

Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
Grupo de Sistemas Elétricos

Dissertação de Mestrado

Algoritmo Genético Multi Objetivo para  
Coordenação Ótima da Proteção de Sistemas  
Mistos

Proponente: Francisco das Chagas Souza Júnior

Campina Grande - Paraíba - Brasil  
© Francisco das Chagas Souza Júnior, Maio de 2011

Francisco das Chagas Souza Júnior

Algoritmo Genético Multi Objetivo para  
Coordenação Ótima da Proteção de Sistemas  
Mistos

Dissertação apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento de Energia

Benemar Alencar de Souza, D.Sc.  
**Orientador**

Campina Grande - Paraíba - Brasil  
Maio - 2011



S729a Souza Junior, Francisco das Chagas.  
Algoritmo genético multi objetivo para coordenação ótima da proteção de sistemas mistos / Francisco das Chagas Souza Junior. - Campina Grande, 2011.  
70 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática.

1. Proteção de Sistemas Elétricos 2. Relés de Distância 3. Relés de Sobrecorrente 4. Algoritmos Genéticos 5. Dissertação I. Souza, Benemar Alencar de, Dr. II. Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande (PB) III. Título

CDU 621.316.925(043)

ALGORÍTMO GENÉTICO MULTI OBJETIVO PARA COORDENAÇÃO ÓTIMA  
DA PROTEÇÃO DE SISTEMAS MISTOS

FRANCISCO DAS CHAGAS SOUZA JÚNIOR

Dissertação Aprovada em 27.05.2011

  
BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFCG  
Orientador

  
DAMÁSIO FERNANDES JÚNIOR, D.Sc., UFCG  
Componente da Banca

  
WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG  
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB  
MAIO - 2011

# Resumo

Um novo método para determinação dos parâmetros de ajuste dos dispositivos de proteção que compõem uma rede com esquema misto, formado por relés de sobrecorrente e de distância, é realizado nesta dissertação. Variando o alcance da primeira zona de atuação dos dispositivos de distância, é possível obter a diminuição do tempo total de atuação dos relés de sobrecorrente. Um algoritmo genético é utilizado em conjunto com uma rotina computacional consagrada dedicada à estudos de coordenação da proteção de modo que possibilite a obtenção desta diminuição. Essa rotina fornece ao algoritmo genético os dados necessários para que a etapa de seleção escolha apenas os indivíduos mais bem adaptados ao problema em questão. Este método de coordenação fornece resultados que, quando comparados com os realizados por meio de técnicas tradicionais, apresentam tempos de atuação dos dispositivos de sobrecorrente mais baixos.

**Palavras-chave:** Proteção de sistemas elétricos; relés de sobrecorrente; relés de distância; algoritmos genéticos.

# Abstract

A new method for adjustments of protection devices settings that make up a mixed scheme network, consisting of overcurrent and distance relays, is carried out. Through varying the scope of the first operation zone of distance relay, intend to achieve the reduction of total time of operation of the overcurrent relays. A genetic algorithm is used in conjunction with a computational routine to coordination protection studies to obtain this goal. This routine, whose use is widespread among protection engineers, provides to the coordination program the necessary data to the selection only the most adapted individuals to the present problem will be choose on the selection stage. This coordination method shows results that, when compared with studies that use traditional methods, there is a reduction in atuation time of overcurrent relays.

**Keywords:** Power system electric protection; overcurrent relays; distance relays; genetic algorithms.

*“Amei a sabedoria mais do que a saúde e a beleza,  
e resolvi tê-la como luz, porque o brilho dela  
nunca se apaga. Com ela me vieram todos os bens,  
e em suas mãos existe riqueza incalculável”.*

SABEDORIA 7,10-11

# Dedicatória

Aos meus pais (Ana e Francisco) pelo amor, carinho, dedicação, esforço e confiança depositados em mim desde o meu nascimento.

Às minhas irmãs (Ana Clara e Ana América) pelo companheirismo e ajuda.

À minha noiva Maiara Lima por compreender a minha ausência.

Ao meu avô José Alves e a minha tia Nevinha (*in memoriam*), bem como a minha avó Ana Alves Vitoriano por toda força e incentivo dados.

A toda minha família pela compreensão e carinho.

# Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço a Deus: Mestre, Amigo, Confidente e Companheiro de todas as horas.

À minha amada mãe - Ana - e ao meu amado pai - Francisco Souza - que durante toda minha vida não mediram esforços para dar-me uma boa formação tanto como profissional, tanto como homem que com eles aprendi a ser. Amo muito vocês. Às minhas queridas irmãs - Ana Clara e Ana América - que com suas diferenças e brincadeiras sempre estiveram ao meu lado ajudando-me a superar as diversidades do dia-a-dia.

À minha noiva Maiara Lima que, mesmo sem concordar, soube me compreender nos momentos de ausência em que tive que dedicar tempo aos estudos.

Ao meu professor orientador Dr. Benemar Alencar de Souza pela orientação, ajuda e dedicação em todos os momentos durante a realização deste trabalho.

Aos amigos de pós-graduação: Wilker, Célio, Alana, Ana Vitória, Wellinsílvio, Paulo e Felipe, e em especial ao amigo Nelson Luiz pelas valiosas colaborações e discussões sobre o problema de coordenação da proteção, que foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

À CAPES, pelo suporte financeiro dado durante o período de realização deste trabalho.

*Francisco das Chagas Souza Júnior*

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>viii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>x</b>
<b>Glossário</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>17</b>
1.1 Motivação . . . . .	18
1.2 Objetivos . . . . .	19
1.3 Metodologia . . . . .	19
1.4 Organização do Trabalho . . . . .	20
<b>2 Revisão Bibliográfica</b>	<b>22</b>
2.1 Artigos analisados . . . . .	22
2.1.1 PÉREZ et al., (2001) . . . . .	22
2.1.2 KHEDERZADEH, (2006) . . . . .	23
2.1.3 CHÁVEZ et al., (2008) . . . . .	24
2.1.4 ABYANEH et al., (2008) . . . . .	24
2.1.5 CHABANLOO et al., (2008) . . . . .	25
2.1.6 MAHAMMEDI et al. (2010) . . . . .	26
2.1.7 OLIVEIRA et al. (2010) . . . . .	27
2.2 Síntese bibliográfica . . . . .	28
<b>3 Fundamentação Teórica</b>	<b>30</b>
3.1 Proteção de Sobrecorrente . . . . .	32
3.1.1 Ajuste dos relés de sobrecorrrete . . . . .	33
3.2 Proteção de Distância . . . . .	35

---

3.2.1	Tipos de relés de distância . . . . .	37
3.2.2	Determinação da impedância . . . . .	38
3.2.3	Zonas de atuação e seus principais ajustes . . . . .	39
3.3	Algoritmo Genético . . . . .	40
3.3.1	Formulação Computacional . . . . .	42
3.3.2	Operadores Genéticos . . . . .	43
<b>4</b>	<b>Algoritmos genéticos e a coordenação da proteção</b>	<b>47</b>
4.1	Estruturação do problema . . . . .	48
4.1.1	Codificação dos indivíduos . . . . .	48
4.1.2	População inicial . . . . .	49
4.1.3	Análise de aptidão . . . . .	50
4.1.4	Outras operações genéticas . . . . .	51
4.2	Estudos de caso . . . . .	51
4.2.1	Determinação dos ajustes da proteção utilizando o MATLAB <sup>®</sup> . . . . .	51
4.2.2	Determinação dos ajustes da proteção utilizando o CAPE <sup>®</sup> como motor . . . . .	54
<b>5</b>	<b>Resultados</b>	<b>59</b>
5.1	Simulações . . . . .	59
5.1.1	Determinação dos ajustes da proteção utilizando o MATLAB <sup>®</sup> . . . . .	59
5.1.2	Determinação dos ajustes da proteção utilizando o CAPE <sup>®</sup> como motor . . . . .	62
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>65</b>
6.1	Conclusões . . . . .	65
6.2	Trabalhos futuros . . . . .	66
	<b>Referências bibliográficas</b>	<b>67</b>
	<b>Apêndice A</b>	<b>68</b>

# Lista de Figuras

2.1	Coordenação entre relés de sobrecorrente direcionais e de distância. . . . .	23
2.2	Localização crítica de faltas na coordenação entre relés de sobrecorrente e distância. . . . .	25
2.3	Rede de 30 barras do IEEE. . . . .	27
3.1	Condições de operação do sistema de potência. . . . .	31
3.2	Sistema fictício protegido por um relé de sobrecorrente e um de distância. . . . .	32
3.3	(a) Fluxograma do processo de determinação dos ajustes dos relés de sobrecorrente. (b) Exemplo de coordenograma de três relés de sobrecorrente. . . . .	35
3.4	Exemplo de determinação dos parâmetros de uma cadeia de dispositivos de sobrecorrente. . . . .	36
3.5	Sistema fictício com uso de relés direcionais de sobrecorrente. . . . .	36
3.6	Exemplo de coordenação do sistema fictício com uso de relés direcionais de sobrecorrente. . . . .	36
3.7	Características de funcionamento de um relé de distância: (a) Impedância; (b) Mho; (c) Amendoin; (d) Lenticular; (e) Otimizada. . . . .	38
3.8	Falta trifásica a x% da barra <i>a</i> . . . . .	38
3.9	Característica de atuação de um relé de distância. . . . .	40
3.10	Fluxograma geral de um Algoritmo Genético. . . . .	42
3.11	Operação de Cruzamento Populacional. O cruzamento pode ser realizado por: (a) Permuta do material genético dos pais e (b) Operações matemáticas com o material genético dos genitores. . . . .	44
3.12	Representação da formação computacional dos números cíclicos. . . . .	45
3.13	Operação de Mutação. Um indivíduo é escolhido aleatoriamente para ter seu código genético alterado. No lado direito, o indivíduo antes da mutação. A esquerda, com a mutação efetuada. . . . .	45

---

3.14	Operação de Seleção via método da roleta. A roleta tem maior probabilidade de parar nos espaços referentes aos melhores indivíduos, embora nada impede do contrário acontecer. . . . .	46
4.1	Coordenação entre um dispositivo de sobrecorrente e um de distância. . . . .	48
4.2	Codificação dos indivíduos: (a) Relé de Sobrecorrente; (b) Relé de Distância. . .	49
4.3	Equivalência entre o AG e os termos da função objetivo. . . . .	50
4.4	Sistema teste composto por 6 barras e 7 linhas. . . . .	54
4.5	Fluxograma de comunicação entre o Algoritmo Genético e o CAPE <sup>®</sup> . . . . .	56
4.6	Sistema teste CEAL. . . . .	58
5.1	Coordenograma dos dispositivos de sobrecorrente da Fig. 4.4. . . . .	61
5.2	Evolução do algoritmo de proteção implementado pelo MATLAB <sup>®</sup> . . . . .	61
5.3	Curva de atuação dos dispositivos de proteção da Fig. 4.6: (a) relés de sobrecorrente, (b) relés de distância. . . . .	63
5.4	Evolução do algoritmo de proteção utilizando o CAPE <sup>®</sup> como motor. . . . .	64

# Lista de Tabelas

2.1	Características dos relés de sobrecorrente. . . . .	26
2.2	Síntese bibliográfica e comparação com o modelo proposto. . . . .	29
3.1	Relação entre os valores das constantes $k_1$ e $k_2$ com o tipo de curva. . . . .	33
3.2	Correspondência entre os termos dos AG e sua funcionalidade. . . . .	41
4.1	Dados das linhas do sistema teste da Fig. 4.4. . . . .	52
4.2	Parâmetros do Algoritmo genético para o sistema da Fig. 4.4. . . . .	52
4.3	Correntes de curto-circuito trifásico vista pelo par P/R para os sistema da Fig. 4.4. . . . .	53
4.4	Dados das linhas do sistema teste da Fig. 4.6. . . . .	57
4.5	Dados das linhas do sistema teste da Fig. 4.6. . . . .	58
5.1	Resultados para simulação utilizando o MATLAB®. . . . .	60
5.2	Parâmetros do Algoritmo genético para o sistema da Fig. 4.4. . . . .	62
5.3	Tempos de atuação dos relés de sobrecorrente da Fig. 4.6. . . . .	64

# Lista de Símbolos

$t_{Z2}$	Tempo de atuação da segunda zona do relé de distância
$t_m(F4)$	tempo de atuação do relé de sobrecorrente que atua como proteção principal
$t_b(F3)$	tempo de atuação do relé de sobrecorrente que atua como proteção de retaguarda
$t_{Z2min}$	Valor mínimo do tempo de atuação da segunda zona do relé de distância
$t_{Z2max}$	Valor máximo do tempo de atuação da segunda zona do relé de distância
$M_i$	Múltiplo de tempo do <i>i-ésimo</i> relé de sobrecorrente
$t_i$	Tempo de atuação do <i>i-ésimo</i> relé de sobrecorrente
$k, \alpha$ e $L$	Constantes arbitrárias que variam de fabricante para fabricante
$t_{mk}$	Tempo de atuação do relé de proteção principal
$t_{bk}$	Tempo de atuação do relé de retaguarda
$\Delta t$	Diferença entre o tempo de atuação das zonas de proteção de retaguarda e principal
$k_1$ e $k_2$	Constantes dependentes do tipo de curva em dispositivos de sobrecorrente
$I_{CCmax}$	Corrente de curto-circuito máxima no ponto de instalação do relé de sobrecorrente

---

$I_{aj,i}$	Corrente de ajuste do $i$ -ésimo relé de sobrecorrente
$x$	Distância entre o ponto de instalação do relé de distância e o local de ocorrência da falta
$Z_1$	Impedância de sequência positiva da linha de transmissão
$\hat{I}_{CC}$	Corrente de curto-circuito trifásica a $x\%$ do barramento $a$
$t_{bOC}$	Tempo de atuação do relé de sobrecorrente atuando como proteção de retaguarda
$t_{mDIST}$	Tempo de atuação do relé de distância atuando como proteção principal
$\theta_{AG}$	Ângulo de torque obtido pelo Algoritmo Genético
$\Delta t_{mb i}$	Intervalo de coordenação existente entre os relés de sobrecorrente $m$ e $b$ relativos ao $i$ -ésimo par da rede de proteção
$\Delta t_{prOCDIST i}$	Intervalo de coordenação existente entre os relés de distância (proteção principal) e de sobrecorrente (proteção de retaguarda) relativos ao $i$ -ésimo par da rede de proteção
$\theta_{AG}$	Ângulo de torque máximo obtido pelo algoritmo genético
$\theta_{mbDISTOC i}$	Ângulo da impedância da linha de transmissão protegida pelo $i$ -ésimo relé de distância
$P_1$	Número de pares <i>principal/retaguarda</i> formados por relés de sobrecorrente

---

$P_2$	Número de pares formados por relés de distância atuando como proteção principal
$P_3$	Número de relés de distância;
$\alpha_1, \beta_2, \beta_3$	Constantes de ponderação da função objetivo
$r_p$	Porcentagem da LT protegida pela primeira zona de atuação do relé de distância, dada em %
$N_d$	Número de descoordenações
$N_v$	Número de violações do intervalo de coordenação
$T_p$	Tempo de atuação da zona primária
$T_s$	Tempo de atuação da zona de retaguarda

# Glossário

ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
SEP	Sistema Elétrico de Potência
AG	Algoritmo Genético
TDS	Time Dial Setting
CTI	Coordination Time Interval
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
RTC	Relação de Transformação do TC
RTP	Relação de Transformação do TP
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IEC	International Electrotechnical Commission

# Capítulo 1

## Introdução

Os Sistemas Elétricos de Potência (SEPs) assumiram níveis de importância bastante elevados, devido ao grau de dependência e correlação entre esses e a sociedade como um todo. A extensão dos SEPs não para de crescer e, segundo dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), até 2011 o Brasil terá cerca de 90 mil quilômetros de redes de transmissão. Em termos comparativos é equivalente a aproximadamente duas voltas em torno da Terra. Sendo os SEPs peça fundamental para a manutenção do bem estar social e econômico, faz-se necessário a existência de um sistema dedicado a garantir o fornecimento de energia elétrica sempre ao maior número de consumidores. A esta parte do SEP dá-se o nome de Proteção de Sistemas Elétricos.

Esquemas de comunicação entre dispositivos de proteção são muito utilizados visando um melhor desempenho desses equipamentos IEEE (2000). Vários mecanismos, a exemplo da norma IEC 61850, entre outros, delimitam ações a serem implantadas nos sistemas de proteção.

Visando aumentar a confiabilidade dos SEPs, esses geralmente são monitorados por sistemas de proteção divididos em blocos conhecidos como proteção *primária* e de *retaguarda*. Esses dois blocos têm a mesma função, com a diferença de que a proteção de retaguarda somente atuará  $\Delta t_s$  depois da detecção do sinistro, se e somente se, o bloco primário apresentar falhas e não operar.

Em sistemas de transmissão e sub-transmissão é comum o uso de relés direcionais de sobrecorrente e de distância compondo o sistema de proteção. Assim sendo, faz-se necessário a coordenação tanto dos relés de sobrecorrente entre si, como destes com os de distância. É importante observar que os relés de sobrecorrente podem atuar de forma instantânea ou temporizada - com tempo de atuação inversamente proporcional a corrente de curto-circuito. Já os relés de distância operam no mesmo instante para faltas dentro da mesma zona de proteção.

As demais zonas são atrasadas de um tempo  $\Delta t$  em relação a sua antecedente.

## 1.1 Motivação

A elaboração do estudo da coordenação da proteção ainda é feita em muitas empresas de maneira muito rudimentar e laboriosa. Nesses casos, a experiência adquirida pelos engenheiros de proteção torna-se um dos fatores mais relevantes para o sucesso, ou não, do estudo realizado. De uma maneira geral, o profissional utiliza valores prévios de estudos de fluxo de carga e curto-circuito além de gabaritos com as inúmeras possibilidades de ajustes para cada um dos relés. Seu trabalho é, portanto, escolher os ajustes dos relés, de modo que sejam respeitados os princípios da velocidade, seletividade, segurança e confiabilidade. Com o crescente incremento dos SEPs, existe a necessidade intrínseca de que sejam realizados frequentes ajustes nos parâmetros da configuração dos componentes do sistema de proteção. Este fato justifica a necessidade da elaboração de um mecanismo que facilite o estudo da coordenação da proteção, deixando o trabalho dos profissionais envolvidos nessa área mais simples e sem perder a qualidade das soluções sugeridas.

Com o advento dos computadores digitais, a presença de métodos computacionais para resolução de problemas relativos a sistemas elétricos de potência se tornou cada vez mais frequente. Há uma verdadeira gama de métodos, tanto numéricos como analíticos, que facilitam sobremaneira a resolução de problemas comuns e de resolução extremamente dispendiosa, a exemplo de: configuração de redes de distribuição, alocação de bancos de capacitores, reguladores de tensão e transformadores, e coordenação da proteção.

De maneira geral, as meta-heurísticas, integrantes da família dos métodos de Inteligência Computacional/Artificial, inspiram-se em fenômenos naturais tais como: comportamento de aves de arribação, sistema imunológico animal e evolução natural das espécies. Esse último, conhecido como Algoritmo Genético (AG), vem sendo muito utilizado na área de sistemas elétricos e, será o alvo desta dissertação.

No que diz respeito aos sistemas de transmissão de energia elétrica, o uso de várias funções de proteção é uma necessidade. Dentre as mais utilizadas pode-se destacar as proteções de sobrecorrente e de distância. A correta coordenação entre dois tipos de função de proteção apresenta características um pouco peculiares em relação ao que acontece no caso de dispositivos de mesmas características. Essas peculiaridades ocorrem devido às próprias características dos dispositivos no tocante a sua resposta frente a situação de sinistro. Logo, a existência de um mecanismo automatizado que realize o estudo de seletividade, levando em consideração a influência das demais funções de proteção, apresentaria uma contribuição significativa no

tocante ao processo desempenhado pelos engenheiros de proteção. O mecanismo de coordenação apresentado nesta dissertação considera um sistema de proteção composto por dispositivos de sobrecorrente e de distância, e realiza a coordenação destes de modo que o tempo de atuação dos dispositivos de sobrecorrente seja o mínimo possível.

Dentro do âmbito do Grupo de Sistemas Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, diversos trabalhos vêm sendo realizados utilizando a técnica de Algoritmos Genéticos. Pode-se citar os trabalhos de BRAZ (2003) e FONTAN (2008), que utilizaram a técnica para resolução de problemas na área de configuração de redes de distribuição. Na área de coordenação da proteção, pode-se citar o trabalho de OLIVEIRA et al. (2010), que utiliza um algoritmo genético para determinação dos ajustes a serem configurados em dispositivos de sobrecorrente.

Esta dissertação, bem como o trabalho de OLIVEIRA et al. (2010), são frutos de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento celebrado entre a UFCG e a Centro Elétrica de Alagoas (CEAL).

## 1.2 Objetivos

Constam como objetivos principais desta dissertação os seguintes tópicos:

- Tornar o processo de coordenação da proteção um evento automatizado e com completa abstração por parte do usuário final da rotina computacional;
- Encontrar via Algoritmos Genéticos os ajustes ótimos dos relés direcionais de sobrecorrente e distância (até a segunda zona de proteção), pertencentes a um sistema de transmissão, fazendo com que a atuação dos primeiros se dê da maneira mais rápida possível, considerando o intervalo de coordenação e presença dos relés de distância;
- Avaliar a aplicabilidade das soluções encontradas através de simulações, de sistemas reais e sistemas-teste, em um *software* dedicado ao estudo da coordenação da proteção.

## 1.3 Metodologia

Para a determinação dos ajustes ótimos dos relés pertencentes ao sistema estudado, duas etapas foram realizadas. Na primeira foi desenvolvido um algoritmo genético (AG) em ambiente MATLAB<sup>®</sup> que realiza a tarefa mediante uma série de passos: variação do ponto limite de atuação da zona primária para proteção de distância, o qual será chamado a partir de agora de ponto de falta crítico; avaliação da coordenação sobrecorrente/sobrecorrente; avaliação da coordenação sobrecorrente/distância. Já na segunda etapa o AG foi implementado em ambiente

C++ e para etapa de teste dos indivíduos foi utilizada uma *software* dedicado a estudos de coordenação da proteção que, por sua vez, retorna os dados necessários para que o programa C++ possa selecionar os melhores indivíduos para o problema em questão. Para que fosse possível a realização de tal iteração entre o programa em C++ e a rotina de coordenação da proteção foi necessário a implementação de um esquema de comunicação que será abordado no Capítulo 4.

Na primeira etapa durante a avaliação dos tempos de atuação dos relés de sobrecorrente, aproximações quanto aos valores das correntes de falha nos pontos de faltas críticos foram necessárias, uma vez que, não faz parte do escopo desta dissertação a implementação de rotinas de cálculo de curtos-circuitos. De posse de tais valores aproximados, foram utilizadas expressões sugeridas por KINDERMANN (2005) para a determinação dos tempos de atuação e, a partir destes, avaliações como: análise de descoordenações, violação do intervalo de coordenação, entre outros.

Na segunda parte da dissertação será apresentado o uso de um *software* comercial dedicado à realização de estudos de coordenação da proteção sendo usado como “motor” da rotina de otimização implementada pelo AG. O uso dessa técnica possibilitará alcançar o primeiro objetivo listado neste capítulo, a completa automatização e abstração do processo de coordenação da proteção por parte do usuário final, uma vez que este será requisitado apenas quanto da criação do sistema que será alvo do estudo.

Para avaliar a robustez do algoritmo, o mesmo foi utilizado em dois sistemas distintos. O primeiro deles foi propositalmente retirado de ABYANEH et al. (2008) de forma que fosse possível a comparação entre os resultados obtidos a partir das duas técnicas de coordenação utilizadas. Por fim, é realizada a coordenação da proteção de parte do Regional Maceió pertencente a Eletrobras Distribuidora de Alagoas, também considerando o emprego das funções de distância e de sobrecorrente.

## 1.4 Organização do Trabalho

Para alcançar os objetivos do trabalho, esta dissertação foi estruturada da seguinte forma:

Uma análise dos trabalhos que tiveram maior influência para a elaboração desta dissertação, assim como uma síntese comparativa entre esses e o trabalho proposto, são abordados no **Capítulo 2**.

O embasamento teórico necessário para a elaboração do trabalho é apresentado no **Capítulo 3**. Os principais tópicos sobre proteção de sobrecorrente e de distância, bem como a teoria dos Algoritmos Genéticos são apresentados nesse capítulo.

No **Capítulo 4** são apresentados detalhes da elaboração do Algoritmo Genético utilizado para resolução do problema da coordenação da proteção, assim como, o esquema de comunicação desenvolvido para que fosse possível a utilização de dois *softwares* distintos visando o mesmo objetivo.

Por fim, os resultados obtidos a partir de simulações realizadas nos dois ambientes utilizados são apresentados no **Capítulo 5**.

# Capítulo 2

## Revisão Bibliográfica

### 2.1 Artigos analisados

O ajuste dos parâmetros dos dispositivos de proteção é um processo extremamente laborioso e lento, tendo seu grau de complexidade aumentado à medida que novas funções de proteção são incorporadas ao sistema, bem como com as constantes modificações ocorridas na rede. Pesquisadores vêm apresentando diversas soluções no que diz respeito à obtenção ótima dos ajustes dos relés sob diversas condições. A seguir são apresentados alguns dos trabalhos considerados mais influentes na elaboração desta dissertação.

#### 2.1.1 PÉREZ et al., (2001)

PÉREZ and URDANETA (2001) apresentam uma metodologia para a determinação do tempo de atuação da segunda zona ( $t_{Z2}$ ) de proteção de relés de distância quando empregados em conjunto com relés direcionais de sobrecorrente. Baseado em programação linear, o trabalho propõe a inclusão de uma nova variável ( $t_{Z2}$ ) no cálculo da função objetivo original do problema de otimização.

Para obtenção do resultado, PÉREZ and URDANETA (2001) seguem os dois pressupostos apresentados a seguir:

- O tempo de atuação da segunda zona do relé de retaguarda (distância) deve ser maior que o do relé de proteção principal (relé direcional de sobrecorrente), ponto F4 da Fig. 2.1;

- O tempo de atuação do relé direcional de sobrecorrente (atuando como retaguarda), deve ser maior que o da segunda zona do relé de distância (proteção principal), ponto F3 da Fig. 2.1.

As premissas apresentadas anteriormente podem ser melhor compreendidas pela análise de (2.1) e (2.2), bem como da Fig. 2.1.

Esta abortagem faz-se necessária pois, caso  $t_{Z2}$  seja um valor previamente fixado, as restrições impostas por (2.1) e (2.2) podem tornar-se inviáveis, indicando a impossibilidade da localização de um conjunto de ajustes que garantam a seletividade do sistema. Esse fato faz com que  $t_{Z2}$  precise ser modificado durante o processo de otimização até que o algoritmo tenha condições de encontrar os ajustes ótimos.

A variação de  $t_{Z2}$  é feita acrescentando uma nova restrição ao sistema. De acordo com (2.3)  $t_{Z2}$  pode variar dentro de uma faixa que vai de 0,3 a 2,5.

Percebe-se então que PÉREZ and URDANETA (2001) utiliza o artifício da obtenção do valor mínimo do tempo de operação da segunda zona de operação, para tornar viável a obtenção de ajustes que assegurem a coordenação e seletividade dos relés direcionais de sobrecorrente.

$$t_{Z2} - t_m(F4) \geq CTI \quad (2.1)$$

$$t_b(F3) - t_{Z2} \geq CTI \quad (2.2)$$

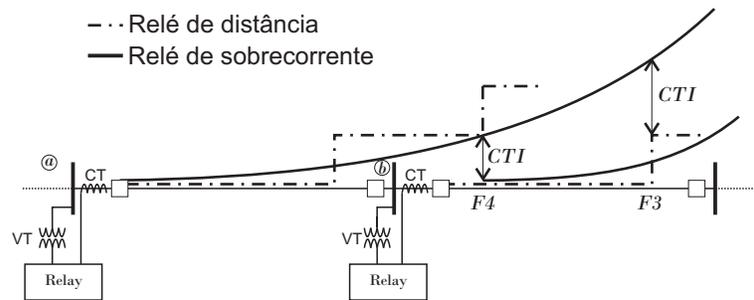


Fig. 2.1: Coordenação entre relés de sobrecorrente direcionais e de distância.

$$t_{Z2min} \leq t_{Z2} \leq t_{Z2max} \quad (2.3)$$

### 2.1.2 KHEDERZADEH, (2006)

A coordenação de sistemas de proteção mistos baseado no trabalho de PÉREZ and URDANETA (2001) é solucionado em KHEDERZADEH (2006) representando os relés de sobrecorrente por dispositivos de proteção universal. Esses últimos são dispositivos digitais que permitem a construção da curva de atuação de equipamentos de proteção do tipo tempo-inverso com a presença de mais de um tipo de curva desenvolvida pelos equipamentos convencionais.

O tempo de atuação da segunda zona do relé de distância é ajustado como proposto por PÉREZ and URDANETA (2001). Porém, a coordenação dos relés de sobrecorrente é realizada considerando curvas compostas por diversos tipos de curva podendo, existir patamares de atuação instantânea e instantânea atrasadas. Para obtenção da minimização do tempo de operação dos relés de sobrecorrente, faltas a partir do ponto médio da linha são protegidas por unidades instantâneas. Essa solução é repetida para faltas próximas ao terminal emissor da LT. Logo, o relé atua de maneira mais rápida para faltas com maior valores de corrente.

### 2.1.3 CHÁVEZ et al., (2008)

O uso de ajustes previamente obtidos pode acarretar em problemas de atuação indevida dos relés em situações nas quais ocorram mudanças na configuração da rede. Este fato se apresenta mais evidente quando tais parâmetros são empregados para proteção de redes muito interconectadas, como é o caso da maioria dos sistemas atuais. Este problema é solucionado pelo uso de sistemas de proteção adaptativa - sistema que se utiliza de algoritmos rápidos e poderosos que podem obter e manter a coordenação dos relés frente a diversas condições de operação.

CHÁVEZ et al. (2008) usam o método da busca para determinação dos ajustes dos relés de distância (zonas 2 e 3) em uma aplicação adaptativa. O trabalho apresenta um algoritmo que determina o conjunto dos pares *primário/retaguarda*, bem como efetua estudos de curto-circuito para a avaliação de diferentes tipos de faltas no sistema em análise.

O trabalho proposto por CHÁVEZ et al. (2008) apresenta um sistema de proteção adaptativa composto por três níveis principais. São eles: o Centro de Controle de Proteções, o Centro de Controle das Subestações e os IED's (*Integret Electronic Devices*).

### 2.1.4 ABYANEH et al., (2008)

No trabalho de ABYANEH et al. (2008) é apresentado o uso de um algoritmo genético para a coordenação ótima de um SEP, protegido por esquema híbrido composto por relés direcionais de sobrecorrente e de distância.

A metodologia do trabalho baseia-se nas seguintes partes:

- Avaliação da velocidade da solução encontrada;
- Ajuste da coordenação dos relés de sobrecorrente (primário e retaguarda);
- Ajuste da coordenação entre relés de sobrecorrente (primários) e de distância (retaguarda).

A coordenação da proteção do sistema inicia-se com o cálculo dos tempos de atuação para correntes de curto-circuito em pontos de localização crítica - pontos predefinidos como sendo a fronteira entre a 1ª e 2ª zona de proteção para os relés de distância (Fig. 2.2). Nesta etapa é utilizado um modelo aproximado de terceira ordem para representação da curva de atuação do relé. Há aqui uma limitação no trabalho, pois, a equação utilizada para estimação do tempo de atuação dos relés de sobrecorrente parte do princípio que todos os relés têm curvas do tipo moderadamente inversa. Esta restrição minimiza a generalização da solução encontrada pelo algoritmo, uma vez que o espaço de busca para este problema foi truncado.

Em termos matemáticos, a aptidão dos indivíduos é conseguida a partir da seguinte equação.

$$FO = \alpha_1 \times \sum_{i=1}^n (t_i)^2 + \beta_2 \times \sum_{k_1=1}^{P_1} (\Delta t_{mb|k_1|} - |\Delta t_{mb|k_1|}|)^2 + \beta_3 \times \sum_{k_2=1}^{P_2} (\Delta t_{mbDISTOC|k_2|} - |\Delta t_{mbDISTOC|k_2|}|)^2 \quad (2.4)$$

com:

$$\Delta t_{mbDISTOC|k_2|} = t_{bOC|k_2|} - t_{mDIST|k_2|} - CTI \quad (2.5)$$

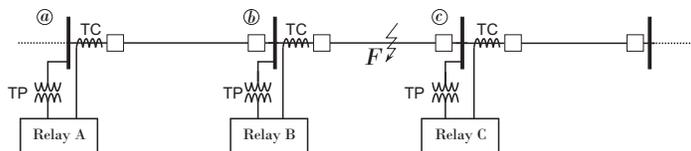


Fig. 2.2: Localização crítica de faltas na coordenação entre relés de sobrecorrente e distância.

### 2.1.5 CHABANLOO et al., (2008)

Uma abordagem que considera várias características de curvas dos relés de sobrecorrente é apresentada em CHABANLOO et al. (2008). Para avaliação do tempo de atuação dos relés de sobrecorrente, utiliza-se de (2.6) porém, assim como ABYANEH et al. (2008), limita o espaço de busca do AG, uma vez que assume que todos os relés de sobrecorrente tem curva do tipo moderadamente inversa.

$$t = TDS \times \left( \frac{k}{M^\alpha - 1} + L \right) \quad (2.6)$$

O valores das constantes  $k$ ,  $\alpha$  e  $L$  assumem os valores mostrados pela Tabela 1 de CHABANLOO et al. (2008), reproduzida na Tabela 2.1 e assumem valores diferentes conforme o fabricante.

Tab. 2.1: Características dos relés de sobrecorrente.

Característica	Tipo de Curva	Norma	k	$\alpha$	L
1	Inversa de tempo curto	Areva	0,05	0,04	0
2	Normal Inversa	IEC	0,14	0,02	0
3	Muito inversa	IEC	13,5	1	0
4	Extremamente Inversa	IEC	80	2	0
5	Inversa de tempo longo	Areva	120	1	0
6	Moderadamente Inversa	ANSI/IEEE	0,0515	0,02	0,114
7	Muito Inversa	ANSI/IEEE	19,61	2	0,491
8	Extremamente Inversa	ANSI/IEEE	28,2	2	0,1217

Após a entrada dos dados da rede estudada, os ajustes dos relés de distância, em suas três zonas de atuação, são calculados através das técnicas tradicionais e não passam por nenhum processo de otimização. Os valores dos seus tempos de atuação são, grosso modo, considerados apenas como restrições para a atuação dos relés de sobrecorrente. Com isso, as curvas de atuação correspondentes são levadas a assumir valores de múltiplo de tempo mais elevados, tornando o sistema mais lento. Esta mesma constatação pode ser aplicada ao trabalho de ABYANEH et al. (2008).

### 2.1.6 MAHAMMEDI et al. (2010)

Baseado no trabalho de ABYANEH et al. (2008), MOHAMMEDI et al. (2010) realiza a coordenação dos dispositivos de sobrecorrente do mesmo sistema com a variação dos parâmetros genéticos. Uma vez que apenas dispositivos de sobrecorrente estão presentes na rede, a função objetivo deste trabalho é modificada em relação a do que o inspirou. Como pode-se ver em (2.7) houve a eliminação do termo relativo à coordenação entre os relés de sobrecorrente e de distância quando comparada com (2.4).

$$FO = \alpha_1 \times \sum_{i=1}^n (t_i)^2 + \beta_2 \times \sum_{k_1=1}^{P_1} (\Delta t_{mb|k_1|} - |\Delta t_{mb|k_1}|)^2 \quad (2.7)$$

com:

$$\Delta t_{mbk} = t_{bk} - t_{mk} - CTI \quad (2.8)$$

Os parâmetros genéticos assumiram 6 conjuntos de valores sendo que destes, apenas um foi capaz de obter a coordenação entre todos os dispositivos da rede. Este conjunto em questão é o mesmo utilizado tanto por ABYANEH et al. (2008) como pelo trabalho atual.

Outra diferença entre os trabalhos de ABYANEH et al. (2008) e de MOHAMMEDI et al. (2010) é a inclusão do sistema-teste padrão do IEEE de 30 barras reproduzido na Fig. 2.3. Também para este sistema, apenas um conjunto de parâmetros genéticos obteve a coordenação entre todos os dispositivos.

Assim como em ABYANEH et al. (2008), MOHAMMEDI et al. (2010) utiliza-se de equações truncadas para determinação dos tempos de atuação dos dispositivos de sobrecorrente.

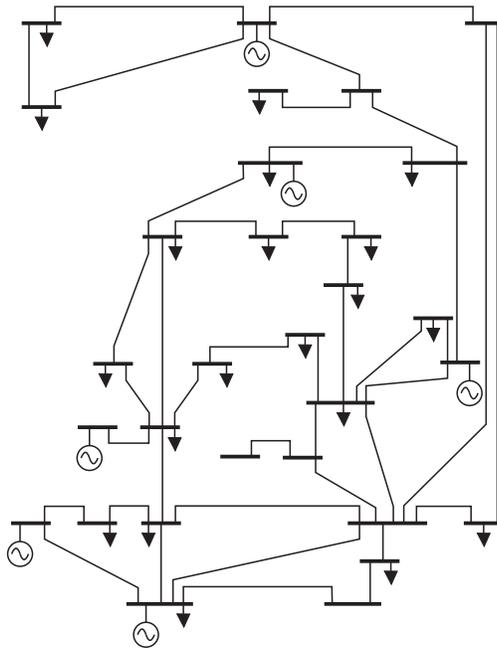


Fig. 2.3: Rede de 30 barras do IEEE.

### 2.1.7 OLIVEIRA et al. (2010)

Tratando do problema de coordenação de dispositivos de sobrecorrente como um processo de otimização, OLIVEIRA et al. (2010) utiliza um algoritmo genético em conjunto com um *software* dedicado a coordenação da proteção utilizado com motor da aplicação de inteligência computacional.

A determinação tanto do *Time Dial Setting*, quanto do tipo de curva dos dispositivos de sobrecorrente é realizada em OLIVEIRA et al. (2010). Como utiliza uma rotina externa para

análise dos resultados propostos pelo AG, é utilizado uma equação com aspecto bem mais agradável que as usadas em ABYANEH et al. (2008), CHABANLOO et al. (2008) e MOHAMMEDI et al. (2010). A função objetivo de OLIVEIRA et al. (2010) consiste da análise dos seguintes parâmetros:

- Análise do número de descoordenações entre dispositivos de sobrecorrente;
- Análise do número de violações do intervalo de coordenação entre os dispositivos de sobrecorrente;
- Velocidade da solução encontrada (considerando a atuação primária e de retaguarda).

Matematicamente a equação (2) de OLIVEIRA et al. (2010) apresenta os termos utilizado. Esta equação é reproduzida em 2.9

$$FO = \alpha \times N_d + \beta \times N_v + \phi \times T_p + \delta \times T_s \quad (2.9)$$

Duas grandes contribuições de OLIVEIRA et al. (2010) são o uso de um *software* dedicado à estudos de coordenação para análise dos resultados obtidos, e a determinação de todos os parâmetros necessário para o ajuste de dispositivos de sobrecorrente. Ao contrário do que é realizado por todos os trabalhos analisados, mais notadamente, PÉREZ and URDANETA (2001), ABYANEH et al. (2008), CHABANLOO et al. (2008) e MOHAMMEDI et al. (2010), que realizam a coordenação dos dispositivos de sobrecorrente com a terminação apenas do *Time Dial Setting*, OLIVEIRA et al. (2010) realiza tanto a determinação dos valores do *Time Dial Setting* quanto do tipo de curva do dispositivo.

## 2.2 Síntese bibliográfica

Como pode-se ver na bibliografia apresentada, a proteção de distância é, na maioria dos casos, tratada num processo que não utiliza-se de técnicas de otimização para a determinação dos seus ajustes. Com isso, entra no processo de otimização apenas como restrições a serem contornadas pelas demais funções. Essa técnica faz com que o sistema de proteção apresente valores de tempo de atuação mais elevados do que o necessário.

Neste trabalho um novo método para coordenação ótima dos sistemas com esquema proteção mista é apresentado (Ver Tab. 2.2). Com o ajuste do início da segunda zona de proteção dos relés de distância podendo variar dentro de uma faixa predeterminada, a proteção de sobrecorrente pode apresentar tempos de atuação bem abaixo dos que apresentaria com a

metodologia tradicional. Com isso, o sistema de proteção torna-se mais rápido, seletivo e seguro.

A determinação da coordenação ótima da proteção, de acordo com o método proposto, é obtida por meio de um Algoritmo Genético (AG), uma das técnicas de inteligência computacional mais utilizadas para resolver problemas de otimização combinatória. Com ela é possível determinar os parâmetros relacionados tanto ao tipo de curva, como os ajustes dos múltiplos de tempo (TDS) dos relés de sobrecorrente (OLIVEIRA et al., 2010), bem com o início da segunda zona de proteção para o relé de distância.

Essa metodologia é bastante útil na resolução do problema de coordenação da proteção, ficando sua potencialidade mais evidenciada quando empregada em sistemas com alto grau de interconexão como ABYANEH et al. (2008) e YANG et al. (2006).

Tab. 2.2: Síntese bibliográfica e comparação com o modelo proposto.

Referência	Parâmetros Analisados					Funções
	Método	Ajustes				
		Curva	TDS	Z <sup>1</sup>	t <sub>z2</sub>	
PÉREZ and URDANETA (2001)	LP <sup>2</sup>	-	-	-	√	DOCR
KHEDERZADEH (2006) <sup>3</sup>	LP <sup>2</sup>	-	-	-	-	DIST e DOCR
CHÁVEZ et al. (2008)	Busca	-	-	√	-	DIST <sup>4</sup>
ABYANEH et al. (2008)	AG	-	√	-	-	DIST e DOCR
CHABANLOO et al. (2008)	AG	-	√	-	-	DIST e DOCR <sup>5</sup>
MOHAMMEDI et al. (2010)	AG	-	√	-	-	DOCR
OLIVEIRA et al. (2010)	AG	√	√	-	-	DOCR
Proposto	AG	√	√	√	-	DIST e DOCR

<sup>1</sup>Alcance da primeira zona de atuação.

<sup>2</sup>Linear Programming.

<sup>3</sup>Utiliza técnicas de composição de curvas para obtenção dos ajustes dos relés de sobrecorrente.

<sup>4</sup>É utilizada uma abordagem adaptativa neste trabalho.

<sup>5</sup>Curvas de atuação de diversos fabricantes são analisadas pelo algoritmo.

# Capítulo 3

## Fundamentação Teórica

Como se sabe, o sistema elétrico deve obedecer a padrões legais preestabelecidos pelos órgãos regulamentadores para que o fornecimento possa ser realizado da melhor maneira possível.

Como consequência de fatores internos e/ou externos, o sistema de potência não está imune à perturbações, defeitos e falhas de diversas origens. Estas condições anormais resultam em interrupções no fornecimento de energia elétrica, podendo ocasionar danos aos componentes que compõem o sistema de potência ou até mesmo à seres vivos.

Visando minimizar tais condições indevidas de operação, o sistema de potência conta com um sistema dedicado a manter os índices de qualidade do sistema em níveis confiáveis. Este sistema é o sistema de proteção. Todo sistema de proteção tem como principais objetivos os seguintes itens:

- Sensibilidade: os equipamentos de proteção devem ser sensibilizados pelo menor nível de defeito a qual o sistema esteja sujeito sem, no entanto, confundir tais situações com uma condição de contingência por exemplo;
- Seletividade: os ajustes dos equipamentos de proteção devem ser tais que o menor número possível de consumidores fique sem o suprimento de energia;
- Segurança: em nenhuma hipótese o sistema de proteção deve interromper o funcionamento normal do sistema elétrico de potência;
- Rapidez: um sistema de proteção é tão melhor quanto mais rápido forem as atuações dos seus dispositivos. Com isto é garantido que o sistema operará em situações de falta pelo menor tempo possível.

Em resumo, a principal atribuição de um sistema de proteção é eliminar situações de falta o mais rápido possível, de modo que as consequências da mesma sejam limitadas. Para isto faz-se necessário o uso de alguns dispositivos tais como: transformadores de corrente (TC) e de potencial (TP), relés e disjuntores.

A Fig. 3.1 apresenta, do ponto de vista dos dispositivos de proteção, as principais condições de operação do sistema de potência ABB (1999).

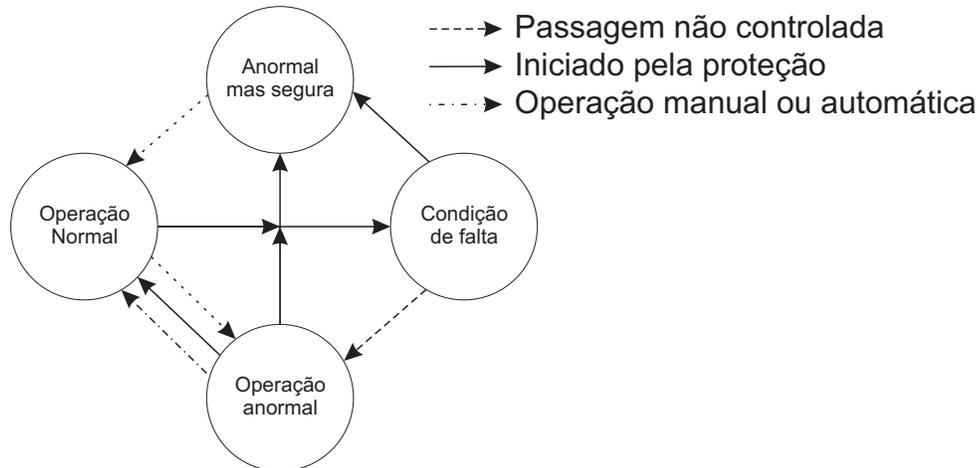


Fig. 3.1: Condições de operação do sistema de potência.

Na figura 3.1 tem-se as seguintes situações:

- situação de operação normal o sistema de potência atende a todos os consumidores com tensões de amplitude e frequência normais;
- Já sob condições anormais, a tensão de alimentação terá amplitude e/ou frequência diferentes das nominais fazendo com que os equipamentos instalados na rede operem em condições não ideais.
- Por sua vez, as condições de faltas são aquelas nas quais o sistema não está habilitado a manter o fornecimento de energia aos consumidores.

Ao processo de determinação dos ajustes dos dispositivos de proteção é dado o nome de estudo de seletividade da proteção e, tem como principal objetivo fazer com que tais dispositivos apresentem suas operações segundo uma sequência correta de atuação. Para esquemas de proteção que tenham arquitetura do tipo principal/retaguarda, essa sequência deve ser do ponto mais próximo do defeito para os mais distantes. Quando este sucesso é alcançado, diz-se que os dispositivos estão coordenados.

O uso de relés de sobrecorrente e de distância nos sistemas de transmissão e subtransmissão é muito comum e, exige um cuidado a mais por parte do engenheiro de proteção devido alguns detalhes apresentados a seguir.

Suponha o trecho de um SEP fictício, apresentado na Fig.3.2, onde um relé de sobrecorrente é instalado na barra  $a$  e um relé de distância na barra  $b$ . Assim sendo, para uma falta em  $F$ , o relé de distância deve atuar, em sua segunda zona de operação, com uma antecedência preestabelecida em relação ao relé de sobrecorrente. A este tempo entre a atuação dos relés dar-se o nome de Tempo de Intervalo de Coordenação (CTI).

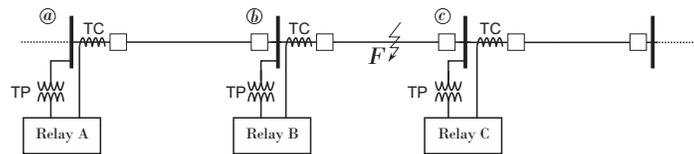


Fig. 3.2: Sistema fictício protegido por um relé de sobrecorrente e um de distância.

### 3.1 Proteção de Sobrecorrente

Relés de sobrecorrente são os mecanismos de proteção mais utilizados em sistemas de distribuição, além de terem grande participação nas demais áreas componentes dos sistemas elétricos de potência.

Para sistemas elétricos radiais e sem geração distribuída o esquema de proteção mais comum é o baseado no princípio da proteção principal e de retaguarda. Segundo esse esquema, o relé mais próximo ao ponto da falha será considerado como proteção principal e deve atuar, de modo instantâneo ou temporizado. Em caso de falha da proteção principal, o dispositivo de retaguarda, localizado em barramentos à montante da proteção principal, deve garantir a manutenção do fornecimento de energia ao maior número de consumidores possível. Para isso, deve atuar  $\Delta t_s$  após o tempo de atuação previsto para a proteção principal.

Quando de sua aplicação em sistemas com geração distribuída, ou que tenham anéis em sua configuração, os relés de sobrecorrente são providos de uma função que garante a sua atuação para determinados sentidos da corrente de curto-circuito, uma vez que, nesses casos, há a possibilidade da corrente ser fornecida pelos dois extremos da rede. Relés de sobrecorrente com esta habilidade são conhecidos como relés de sobrecorrente direcionais. Fora a característica da direcionalidade do sentido da corrente, estes relés também são empregados em esquemas do tipo proteção *principal/retaguarda*, aos moldes do que foi explanado anteriormente.

### 3.1.1 Ajuste dos relés de sobrecorrente

Considere o sistema de proteção mostrado pela Fig. 3.2. A coordenação dos relés de sobrecorrente pertencentes ao mesmo segue um algoritmo consagrado porém de difícil realização quando é feito “à mão livre”. O princípio básico deste algoritmo é garantir o intervalo de coordenação para cada um dos pares de proteção *principal/retaguarda* do sistema. Ou seja, os tempos de atuação dos relés, em qualquer local da rede, deve atender a equação (3.1):

$$t_{i-1} \geq t_i + \Delta t \quad (3.1)$$

onde  $i$  indica o barramento no qual está instalado o equipamento de proteção principal.

Desta forma, faz-se necessário que se disponha de uma maneira com a qual se possa estimar o tempo de atuação de cada um dos relés componentes do sistema. Esta característica é determinada por (3.2) cujos parâmetros serão explicados a seguir.

$$t_i = \frac{TDS \times k_1}{M^{k_2} - 1} \quad (3.2)$$

De acordo com ALMEIDA (2000), os valores de  $k_1$  e  $k_2$  são dados de acordo com os tipos de curva do dispositivo de sobrecorrente conforme, Tab. 3.1.

Tab. 3.1: Relação entre os valores das constantes  $k_1$  e  $k_2$  com o tipo de curva.

Curva	$k_1$	$k_2$
Normal inversa	0,14	0,02
Muito inversa	13,5	1
Extremamente inversa	80	2

De acordo com IEEE (1996), os relés de sobrecorrente podem ter curvas de atuação de três tipos: moderadamente inversa, muito inversa e extremamente inversa. Já para a IEC (1989), são relatadas as seguintes classes de curvas: normal inversa, muito inversa, extremamente inversa, inversa de tempo longo e inversa de tempo curto. Cada um desses tipos de curva são compostas por uma família associada à um determinado valor de múltiplo de corrente.

Desta forma, para determinação dos ajustes de sobrecorrente do relé instalado na barra  $w$ , deve-se conhecer de antemão o valor da corrente de curto-circuito máximo no ponto de instalação do seu respectivo TC. Com este valor, pode-se determinar o valor do múltiplo de corrente através de (3.3).

$$M_C = \frac{I_{CCmax}}{RTC \times I_{aj,C}} \quad (3.3)$$

De posse do valor do múltiplo de corrente do relé  $C$ , pode-se escolher um conjunto *tipo de curva/múltiplo de tempo* de modo que o tempo de atuação deste atenda ao critério imposto por (3.2), caso o barramento não seja terminal, ou à critérios internos da companhia que opera o sistema.

Determinado o tempo de atuação do relé da barra  $C$ , o tempo de atuação do dispositivo de proteção de retaguarda (relé  $B$ ), deve ser acrescido de um valor  $\Delta t$  maior que o da proteção primária, de acordo com (3.1). Esse determinado tempo de atuação deve ser conseguido pela combinação correta dos valores do múltiplo de tempo e do tipo de curva corretos. Para a determinação do múltiplo de corrente do relé  $B$  deve ser utilizado o mesmo valor de corrente de curto-circuito do relé da barra  $C$ , como pode ser visto a seguir.

$$M_B = \frac{I_{CCmax}}{RTC \times I_{aj,B}} \quad (3.4)$$

Agora, de posse do tempo de atuação e do múltiplo de corrente do relé  $B$ , é possível determinar o par tipo de curva - múltiplo de tempo que são os parâmetros de configuração de um relé de sobrecorrente desejados.

Pode-se constatar então, a complexidade da operação, dado o número de possibilidades dos ajustes. Esse processo é repetido até que se obtenha a coordenação entre todos os dispositivos que compõem a rede estudada. O fluxograma da Fig. 3.3 apresenta a sequência necessária para determinação dos ajustes dos relés de sobrecorrente de uma rede.

Uma outra maneira de ver a coordenação entre dois dispositivos de sobrecorrente é através da Fig. 3.4. O primeiro passo, como visto no fluxograma da Fig. 3.3 é a escolha do tipo de curva do dispositivo. Como este é um exemplo meramente didático, suponha a escolha das curvas tipo moderadamente inversa. O próximo passo é a determinação do múltiplo de corrente, realizado através de (3.3) e estimação do tempo de atuação através de (3.2). A escolha desses dois pontos está representada na Fig. 3.4 pelo ponto  $A$ . Para a instalação de um dispositivo a montante deste, novamente será realizado o cálculo do múltiplo de corrente e estimação do tempo de atuação, lembrando de acrescentar o valor de  $CTI$  previamente definido. Desta forma, supondo a manutenção das curvas normal inversa, deve-se escolher o múltiplo de tempo que dê o valor de tempo de atuação mais próximo ao determinado via (3.1). Observa-se que para o ponto  $B$  da Fig. 3.4, não possível obter o valor do tempo de intervalo de coordenação desejado.

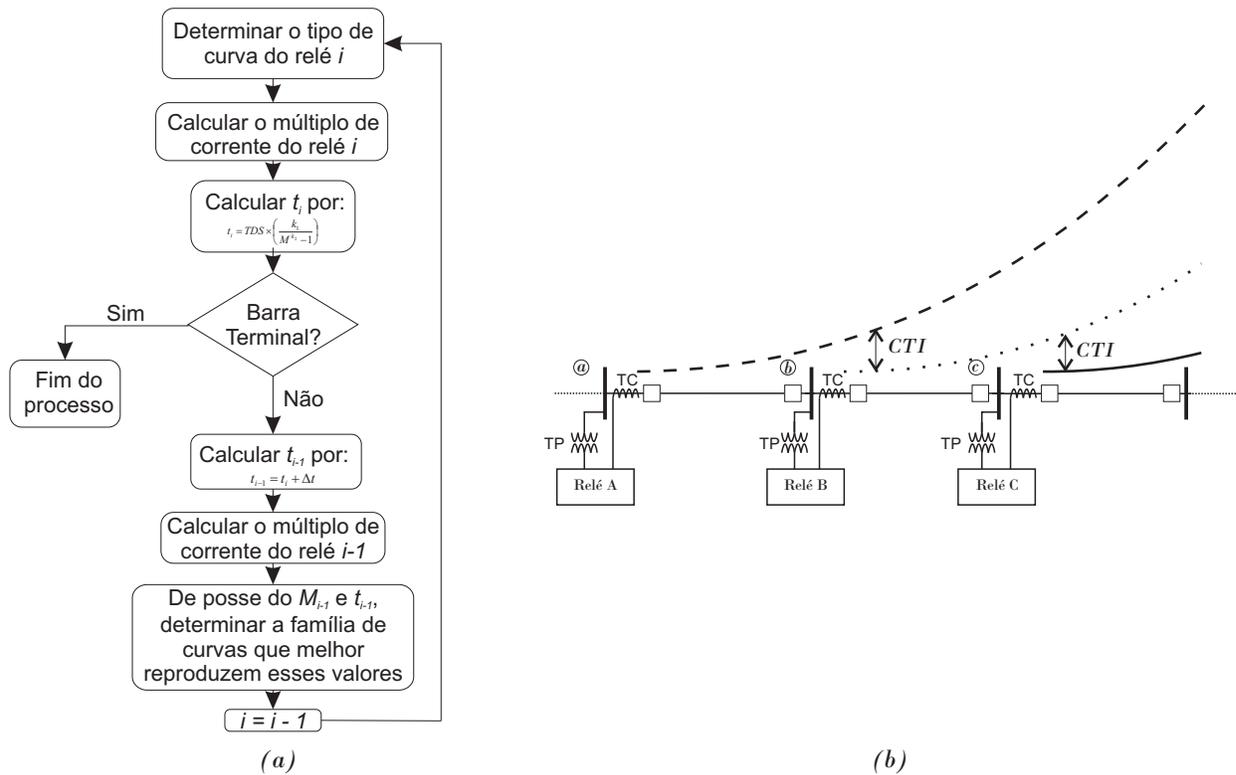


Fig. 3.3: (a) Fluxograma do processo de determinação dos ajustes dos relés de sobrecorrente. (b) Exemplo de coordenograma de três relés de sobrecorrente.

Desta forma, um novo valor de múltiplo de tempo deve ser escolhido até que a inequação (3.1) seja válida. Este ponto é representado na Fig. 3.4 pelo ponto *C*.

Com relação à função direcional dos dispositivos de sobrecorrente, algumas observações devem ser feitas. Considere o sistema fictício da Fig. 3.5 composto por duas linhas de transmissão, quatro relés e dois geradores conectados nos extremos destas linhas. A técnica de coordenação para este tipo de relé consiste na abertura do anel em um determinado ponto da rede e executar a coordenação da proteção nos dois sentidos da rede.

Feita a coordenação dos relés de sobrecorrente aos moldes apresentados no parágrafo anterior, os dispositivos apresentaram curvas de atuação como as mostradas na Fig. 3.6. Caso haja nessa rede alguma descoordenação, deve-se escolher um segundo ponto de quebra do anel e refazer o estudo para o mesmo. Esse processo deve ser refeito até que seja encontrada uma solução na qual não haja descoordenações ou o número dessas seja o mínimo dentre os possíveis.

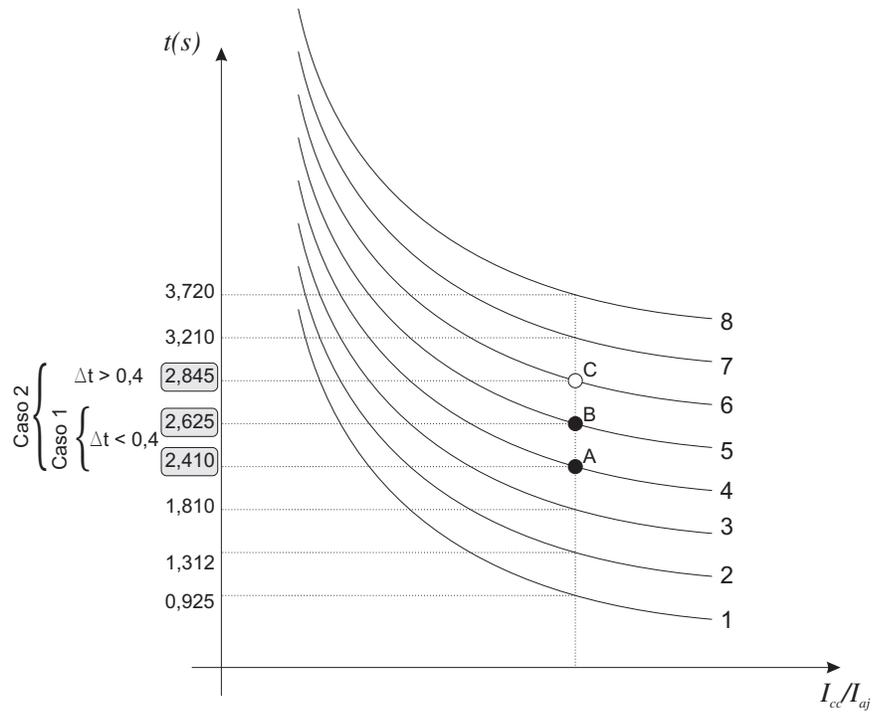


Fig. 3.4: Exemplo de determinação dos parâmetros de uma cadeia de dispositivos de sobrecorrente.

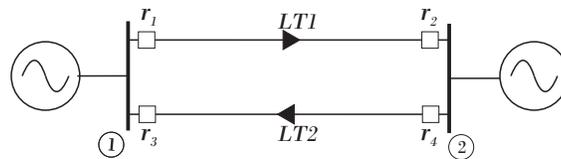


Fig. 3.5: Sistema fictício com uso de relés direcionais de sobrecorrente.

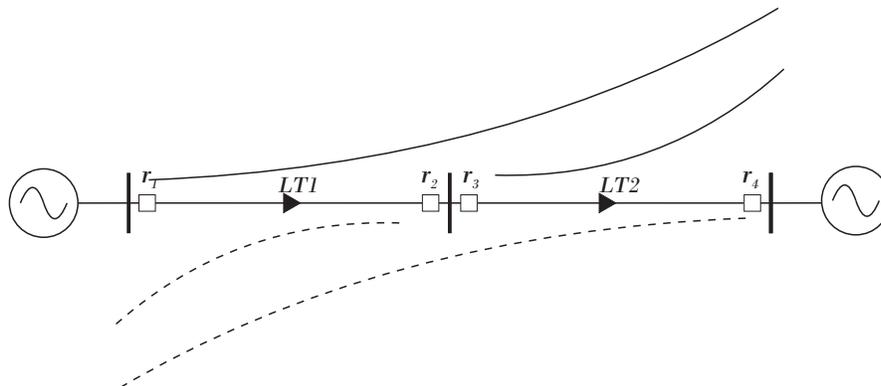


Fig. 3.6: Exemplo de coordenação do sistema fictício com uso de relés direcionais de sobrecorrente.

## 3.2 Proteção de Distância

A proteção de distância utiliza dados de tensão e corrente disponibilizados por TC's e TP's para determinação de parâmetros da linha de transmissão, como impedância, admitância ou reatância, entre o ponto da falta e o local de instalação do relé. Recebeu este nome devido a proporcionalidade entre as grandezas medidas e a distância.

Como a grandeza monitorada por esse tipo de dispositivo é um número complexo, torna-se prudente que suas características sejam apresentadas em um sistema que relacione as suas partes real e imaginária de um modo mais simples possível. Esse sistema é conhecido como *Diagrama R-X* e contém a região de atuação do dispositivo correspondente.

Existem diversos tipos de relés de distância e cada um apresenta uma região de atuação diferente, como pode ser visto na Fig. 3.7. Cada um desses dispositivos apresenta determinadas características que serão abordadas na subseção 3.2.1.

Após o tratamento dos valores de tensão e corrente associados ao relé da barra  $a$ , o valor da impedância medida é comparado com o ajuste do relé. Caso esteja inserida na região de atuação do dispositivo, este irá enviar o comando de *trip* para o disjuntor e, caso este funcione como esperado, o circuito será aberto e a falta eliminada.

Em comparação com os relés de sobrecorrente, os relés distância são de parametrização mais simples. Porém, o conhecimento de diversas características desses são necessárias para a correta compreensão do estudo de seletividade da proteção. As principais características deste importante componente dos sistemas de proteção são apresentadas a seguir.

### 3.2.1 Tipos de relés de distância

Deste a época dos relés eletromecânicos, diversos modelos de relés de distância vêm sendo usados. As características mais comuns para esses dispositivos são mostrados na Fig. 3.7 e comentários serão tecidos a respeito dos principais deles a seguir.

**Relé de Impedância:** Esse tipo de relé tem a mesma sensibilidade para qualquer ângulo de carga. Relés com essa característica não são capazes de detectar o sentido da corrente, a menos que sejam associados a um relé do tipo direcional. A falta desta função faz com que sistemas que usam o relé de impedância percam o princípio da seletividade, uma vez que o *trip* pode ser enviado a um disjuntor diferente do que realmente protege o trecho da LT defeituosa.

**Relé de Admitância ou Mho:** Os relés do tipo Mho apresentam características complementares em relação aos de impedância. Por si só, os relés Mho implementam a função direcional eliminando assim, a necessidade da associação com um relé que a desempenhe. Devido a essa facilidade associada com um conjunto de outras, como a baixa sensibilidade para

condições de carga, esse é o tipo de relé de distância mais utilizado nos sistemas de proteção.

**Curva Característica Otimizada:** Com o advento dos equipamentos de proteção digital, as curvas de características dos relés de distância puderam assumir comportamentos completamente diferentes das disponíveis até então. Curvas compostas por segmentos de retas, conhecidas como curvas de atuação poligonais ou otimizadas, são construídas de modo que assumam características particulares, que não eram possíveis com os relés eletromecânicos, ou sua obtenção se dava de maneira bastante complicada.

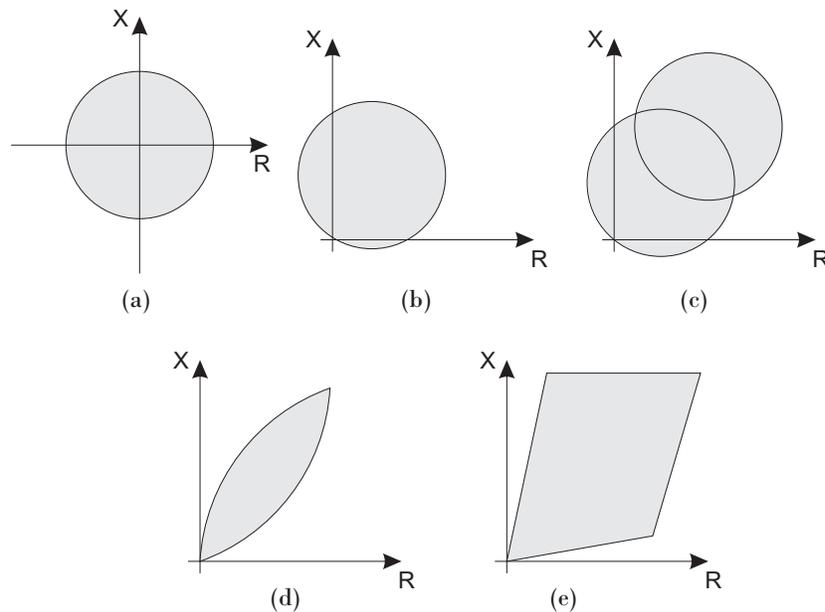
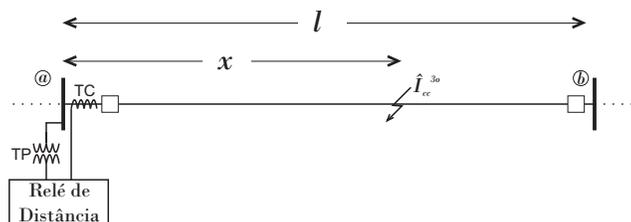


Fig. 3.7: Características de funcionamento de um relé de distância: (a) Impedância; (b) Mho; (c) Amendoin; (d) Lenticular; (e) Otimizada.

### 3.2.2 Determinação da impedância

Os relés de distância do tipo impedância têm por finalidade a estimação da impedância de sequência positiva entre o ponto de instalação do mesmo e o ponto de ocorrência do curto-circuito. Esses dispositivos utilizam-se da impedância de sequência positiva devido a sua distribuição praticamente uniforme, presença comum em todos os tipos de falta e a sua independência dos valores da resistência do solo. Em uma situação de falta, esse relé deve ser capaz de medir tanto a porção da impedância de LT na qual ocorreu a falta, como parâmetros que influenciam na medição, tais como a resistência de falta entre outros ANDERSON (1999).

Considere uma falta trifásica ocorrida a  $x\%$  da LT protegida pelo relé instalado no barramento  $a$  da Fig. 3.8. Desta forma, pode-se determinar os valores da tensão e da corrente no secundário dos TP's e TC's que alimentam o relé de acordo com as equações (3.5) e (3.6).

Fig. 3.8: Falta trifásica a  $x\%$  da barra  $a$ .

$$\hat{V}_s = \frac{xZ_1 \times \hat{I}_{CC}}{RTP} \quad (3.5)$$

$$\hat{I}_s = \frac{\hat{I}_{CC}}{RTC} \quad (3.6)$$

De posse de (3.5) e (3.6), a determinação da impedância vista pelo relé pode ser calculada como:

$$Z = \frac{\hat{V}_s}{\hat{I}_s} \implies Z = xZ_1 \times \frac{RTC}{RTP} \quad (3.7)$$

De acordo com (3.7), a impedância no secundário dos transdutores de corrente e tensão, vista pelo relé de distância está relacionada com a do primário por um fator determinado pelas relações de transformação do TC e TP associados. De modo mais geral, os valores desta impedância secundária sofrem influência de diversos parâmetros do sistema como: erros devido a valores incorretos dos parâmetros de LT's e de equipamentos, influência da corrente da outra extremidade da linha sobre a resistência de falta e à diferença de ângulo das tensões devido à transferência de potência ativa através da linha SILVA (2009) e MAEZONO (2001).

### 3.2.3 Zonas de atuação e seus principais ajustes

Diferentemente do que acontece com outros tipos de relés, como os de sobrecorrente, que têm sua atuação dada por uma curva suave, os relés de distância possuem um mecanismo conhecido como zonas de proteção que dão ao usuário idéia direta dos trechos de operação que compõem a curva de atuação total do dispositivo.

Cada relé de distância protege o sistema ao que é empregado através de suas zonas de atuação. Cada uma dessas zonas é responsável por um trecho do sistema e possuem tempos de atuação distintos.

A **primeira zona** de atuação deve detectar faltas internas a linha com uma margem de

segurança para evitar atuações indevidas ocasionadas pelos problemas relacionados no final da subseção 3.2.2.

O alcance da primeira zona de atuação varia de acordo com o sistema a ser protegido. De modo geral, esse alcance assume valores entre 70% e 85% da impedância da LT na qual está conectado o relé. A atuação da primeira zona é feita de maneira instantânea.

A **segunda zona** de operação deve ser capaz de detectar falhas durante todo o comprimento da LT remota bem como uma determinada parte da menor LT subsequente. O alcance dessa zona é então, 100% da LT protegida mais 20 – 50% da linha subsequente mais curta ou do transformador conectado à barra da subestação da outra extremidade, tendo prioridade o que assumir o maior valor. O tempo de atuação dessa zona varia entre 0,3s e 0,6s.

A **terceira zona** deve ser capaz de detectar toda a extensão da LT subsequente, mais uma parcela relacionada à circuitos duplos conectados a subestação remota. Assim, o seu alcance é 100% da linha protegida, mais 120% da linha subsequente mais curta. O seu tempo de atuação varia entre 0,6s e 1,2s. Vale a observação que dificilmente se obtém seletividade quando da atuação da terceira zona.

Existe também a possibilidade de outras zonas de atuação. Nesses casos, essas devem ser capazes de detectar falhas em toda a extensão da LT conectada à subestação remota. É desejável que se detecte faltas também no secundário dos transformadores conectados na SE da linha protegida. O seu tempo de atuação é superior a 2,0s.

Por fim, existe a **zona de atuação reversa** que tem o objetivo de detectar faltas na barra da própria subestação ou nos equipamentos conectados na barra. Essa zona deve ser, necessariamente, temporizada de modo a não interferir na seletividade das proteções das demais linhas ou equipamentos conectados a barra. O seu tempo de atuação deve ser maior que 2,0s sendo que experiências práticas demonstram que o tempo de 3,0s é o mais apropriado.

A Fig. 3.9 apresenta um exemplo de característica de atuação de um relé de distância desempenhado pelo dispositivo P543 de fabricação da AREVA T&D.

### 3.3 Algoritmo Genético

Algoritmos Genéticos (AGs) são um dos componentes da família de meta-heurísticas muito utilizados para determinação de soluções de problemas de otimização combinatória. Apresentado formalmente a primeira vez por John Holland em HOLLAND (1975), os AGs baseiam-se em uma estratégia de busca paralela e aleatória, voltada para valorização dos indivíduos mais bem adaptados às condições do problema.

Baseado na teoria evolucionária de *Charles Darwin*, desde a sua concepção, os AGs vêm

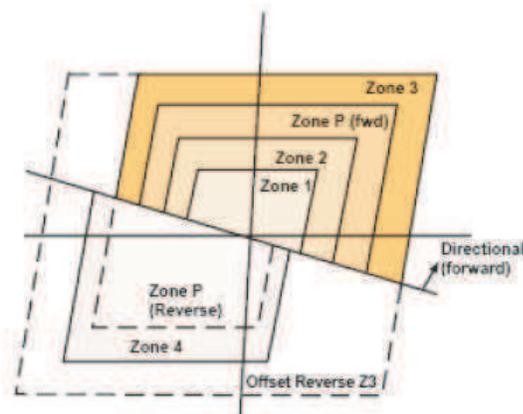


Fig. 3.9: Característica de atuação de um relé de distância.

sendo utilizados com grande margem de sucesso na resolução de problemas de otimização combinatória nas mais diversas áreas do conhecimento. A facilidade da resolução de problemas multi-dimensionais, que apresentam grande dificuldade (ou impossibilidade) de resolução analítica, são facilmente determinados através desta técnica.

Para facilitar o perfeito entendimento a respeito dos algoritmos genéticos, a Tab. 3.2 apresenta uma equivalência entre os termos biológicos, utilizados nos AG, e suas correspondentes funções dentro do algoritmo. No decorrer das próximas páginas, estes termos voltarão à tona e mais características sobre os mesmos serão apresentadas.

Tab. 3.2: Correspondência entre os termos dos AG e sua funcionalidade.

Termo	Significado no AG
Indivíduo	Pretensa solução ao problema ao qual o AG se propõe a resolver
Cromossomo	Parte constituinte do indivíduo, formado por genes
Genes	Elemento componente dos cromossomos. Carrega as características peculiares dos indivíduos
Alfabeto	Conjunto de valores que um gene pode assumir
Genótipo	Solução ao problema no domínio do AG
Fenótipo	Solução do problema no domínio da aplicação
População	Conjunto de indivíduos
Geração	Cada uma das iterações do processo evolutivo
Codificação	Esquema de representação das soluções para interpretação do AG
Aptidão	Característica de cada indivíduo que denota a capacidade de gerar descendentes

Em linhas gerais, os AGs codificam suas pretensas soluções em itens conhecidos como *indivíduos*, formados por *cromossomos* que representam as características de seus portadores.

Através de operadores genéticos (ver o item 3.3.2), esses *indivíduos* são manipulados e classificados por meio de uma função de aptidão e, agrupados em forma de uma *população*. Mesmo sem conhecer detalhes técnicos do problema a ser solucionado, os AGs têm grande possibilidade de encontrar a solução ótima para o mesmo.

Os AGs partem da geração, na grande maioria das vezes aleatória, de um conjunto de *indivíduos* chamados de *população inicial*. Cada um desses *indivíduos* é composto por um ou mais *cromossomos* e, representa uma possível solução para o problema.

Ao conjunto de operações genéticas ocorridas em todos os indivíduos da população dar-se o nome de *geração*. Durante a *geração*, cada um dos *indivíduos* é posto a prova e, o seu grau de aplicabilidade a resolução do problema é determinado. É de acordo com tal grau que é feita a classificação dos *indivíduos* e determinada a chance de cada um deles evoluir para *gerações* seguintes.

Como mencionado anteriormente, não é necessário que o AG conheça o problema ao qual tenta solucionar. A única exigência feita é que haja um mecanismo eficiente de classificação das soluções externadas por ele. A esta aptidão à solução do problema é dado o nome de *fitness* e ao seu mecanismo de determinação de *função objetivo*.

O fluxograma da Fig. 3.10 apresenta um roteiro padrão para determinação de uma solução através do uso dos algoritmos genéticos. Através desta figura, pode-se observar a independência dos AGs em relação ao problema em questão. A partir de uma rotina auxiliar, aparte ao algoritmo genético, é a realizado o processo de avaliação dos indivíduos externados pelo AG.

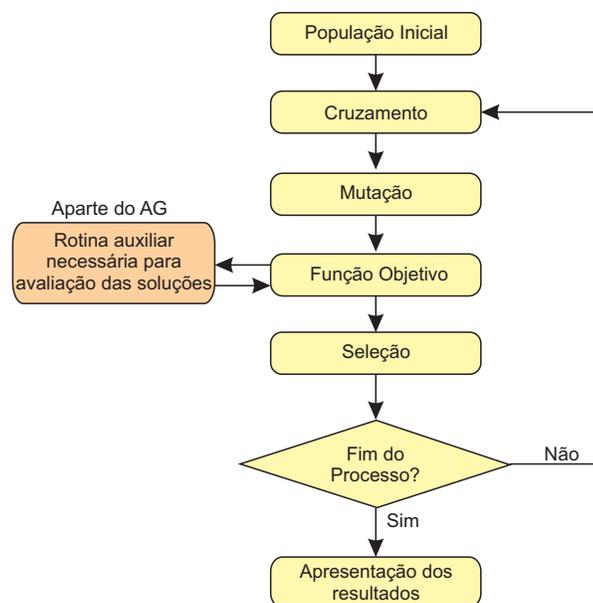


Fig. 3.10: Fluxograma geral de um Algoritmo Genético.

### 3.3.1 Formulação Computacional

Conhecidos os princípios básicos dos AGs, faz-se necessário a explicação da representação computacional dos elementos que o compõem. É o que segue.

Historicamente os *cromossomos* são representados por cadeias de vetores de tamanho variável e dependente do número de incógnitas. Cada um dos elementos do *cromossomo*, os *genes*, são preenchidos por um valor viável aquela posição. O conjunto desses valores é conhecido como *alfabeto* do *cromossomo*. Este *alfabeto* pode assumir codificação decimal ou em qualquer outra base numérica, a depender das características do problema.

O processo de escolha da codificação é uma das etapas mais importantes durante a implementação do AG. O *alfabeto* deve ser escolhido de modo que já haja nele, uma espécie de guia para a solução desejada. Deste modo, se um AG se propõe a resolver um problema de lógica binária, não justifica-se a utilização de um alfabeto decimal, uma vez que não há a possibilidade do resultado final apresentar dígitos diferentes de 0 e 1.

Uma outra etapa muito importante na obtenção da solução ótima do problema é exatamente a utilização de um mecanismo eficiente e refinado, capaz de avaliar as pretensas soluções em cada uma das *gerações*. Devido a esta parte não ser diretamente ligada ao AG, não há regras gerais na formulação da mesma. Em linhas gerais, a única exigência feita é que esse mecanismo não “faça confusão” entre os diversos indivíduos.

São essas duas etapas as mais importantes para a obtenção de uma solução verdadeiramente ótima para o problema em análise.

Um outro ponto ao qual deve-se ter um cuidado especial é na escolha das taxas de aplicação dos operadores genéticos. Há diversos trabalhos que tentam determinar expressões para a obtenção dos valores a serem utilizados no AG. Porém, durante a etapa de implementação e obtenção dos resultados, a determinação desses valores foi feita sem o emprego de tais técnicas.

### 3.3.2 Operadores Genéticos

Operadores genéticos são rotinas que manipulam tanto os *indivíduos* como um todo, como com seus *cromossomos*. Os operadores genéticos mais comuns são: Cruzamento, Mutação e Seleção, embora ainda haja alguns outros, como o Elitismo. A seguir são apresentadas as principais características dos principais operadores genéticos.

#### Cruzamento

Como já dito, o AG parte de um *população inicial*, seja ela gerada aleatoriamente ou não. A partir dessa *população inicial*, *indivíduos* (pais) são escolhidos aleatoriamente para cruzar o seu

material genético com o intuito de gerar novos *indivíduos* (filhos). A esse processo é dado o nome de Cruzamento.

O número de *indivíduos* a serem criados em cada *geração* é dependente de uma constante presente no corpo do AG chamada *taxa de cruzamento* e que assume, na maior parte das vezes, valores entre 25% e 50%.

Há diversas maneiras de se realizar o processo de cruzamento. A Fig. 3.11 apresenta os dois modos mais comuns. No primeiro modo (Fig. 3.11(a)) há somente a permuta de parte dos *chromossomos* envolvidos na operação que tem como resultado indivíduos com as mesmas características de seus pais. Na Fig. 3.11(b) é apresentado um mecanismo de cruzamento mais complexo que utiliza-se das operações de soma e subtração para a obtenção dos *indivíduos-filhos*. Desta feita, um indivíduo “*nasce*” através da soma do *código genético* dos pais e o outro através da subtração do mesmo.

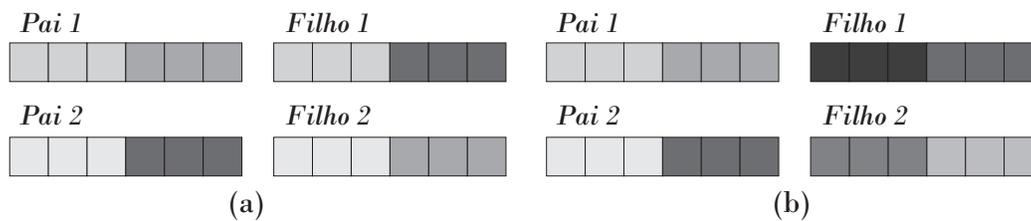


Fig. 3.11: Operação de Cruzamento Populacional. O cruzamento pode ser realizado por: (a) Permuta do material genético dos pais e (b) Operações matemáticas com o material genético dos genitores.

O uso do processo de cruzamento baseado em operações algébricas, conforme apresentado na Fig. 3.11(b), acarreta no uso de uma ferramenta conhecida como números cíclicos. Este fato se faz necessário para que após realizadas as somas ou subtrações, nenhum *gene* do *chromossomo* apresente um valor que não faça parte do respectivo *alfabeto*.

A representação computacional mais comum da técnica de cruzamento baseado em operações algébricas consiste na alocação de todos os valores do alfabeto em uma estrutura semelhante a uma roleta. Quando requisitada a realizar a operação, a rotina não trabalha diretamente com os valores dos *genes* e sim, com os índices de tais valores na roleta que contém o *alfabeto*. Assim, supondo os dois indivíduos apresentados na Fig. 3.12(b) o filho representado pela soma entre os *genes* dos pais seria o apresentado na Fig. 3.12(c). Para determinação do indivíduo gerado pela soma, a roleta (Fig. 3.12(a)) gira no sentido anti-horário até a posição indicada pelo índice de cada *gene*. Já o segundo filho do processo, oriundo da subtração do material genético dos pais, segue a mesma regra, contanto que, nesse caso porém, a roleta é movimentada no sentido horário.

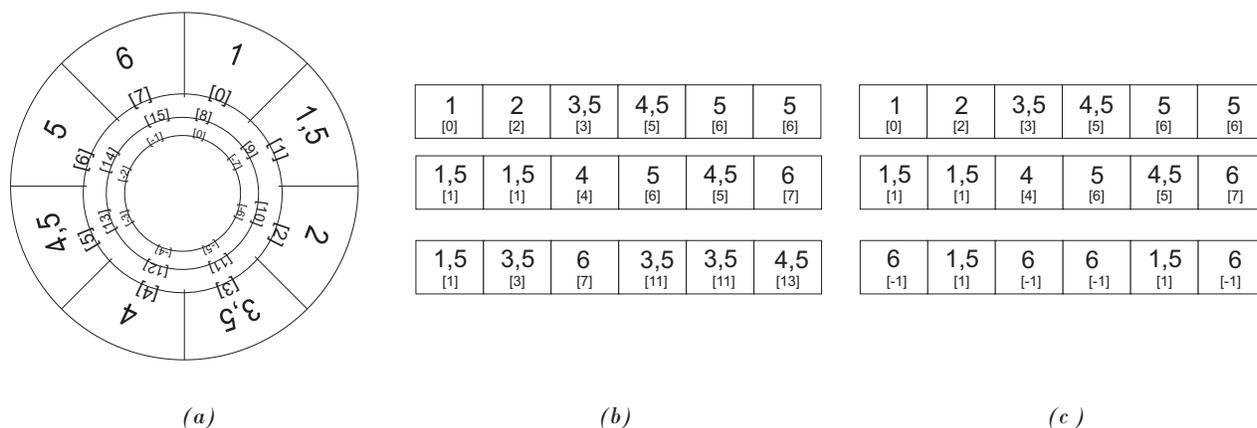


Fig. 3.12: Representação da formação computacional dos números cíclicos.

Observe que esta abordagem é completamente geral, podendo ser utilizada para qualquer alfabeto, independente da distribuição entre os termos que o compoem.

### Mutação

Há na natureza diversos fenômenos, algumas vezes classificados como *anomalias*, que ocorrem por alterações em *genes* específicos e que podem acarretar em *indivíduos* totalmente diferente dos seus *pais*. As características apresentadas por esses novos *seres* podem ser melhores ou piores que as dos seus ancestrais, e essa classificação se dará em função da adaptação desse *indivíduo* ao ambiente no qual está inserido.

Nos AGs esse processo é realizado através da mudança de um *gene* de um *indivíduo* da *população* escolhido aleatoriamente. Observa-se que esta operação não acarreta em mudanças no tamanho da população (ver Fig. 3.13).



Fig. 3.13: Operação de Mutação. Um indivíduo é escolhido aleatoriamente para ter seu código genético alterado. No lado direito, o indivíduo antes da mutação. A esquerda, com a mutação efetuada.

O processo de mutação é realizado de acordo com a *taxa de mutação* do problema. Essa taxa em geral assume valores bem pequenos, entre 1% e 2%. Sua principal função é fazer com que o algoritmo não fique preso a uma solução ótima local e sim, sempre siga para ótimos globais.

## Seleção

Ao final de uma geração existe uma gama de *indivíduos* que devem ter sua adaptabilidade ao problema proposto mensurada. Essa trabalho fica a cargo da *seleção*.

A *seleção* faz uso dos valores da *função objetivo* ou *fitness* para selecionar os *indivíduos* mais bem adaptados ao problema em questão. Os valores da *função objetivo* são determinados por uma rotina externa ao AG que tem o conhecimento especialista a respeito do problema ao qual se deseja encontrar a solução.

Embora a *seleção* seja responsável pela classificação dos elementos mais bem adaptados a situação em estudo, não há a garantia de que não existam *indivíduos* inferiores dentre os selecionados. Esse fato ocorre porque os *indivíduos* participantes do processo de seleção são escolhidos aleatoriamente havendo assim, a possibilidade da não inclusão de *indivíduos* pouco adaptados no mesmo. Para contornar essa situação, há uma outra operação genética conhecida por *Elitismo* que, garante a escolha apenas do *indivíduos* com maior índice de adaptação.

Pelo menos dois métodos de *seleção* têm sua aplicação consagrada na literatura. São eles: o *torneio* e o *método da roleta*. O processo de seleção baseado no *torneio* consiste na comparação entre de um conjunto de  $n$  *indivíduos* e tem como resultado um grupo composto pelos  $n-m$  *seres* com melhor grau de adaptação (onde  $n$  é o número de *indivíduos* após o processo de *crescimento* e  $m$  é a quantidade de *indivíduos* gerados via *crescimento*). Já o método da *roleta* faz uma analogia ao tradicional jogo de azar dos cassinos norte-americanos. Por este, *seres* que tenham se mostrado mais bem adaptados ao problema têm maior probabilidade de serem levados às gerações seguintes, embora, devido às características aleatórias do processo, *indivíduos* inferiores podem ser escolhidos no lugar dos primeiros. O processo da seleção via método da *roleta* pode ser melhor entendido com o auxílio da Fig. 3.14

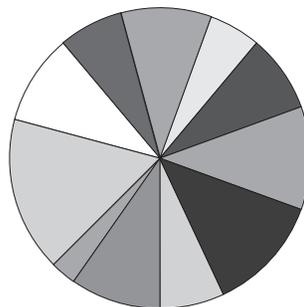


Fig. 3.14: Operação de Seleção via método da roleta. A roleta tem maior probabilidade de parar nos espaços referentes aos melhores indivíduos, embora nada impede do contrário acontecer.

Três passos são essenciais no método da *roleta*: ordenar os indivíduos de forma decrescente em relação à *função objetivo*, realizar o cálculo da aptidão e da aptidão acumulada FONTAN

---

(2008). Existem vários algoritmos para implementar a função de seleção através do método da *roleta*, os quais são diferenciadas de acordo com o cálculo da aptidão. De maneira geral, esse cálculo pode ser realizado com base na posição que o indivíduo ocupa após a população ser ordenada, ou com base na *função objetivo*.

## Capítulo 4

# Algoritmos genéticos e a coordenação da proteção

A obtenção da coordenação ótima de um sistema de proteção, aos moldes apresentados nesta dissertação, tem foco na minimização do tempo de operação dos relés de sobrecorrente quando empregados em conjunto com relés de distância. Ou seja, deseja-se encontrar os ajustes dos dois tipos de relés que levem a esse sucesso. Nestes termos, o problema da coordenação da proteção é um problema de otimização combinatória. Problemas como esse são extremamente dependentes do número de variáveis, de modo que o aumento exacerbado de sua dimensão implica no fenômeno da *explosão combinatória* BRAZ (2003).

Os Algoritmos Genéticos vêm sendo amplamente utilizados na resolução de problemas de natureza combinatória. Por ser de fácil implementação e, mesmo assim, obter resultados satisfatórios, este método de Inteligência Computacional tem se popularizado cada vez mais a partir da década de 90. Para que a aplicação de um AG em um dado problema dê bons resultados, pelo menos dois componentes devem ser alvo de uma maior parcela de atenção por parte do usuário do método, como visto em 3.3.1. Esses componentes são: a codificação que será utilizada para representação dos *indivíduos*, que na maior parte das vezes são compostos por um único *cromossomo*, e a função de aptidão do problema. Outro ponto que incide diretamente no desempenho de um AG são seus fatores internos, a saber: taxa de cruzamento, taxa de mutação, tamanho da população, critério de parada e modelagem do problema. A seguir, serão abordadas as estratégias utilizadas para a resolução do problema da coordenação ótima da proteção quando da presença de relés de distância e de sobrecorrente.

## 4.1 Estruturação do problema

Suponha o trecho de um SEP fictício apresentado na Fig. 4.1 onde um relé de sobrecorrente é instalado na barra  $a$  e um relé de distância na barra  $b$ . Assim sendo, para uma falta em  $F$ , o relé de distância deve atuar, em sua segunda zona de operação, com uma antecedência preestabelecida em relação ao relé de sobrecorrente. A este tempo entre a atuação dos relés dar-se o nome de Tempo de Intervalo de Coordenação (CTI).

Os dispositivos de sobrecorrente, embora muito utilizados, não dão aos operadores do sistema em análise informações relevantes como as estimativas do ponto de ocorrência do sinistro. Essa característica complementar é dada por meio dos relés de distância. Desta forma, o ajuste dos dispositivos de sobrecorrente que compõem a cadeia de proteção, baseia-se na escolha das curvas características adequadas, parâmetro este que torna-se o único mecanismo de controle capaz de garantir as características desejadas do sistema de proteção. Já para os dispositivos de distância, o parâmetro a ser ajustado diz respeito ao alcance de cada uma das suas zonas de operação. Esse ajuste se caracteriza por um valor de impedância.

É feita aqui a mesma consideração proposta por CHÁVEZ et al. (2008), na qual a coordenação entre um dispositivo de sobrecorrente e de distância se dá conforme apresentado na Fig. 4.1. Essa consideração implica na eliminação da restrição da inequação (2.1) sugerida por PÉREZ and URDANETA (2001).

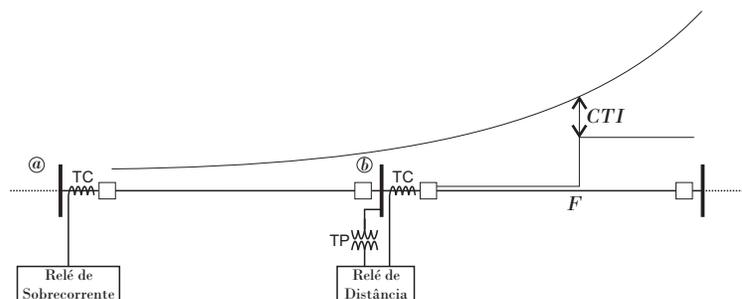


Fig. 4.1: Coordenação entre um dispositivo de sobrecorrente e um de distância.

### 4.1.1 Codificação dos indivíduos

Devido a característica do sistema ao qual pretende-se obter a coordenação ótima, cada *indivíduo* é composto por dois *cromossomos*. O primeiro desses está relacionado às características dos relés de sobrecorrente, enquanto o segundo, aos relés de distância.

Para se determinar a curva de operação de um relé de sobrecorrente, deve-se conhecer a sua classe, que pode ser dos seguintes tipos: moderadamente inversa, inversa ou muito inversa

segundo IEEE (1996), bem como o seu  $TDS$ . Dessa forma, os *chromossomos* que representam as características de sobrecorrente possuem comprimento igual a duas vezes o número de dispositivos instalados na rede sendo a primeira parte correspondente ao  $TDS$  e a segunda ao tipo de curva do mesmo.

O valor do  $TDS$  varia entre 0 – 1 e, com o advento dos relés digitais, essa variável pode assumir quaisquer valores dentro dessa faixa. Esse fato nos remete a uma codificação em ponto flutuante para esta parte do *chromossomo*. Tais valores são distribuídos de forma discreta com passo de 0,05. Esse fato implica em uma redução do espaço de busca do algoritmo porém, não prejudica a generalidade do método uma vez que a mudança do passo de incremento do  $TDS$ , apenas implicaria em um maior tempo de simulação, associado ao aumento da população inicial e do acréscimo de operações ocasionadas por este. Já o tipo de curva, pode ser representado por um número inteiro na faixa de 1 a 3, assumindo uma codificação decimal com o alfabeto reduzido aos valores 1, 2 ou 3.

O segundo *chromossomo* do *indivíduo*, representante das características de proteção de distância, é formado também por duas parte, sendo a primeira relativa ao valor do módulo da impedância de alcance da primeira zona de atuação<sup>1</sup> e a segunda, remete-se ao valor do ângulo de torque máximo do relé de distância.

Como pode ser visto na seção 3.2.3, a primeira zona de atuação de um relé de distância pode variar entre 70% e 85%. Essa é portanto, a faixa de variação do alfabeto relativo a primeira parte do *chromossomo* que, como pode ser visto, apresenta codificação decimal. O ângulo de torque máximo, componente da segunda parte do *chromossomo*, assume valores muito próximos ao ângulo da impedância da linha protegida. Desta forma, esses parâmetros podem assumir valores entre 75° e 89°. Mais uma vez, foi realizada uma estratégia de “discretização” de tal intervalo, podendo variar de um extremo a outro com passo de 0,25°.

A Fig. 4.2 apresenta a estrutura de codificação apresentada anteriormente.

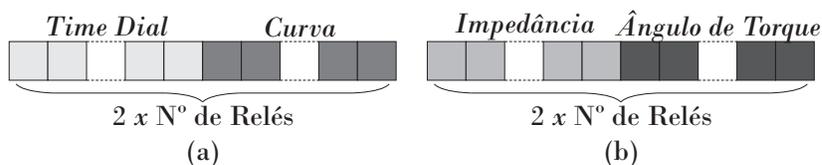


Fig. 4.2: Codificação dos indivíduos: (a) Relé de Sobrecorrente; (b) Relé de Distância.

<sup>1</sup>Este ponto foi escolhido por ser o local de início da segunda zona de proteção

### 4.1.2 População inicial

A população inicial de cada estudo é gerada de modo aleatório porém, respeitando os limites impostos pelo alfabeto de cada parte dos *chromossomos*, como apresentado anteriormente. Há ainda a possibilidade do estudo ser iniciado a partir de uma população inicial já utilizada. Essa funcionalidade permite realizar uma análise de desempenho do algoritmo, o que é um aspecto muito interessante em estudos que utilizam técnicas de Inteligência Computacional, como é o caso dos Algoritmos Genéticos.

### 4.1.3 Análise de aptidão

A análise de quão adaptados, ou não, os *indivíduos* estão ao problema é realizada nesta etapa. De posse dos *indivíduos* estudados, faz-se necessário a utilização de uma expressão matemática, bem definida, que atribua valores relacionados ao tempo de atuação dos relés para cada um dos conjuntos de ajustes analisados. Para realização da avaliação de aptidão dos *indivíduos*, foi utilizada uma expressão baseada em ABYANEH et al. (2008), reproduzida em (2.4), que foi acrescida da análise relativa à coordenação dos relés de distância. Como a coordenação entre os alcances das zonas de atuação dos dispositivos de distância não se faz necessário, uma vez que o AG considera apenas a primeira delas como parâmetro a ser determinado, o termo que representa esta função de proteção em (4.1) é relativo ao ângulo de torque máximo do dispositivo, parâmetro este que influenciará na velocidade de atuação do dispositivo. Esta parcela é representada pelo quarto termo da equação 4.1.

A Fig. 4.3 apresenta a equivalência entre os termos dos cromossomos que representam cada indivíduo com os termos utilizados nos cálculos da função objetivo. Os termos do cromossomo de sobrecorente serão utilizados na equação (3.2), onde o valor do *Time Dial Setting* é utilizado diretamente na equação e o tipo de curva irá determinar os valores de  $k_1$  e  $k_2$ , conforme a Tabela 3.1.

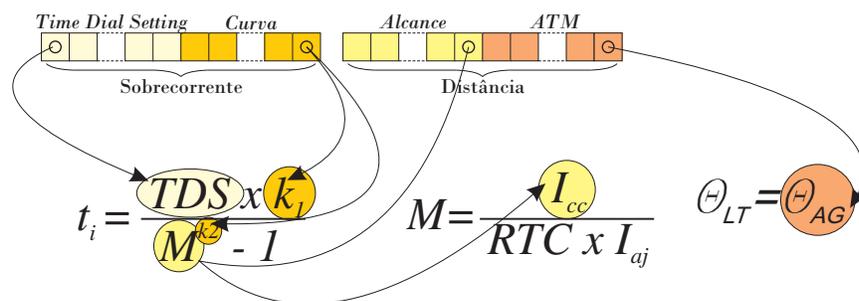


Fig. 4.3: Equivalência entre o AG e os termos da função objetivo.

$$FO = \alpha_1 \times \sum_{i=1}^n (t_i)^2 + \beta_2 \times \sum_{k_1=1}^{P_1} (\Delta t_{mb|k_1|} - |\Delta t_{mb|k_1||})^2 + \beta_3 \times \sum_{k_2=1}^{P_2} (\Delta t_{mbDISTOC|k_2|} - |\Delta t_{mbDISTOC|k_2||})^2 + \sum_{k_3=1}^{P_3} (\theta_{AG} - \theta_{mbDISTOC|k_3|})^2 \quad (4.1)$$

com:

$$\Delta t_{mbDISTOC|k_2|} = t_{bOC|k_2|} - t_{mDIST|k_2|} - CTI \quad (4.2)$$

Percebe-se que a primeira parte de (4.1) diz respeito ao critério da velocidade do sistema de proteção, isto é, quanto mais rápido atuarem os relés da zona de proteção primária, melhor será esta solução. A segunda parte visa garantir a coordenação entre os relés de sobrecorrente. Já a terceira parte, está relacionada a coordenação entre relés de distância e de sobrecorrente e a última ao ajuste do ângulo de torque máximo dos relés de distância, uma vez que a coordenação do alcance dos mesmos é conseguida pelas limitações impostas ao alfabeto.

#### 4.1.4 Outras operações genéticas

Durante a execução do AG, outras funções genéticas exercem papel importante na obtenção da melhor solução. Como descrito na seção 3.3.2, as operações de crescimento e mutação influem diretamente, desde que utilizadas de modo correto, nas soluções encontradas.

Após toda a manipulação e atribuição dos valores de aptidão aos *indivíduos* da população, a operação da *seleção* deve ser posta em prática de modo que possa selecionar os componentes com maior probabilidade de terem seu material genético passado para as gerações subsequentes.

## 4.2 Estudos de caso

Como mencionado no Capítulo 1, durante a elaboração desta dissertação foram utilizadas duas abordagens distintas a fim de avaliar a aplicabilidade do método proposto na resolução do problema da coordenação da proteção. A primeira destas abordagens consistiu no uso do *software* MATLAB<sup>®</sup>, o qual lançou mão do conjunto de equações apresentadas na seção 3.1 para determinar os tempos de atuação dos dispositivos de sobrecorrente. A segunda técnica utilizada trata-se do uso do *software* *Computed Aided Protection Engineering* (CAPE<sup>®</sup>), de fabricação da Electrocon<sup>®</sup> como rotina auxiliar ao processo de análise do grau de adaptação dos *indivíduos* ao problema. As próximas subseções apresentarão as particularidades de cada uma destas técnicas.

### 4.2.1 Determinação dos ajustes da proteção utilizando o MATLAB<sup>®</sup>

Para simulação no MATLAB<sup>®</sup>, o método proposto foi aplicado a um sistema de 6 barras e 7 linhas reportado no trabalho de ABYANEH et al. (2008) e mostrado na Fig. 4.4. Neste caso, o MATLAB<sup>®</sup> implementou todas as funcionalidades do AG bem como, realizou os cálculos dos tempos de atuação dos dispositivos de proteção.

Nesse estudo foi considerado que todos os disjuntores do sistema são comandados por um relé de sobrecorrente e um de distância, sendo estes do tipo Mho. As impedâncias de seqüências positiva e negativa da rede, em *por unidade* na base de 100 MVA e 150 kV são apresentadas na Tab. 4.1. Em seguida, os dados relativos as correntes de curto-circuito trifásico, bem como a corrente vista por cada dispositivo do par *principal/retaguarda*, são apresentadas na Tab. 4.3. Os parâmetros internos do AG são apresentados na Tab. 4.2. Os resultados obtidos nessa etapa são apresentas na Tab. 5.1.

Tab. 4.1: Dados das linhas do sistema teste da Fig. 4.4.

Linha	R( <i>pu</i> )	X( <i>pu</i> )
1	0,0018	0,0222
2	0,0018	0,0222
3	0,0018	0,02
4	0,0022	0,02
5	0,0022	0,02
6	0,0018	0,02
7	0,0022	0,0222

Tab. 4.2: Parâmetros do Algoritmo genético para o sistema da Fig. 4.4.

Parâmetros do AG	
População inicial	100
$N^0$ de Gerações	2000
Taxa de Crescimento	25%
Taxa de Mutação	1%

A função de avaliação dos indivíduos utilizada nesta etapa é a descrita em (4.1). Os valores dos tempos de atuação foram determinados pelo próprio MATLAB<sup>®</sup> com auxílio das equações (3.1), (3.2) e (3.3). Vale lembrar que são dados como parâmetros de entrada ao algoritmo apenas os valores das correntes de curto-circuito nas extremidades das linhas do sistema da Fig. 4.4. Para a determinação dos valores em locais diferentes destes, lançou-se mão de uma

Tab. 4.3: Correntes de curto-circuito trifásico vista pelo par P/R para os sistema da Fig. 4.4.

Proteção Principal (M)	Proteção de Retaguarda (B)	$I_{cc}^{3\phi}$ em P	$I_{cc}^{3\phi}$ em R
8	7	4991,8	406,9
8	9	4991,8	1546,3
1	6	2702,4	2702,4
2	7	5399,5	1546,3
2	1	5399,5	814,5
9	10	1417,4	1417,4
3	2	3371,8	3371,8
10	11	2379,9	2379,9
4	3	2180,6	2180,6
11	12	3517,6	3517,6
5	4	1328,4	1328,4
12	13	5399,5	814,5
12	14	5399,5	1546,3
6	5	4991,9	406,9
6	14	4991,9	1546,3
13	8	2508,4	2508,4
14	1	4260,2	814,5
14	9	4260,2	406,5
7	5	4260,2	406,5
7	13	4260,2	814,5

aproximação, uma vez que não é foco desta dissertação a elaboração de rotinas de cálculo de curto-circuito.

Tal aproximação pode ser explicada da seguinte forma. Seja o múltiplo de corrente relativo a uma falta ocorrida no pé na barra chamado de  $M_1$  e para uma falta no extremo oposto da LT  $M_2$ . Neste ponto faz-se a consideração de que a curva de atuação do relé de sobrecorrente pode ser representada por uma equação da forma mostrada a seguir.

$$t_i = \alpha e^{\beta x} \quad (4.3)$$

Faz-se necessário então, a determinação dos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$ . Desta forma, seja então:

$$A = \begin{pmatrix} M_1 \\ M_2 \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

e

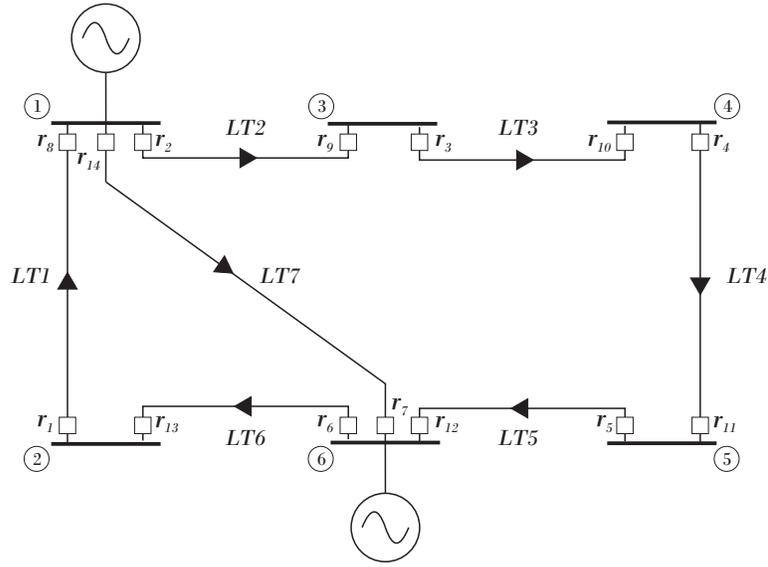


Fig. 4.4: Sistema teste composto por 6 barras e 7 linhas.

$$b = \log \left( \begin{matrix} t(M_1) \\ t(M_2) \end{matrix} \right)^T \quad (4.5)$$

De acordo com o critério dos mínimos quadrados, pode-se mostrar que o erro na determinação dos valores de  $\alpha$  e  $\beta$  será mínimo quando:

$$\Omega = \frac{A^t \times A}{A^t \times b} \quad (4.6)$$

Considerando o primeiro elemento do vetor  $\Omega$  como sendo  $\Omega(1)$  e o segundo  $\Omega(2)$ , estes valores estão relacionados com os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  de 4.3 conforme as equações seguintes.

$$\begin{aligned} \beta &= \Omega(1) \\ e \\ \alpha &= e^{\Omega(2)} \end{aligned} \quad (4.7)$$

Determinados  $\alpha$  e  $\beta$ , é necessário a determinação do múltiplo de corrente para o ponto limite da primeira zona de atuação do relé de distância, para que o tempo de atuação do relé de sobrecorrente que atua como proteção de retaguarda possa ser determinado por (4.3). O valor deste múltiplo é determinado de acordo a equação (4.8).

$$M_x = M_1 - (M_1 - M_2) \times (1 - r_p) \quad (4.8)$$

### 4.2.2 Determinação dos ajustes da proteção utilizando o CAPE<sup>®</sup> como motor

O CAPE<sup>®</sup> é um dos *softwares* mais utilizados na área de proteção de sistemas elétricos. Porém, não há no seu pacote de funcionalidades uma janela que permita a comunicação entre este e uma segunda rotina, externa à primeira. Em outras palavras, na sua forma original, o CAPE<sup>®</sup> não foi idealizado como uma rotina de auxílio à uma outra, seja qual for o objetivo desta segunda.

A modelagem de sistemas de potência no mesmo se dá de maneira bastante simples. Utilizando os seus vários módulos, o usuário pode realizar não apenas estudos de coordenação da proteção como também: análises de fluxos de carga e curto-circuitos.

No que diz respeito aos dispositivos de proteção, o CAPE<sup>®</sup> tem uma vasta gama de relés digitais dos principais fabricantes do mundo. Cada um destes componentes representa de maneira bastante fiel as características dos equivalentes dispositivos físicos. Apegados a credibilidade que o CAPE<sup>®</sup> tem no ramo de coordenação da proteção, os próprios fabricantes encarregam-se de criar estes modelos e distribuí-los aos usuários do *software*. Assim sendo, uma simulação realizada com o dispositivo SEL-311, por exemplo, apresentará resultados extremamente próximos aos obtidos em um sistema real.

Por outro lado, a complexidade da representação dos dispositivos de proteção não para nas suas características de atuação. Para a utilização de um relé no CAPE<sup>®</sup> faz-se necessário que o usuário proceda da mesma forma que procederia caso estivesse tratando com o dispositivo real. Desta forma, configura-se aqui, a parte mais complexa da modelagem de um sistema de proteção nesta poderosa rotina computacional.

Conforme pode ser visto no fluxograma da Fig. 4.5, o CAPE<sup>®</sup> será usado como motor do algoritmo de proteção. Sendo assim, a rotina-motor lançará mão dos *indivíduos*, fornecidos pela rotina que implementa o AG, e testará a sua adaptabilidade ao problema em questão. Como retorno, parâmetros relativos ao número de descoordenações, número de violações do intervalo de coordenação, tempo de atuação da zona de proteção primária, relativos ao indivíduo analisado são passados ao AG.

Como função objetivo do problema, utilizou-se uma equação de OLIVEIRA et al. (2010) reproduzida a seguir:

$$FO = \alpha \times N_d + \beta \times N_v + \phi \times T_p + \delta \times T_s \quad (4.9)$$

Vale aqui uma observação importante. Utiliza-se neste trabalho, que tem por objetivo de-

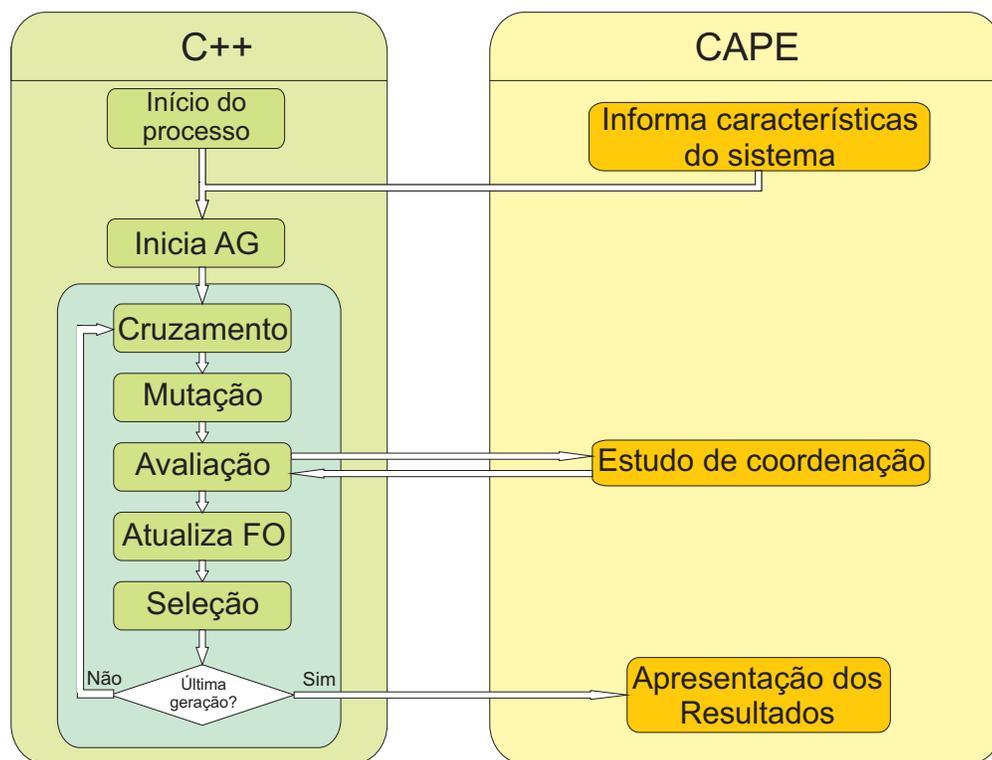


Fig. 4.5: Fluxograma de comunicação entre o Algoritmo Genético e o CAPE<sup>®</sup>.

terminar a coordenação da proteção de dispositivos de sobrecorrente e de distância, a mesma função objetivo utilizada para determinar a coordenação apenas de relés de sobrecorrente utilizada por OLIVEIRA et al. (2010). O que parece uma contradição, ou até mesmo um equívoco, é explicado pelo significado dos parâmetros da equação (4.9). O parâmetro  $N_d$  por exemplo, no trabalho de OLIVEIRA et al. (2010), diz respeito apenas as descoordenações dos relés de sobrecorrente entre si. No caso da proteção de sobrecorrente e distância, o CAPE<sup>®</sup> deve ser configurado de modo tal que este parâmetro leve em consideração tanto as descoordenações entre os relés de sobrecorrente, como deste com os de distância. Não foram consideradas as descoordenações dos dispositivos de distância entre si pois este controle é realizado através da limitação do dicionário de cada parte do *cromossomo* relativo às funções de distância.

Quando comparadas as equações (4.9) e (4.1), é possível verificar uma relação direta entre alguns termos das duas. O primeiro termo de (4.9),  $N_d$ , está relacionado ao segundo e terceiro termos de (4.1). Já o terceiro termo de (4.9) está relacionado ao primeiro termo de (4.1). Já o segundo,  $N_v$ , e o quarto termo,  $T_s$ , de (4.9), não tem equivalentes em (4.1). Dessa forma, é esperado que os valores obtidos nos dois casos sejam diferentes, pois, embora ambas as equações sejam válidas ao problema em questão, a equação (4.9) abrange mais termos que (4.1).

As descoordenações entre relés de sobrecorrente e de distância caracterizam-se, de acordo

com PÉREZ and URDANETA (2001), pela atuação antecipada do relé de sobrecorrente em relação à segunda zona do relé de distância e, a atuação antecipada do relé de sobrecorrente, quando funcionando como proteção de retaguarda, em relação a primeira zona de atuação do relé de distância que atua como relé de proteção principal. Estas duas condições foram simplificadas em KHEDERZADEH (2006), sendo necessário apenas a primeira delas, como mostrado na Fig. 4.1.

Para a utilização do CAPE<sup>®</sup> como rotina auxiliar ao algoritmo de proteção, foi necessário a criação de um mecanismo de comunicação entre as duas rotinas. O processo da criação desta janela de comunicação é o que segue.

### Esquema de Comunicação de uma rotina auxiliar com o CAPE<sup>®</sup>

Apesar de não permitir diretamente a comunicação com uma segunda rotina, o CAPE<sup>®</sup> possui duas funcionalidades que permitiram que a comunicação entre rotinas fosse obtida. Essas funcionalidades são: acesso a todas as rotinas do *software* via teclado e possibilidade do agrupamento de um conjunto de atividades em uma única rotina através de um arquivo *.mac*.

Para a implementação dos arquivos *.mac*, a ELECTROCON desenvolveu uma linguagem de programação própria conhecida como: Linguagem de Programa dos Usuários CAPE<sup>®</sup> (CUPL). Essa linguagem baseia-se nas linguagens *Fortran* e *Pascal* e, tem como principal fonte de referência o fórum do grupo de usuários do *software*. Através da CUPL é possível montar funções contendo uma sequência de tarefas a serem executadas pelo CAPE<sup>®</sup>. A montagem desse arquivo *.mac* é responsabilidade da rotina C++ que implementa o AG.

Montado o arquivo *.mac*, é necessário agora que o CAPE<sup>®</sup> o execute. Para isto, foram utilizadas as funções da biblioteca MSDN, que simulam um teclado virtual.

O segundo sistema-teste utilizado durante o trabalho de pesquisa é a parte destacada na Fig. 4.6, integrante do Regional Maceió, pertencente a Eletrobras Distribuidora de Alagoas, antiga CEAL. Esta parte consiste nos seguintes barramentos de 69 kV: Seccionadora Tabuleiro dos Martins (TBM), Cruz das Almas (CZA) e Pajussara (PJA). Para este sistema, cujos parâmetros de linha e dados relativos as correntes de curto-circuito, são apresentados nas Tab. 4.4 e 4.5, foi considerado que cada linha é protegida por um relé de distância, do tipo Mho, e um de sobrecorrente, totalizando assim, seis relés na rede.

Os resultados relativos tanto ao sistema da Fig. 4.4, como da Fig. 4.6, são apresentados no Capítulo 5.

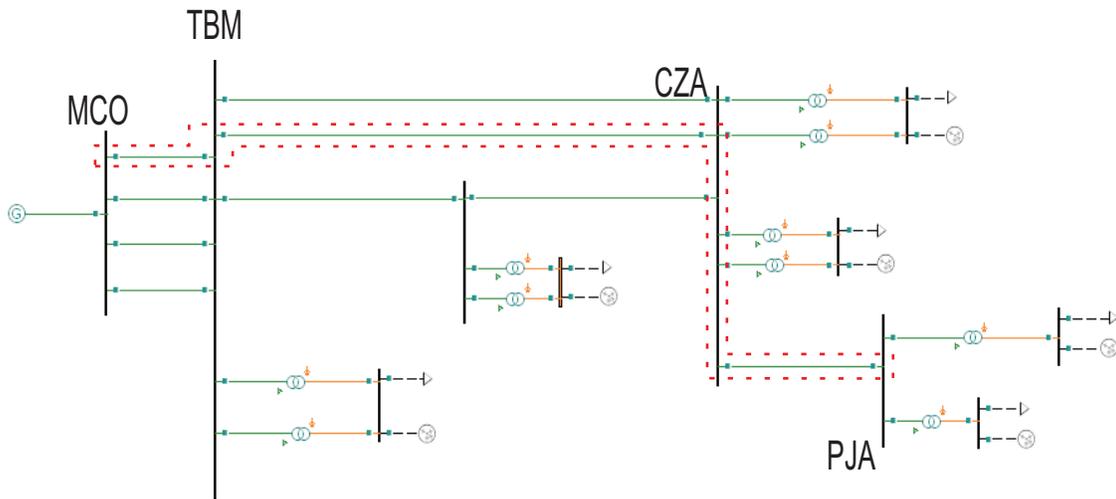


Fig. 4.6: Sistema teste CEAL.

Tab. 4.4: Dados das linhas do sistema teste da Fig. 4.6.

Trecho	Seq. (+)		Seq. (-)	
	R( $\Omega$ )	X( $\Omega$ )	R( $\Omega$ )	X( $\Omega$ )
G-MCO	0,1428	2,7947	0	19,9962
MCO-TBM	0,0286	0,1904	0,1095	0,7618
TBM-CZA	3,1184	7,5033	6,0322	28,1756
CZA-PJA	1,9568	4,7134	3,7898	17,7062

Tab. 4.5: Dados das linhas do sistema teste da Fig. 4.6.

Barra	$I_{ccMAX}(A)$
TBM	13995,5
CZA	7485,1
PJA	5151,43

# Capítulo 5

## Resultados

### 5.1 Simulações

#### 5.1.1 Determinação dos ajustes da proteção utilizando o MATLAB<sup>®</sup>

Um sequência de simulações usando como parâmetros genéticos os apresentados na Tab. 4.2 foi realizada a fim de verificar possíveis variações na determinação dos ajustes ótimos da coordenação do sistema estudado (ver Fig. 4.4). Durante esta etapa do trabalho, não houve variações relevantes, fato este que sugere serem esses, os parâmetros pertencentes à configuração ótima para esta rede.

De acordo com os resultados obtidos nas simulações, o algoritmo foi capaz de conseguir a coordenação entre todos os dispositivos presentes na rede de proteção. Ou seja, de acordo com os ajustes sugeridos, fica garantido que a operação dos relés de retaguarda só acontecerão caso a primária venha a falhar. Valores muito próximos do intervalo de coordenação estipulado, 0,3s, foram conseguidos com pequenas variações.

Outra constatação importante é a confirmação da diminuição do tempo de atuação primária, conseguida a partir da possibilidade de variação do alcance da primeira zona de atuação dos relés de distância. Como pode-se constatar na Tab. 5.1, houve uma redução tanto nos tempos de atuação primária, como nos intervalos de coordenação, quando os resultados são comparados com os obtidos mediante técnicas convencionais apresentadas em (ABYANEH et al., 2008) e (CHABANLOO et al., 2008).

Quando comparados pelo valor da função objetivo da solução encontrada, obteve-se um valor de 7,085 s usando a metodologia proposta frente a 14,042 s do trabalho de (ABYANEH

et al., 2008).

Em termos gráficos o resultado da simulação é o apresentada nas Figs. 5.1. Da Fig. 5.1 pode-se verificar a perfeita coordenação entre todos os relés de sobrecorrente. Para uma melhor apresentação gráfica, os relés de 8 a 14, que atuam em direção contrária à dos relés de 1 a 7, tiveram suas curvas de atuação representadas com eixos no mesmo sentido dos primeiros. Para uma representação que dê a idéia de direcionalidades opostas entre estes dois conjuntos de relés, os deveria-se rebater o gráfico da Fig. 5.1(b) em torno dos dois eixos.

O alcance da primeira zona de atuação dos dispositivos de distância, parâmetro determinado pelo AG proposto, foi de no máximo 83% na linha protegida. Já a segunda zona de atuação deste dispositivo, que foi calculado mediante técnicas tradicionais, é fixa em 120%. O tempo de atuação do relé de distância em sua segunda zona de atuação foi considerada como sendo 0,3 s.

Tab. 5.1: Resultados para simulação utilizando o MATLAB<sup>®</sup>.

Relé	$t(s)$	Red(%)	P	R	$\Delta t_{pr}(s)$	$\Delta t_{prOCIDSC}(s)$
1	0,496	-15,85	8	7	0,007	0,023
2	1,268	4,16	8	9	0,003	0,236
3	0,834	-13,31	1	6	0,012	0,134
4	0,932	40,45	2	7	0,016	1,004
5	0,159	-79,24	2	1	0,002	0,721
6	0,574	-24,70	9	10	0,021	0,627
7	0,007	-99,01	3	2	0,0018	1,049
8	0,526	-31,02	10	11	0,003	0,440
9	0,046	-86,78	4	3	0,063	0,282
10	0,418	-39,27	11	12	0,001	0,582
11	0,489	-50,28	5	4	0,023	1,827
12	0,686	-42,10	12	13	0,008	0,936
13	0,572	22,62	12	14	0,125	0,736
14	0,078	-86,88	6	5	0,000	0,536
-	-	-	6	14	0,214	0,126
-	-	-	13	8	0,0019	0,450
-	-	-	14	1	0,427	0,645
-	-	-	14	9	0,000	0,338
-	-	-	7	5	0,000	0,357
-	-	-	7	13	0,0012	0,550

Em termos de eficiência do algoritmo, verifica-se uma oscilação considerável que pode ser vista na Fig. 5.2. Esta oscilação pode ser atribuída ao número de variáveis a serem determinadas pelo AG (56 parâmetros no total). Apesar do comportamento oscilatório, verifica-se que após

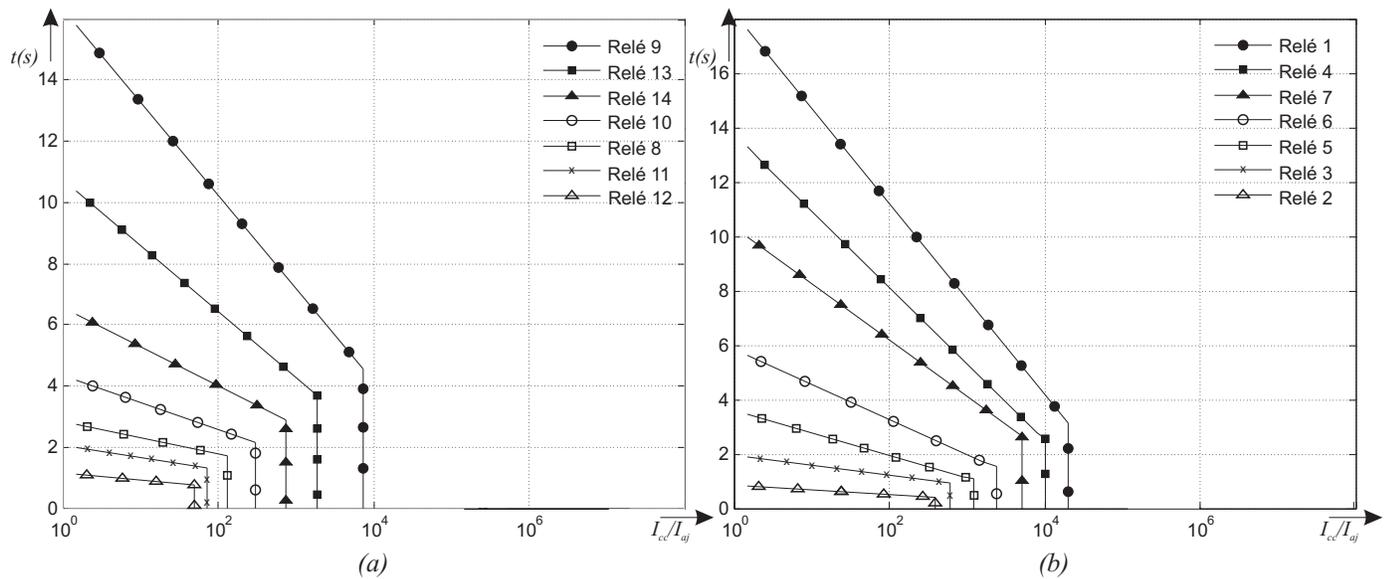


Fig. 5.1: Coordenograma dos dispositivos de sobrecorrente da Fig. 4.4.

um determinado número de gerações (aproximadamente 150), o algoritmo encontra um grau de estabilidade maior e assim, a solução ótima do problema analisado.

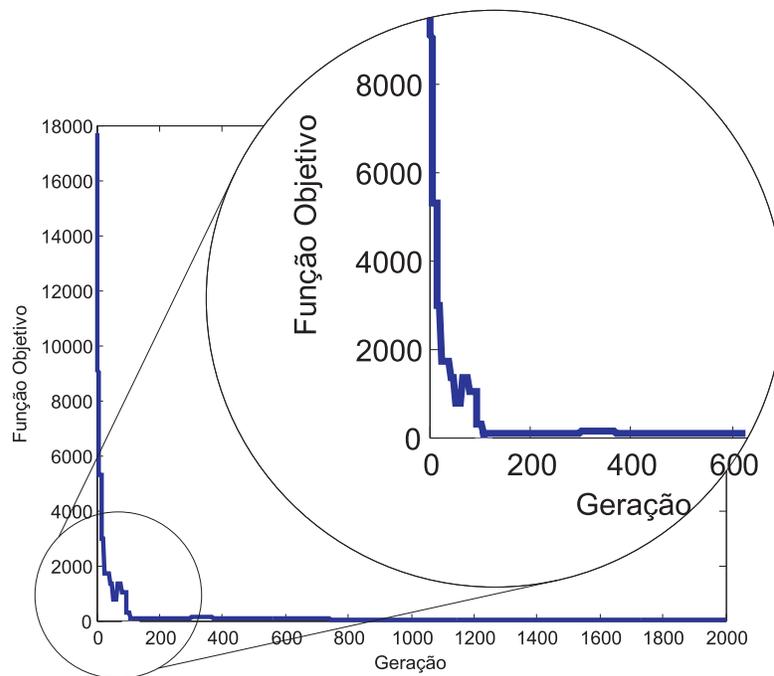


Fig. 5.2: Evolução do algoritmo de proteção implementado pelo MATLAB®.

Observe que existe uma grande diferença entre o valor inicial e o valor final obtidos pelo AG. Esta variação pode ser justificada pela relação entre o número de variáveis a serem determinadas

(56 parâmetros para dispositivos de sobrecorrente e de distância), e o número de indivíduos em cada geração (100 indivíduos antes do cruzamento). Uma vez que a relação variáveis/ $n^0$  de indivíduos ser aproximadamente 50%, valor considerado extremamente alto. Dessa forma, é comum que o valor inicial da função objetivo seja um valor extremamente elevado uma vez que os indivíduos da primeira geração (gerados aleatoriamente) ainda não carregam nenhuma informação a respeito do problema em questão.

### 5.1.2 Determinação dos ajustes da proteção utilizando o CAPE<sup>®</sup> como motor

Analogamente ao que foi realizado usando o MATLAB<sup>®</sup>, a rotina C++ , que implementa o AG e o esquema de comunicação com o CAPE<sup>®</sup>, foi empregada para realização do estudo de coordenação da proteção da rede mostrada na Fig. 4.6. Como mencionado anteriormente, a rede é composta por três relés de sobrecorrente e três de distância, localizados no início da linha a ser protegida.

Como o número de parâmetros a serem determinados neste caso é bem menor do que no caso do sistema da Fig. 4.4, foram necessárias apenas 50 gerações como apresentados na Tabela 5.2, e em forma gráfica pela Fig. 5.3.

Tab. 5.2: Parâmetros do Algoritmo genético para o sistema da Fig. 4.4.

Parâmetros do AG	
População inicial	100
$N^0$ de Gerações	50
Taxa de Crescimento	25%
Taxa de Mutação	1%

Com pode-se verificar na Tab. 5.3, o algoritmo de proteção foi capaz de determinar com sucesso os parâmetros necessários para que a rede não apresente descoordenações entre seus dispositivos.

O uso do CAPE<sup>®</sup> como rotina de verificação do grau de aptidão dos dispositivos por este trabalho, garante à solução um alto índice de aplicabilidade uma vez que o *software* implementa características reais para cada dispositivo de proteção. Para uso nesta simulação, foram considerados os relés SEL-211 desempenhando a função de sobrecorrente e o GCY12A da General Electric como relé de distância.

Após uma sequência de simulações, o algoritmo obteve como solução ótima o *indivíduo* que apresenta as curvas de atuação da Fig. 5.3 para os relés de sobrecorrente e de distância. Uma

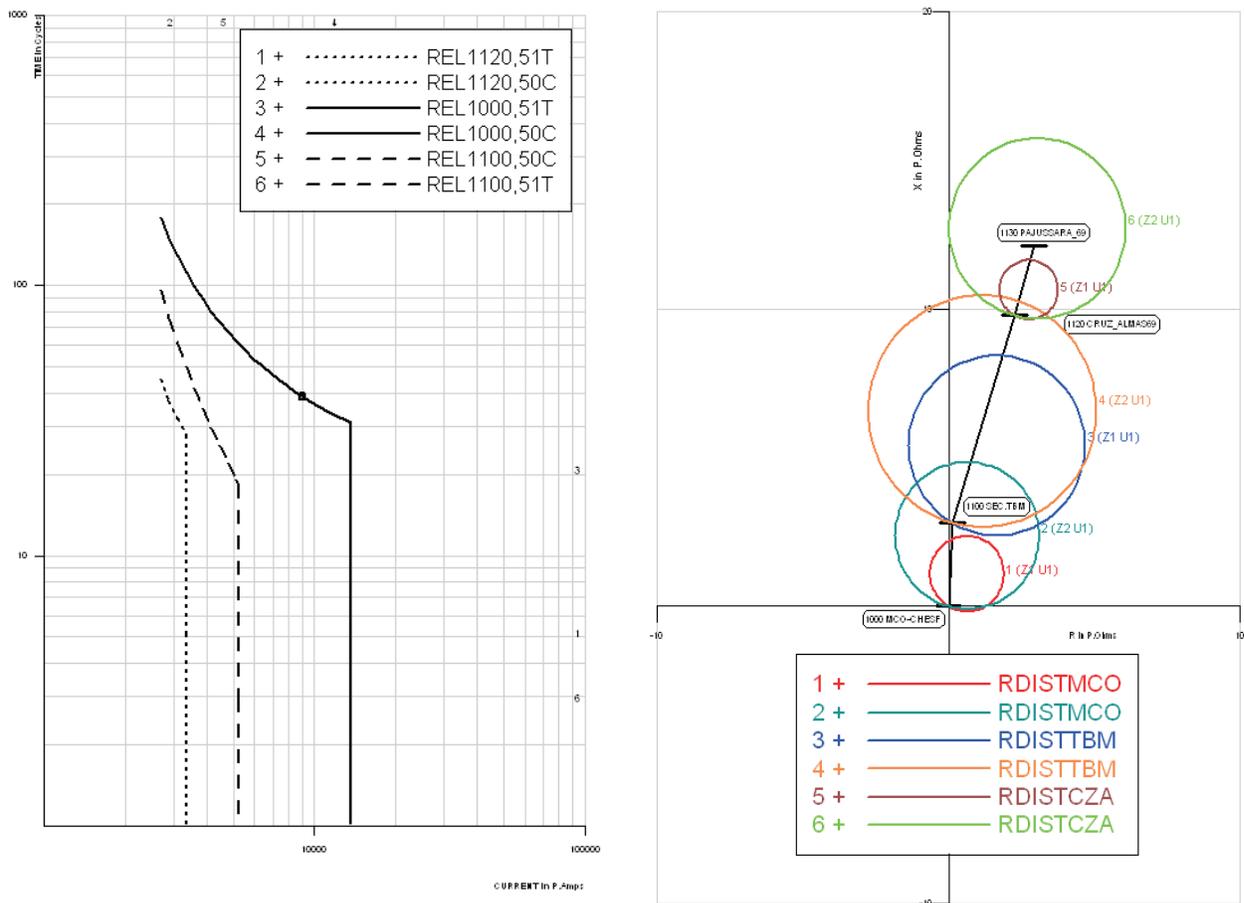


Fig. 5.3: Curva de atuação dos dispositivos de proteção da Fig. 4.6: (a) relés de sobrecorrente, (b) relés de distância.

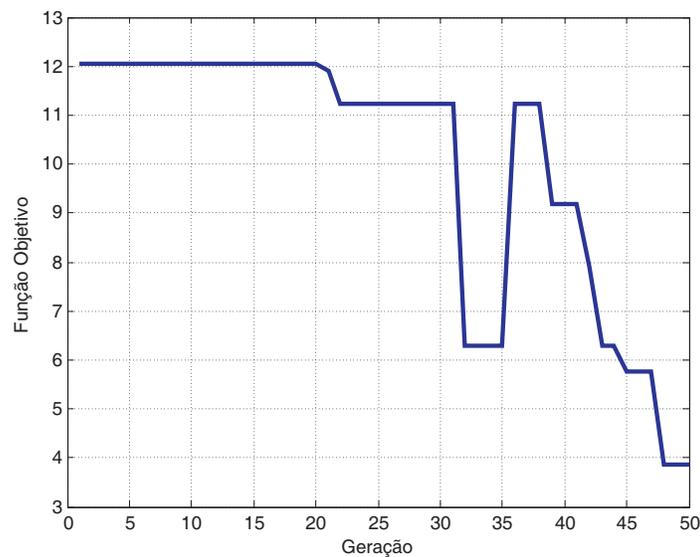
dessas simulações, foi utilizada para a confecção do gráfico da Fig. 5.4 que apresenta a evolução do algoritmo genético na obtenção da coordenação da proteção do sistema em questão. Como pode-se ver, o algoritmo encontrou a solução ótima na 47<sup>a</sup> iteração e esta foi mantida até o final do processo iterativo. Este resultado é considerado o verdadeiramente ótimo uma vez que uma sequência de 10 simulações foi realizada e foi este o resultado encontrado em todas elas.

Em termos dos tempos de atuação dos dispositivos de sobrecorrente estes são apresentados na Tab. 5.3. É possível verificar pela terceira coluna que o intervalo de coordenação obtido é muito próximo aos valores adotados como ótimos 0,3s. Lembrando que o intervalo de coordenação é dado pelas equações (2.5) e (2.8).

Quando comparados os gráficos das figuras 5.2 e 5.4, observa-se que no segundo caso, a primeira geração já partiu de valor relativamente próximo ao valor final da função objetivo. Neste caso acontece o fenômeno contrário ao analisado no primeiro caso (sistema de 6 barras e 7 linhas). Como o número de variáveis a ser determinado pelo AG é 12 e o número de

Tab. 5.3: Tempos de atuação dos relés de sobrecorrente da Fig. 4.6.

Falta $3\phi T$ no início da LT					
Relé	$t(s)$	P	R	$\Delta t_{pr}(s)$	$\Delta t_{prOCIDSC}(s)$
1	0,496	-	-	-	-
2	0,180	2	1	0,587	0,471
3	0,537	3	2	0,488	0,155
		3	1	1,613	2,125
Falta $3\phi T$ no alcance máximo dos relés de distância					
Relé	$t(s)$	P	R	$\Delta t_{pr}(s)$	$\Delta t_{prOCIDSC}(s)$
1	0,708	-	-	-	-
2	0,742	2	1	0,980	0,717
3	0,745	3	2	0,848	1,697
		3	1	2,232	2,952

Fig. 5.4: Evolução do algoritmo de proteção utilizando o CAPE<sup>®</sup> como motor.

indivíduos na primeira geração, antes do cruzamento é 100, temos uma relação variáveis/ $n^0$  de indivíduos aproximadamente igual a 10%, ou seja, apesar dos indivíduos da primeira geração não carregarem nenhuma característica inerente ao problema, como o número de indivíduos é muito maior que o de incógnitas, a probabilidade de um indivíduo apresentar uma solução relativamente boa é bastante considerável.

# Capítulo 6

## Conclusões

### 6.1 Conclusões

Este trabalho apresentou uma nova técnica de realização de estudos de coordenação da proteção para redes compostas por relés de sobrecorrente e de distância.

Utilizando-se das funcionalidades dos algoritmos genéticos em conjunto com a variação do alcance da primeira zona de atuação dos dispositivos de distância, obteve-se uma redução considerável no tempo total de atuação dos dispositivos de sobrecorrente. Este fato faz com que a possibilidade de variação deste parâmetro possibilite tornar o sistema de proteção mais veloz.

Além de possibilitar a diminuição do múltiplo de tempo dos dispositivos de sobrecorrente, a variação do alcance da primeira zona de atuação dos relés de distância favorecem ainda a alteração do tipo de curva característica dos primeiros dispositivos. Desta forma, observa-se que a diminuição do tempo de atuação obtido, tem grande contribuição da possibilidade do uso de tipos de curvas características diferentes para os diversos relés de sobrecorrente empregados na rede.

Para o caso de redes sem geração distribuída, como é o caso do sistema da Fig. 4.6, observa-se que o alcance da primeira zona de atuação dos dispositivos de distância assumiu valores muito próximos ao limite máximo empregado no algoritmo. Este fato já era de certa forma esperado, uma vez que sofrendo a influência de apenas um gerador, quanto maior o alcance da primeira zona de atuação dos dispositivos de distância, menores serão os múltiplos de tempo assumidos pelos relés de sobrecorrente. No limite, isto é, quando o tempo de atuação dos relés de distância não influenciarem nos dispositivos de sobrecorrente, estes apresentaram os menores valores de

tempo de atuação possível.

A dinâmica de busca empregada pelos algoritmos genéticos torna a rotina de coordenação uma importante ferramenta na solução de problemas de otimização combinatória, como é o caso da coordenação da proteção. Por se basear num método de busca, os algoritmos genéticos, esta rotina é perfeitamente aplicável a qualquer sistema proteção. Bastando para tanto, que o usuário realize a correta modelagem do sistema no CAPE e realize os ajustes nas macros. Desta forma, é possível deixar o processo do ajuste dos dispositivos de proteção totalmente transparente ao usuário final da aplicação.

## 6.2 Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros é possível destacar os seguintes itens:

- Avaliar a influência do comprimento do circuito na diminuição, ou não, dos tempos de atuação para dispositivos de sobrecorrente;
- Aplicar a técnica em redes com outras funções de proteção como: diferencial de linha, sobre e subtensão, entre outras;
- Usar a metodologia de variação do alcance da primeira zona de atuação dos relés de distância com as técnicas de proteção adaptativa e posterior avaliação do desempenho do sistema;
- Representar o sistema de potência utilizando o RTDS (*Real Time Digital Simulator*) (RTDS);
- Desenvolvimento de sistema completo, *hardware* e *software*, utilizando as técnicas de proteção adaptativa;
- Aplicação do conjunto *hardware/software* em um sistema de potência real.

Por fim, pode-se destacar que o uso desta ferramenta automatizada vem de encontro à tendência de modernização atual, uma vez que a árdua tarefa desempenhada pelos engenheiros de proteção passa a ser realizada automaticamente e os seus resultados avaliados por uma rotina consagrada no estudo de proteção de sistemas elétricos.

# Referências Bibliográficas

- ABB. *Protection Application Handbook*, volume 6, chapter Protection General, page 84. 1999.
- H.A. ABYANEH, S. KAMANGAR, F. RAZAVI, and R.M. CHABANLOO. A new genetic algorithm method for optimal coordination of overcurrent relays in a mixed protection scheme with distance relays. *Universities Power Engineering Conference, 2008. UPEC 2008. 43rd International*, pages 1–5, Setembro 2008.
- M. A. D. ALMEIDA. *Apostila de Proteção de Sistemas Elétricos*, volume 1, chapter Aplicações de relés de sobrecorrente na proteção de alimentadores, page 11. UFRN, 2000.
- P. M. ANDERSON. *Power System Protection*. IEEE Press, 1999.
- H. D. M. BRAZ. Algoritmo genético para configuração ótima de redes de distribuição de energia elétrica. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, 2003.
- R.M. CHABANLOO, H.A. ABYANEH, S.S.H. KAMANGAR, and F. RAZAVI. A new genetic algorithm method for optimal coordination of overcurrent and distance relays considering various characteristics for overcurrent relays. *Power and Energy Conference, 2008. PECon 2008. IEEE 2nd International*, pages 569 –573, Dezembro 2008.
- A. A. CHÁVEZ, J. L. GUARDADO, D. SEBASTIÁN, and E. MELGOZA. Distance protection coordination using search methods. *IEEE Latin America Transactions*, 6(1):51–58, Março 2008.
- D. M. S. FONTAN. Reconfiguração de sistemas de distribuição utilizando um algoritmo evolutivo. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, 2008.
- J. H. HOLLAND. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press, 1975.
- IEC. Single input energizing quantity measuring relays with dependent or independent. *IEC Publication*, 1989.

- IEEE. Ieee standard inverse-time characteristic equations for overcurrent relays. *IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE*, 1996.
- IEEE. Ieee guide for protective relay applications to transmission lines. *IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE*, 2000.
- M KHEDERZADEH. Back-up protection of distance relay second zone by directional overcurrent relays with combined curves. *Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE*, Outubro 2006.
- G. KINDERMANN. *Proteção de Sistemas Elétricos*, volume 1, chapter Relé de Sobrecorrente, pages 55–178. UFSC, 2005.
- P. K. MAEZONO. Proteção de linhas de transmissão. Technical report, Virtus Consultoria e Serviços Ltda., 2001.
- R. MOHAMMEDI, H.A. ABYANEH, F. RAZAVI, AL-DABBAGH, and S. H. H. SADEGHI. Optimal relays coordination efficient method in interconnected power systems. *Journal of ELECTRICAL ENGINEERING*, 61(2):75–83, 2010.
- N. L. S. OLIVEIRA, F. C. SOUZA Jr, and B. A. SOUZA. Automatização da coordenação da proteção de sobrecorrente em sistemas elétricos de distribuição utilizando algoritmos genéticos. *IEEE/PES TeD 2010 - Latin America*, Novembro 2010.
- L.G. PÉREZ and A.J. URDANETA. Optimal computation of distance relays second zone timing in a mixed protection scheme with directional overcurrent relays. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 16(3):385–388, Julho 2001.
- K. M. SILVA. Estimaco de fasores baseada na transformada wavelet para uso na proteo de distância de linhas de transmisso. Tese de doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, 2009.
- Z. YANG, D. SHI, and X. DUAN. Optimal coordination of distance relays in interconnected power systems. *Power System Technology, 2006. PowerCon 2006. International Conference on*, pages 1–5, Novembro 2006.

# Apêndice A

## Trabalhos publicados relacionados à pesquisa

**SOUZA Jr., F. C.;** SOUZA, B. A.; "*Algoritmo Multi Objetivo para Coordenação Ótima da Proteção de Sistemas Mistos*", Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia (CMNE) 2011, Coimbra, Portugal, Junho, 2011 (***Aceite***)

**SOUZA Jr., F. C.;** SOUZA, B. A.; "*Optimal coordination of mixed scheme protection using Genetic Algorithm*", International Conference on Power Systems Transients (IPST) 2011, Delft, Holanda, Junho, 2011 (***Aceite***)

**SOUZA Jr., F. C.;** SOUZA, B. A.; "*Influência do alcance da primeira zona dos relés de distância na velocidade do sistema de proteção*", Congresso Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica (CBQEE) 2011, Cuiabá - MT, Julho, 2011 (***Aceite***)

OLIVEIRA, N. L. S.; **SOUZA Jr., F. C.;** SOUZA, B. A.; "*Automatização da Coordenação da Proteção de Sobrecorrente em Sistemas Elétricos de Distribuição utilizando Algoritmos Genéticos*", IEEE/PES TeD 2010 Latin America, São Paulo - SP, Novembro, 2010 (***Aceite e apresentado***)