L.

CC3Ø com geradores		Relé									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ponto de falta	1	0,3547	0,7807		0,7829						
	2	0,5659	0,2832	3,6246			0,8756				
	3		0,7807	0,3243	0,7829						
	4	3,3679		0,6035	0,1534	0,5556					
	5	0,5659		3,6246		0,2041	0,8756				
	6	3,3679		0,6035		0,5556	0,2527				
	7		0,7807		0,7829			0,2802			
	8	0,5659		3,6246			0,8756		0,1017		
	9		0,7807		0,7829					0,0988	
	10	3,3679		0,6035		0,5556					0,0987
	11		0,8539		0,8636			0,3043			
	12		0,8751		0,8872					0,1077	
	13	3,9881		0,6776		0,6281					0,1106

CC3Ø sem geradores		Relé									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ponto de falta	1	0,4058									
	2	0,6070	0,8874	2,4143			1,2072				
	3			0,3995							
	4	1,7579		0,6974	0,3087	0,8231					
	5	0,6070		2,4143		0,2966	1,2072				
	6	1,7579		0,6974		0,8231	0,3487				
	7										
	8	0,6070		2,4143			1,2072		0,1432		
	9									0,1361	
	10	1,7579		0,6974		0,8231					0,1377
	11										
	12									0,1453	
	13	1,9490		0,7608		0,9064					0,1501

Tabela B.3: Tempos de atuação (s) para faltas dupla-fase com e sem os geradores nas barras J e L.

CC2∅ com geradores		Relé									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ponto de falta	1	0,4131	0,9548		0,9770						
	2	0,6624	0,3338	4,4758			1,0438				
	3		0,9548	0,3766	0,9770						
	4	4,2289		0,7044	0,1798	0,6545					
	5	0,6624		4,4758		0,2375	1,0438				
	6	4,2289		0,7044		0,6545	0,2945				
	7		0,9548		0,9770			0,3370			
	8	0,6624		4,4758			1,0438		0,1179		
	9		0,9548		0,9770					0,1148	
	10	4,2289		0,7044		0,6545					0,1149
	11		1,0503		1,0868			0,3674			
	12		1,0781		1,1193					0,1252	
	13	5,0896		0,7921		0,7419					0,1289

CC2∅ sem geradores		Relé									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ponto de falta	1	0,4731									
	2	0,7112	1,0943	2,9138			1,4569				
	3			0,4646							
	4	2,1188		0,8155	0,3673	0,9794					
	5	0,7112		2,9138		0,3461	1,4569				
	6	2,1188		0,8155		0,9794	0,4077				
	7										
	8	0,7112		2,9138			1,4569		0,1663		
	9									0,1585	
	10	2,1188		0,8155		0,9794					0,1608
	11										
	12									0,1693	
	13	2,3603		0,8906		1,0817					0,1755

Tabela B.4: Tempos de atuação (s) para faltas dupla-fase-terra com e sem os geradores nas barras J e L.

CC2∅T com geradores		Relé									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ponto de falta	1	0,3798	0,7906		0,7931						
	2	0,6146	0,2979	4,0459			0,9538				
	3		0,7906	0,3461	0,7931						
	4	3,7656		0,6553	0,1640	0,6024					
	5	0,6146		4,0459		0,2188	0,9538				
	6	3,7656		0,6553		0,6024	0,2726				
	7		0,7906		0,7931			0,2834			
	8	0,6146		4,0459			0,9538		0,1090		
	9		0,7906		0,7931					0,1051	
	10	3,7656		0,6553		0,6024					0,1064
	11		0,8823		0,8947			0,3135			
	12		0,9039		0,9187					0,1156	
	13	4,5300		0,7423		0,6887					0,1204

CCØT sem geradores		Relé										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Ponto de falta	1	0,4356										
	2	0,6593	0,9886	2,6614			1,3307					
	3			0,4284								
	4	1,9409		0,7582	0,3386	0,9029						
	5	0,6593		2,6614		0,3215	1,3307					
	6	1,9409		0,7582		0,9029	0,3791					
	7											
	8	0,6593		2,6614			1,3307		0,1549			
	9									0,1460		
	10	1,9409		0,7582		0,9029						0,1496
	11											
	12									0,1567		
	13	2,1718		0,8322		1,0019						0,1641

Tabela B.5: Tempos de atuação (s) para faltas monofásicas com e sem os geradores nas barras J e L.

CCØT com geradores		Relé										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Ponto de falta	1	0,5030	0,8218		0,8250							
	2	0,8343	0,3317	8,6676			1,2506					
	3		0,8218	0,4459	0,8250							
	4	12,3680		0,8735	0,1929	0,7682						
	5	0,8343		8,6676		0,2662	1,2506					
	6	12,3680		0,8735		0,7682	0,3413					
	7		0,8218		0,8250			0,2934				
	8	0,8343		8,6676			1,2506		0,1328			
	9		0,8218		0,8250					0,1318		
	10	12,3680		0,8735		0,7682						0,1330
	11		0,9818		1,0040			0,3453				
	12		0,9623		0,9818					0,1483		
	13	20,2590		1,0245		0,9120						0,1552

CCØT sem geradores		Relé										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Ponto de falta	1	0,6578										
	2	1,0229	1,8664	4,6045			2,3023					
	3			0,6415								
	4	3,3510		1,1704	0,5564	1,4837						
	5	1,0229		4,6045		0,4920	2,3023					
	6	3,3510		1,1704		1,4837	0,5852					
	7											
	8	1,0229		4,6045			2,3023		0,2327			
	9									0,2198		
	10	3,3510		1,1704		1,4837						0,2299
	11											
	12									0,2377		
	13	3,8563		1,2976		1,6784						0,2546

APÊNDICE C - Fasores de corrente de operação e tensão de polarização em condições de curto-circuito e região de torque da característica direcional

1. Falta Dupla-Fase (fases BC)

1.1. Relé R1; Pontos de falta: P1 e P2

a) Relé de Fase (fase B)

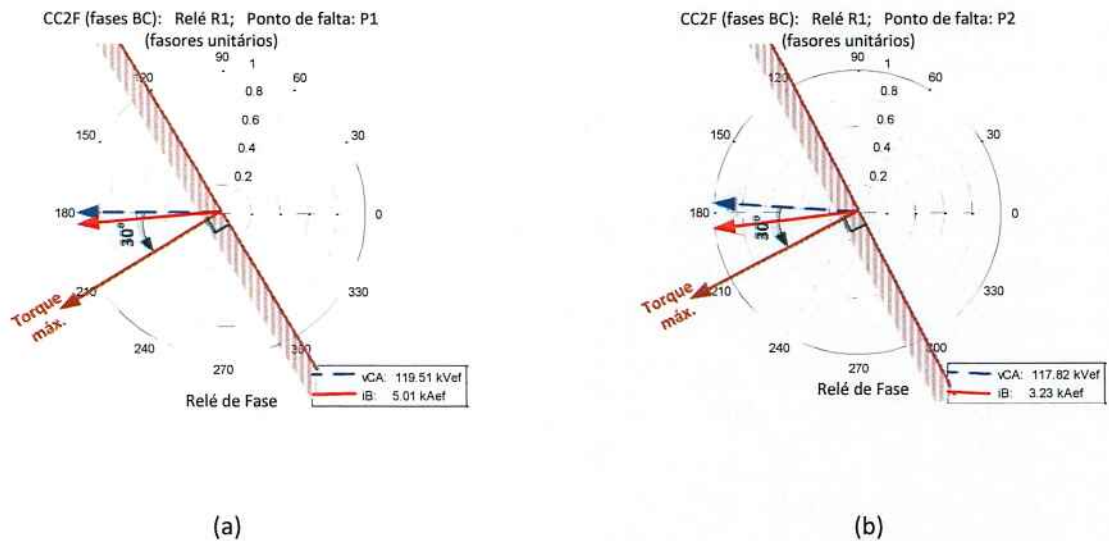


Figura C.1: Fasores de corrente e tensão no relé 1 (na fase B) para falta dupla-fase (fases BC) no ponto 1 (a) e no ponto 2 (b).

b) Relé de Neutro

Não há corrente de neutro no curto-circuito dupla-fase.

1.2. Relé R6; Ponto de falta: P5

a) Relé de Fase (fase B)

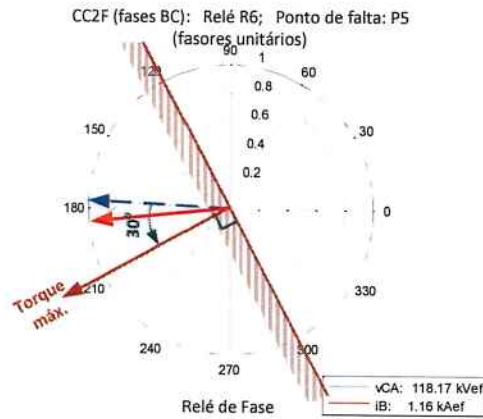
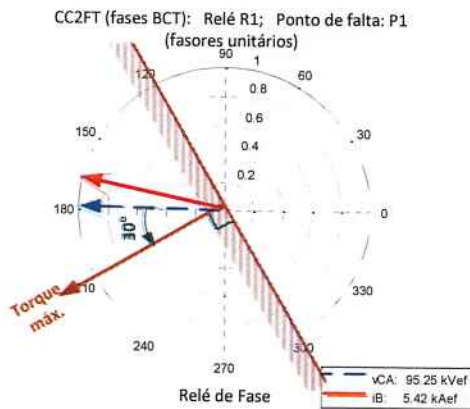


Figura C.2: Fasores de corrente e tensão no relé 6 (na fase B) para falta dupla-fase (fases BC) no ponto 5.

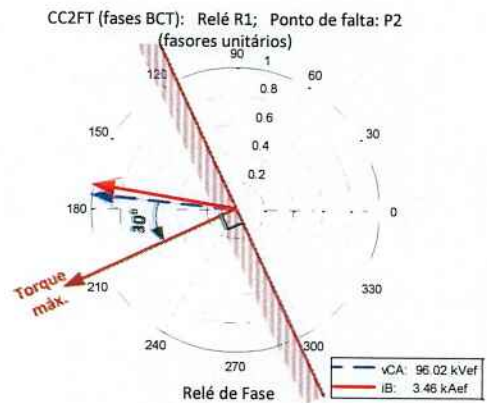
2. Falta Dupla-Fase-Terra (fases BC)

2.1. Relé R1; Pontos de falta: P1 e P2

a) Relé de Fase (fase B)



(a)



(b)

Figura C.3: Fasores de corrente e tensão no relé 1 (na fase B) para falta dupla-fase-terra (fases BC) no ponto 1 (a) e no ponto 2 (b).

b) Relé de Neutro

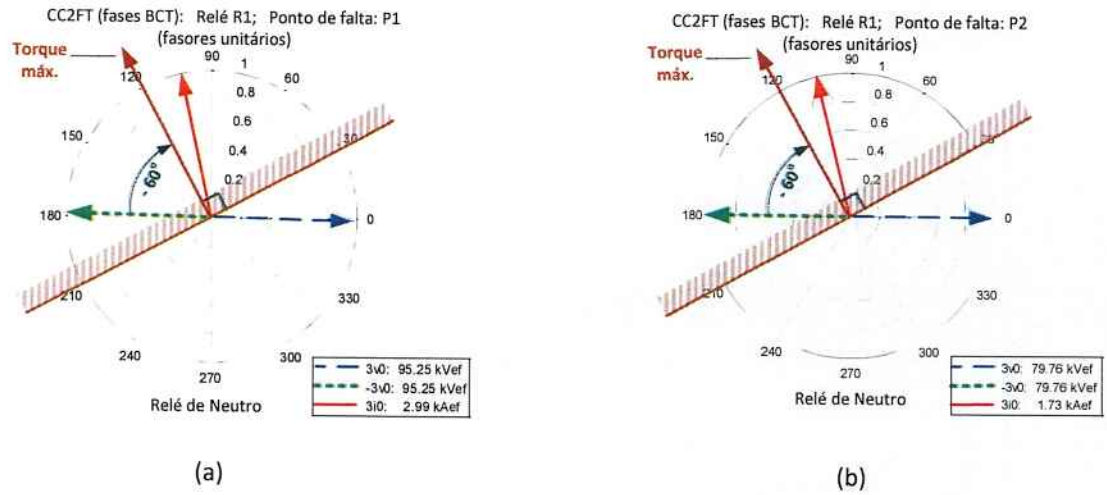


Figura C.4: Fasores de corrente e tensão no relé 1 (neutro) para falta dupla-fase-terra (fases BC) no ponto 1 (a) e no ponto 2 (b).

2.2. Relé R6; Ponto de falta: P5

a) Relé de Fase (fase B)

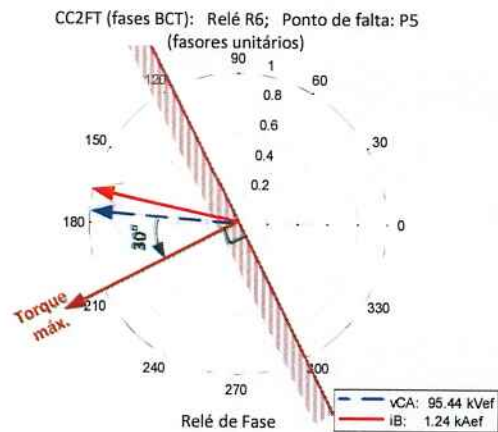


Figura C.5: Fasores de corrente e tensão no relé 6 (na fase B) para falta dupla-fase-terra (fases BC) no ponto 5.

b) Relé de Neutro

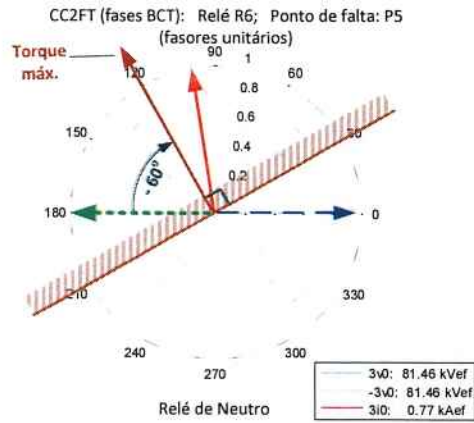
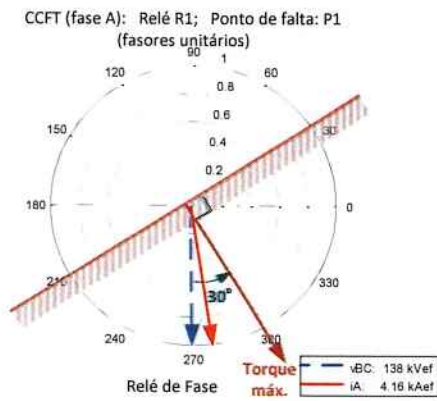


Figura C.6: Fasores de corrente e tensão no relé 6 (neutro) para falta dupla-fase-terra (fases BC) no ponto 5.

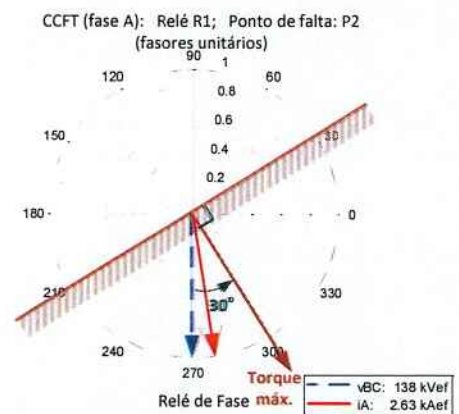
3. Falta Fase-Terra (fase A)

3.1. Relé R1; Pontos de falta: P1 e P2

a) Relé de Fase (fase A)



(a)



(b)

Figura C.7: Fasores de corrente e tensão no relé 1 (fase A) para falta monofásica (fase A) no ponto 1 (a) e no ponto 2 (b).

b) Relé de Neutro

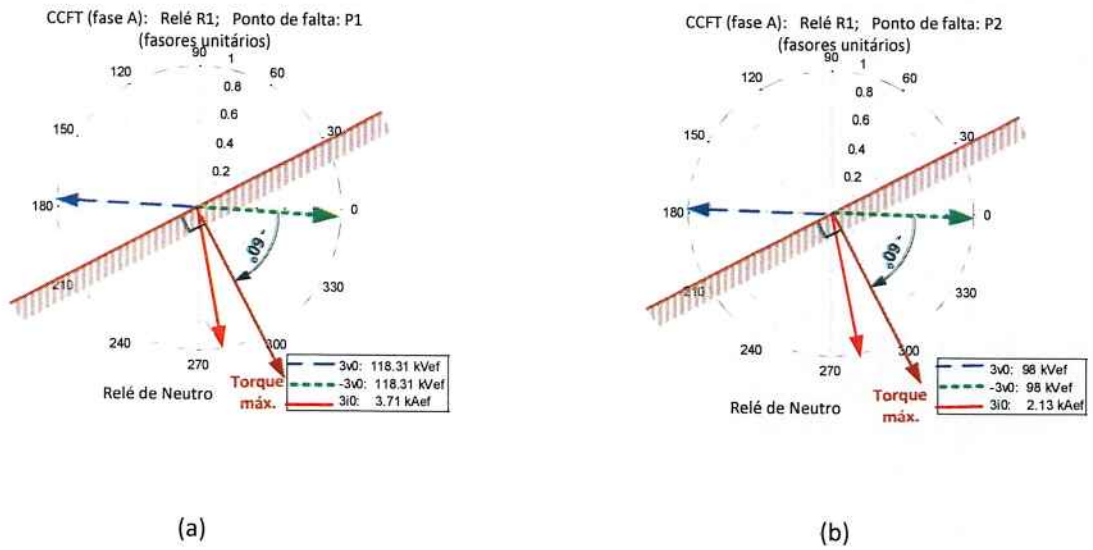


Figura C.8: Fasores de corrente e tensão no relé 1 (neutro) para falta monofásica (fase A) no ponto 1 (a) e no ponto 2 (b).

3.2. Relé R6; Ponto de falta: P5

a) Relé de Fase (fase A)

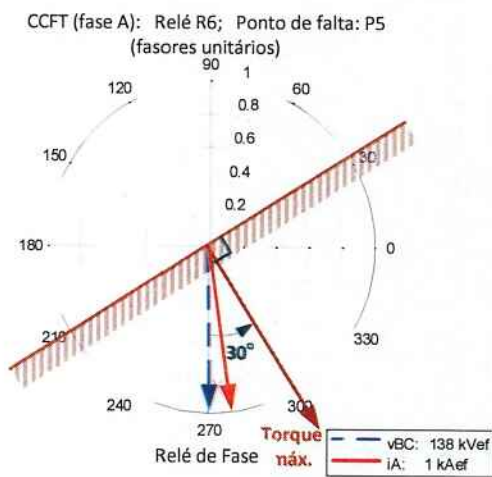


Figura C.9: Fasores de corrente e tensão no relé 6 (fase A) para falta monofásica (fase A) no ponto 5.

b) Relé de Neutro

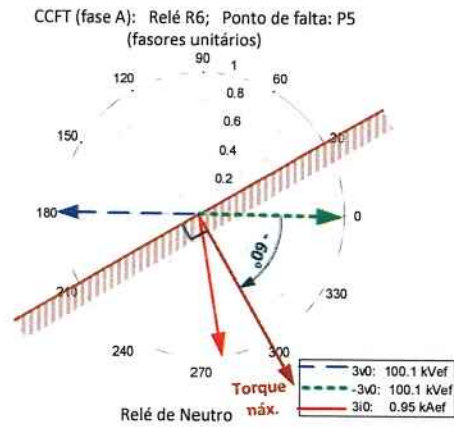
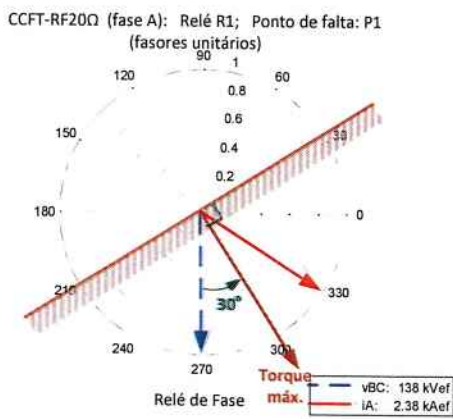


Figura C.10: Fasores de corrente e tensão no relé 6 (neutro) para falta monofásica (fase A) no ponto 5.

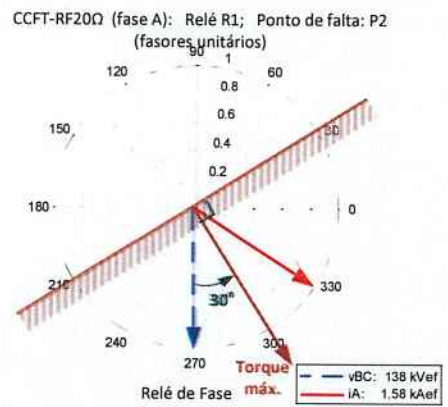
4. Falta Fase-Terra (fase A) com Resistência de Falta de 20 Ω

4.1. Relé R1; Pontos de falta: P1 e P2

a) Relé de Fase (fase A)



(a)



(b)

Figura C.11: Fasores de corrente e tensão no relé 1 (fase A) para falta monofásica (fase A) com resistência de falta de 20Ω no ponto 1 (a) e no ponto 2 (b).

b) Relé de Neutro

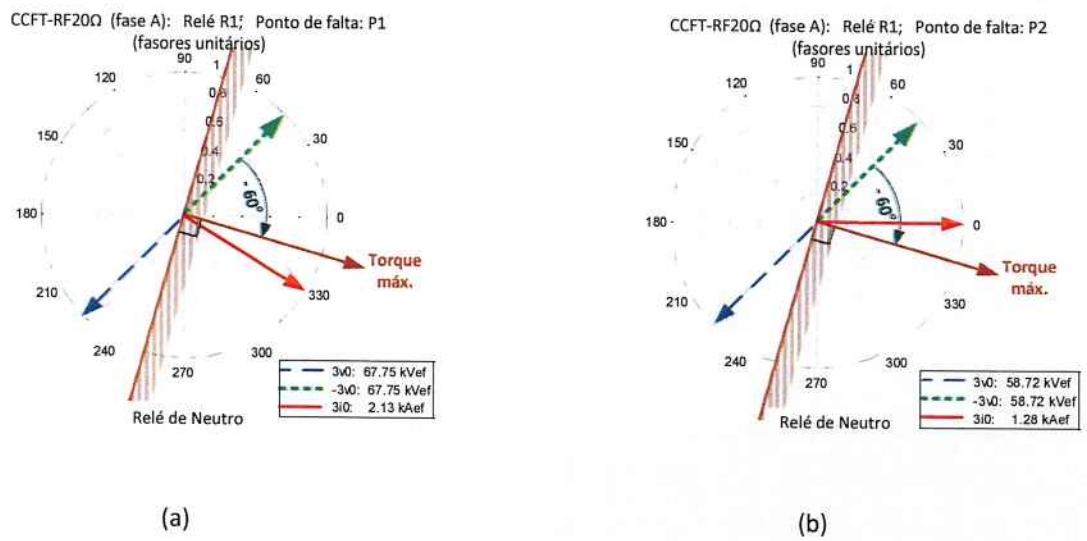


Figura C.12: Fasores de corrente e tensão no relé 1 (neutro) para falta monofásica (fase A) com resistência de falta de 20Ω no ponto 1 (a) e no ponto 2 (b).

5. Falta Trifásica

5.1. Relé R1; Ponto de falta: P2

a) Relé de Fase (fase B)

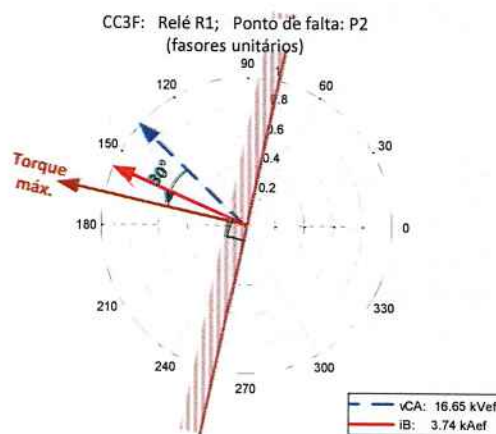


Figura C.13: Fasores de corrente e tensão no relé 1 (fase B) para falta trifásica no ponto 2.

b) Relé de Neutro

Não há corrente de neutro no curto-circuito trifásico

5.2. Relé R6; Ponto de falta: P5

a) Relé de Fase (fase B)

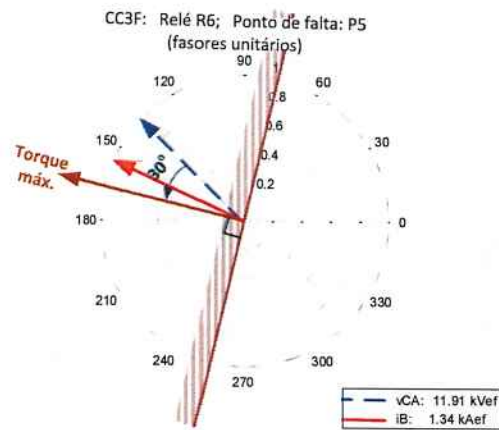


Figura C.14: Fasores de corrente e tensão no relé 6 (fase B) para falta trifásica no ponto 5.

b) Relé de Neutro

Não há corrente de neutro no curto-circuito trifásico.

APÊNDICE D - Redes para testes iniciais

Durante as primeiras etapas da implementação do algoritmo genético foram usadas as seguintes configurações de redes, as quais eram simples, com o intuito de fazer testes conforme cada operador era desenvolvido.

A rede da Figura D.1 foi usada para testes ao longo do desenvolvimento dos operadores de cruzamento e mutação e, principalmente, da função de avaliação, onde foram testadas algumas possibilidades para obter uma boa configuração de um algoritmo genético aplicado ao problema de proteção e coordenação de relés de sobrecorrente.



Figura D.1: Primeira rede radial para testes.

A rede da Figura D.2 foi usada para testes ao longo do aperfeiçoamento da função de avaliação, principalmente na parte relacionada à coordenação, já que o relé mais próximo do gerador agora precisa coordenar com dois relés na barra seguinte.

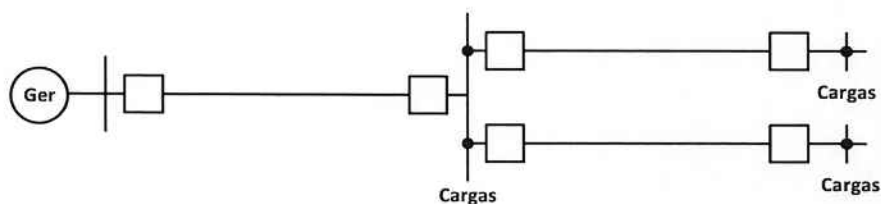


Figura D.2: Segunda rede radial para testes.

A rede da Figura D.3, que já é malhada, foi usada para desenvolver a parte do algoritmo relativa à direcionalidade e coordenação dos relés de sobrecorrente direcionais. Neste caso, os relés nos finais das linhas que saem do gerador podem sentir corrente de falta em ambas as direções, dependendo do local de falta.

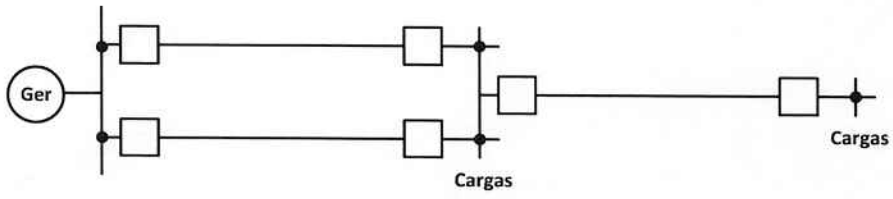


Figura D.3: Primeira rede malhada para testes.