

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Dissertação de Mestrado

Algoritmo Genético de Coordenação Ótima da Proteção de
Sobrecorrente em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica

Nelson Luiz da Silva Oliveira

Campina Grande – Paraíba – Brasil
© Nelson Luiz da Silva Oliveira, Novembro de 2010

Nelson Luiz da Silva Oliveira

Algoritmo Genético de Coordenação Ótima da Proteção de
Sobrecorrente em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica

*Dissertação de mestrado 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 da Energia

Benemar Alencar de Souza, D. Sc

Orientador

Campina Grande – Paraíba – Brasil
Novembro de 2010

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

O48a

Oliveira, Nelson Luiz da Silva

Algoritmo genético de coordenação ótima da proteção de sobrecorrente em sistemas de distribuição de energia elétrica / Nelson Luiz da Silva Oliveira. — Campina Grande, 2010.

44 f. il.

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

Referências.

Orientador: Prof. Dr. Benemar Alencar de Souza.

1. Algoritmos Genéticos. 2. Coordenação Ótima da Proteção.
3. Sistemas de Distribuição de Energia. I. Título.

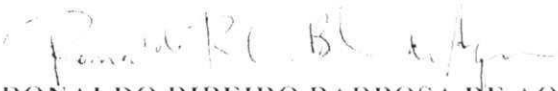
CDU 621.316(043)

ALGORITMO GENÉTICO DE COORDENAÇÃO ÓTIMA DA PROTEÇÃO DE
SOBRECORRENTE EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

NELSON LUIZ DA SILVA OLIVEIRA

Dissertação Aprovada em 17.12.2010


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


RONALDO RIBEIRO BARBOSA DE AQUINO, D.Sc., UFPE
Componente da Banca


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

WELLINGTON SANTOS MOTA, Ph.D., UFCG
Componente da Banca (Ausência Justificada)

CAMPINA GRANDE - PB
DEZEMBRO - 2010

RESUMO

A coordenação da proteção de sobrecorrente é formulada nesta dissertação como um problema de otimização. O objetivo é determinar a curva característica de cada relé que compõe a cadeia de proteção de modo a garantir coordenação entre o maior número possível desses dispositivos empregando o menor tempo seguro de coordenação e desse modo tornar o sistema de proteção confiável, seletivo e veloz. Para resolver o problema de otimização é proposto um Algoritmo Genético em que as restrições são incorporadas à função de aptidão mediante penalidades.

Palavras-chave: Algoritmos genéticos, coordenação ótima da proteção, sistemas de distribuição de energia.

A minha família

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus, sem o qual nada seria possível.

A meus pais, Vescio e Maria de Lourdes, e minha irmã, Ana, pelo amor, carinho, compreensão e incentivo.

Ao professor Benemar Alencar pela orientação, paciência e dedicação que tanto contribuiu para minha formação profissional e realização deste trabalho.

A minha amada esposa, Priscila, por ser companheira, amiga e amorosa, sem medir tempo nem esforços.

Aos amigos de Pós-graduação, pelo convívio prazeroso. Em especial ao amigo Francisco, pelas valiosas contribuições, essenciais ao desenvolvimento deste trabalho.

À CAPES, pelo suporte financeiro durante a realização deste trabalho.

Nelson Luiz da Silva Oliveira

ABSTRACT

The coordination of overcurrent protection is formulated in this dissertation as an optimization problem. The objective is to determine the characteristic curve of each relay in the protection chain to ensure coordination between the largest possible number of devices using the least safe coordination time and thus, make the system protection reliable selective and fast. To solve the optimization problem a genetic algorithm is proposed, in which constraints are incorporated into the fitness function through penalty.

Palavras-chave: Distribution systems, Genetic algorithms, optimal protection coordination.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	ix
Capítulo 1.....	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	2
1.3 RELÉS DE SOBRECORRENTE DE TEMPO INVERSO: COORDENAÇÃO RELÉ-RELÉ.....	3
1.3.1 Procedimentos para coordenação dos relés de sobrecorrente de tempo inverso	4
1.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
1.5 OBJETIVOS.....	14
Capítulo 2	15
2.1 MODELAGEM COMPUTACIONAL.....	16
2.1.1 Representação cromossômica e Função Objetivo	18
2.1.2 Operadores Genéticos: Seleção Natural, Cruzamento e Mutação	20
2.1.3 Convergência do método e condição de parada	23
Capítulo 3	25
3.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	25
3.2 MÉTODO DE SOLUÇÃO PROPOSTO	25
3.2.1 Codificação decimal	25
3.2.2 Função Objetivo	28
3.2.3 Fluxograma.....	30
Capítulo 4	31
4.1 SISTEMA TESTE 3 RELÉS	31
4.2 SISTEMA TESTE 5 RELÉS	34
Capítulo 5	37
Referências Bibliográficas.....	38
Apêndice A.....	40
Apêndice B	43
Apêndice C	44

LISTA DE FIGURAS

1.1	Cadeia de proteção composta por dois níveis de retaguarda (relés <i>B</i> e <i>C</i>).....	3
1.2	Determinação da curva característica do relé <i>A</i>	4
1.3	Determinação da curva característica do relé <i>B</i>	6
1.4	Coordenação de relés de sobrecorrente de tempo inverso.....	6
2.1	Representação do método da roleta.....	21
2.2	Cruzamento convencional.....	22
2.3	Mutação convencional.....	22
3.1	Estrutura cromossômica	26
3.2	Cadeia de proteção composta por dois níveis de retaguarda (relés <i>B</i> e <i>C</i>).....	27
3.3	Exemplo de cruzamento	28
3.4	Fluxograma do algoritmo genético de otimização da proteção de sobrecorrente em sistemas de distribuição.....	30
4.1	Sistema teste com 3 relés	31
4.2	(a) Cromossomo da configuração ótima. (b) Coordenograma associado à coordenação ótima.....	32
4.3	Desempenho do algoritmo genético	33
4.4	Sistema teste hipotético com 5 relés.....	34
4.5	(a) Cromossomo da configuração ótima. (b) Coordenograma associado à coordenação ótima.....	35
4.6	Desempenho do algoritmo genético	35
4.7	Gráfico do mínimo valor da função objetivo versus número da geração.....	36
A.1	Sistema teste com 3 relés.....	40
A.2	Sistema teste hipotético com 5 relés.....	41

LISTA DE TABELAS

1.1	Resumo da revisão bibliográfica sobre coordenação ótima da proteção de sistemas elétricos de potência.....	13
2.1	Equivalência de termos entre biologia e AGs	18
2.2	Codificação e decodificação para o exemplo	19
3.1	Decodificação do cromossomo	26
4.1	Tempos de coordenação da proteção.....	33
4.2	Tempos de coordenação da proteção.....	36
A.1	Dados de linha e do gerador.....	41
A. 2	Relação de TCs utilizadas	41
A.3	Dados de linha e do gerador.....	42
A.4	Relação de TCs utilizadas	42
B.1	Parametrização do AG.....	43
B.2	Parametrização do AG.....	43

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A proteção dos Sistemas Elétricos de Potência é feita por esquemas de proteção basicamente comandados por relés os quais têm por função identificar falhas, localizá-las da maneira mais exata possível, informar sua ocorrência através do disparo de sinalizações e, a depender do tipo de relé, comandar a abertura dos disjuntores que irão isolar o defeito mantendo o restante do sistema em operação normal. São vários os tipos de relés, empregando tecnologias e princípios de funcionamento distintos. Dentre esses podemos citar os relés de sobrecorrente, tema desta dissertação.

Relés de sobrecorrente são todos os relés que atuam para uma corrente maior que a do seu ajuste, sendo esta atuação de forma instantânea ou temporizada, conforme a necessidade. A depender da importância do elemento de sistema protegido, a proteção pode ser estruturada em níveis conhecidos como proteção *primária* e de *retaguarda* sendo necessário adotar uma escada de tempo de atuação em que, ao ocorrer uma falta, a proteção primária seja quem atue e só no caso desta falhar é que a de retaguarda opere, de modo a deixar o menor número possível de consumidores sem energia elétrica. A essa estratégia de proteção, em que para qualquer corrente de curto-circuito o relé mais próximo do defeito atua prioritariamente dá-se o nome de *Coordenação da Proteção* e a mínima diferença de tempo (Δt) que dois relés mais próximos da cadeia de proteção devem ter para garantir a coordenação é conhecida por *Tempo de Coordenação*. Numa cadeia de proteção procura-se sempre utilizar o menor valor seguro para o tempo de coordenação. Apesar dos relés eletrônicos e digitais possibilitarem o uso de um tempo de coordenação menor, na prática, muitas empresas de energia elétrica, para favorecer à garantia, adotam o tempo de coordenação dos relés eletromecânicos, 0,4 a 0,5 segundos (Kindermann, 2005).

Nas estratégias tradicionalmente empregadas de coordenação da proteção, o especialista deve analisar os dados obtidos em estudos de curto-circuito, fluxo de carga e simulações de contingências, considerando diversas condições de operação do sistema elétrico. Para encontrar os

ajustes da coordenação correspondentes a cada uma das condições de operação do sistema são necessárias diversas iterações até que uma solução satisfatória seja alcançada. No entanto, é necessário verificar a coordenação para as várias condições de operação do sistema, para que possa ser definido o conjunto de ajustes que atenda a todas elas simultaneamente.

Procedimentos do tipo tentativa-e-erro, em que o especialista deve analisar os resultados do cálculo de curto-circuito, do fluxo de carga e de simulações de contingências são ineficientes e, algumas vezes, até mesmo ineficazes, por ser difícil contemplar todas as situações possíveis. Se não bastasse o fato do ajuste da proteção de sobrecorrente ser uma tarefa por si só bastante laboriosa, sua aplicação em redes de distribuição conta com outro agravante: o comportamento dinâmico dessas redes. Em virtude das possibilidades de manobras e a necessidade constante de expansão, os sistemas de distribuição exigem adequações frequentes em sua proteção.

Uma alternativa viável em substituição aos métodos tradicionais é a aplicação de técnicas de inteligência artificial (IA), que vêm sendo largamente empregadas em diversas áreas do conhecimento, notadamente na área de sistemas de potência. Estas técnicas caracterizam-se como algoritmos computacionais robustos que emulam aspectos humanos, tais como: percepção, raciocínio, aprendizado, evolução e adaptação.

Nesta dissertação a coordenação da proteção é enunciada como um problema de otimização combinatória a ser resolvido por um algoritmo genético que otimiza os parâmetros diretamente empregados na escolha das curvas características dos relés.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este capítulo contém uma introdução sobre o problema; uma breve descrição sobre a organização do trabalho; um resumo sobre o método de coordenação relé – relé aplicado aos relés de sobrecorrente de tempo inverso; a revisão bibliográfica do tema e a definição dos objetivos da dissertação.

O capítulo 2 traz uma fundamentação teórica acerca do método de otimização adotado: algoritmos genéticos.

No capítulo 3 são apresentados os sistemas de distribuição utilizados nos testes, a composição da função objetivo, a codificação da solução e os operadores genéticos empregados, descrevendo desse modo, a implementação computacional do método.

O capítulo 4 é destinado à validação do método proposto, sendo analisados os resultados de sua aplicação no sistema teste proposto.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões. Possibilidades de continuidade da pesquisa são indicadas como propostas para trabalhos futuros.

1.3 RELÉS DE SOBRECORRENTE DE TEMPO INVERSO: COORDENAÇÃO RELÉ-RELÉ

Em sistemas de energia elétrica radiais um esquema de proteção muito empregado consiste em situar a proteção de retaguarda nas subestações a montante daquela onde está concentrada a proteção primária (mais próxima da falta). No caso de falha da proteção primária, a proteção de retaguarda na subestação a montante mais próxima atua com certo retardo de tempo. Logo, a proteção de retaguarda deve estar coordenada com a proteção primária, possibilitando uma sequência de atuações em que o relé mais próximo da falta atua primeiro, se este falhar, deve atuar o relé a montante mais próximo e assim sucessivamente, até que o último nível da proteção de retaguarda entre em operação.

Uma cadeia de proteção é esquematizada na Figura 1.1. Na ocorrência de uma falta à jusante da subestação A, a sequência esperada de atuação dos relés seria: A – B – C. Isto é, se a proteção primária (relé A) falhar, o primeiro nível da proteção de retaguarda (relé B) é inicializado. Caso esse também falhe, caberá ao relé C, no segundo nível de proteção de retaguarda, atuar. Os níveis de proteção se estabelecem em conformidade com o local de ocorrência do defeito.

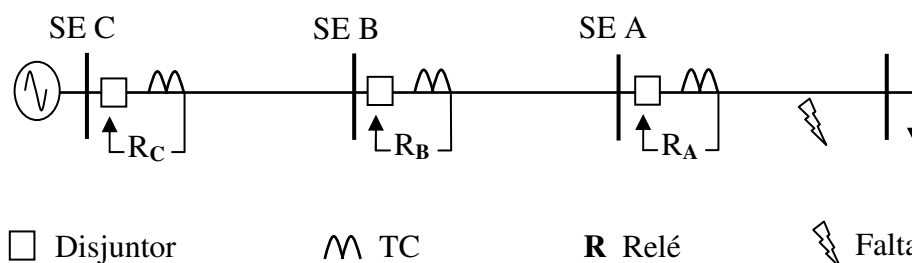


Figura 1.1 – Cadeia de proteção composta por dois níveis de retaguarda (relés B e C).

1.3.1 Procedimentos para coordenação dos relés de sobrecorrente de tempo inverso

A coordenação dos relés de sobrecorrente de tempo inverso, em um sistema de energia elétrica radial, é feita empregando-se o procedimento descrito a seguir, onde os relés são considerados aos pares a partir do dispositivo mais afastado da geração até o mais próximo desta. Considerando o diagrama unifilar ilustrado na figura 1.1, a coordenação de sua proteção de fase, supondo a retaguarda do relé *A* sendo formada pelos relés *B* e *C*, se dá através dos seguintes passos:

1º Passo: Para o relé *A*, escolhe-se a curva característica com menor múltiplo de tempo que permita coordenação com os dispositivos de proteção a jusante. Por exemplo, a curva 0,5 normal inversa descrita matematicamente pela equação (1.2):

$$T = TD \times \left(\frac{0,14}{M^{0,02} - 1} \right) \quad (1.1)$$

sendo:

TD: múltiplo de tempo;

M: múltiplo de corrente;

T: tempo para atuação do relé;

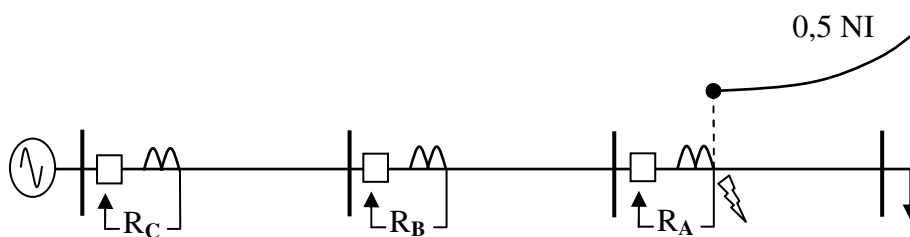


Figura 1.2 – Determinação da curva característica do relé *A*.

2º Passo: Com a corrente de curto-circuito trifásico no ponto de instalação do transformador de corrente associado ao relé *A*, calcular o múltiplo de corrente desse relé segundo a equação (1.2):

$$M_A = \frac{I_{CC3\theta A}}{RTC_A \times I_{ajA}} \quad (1.2)$$

sendo:

$I_{CC3\theta A}$: corrente de curto-circuito trifásico no local de instalação do transformador de corrente associado ao relé A ;

RTC_A : relação de transformação do transformador de corrente associado ao relé A ;

I_{ajA} : corrente de ajuste do relé A ;

M_A : múltiplo de corrente do relé A .

3º Passo: Com o múltiplo M_A e a equação (1.1), obtém-se o tempo para operação do relé A (t_A).

4º Passo: Para a mesma corrente de curto-circuito do 2º Passo, o tempo de operação do relé B para estar coordenado com o relé A é dado conforme equação (1.3):

$$t_B = t_A + \Delta t \quad (1.3)$$

sendo:

Δt : intervalo de tempo mínimo para coordenação entre dois relés consecutivos;

t_A : tempo para atuação do relé A diante de uma falta aplicada na barra onde está instalado seu transformador de corrente;

t_B : tempo mínimo para atuação coordenada do relé B com o relé A ;

5º Passo: Para a mesma corrente de curto circuito do 2º Passo, calcular o múltiplo de corrente M_B do relé B segundo equação (1.4).

$$M_B = \frac{I_{CC3\theta A}}{RTC_B \times I_{ajB}} \quad (1.4)$$

sendo:

$I_{CC3\theta A}$: Corrente de curto-circuito trifásico no local de instalação do transformador de corrente associado ao relé A ;

RTC_B : relação de transformação do transformador de corrente associado ao relé B ;

I_{ajB} : corrente de ajuste do relé B ;

M_B : múltiplo de corrente do relé B .

6º Passo: Com o múltiplo M_B e o tempo para operação do relé B (t_B), obtém-se da família de curvas características disponíveis para este relé aquela que melhor associe estes dois valores. No caso dos

relés eletromecânicos, que apresentam famílias pré-definidas de curvas características, deve-se escolher aquela curva que associe ao M_B encontrado um valor de t_B igual ou que exceda o menos possível o determinado através equação (1.3).

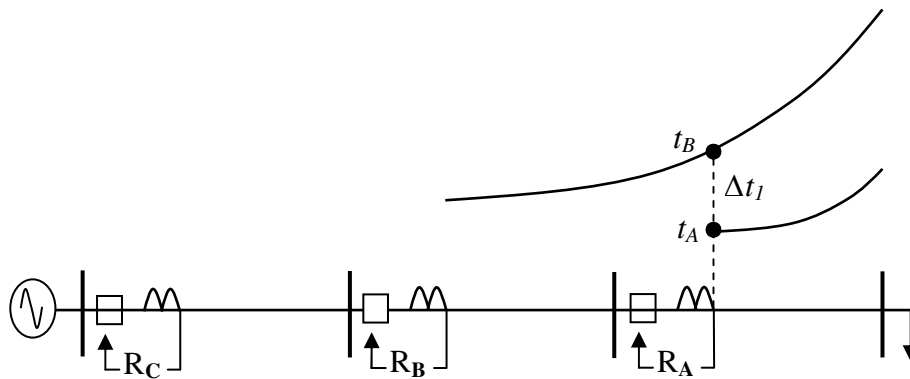


Figura 1.3 – Determinação da curva característica do relé B.

A coordenação do relé C segue a mesma sequência do 2º Passo em diante, sendo que dessa vez o curto-circuito é no local de instalação do transformador de corrente associado ao relé B. A coordenação da proteção de neutro emprega os passos adotados na proteção de fase, apenas empregando o curto fase-terra em lugar do trifásico.

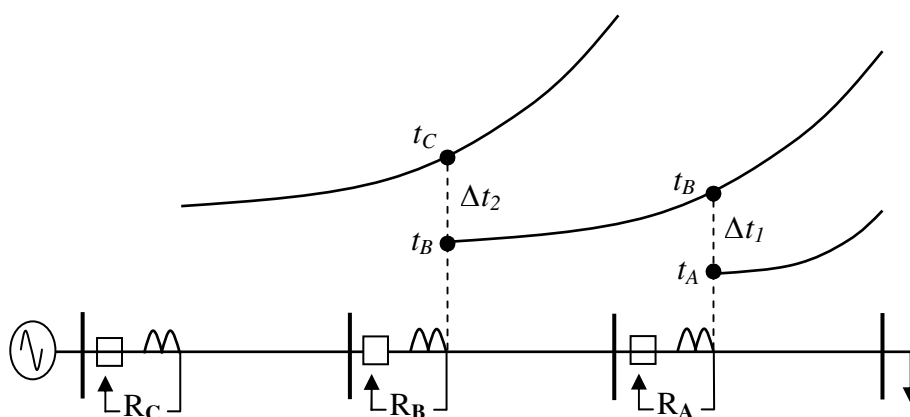


Figura 1.4 – Coordenação de relés de sobrecorrente de tempo inverso.

1.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A proteção de um sistema típico de distribuição pode estar a cargo de centenas de relés e outros dispositivos de proteção. Cada um desses dispositivos precisa ter suas funções coordenadas com as funções dos equipamentos adjacentes, o que torna complexa a tarefa de proteger por completo o sistema.

Chattopadhyay et al (1996) desenvolvem uma técnica on-line para coordenação de relés aplicável à proteção adaptativa de sistemas de distribuição. O algoritmo proposto otimiza os múltiplos de tempo empregados pela proteção através da minimização de uma função objetivo composta pelo somatório dos tempos para atuação dos relés diante de faltas trifásicas aplicadas em suas respectivas barras de instalação.

A otimização da função objetivo emprega o método Simplex em duas fases. Na fase I variáveis de folga e artificiais não-negativas são adicionadas as restrições do problema e uma função objetivo auxiliar é criada para substituir a original. Nesse momento, o método Simplex é aplicado de forma a minimizar a função objetivo auxiliar, o que se dá quando todas as variáveis artificiais tornam-se nulas. A fase I chega ao fim com a minimização da função objetivo auxiliar e obtenção de uma solução factível para o problema original. A fase II consiste em minimizar a função objetivo original do problema empregando o Simplex e tomando como solução inicial os valores obtidos pela primeira fase.

O algoritmo proposto foi empregado na coordenação de relés de sobrecorrente e sobrecarga que compõem a proteção de um sistema de distribuição composto por cinco subestações de 72 kV/14.4 kV interconectadas. O método adaptativo de coordenação foi comparado com um método não adaptativo, onde são consideradas as faltas mais severas possíveis de ocorrer, fornecendo melhores ajustes para a proteção do sistema de distribuição considerado.

English & Rogers (1994) demonstram como automatizar o ajuste e a coordenação dos vários dispositivos de proteção presentes em um sistema de potência através de macros escritas para serem lidas e executadas em um sistema denominado Computer Aided Protection Engineering (CAPE). O CAPE é um sistema modular de programas que faz uso de um banco de dados com detalhes do sistema e seus equipamentos. Modelos de transformadores de corrente e de potência, como também a definição de zonas de proteção estão presentes nesse banco de dados, que contém ainda informações necessárias à concepção de um modelo característico para cada dispositivo,

possibilitando simulações mais realísticas de seu funcionamento, livres dos inconvenientes causados pelo uso de modelos genéricos.

Empregando uma linguagem de programação de alto nível desenvolvida para uso no ambiente CAPE, denominada CUPL, o usuário tem acesso direto ao banco de dados, realiza operações lógicas e aritméticas com as quantidades ali armazenadas e define variáveis, além escrever sequências de comandos (macros) que irão automatizar a coordenação da proteção.

Girgis & Sukumar (2001) exploram o efeito da geração distribuída na coordenação fusível-fusível, fusível-religador e relé-relé. Em cada caso, dependendo do número e localização dos pontos de geração, há situações em que a coordenação se mantém e outras em que isso não é possível, conforme demonstram as análises.

As estratégias de coordenação são inicialmente empregadas considerando o sistema radial com apenas uma fonte de alimentação. Em seguida são conectadas outras fontes em diferentes pontos do sistema, sendo identificadas possíveis descoordenações devido às modificações nos níveis máximos e mínimos das correntes de falta e no sentido dessas.

Nos esquemas fusível-fusível e relé-relé, os dispositivos que se encontram a jusante de todas as fontes de geração estão imunes a possíveis perdas de coordenação. Caso esses dispositivos detectem correntes de falta a sua montante e a jusante, são possíveis duas situações: quando dois ou mais dispositivos detectam o mesmo nível de corrente a coordenação está comprometida; quando dois ou mais dispositivos detectam níveis distintos de correntes, a depender do valor dessas correntes, a coordenação se mantém.

Para o esquema fusível-religador haverá perda de coordenação a menos que a variação nos níveis das correntes de falta permaneçam dentro da margem de coordenação considerada.

Kawahara et al (1997) desenvolvem um método, baseado em regras, para resolver de modo eficiente o problema da coordenação de relés direcionais. O processo tem início com a identificação de todos os pares relé primário/ relé de retaguarda presentes no sistema. Em seguida são escolhidos os relés instalados em pontos onde os laços existentes no sistema podem ser abertos. Esse conjunto de relés (Break Point Set – BPS) é então reduzido através de regras heurísticas para determinar o BPS mínimo, uma vez que o número de iterações requeridas para a coordenação dos dispositivos é diretamente proporcional ao tamanho do BPS.

Determinado o BPS mínimo, é necessário encontrar a ordem em que os relés do sistema devem ser ajustados, o que é feito através de um algoritmo dividido em cinco etapas. Na etapa I,

escolhe-se de modo aleatório um integrante do BPS mínimo; na etapa II é atribuído a ordem de ajuste ($J=1$) ao indivíduo escolhido na etapa anterior; na etapa III o contador de ordens de ajuste é incrementado ($J=J+1$); na etapa IV é escolhido um outro relé para ser ajustado; na etapa V o grupo de relés que já tiveram sua ordem de ajuste determinada é atualizado; a etapa VI ocorre com a verificação se a ordem de ajuste de todos os relés já foi determinada, caso contrário a etapa III é repetida. O algoritmo é finalizado na etapa VII com o ajuste dos relés.

Os resultados apresentados após utilização do método proposto no ajuste e coordenação da proteção de um sistema teste composto por 14 relés de sobrecorrente direcionais confirmam sua eficiência.

Ordunã et al (2003) definem um sistema adaptativo de ajuste e coordenação da proteção em sistemas elétricos malhados onde a proteção é realizada por dispositivos digitais. O sistema supervisor de controle e aquisição de dados (SCADA) identifica a topologia da rede e os ajustes atuais dos relés. Quando ocorre alguma alteração nessa topologia, cálculos de curto-circuito são realizados para identificar a magnitude das novas correntes de falta. Um sistema especialista verifica se há algum relé ajustado inapropriadamente e, em caso afirmativo, propõe correções. Após as correções propostas serem implementadas, o sistema especialista verifica se há descoordenações. Havendo descoordenações, a proteção é novamente coordenada.

O sistema especialista citado na pesquisa, fundamenta suas ações em 20 regras principais extraídas da literatura sobre proteção, sendo capaz de propor ajustes para correntes de pickup de unidades temporizadas e instantâneas dos relés de sobrecorrente, ajustar o alcance das zonas de proteção dos relés de distância e verificar a coordenação da proteção. A consideração apenas da topologia atual do sistema, atuação mais rápida da proteção e redução do número de pares descoordenados de relés, são citadas como vantagens do ajuste em tempo real dos parâmetros e funções dos dispositivos de proteção.

Peres et al (1998) realizam uma avaliação da metodologia empregada para coordenar a proteção de linhas em sistemas interligados de sub-transmissão. Três métodos de coordenação foram comparados tendo como alvo um sistema composto por 108 barramentos, 86 linhas, 61 transformadores e 97 relés direcionais de sobrecorrente: 1) Coordenação dos relés direcionais de sobrecorrente independente da coordenação dos relés de distância; 2) Coordenação dos relés direcionais de sobrecorrente considerando os relés de distância e 3) Coordenação de relés direcionais de tempo definido considerando os relés de distância. Nas análises foi empregado um

programa de computador baseado em programação linear para proceder com a coordenação ótima da proteção.

Na metodologia 1, os relés direcionais de sobrecorrente são ajustados como se não houvesse a proteção de distância e os relés de distância coordenados de forma usual, através de intervalos de tempo entre suas zonas. Como vantagem, essa metodologia possibilita uma proteção de distância com atuação rápida da segunda zona, sem necessidade de substituição da proteção de sobrecorrente existente. Por outro lado, a seletividade é comprometida, visto que, a coordenação entre dispositivos de sobrecorrente e distância não é averiguada.

Na metodologia 2, a coordenação dos relés de sobrecorrente leva em consideração a presença da proteção de distância existente, com isso consegue-se um esquema de proteção seletivo sem a necessidade de substituição da proteção de sobrecorrente existente, no entanto, há um aumento do tempo para atuação da segunda zona da função de distância.

A metodologia 3, assim como a 2, considera a proteção de distância durante o ajuste da proteção de sobrecorrente, porém, propõe a substituição dos relés de sobrecorrente direcionais com curva de tempo inverso por dispositivos direcionais de atuação baseada em tempo definido. Desse modo é possível garantir a seletividade da proteção e sua coordenação com relés de falha do disjuntor por meio de um processo simples de coordenação no tempo, A necessidade de troca dos dispositivos existentes e o fato de haver perda da seletividade entre a proteção de linhas e transformadores, como também, a impossibilidade de atuação como proteção de retaguarda para faltas além de barramentos remotos, constituem pontos desfavoráveis dessa metodologia.

Os estudos atestam a aplicabilidade das técnicas de programação linear na coordenação da proteção de sobrecorrente associada a proteção de distância. Com o uso de um programa de computador dedicado a coordenação ótima da proteção as vantagens e desvantagens dos três diferentes métodos para ajuste da proteção de sobrecorrente direcional foram apresentadas, de onde pode-se concluir que a aplicabilidade de cada um deles dependerá do caso específico sob estudo. Para o sistema apresentado no artigo, a decisão de usar coordenação independente entre proteção de distância e de sobrecorrente é descartada. A recomendação é empregar relés de sobrecorrente de tempo inverso até que estes sejam substituídos por dispositivos de tempo definido.

So et al (1997) propõem um método de coordenação da proteção de sobrecorrente baseado em algoritmos genéticos. O método considera as preferências do usuário ao escolher os ajustes da proteção. Cada cromossomo contém, em sua estrutura, ajustes de múltiplo de tempo e corrente relativos aos relés sob coordenação. Para a formação da população inicial de cromossomos, diversas

variações dos ajustes empregados pelos n relés que compõem a cadeia de proteção são geradas de forma aleatória, tomando os devidos cuidados para que esses ajustes satisfaçam totalmente as restrições do problema.

A avaliação da qualidade de cada solução proposta pelo método se dá com o cálculo do valor da função objetivo associada a cada cromossomo. Esta função é composta pela soma dos seguintes termos: somatório dos tempos para atuação dos relés, observado diante de todos os cenários de falta possíveis; somatório do quadrado da diferença entre o múltiplo de tempo sugerido pelo algoritmo genético e o desejado pelo usuário; somatório do quadrado da diferença entre o múltiplo de corrente sugerido pelo algoritmo genético e o desejado pelo usuário e somatório do quadrado da diferença entre os intervalos de coordenação sugeridos pelo algoritmo genético e o intervalo padrão de 0,4 segundos. Quanto menor for o valor da função objetivo, mais aptos a solução do problema serão os cromossomos a ela associados.

Os autores empregaram elitismo para aumentar a sobrevivência e as chances de reprodução dos cromossomos mais aptos. O operador de cruzamento é responsável por gerar novos indivíduos a partir da recombinação do material genético de cromossomos escolhidos como pais. Para aumentar a heterogeneidade da população são empregadas as mutações. Cada indivíduo resultante de um cruzamento ou mutação passa por um teste onde é averiguado se o mesmo satisfaz as restrições do problema. Cromossomos que não satisfazem as restrições são eliminados. Para selecionar os indivíduos que irão compor a próxima geração é utilizado o método da roleta com área de setores proporcional a aptidão dos indivíduos.

O algoritmo genético é finalizado depois de um número fixo de gerações. O número necessário de gerações varia com a complexidade do sistema e o tamanho da população empregada pelo algoritmo.

Seis diferentes ajustes de parâmetros da função objetivo foram testados e os resultados analisados. Em todos os casos faltas foram aplicadas aos barramentos de um sistema de 33 kV em anel típico e o atendimento as restrições averiguado. Os melhores resultados foram alcançados quando a otimização priorizou o menor tempo total de operação dos relés. Em geral, o AG com maior população e mais gerações forneceu melhores resultados. Ficou provada a possibilidade de emprego do método sugerido na coordenação da proteção em sistemas em anel.

Urdaneta et al (1995) desenvolvem um método para coordenar a operação de relés direcionais frente as mudanças na topologia do sistema e na corrente detectada por esses dispositivos durante a eliminação da falta, quando apenas um dos relés principais atua (configurações transitórias). Um

algoritmo com base em programação linear é usado para calcular valores do múltiplo de tempo (time-dial) capazes de minimizar a soma dos tempos para operação dos relés, considerando a configuração do sistema presente durante a falta e respeitando a faixa de valores admissíveis dos ajustes, bem como a característica tempo-corrente de cada relé.

A princípio, uma solução inicial é obtida considerando o sistema em sua configuração original. Com esses ajustes e para faltas aplicadas em cada barramento do sistema, o tempo para operação dos relés é calculado, sendo identificado o primeiro e o segundo relés principais a atuarem, como também todas as configurações transitórias importantes. Em seguida, o problema é modificado para levar em consideração as restrições associadas às configurações transitórias e descartar as restrições irrelevantes relacionadas a configuração original. O algoritmo de otimização é executado novamente e observado os valores dos ajustes de cada relé. Se os ajustes sugeridos pelo método modificam a ordem de atuação do primeiro relé a atuar identificado inicialmente, faz-se necessária uma nova iteração do método, caso contrário, houve convergência do método.

Dois sistemas reais, um composto por cinco barramentos e dois transformadores de potência e outro formado por 18 barramentos e 96 relés direcionais de sobrecorrente, tiveram sua proteção coordenada com auxílio do método proposto. Os resultados obtidos confirmam a relevância de se considerar mudanças na topologia do sistema durante a eliminação de uma falta.

Yinhong et al (2003) dedicam-se a coordenação ótima dos relés de tempo definido empregando algoritmos genéticos. O método empregado, denominado de método da codificação dos intervalos de restrição, se divide em quatro etapas: 1) codificação, 2) inicialização, 3) cálculo da função objetivo de cada indivíduo e 4) geração.

A codificação das soluções ocorre com a divisão do espaço de soluções das variáveis naturais em um número definido de sub-intervalos segundo as restrições do problema, estando cada sub-intervalo associado a um código. O limite superior (ou o inferior) desses intervalos corresponde ao ajuste do relé que o código representa. Empregando essa forma de codificar as variáveis naturais, o tamanho dos cromossomos são reduzidos, levando ao aumento da eficiência do processo de otimização sem prejuízos à precisão dos resultados.

Na etapa de inicialização, um conjunto de soluções do problema (população) é gerado de forma aleatória. O número de soluções nesse conjunto está relacionado à dimensão do sistema de proteção a ser coordenado.

Cada cromossomo da população tem sua função objetivo calculada para avaliar suas chances de sobrevivência numa próxima geração. Da forma como foi definida no trabalho, quanto maior o

valor da função objetivo maior a probabilidade do cromossomo sobreviver ao ambiente definido pelo problema de otimização.

O uso de operadores genéticos, como o cruzamento e mutação, fazem com que o valor da função objetivo se eleve gradualmente ao longo das varias gerações de cromossomos. Quando o valor da função objetivo tende a se estabilizar ou um número predefinido de gerações foi atingido, o cromossomo associado ao maior valor da função objetivo contém os ajustes ótimos da proteção.

Na intenção de verificar a eficiência do novo método, os resultados obtidos com sua aplicação na coordenação dos relés de tempo definido presentes em um sistema composto por 11 circuitos protegidos por relés de distância são comparados aos obtidos empregando-se procedimentos habituais e o método da enumeração infinita. O método proposto e a enumeração infinita levam a melhores resultados que os procedimentos comumente empregados para coordenação da proteção, com uma redução de 23% no tempo de operação dos relés. Em termos de eficiência da otimização, a enumeração infinita necessita de algo em torno de 23 minutos para determinar o melhor e segundo melhor resultados, enquanto o método proposto apenas 1 segundo. Quando o número de iterações é maior que 100, o segundo melhor resultado é obtido, se for maior que 600, o melhor resultado é alcançado, o que permite afirmar ser o método da codificação dos intervalos de restrição mais eficiente que o da enumeração infinita.

Na tabela 1.1 encontram-se listados, segundo o método de otimização empregado, os artigos referenciados. Dentre as referências, So et al (1997) e Yinhong et al (2003), por empregarem algoritmos genéticos e focarem suas análises na proteção de sobrecorrente, tiveram maior relevância na pesquisa desenvolvida nesta dissertação.

Tabela 1.1 – Resumo da revisão bibliográfica sobre coordenação ótima da proteção de sistemas elétricos de potência.

Referência	Função de proteção		Método de otimização
	Sobrecorrente	Distância	
Girgis & Sukumar (2001)	✓	-	-
English & Rogers (1994)	✓	✓	-
Chattopadhyay et al (1996)	✓	-	Simplex em duas fases
Prez et al (1998)	✓	✓	Programação linear
Urdaneta et al (1995)	✓	-	Programação linear
Yinhong et al (2003)	✓	✓	Algoritmos genéticos
So et al (1997)	✓	-	Algoritmos genéticos
Orduna et al (2003)	✓	✓	Heurística
Kawahara et al (1997)	✓	-	Heurística

1.5 OBJETIVOS

- Desenvolver um Algoritmo Genético capaz de determinar a curva característica de cada relé da cadeia de proteção de modo a garantir o menor tempo seguro de coordenação entre o maior número possível desses dispositivos, tornando o sistema de proteção confiável, seletivo e veloz.
- Avaliar os ajustes determinados pelo algoritmo genético dedicado a coordenação ótima da proteção através do emprego dos mesmos em um sistema distribuição teste.

Capítulo 2

ALGORITMOS GENÉTICOS

Algoritmos genéticos (AGs) são métodos probabilísticos de otimização e busca baseados em uma metáfora do processo biológico de evolução natural. Foram desenvolvidos por *John Holland* juntamente com alguns de seus colegas e estudantes, durante a década de 60.

Desde a década de 90, os algoritmos genéticos têm sido aplicados com sucesso na resolução de diversos problemas de otimização combinatória em diferentes áreas do conhecimento. Problemas com múltiplos objetivos, com grande número de restrições, com condições difíceis de modelar matematicamente e problemas com espaços de busca muito grandes têm sido solucionados com êxito.

Essa ampla aplicabilidade é resultado da capacidade que o algoritmo possui de realizar uma busca adaptativa, paralela e cega. Esta última se deve ao fato de que a operação do algoritmo é inerentemente independente da aplicação. Em síntese, os algoritmos genéticos possuem quatro características que os diferenciam dos métodos convencionais de busca e otimização:

- operam com a representação codificada das soluções e não com estas em si;
- realizam a busca dentro de uma população de soluções;
- usam aptidões para guiar a busca e não derivadas ou outros conhecimentos auxiliares;
- empregam leis probabilísticas em lugar das leis determinísticas.

O princípio de funcionamento do algoritmo reside na sobrevivência do mais apto, da forma como o naturalista e fisiologista *Charles Darwin* enunciou em seu livro *A origem das espécies* (1859). De acordo com Darwin, “Quanto melhor um indivíduo se adaptar ao seu meio ambiente, maior será sua chance de sobreviver e gerar descendentes”.

A idéia básica de funcionamento dos algoritmos genéticos é emular o processo evolutivo das espécies, fornecendo um ambiente controlado onde:

- soluções codificadas de um problema representam indivíduos;

- uma nota, definida em termos de qualidade das soluções, denota a adaptação dos indivíduos e, conseqüentemente, a probabilidade de cada um gerar descendentes;
- um processo reprodutivo seja simulado, permitindo que os mais aptos se perpetuem.

O processo reprodutivo é simulado com base na natureza: indivíduos são selecionados de modo estocástico para gerar descendentes em função de suas aptidões. Em geral, os indivíduos mais aptos são selecionados e os indivíduos menos aptos são descartados (Darwinismo). Uma estratégia de combinação entre soluções é definida para representar a recombinação cromossômica que ocorre na fecundação, do modo como ocorre na natureza. Uma perturbação aleatória é estabelecida com o intuito de simular as falhas de transmissão de material genético de uma geração para outra, ou seja, as mutações. A operação do algoritmo genético consiste na simulação, dentro deste espaço controlado, de sucessivos processos reprodutivos, definidos como gerações. A solução ótima para o problema, o melhor indivíduo, tende a se perpetuar ao longo do processo.

2.1 Modelagem Computacional

Devido ao fato dos AGs terem sido inspirados na teoria da evolução das espécies, muitos de seus termos foram importados da biologia. Um sumário dos termos empregados com maior frequência é apresentado na tabela 2.1

O algoritmo começa com a criação aleatória de uma *população inicial*, composta por soluções potenciais para o problema. Uma solução do problema caracteriza um *indivíduo*, composto por um ou mais *cromossomos*. Cada cromossomo é formado por uma sequência de elementos de informação denominados *genes*. O conjunto de todas as configurações que o indivíduo pode assumir forma o seu *espaço de busca*. Para uma maior diversidade da população inicial e, por conseguinte, maiores chances de obtenção do ótimo global para o problema, é desejável que figurem na população inicial soluções pertencentes a todo o espaço de busca.

O modo como a solução é traduzida do domínio da aplicação (*fenótipo*) para a representação no AG (*genótipo*), recebe o nome de codificação. Frequentemente, genótipos e fenótipos apresentam relação de um-para-um.

Durante sucessivas *gerações*, os indivíduos da população são avaliados, recebendo uma nota que reflete sua *aptidão* para geração de descendentes. O procedimento de seleção dos mais aptos, cruzamento e mutação é realizado continuamente até uma condição de parada ser obtida. A rotina

básica de um algoritmo genético, considerando $P(t)$ como população de indivíduos na geração t , tem a seguinte estrutura.

```
t = 0
inicializar  $P(t)$ 
avaliar  $P(t)$ 
enquanto o critério de parada não for satisfeito faça
    t = t + 1
    selecionar  $P(t)$  a partir de  $P(t-1)$ 
    aplicar cruzamento e mutação sobre  $P(t)$ 
    avaliar  $P(t)$ 
fim do laço
```

Um algoritmo genético é caracterizado por meio de vários componentes: um problema alvo, uma estratégia de codificação e decodificação, uma função objetivo, operadores genéticos, um método de inicialização da população inicial e condições de parada. Alguns desses componentes não dependem do tipo de aplicação, sendo internos aos AGs. Por exemplo, a definição da estratégia de seleção empregada, o modo como ocorrem a recombinação dos indivíduos e a estratégia de mutação não dependem do problema abordado, mas sim de parâmetros internos ao algoritmo e da forma de representação dos indivíduos escolhida. A única conexão do AG com o domínio da aplicação é feita por meio da avaliação de aptidões, o que requer *decodificação*. Essa característica dá ao AG o adjetivo de método de busca “cego”. A função objetivo empregada e a estratégia de decodificação são fortemente relacionadas com o problema específico estudado e devem ser restabelecidas para cada aplicação.

Tabela 2.1 – Equivalência de termos entre biologia e AGs

Termo empregado	Significado no contexto dos AGs
Indivíduo	Uma solução potencial do problema codificada para uso no AG.
Cromossomo	Parte constituinte do indivíduo, com genes e alfabeto próprios.
Gene	Elemento de informação integrante do cromossomo.
Alelo	Conjunto de valores que um gene pode assumir
Genótipo	Uma solução do problema no domínio do AG.
Fenótipo	Uma solução do problema no domínio da aplicação.
População	Um conjunto de indivíduos.
Geração	Cada iteração do processo evolutivo.
Codificação	Estratégia de tradução de soluções do domínio da aplicação para o domínio dos AGs.
Decodificação	Estratégia de tradução de soluções do domínio dos AGs para o domínio da aplicação.
Aptidão	Uma característica de cada indivíduo que denota a capacidade de gerar descendentes.

2.1.1 Representação cromossômica e Função Objetivo

A primeira etapa para aplicação de AGs a um problema é a definição da estratégia de codificação empregada para traduzir soluções em indivíduos. Em geral, um indivíduo é composto por um único cromossomo, modelado por uma sequência de símbolos s em que cada símbolo de s pertence a um alfabeto finito. Goldberg (1989) propôs uma representação empregando o alfabeto binário, porém codificações inteira e em ponto flutuante foram propostas e são populares atualmente, de modo que a escolha deve ser guiada pelo tipo de aplicação alvo.

Como exemplo, considere a determinação do ponto máximo da função

$$f(x) = x.\text{sen}(10\pi.x) + 3, \text{ em que } x \in [-1, 2] \quad (\text{Galvão et al 1999}) \quad (2.1)$$

Esta função possui apenas uma variável independente. Consequentemente, uma solução para o problema é formada por um único valor candidato a x ótimo. Fazendo opção por uma

representação binária de 10 bits, um exemplo de indivíduo para este problema, com cromossomo único, pode ser: $s_1 = 1100000101$.

Neste caso o espaço de busca é formado por 2^{10} valores, denotando todos os números binários representados por 10 bits. Codificações empregando números maiores de bits permitem maior refinamento da solução, porém implicam em espaços de busca maiores. A tarefa de conversão entre a representação em ponto flutuante e binária, para n bits, pode utilizar uma fórmula simples como apresentado na tabela 2.2.

Uma vez definida a estratégia de codificação, é necessário definir uma função que permita a avaliação dos indivíduos. Essa função contabiliza a adequabilidade dos indivíduos ao ambiente, guiando todo o processo de busca. Tal função deve refletir rigorosamente os objetivos e as restrições do problema, já que ela tem o potencial de afetar severamente a qualidade das respostas obtidas e o tempo de processamento associado.

Para o exemplo proposto, a função alvo é positiva em todo o intervalo de pesquisa, logo, a função objetivo f mais simples possível é a própria função a ser maximizada. Neste caso, para a uma população de N indivíduos, o indivíduo s_i será selecionado para reprodução com uma probabilidade:

$$p_i = \frac{f(s_i)}{\sum_{k=1}^N f(s_k)} \quad (2.2)$$

De acordo com a equação 2.2, a avaliação do indivíduo s_i requer sua decodificação. O procedimento é o descrito na tabela 2.2:

Tabela 2.2 – Codificação e decodificação para o exemplo.

Codificação ($s_I = g(x)$)	Decodificação ($x = g(s_I)$)
$d_1 = \frac{(x - \min)}{\max - \min} (2^n - 1)$ e s_1 recebendo d_1 na base dois	$x = \min + (\max - \min) \frac{d_1}{(2^n - 1)}$ e d_1 recebendo s_1 na base 10

$$d_1 = (1100000101)_{10} = 773 \quad x_1 = (-1) + (2 - (-1)) \cdot \frac{773}{2^{10} - 1} = 1,2646$$

$$f_{ap}(d_1) = f(x_1) = 1,2646 \cdot \text{sen}(10\pi \cdot 1,2646) + 3 = 3,8083$$

2.1.2 Operadores Genéticos: Seleção Natural, Cruzamento e Mutação

Os operadores tem por função implementar o processo reprodutivo simulado que ocorre nos AGs. Foram propostos vários operadores, bem como diferentes estratégias para implementação. Contudo serão abordados operadores mais comumente empregados: *seleção*, *cruzamento* e *mutação*.

O Procedimento de seleção pode empregar diferentes estratégias, porém todas têm em comum o fato de serem guiadas pelos valores das funções objetivo dos indivíduos. As estratégias mais empregadas na literatura são *roleta* e *torneio*.

- O método da roleta consiste em representar as chances de cada indivíduo por setores em um círculo, conforme ilustrado na Figura 3.3. A área dos setores é diretamente proporcional à qualidade da solução que representam. A roleta é girada e pára em um ponto aleatório, selecionando um indivíduo. O algoritmo que implementa o método da roleta tem a seguinte estrutura:

```
total = somatório ( $f_{ap}$ )
aleatório = aleatório (0, total)
total_parcial = 0
i = 0
enquanto total_parcial menor que aleatório faça
i = i + 1
total parcial = total_parcial +  $f_{ap}$ 
fim do laço
retorna cromossomo  $s_i$ 
```

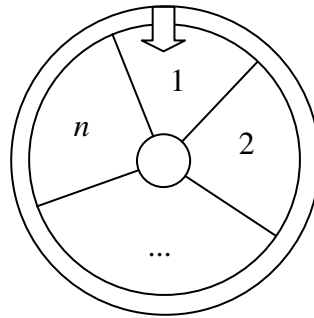


Figura 2.1 – Representação do método da roleta.

- No torneio são escolhidos aleatoriamente n cromossomos da população, sendo selecionado aquele com maior valor da função objetivo. Nesse método de seleção, o melhor indivíduo pode não participar de nenhum sorteio, não passando seu material genético para a próxima geração. Por este último motivo, recomenda-se também fazer uso do elitismo ao ser utilizado o método do torneio. O elitismo consiste em transferir para a próxima geração, sem a realização de seleção, os n melhores indivíduos da população atual, sem alterações. O número de eleitos deve ser mantido pequeno, normalmente um, sob pena de comprometer o processo de busca.

Todas as estratégias de seleção operam a quantidade de vezes necessária para selecionar o número de indivíduos que participam da próxima etapa: o cruzamento

O cruzamento é o operador que mistura o material genético, buscando tornar a população homogênea. Por esse motivo, pode ser interpretado como um operador de busca local. O número de cruzamentos que ocorrem a cada geração, bem como os indivíduos que participam deste processo, são obtidos de forma aleatória. Normalmente a taxa de cruzamento situa-se entre 0,50 e 0,80. Na Figura 3.4 é ilustrado o processo convencional de cruzamento, cujas etapas são:

- i. seleção de dois indivíduos da população como pais;
- ii. escolha de um ponto comum para quebra dos cromossomos dos pais;
- iii. obtenção dos cromossomos dos filhos ao combinar material genético de ambos os pais.

Em alguns problemas, em função do procedimento de codificação empregado, a operação de cruzamento pode gerar indivíduos que não representam soluções para o problema. Esses indivíduos podem representar soluções que violam alguma restrição ou mesmo codificar soluções fora do

domínio de busca desejado. Por isso, um indivíduo deste tipo é dito infactível ou defeituoso e lhe é atribuído menor chance de sobrevivência. Ainda assim, não é recomendado exterminá-lo, pois características desejáveis poderiam ser perdidas. Em um cruzamento envolvendo um indivíduo defeituoso, é possível que sejam gerados filhos normais, até mesmo melhores que aqueles gerados por pais sadios.

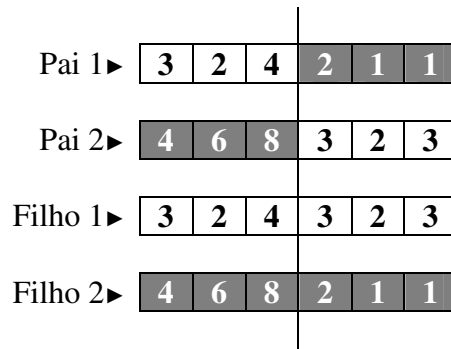


Figura 2.2 – Cruzamento convencional.

Após a operação de cruzamento, ocorre a mutação que consiste em alterar um gene do cromossomo, melhorando a diversidade dos indivíduos da população. Por outro lado, a mutação destrói informação genética preservada pelos operadores de seleção e cruzamento, logo, deve ocorrer de forma reduzida e controlada Normalmente a taxa de mutação situa-se entre 0,05 e 0,1. Na Figura 3.5 é ilustrado o processo convencional de mutação, cujas etapas são:

- i. seleção de um indivíduo da população;
- ii. escolha do gene deste indivíduo que terá seu valor modificado;
- iii. alteração do gene escolhido.

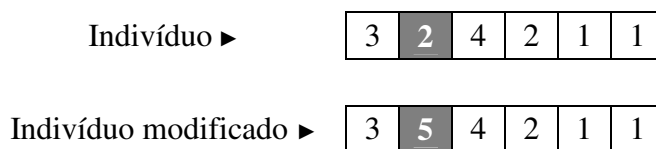


Figura 2.3 – Mutação convencional

Realizadas estas três etapas, tem-se uma nova população. O aspecto aleatório dos operadores garante a semelhança entre o procedimento reprodutivo implementado no AG e o que ocorre na natureza.

2.1.3 Convergência do método e condição de parada

Os algoritmos genéticos são fortemente influenciados pelo ajuste de seus parâmetros. Isso faz com que, eventualmente, a convergência de toda uma população para uma determinada solução não necessariamente implique em respostas satisfatórias. Os parâmetros mais determinantes são a taxa de cruzamento e de mutação. Contudo, o tamanho da população e a função objetivo também podem influenciar a convergência do algoritmo.

As taxas de cruzamento e mutação têm impacto significativo no processo de busca, pois seu efeito combinado guia o processo. Elas operam concorrentemente e, por isso, precisam estar em equilíbrio para favorecer o desempenho do algoritmo. Enquanto o cruzamento opera sempre no sentido de misturar o material genético, tornando a população homogênea. A mutação opera como uma perturbação que obriga o AG a estender a busca para áreas inexploradas do espaço de busca. Quando a mutação gera uma solução ruim, o processo de seleção faz com que essa solução não se propague. Se a mutação gera uma solução boa, o processo de seleção faz com que essa solução se propague pelas próximas gerações. Se o ótimo global é obtido, as mutações se tornam ineficazes.

Outro fator influenciador da convergência é o tamanho da população. Este valor é geralmente constante e depende da aplicação, variando de 50 a 200 indivíduos. Populações grandes implicam em maior grau de paralelismo na busca e, conseqüentemente, maior diversidade genética; entretanto, implicam em maiores tempos de processamento. Por outro lado, populações muito pequenas podem resultar em convergência prematura, impedindo que o AG realize uma busca satisfatória por falta de diversidade na população.

A função objetivo também afeta a velocidade com que o algoritmo converge, desde que seja mal condicionada ao problema. Uma taxa de variação muito grande nesta função pode privilegiar excessivamente algumas soluções em detrimento de outras, provocando convergência prematura. Efeito contrário é obtido com taxas de variação pequenas. Nestes casos, o método de seleção pode degenerar para uma seleção aleatória com probabilidades aproximadamente iguais, fazendo com que o algoritmo não evolua.

A teoria dos algoritmos genéticos indica que o ajuste minucioso destes parâmetros resulta na convergência do algoritmo. No entanto, é necessário definir indicadores de convergência que impeçam uma execução indefinida. Idealmente, o critério de parada deveria detectar quando as mutações se tornassem ineficazes e encerrar o processamento, porém, essa condição é muito

subjetiva, não havendo garantia de ocorrência. Deste modo, critérios de parada mais simples foram propostos:

- número de gerações e de soluções exploradas (n° de gerações vezes tamanho da população);
- tempo de processamento;
- diversidade da população;
- estagnação do processo de busca.

Capítulo 3

IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

3.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Na proteção de sobrecorrente não há informação sobre a localização da falta. Assim o ajuste dos diversos relés que compõem a cadeia de proteção, com base na escolha das curvas características adequadas, torna-se o único parâmetro de controle capaz de garantir atuação coordenada desses dispositivos, promovendo uma proteção confiável, seletiva e veloz.

A coordenação ótima da proteção de sobrecorrente em sistemas de distribuição de energia elétrica, da maneira que é tratada nesta dissertação, está centrada na escolha adequada das curvas características dos relés presentes em sistemas de distribuição com topologia radial, considerando a especificação dos transformadores de corrente já realizada em uma etapa prévia. Nesses termos o problema da coordenação ótima é típico de otimização combinatória e pode ser formulando do seguinte modo:

Dada uma cadeia de proteção composta por n relés, determinar a curva característica de cada relé de modo a garantir coordenação entre o maior número possível desses dispositivos empregando o menor tempo seguro de coordenação, tornando a proteção confiável, seletiva e veloz.

3.2 MÉTODO DE SOLUÇÃO PROPOSTO

3.2.1 Codificação decimal

A primeira etapa para aplicação de um algoritmo genético a um problema de otimização é a definição da estratégia de codificação a ser adotada. Neste trabalho, foi utilizada a codificação decimal. A determinação da curva característica de um dado relé implica no conhecimento de sua classe e do valor do seu múltiplo de tempo (time dial – TD). Cada um desses parâmetros é

codificado em partes distintas do cromossomo. Na primeira parte, os genes indicam o TD da curva. Na segunda, os genes informam a classe da curva de cada relé. Conforme esquematizado na figura 3.1, o comprimento do cromossomo é duas vezes o número de relés. Se forem consideradas apenas as curvas *normal inversa*, *muito inversa* e *extremamente inversa* (IEC), sendo cada família de curva composta por dez exemplares, o alfabeto dos n primeiros genes é $\vartheta = \{1, 2, \dots, 10\}$, enquanto para os demais é $\Gamma = \{1, 2, 3\}$. Os elementos de cada alfabeto codificam valores dos parâmetros conforme indicado na tabela 3.1.

TD				Classe			
1	2	...	n	1	2	...	n
φ	φ	...	φ	γ	γ	...	γ

Figura 3.1 - Estrutura cromossômica com $\varphi \in \vartheta$ e $\gamma \in \Gamma$.

Tabela 3.1 – Decodificação do cromossomo.

φ	TD	γ	Classe
5	0,5	1	normal inversa
7	0,7	2	muito inversa
...	...	3	extremamente inversa
10	1		

É possível representar os valores associados ao parâmetro TD com tantas casas decimais forem necessárias, conforme ocorre nos modernos relés digitais. O aumento da precisão empregada na representação do TD reduz a eficiência do algoritmo genético pois leva ao crescimento do espaço das soluções do problema, o qual pode ser dimensionado através da equação (3.1).

$$S = C^R \times T^R \tag{3.1}$$

sendo:

C : número de tipos de curvas disponíveis;

T : quantidade de valores possíveis de serem atribuídos ao múltiplo de tempo;

R : o número de relés a serem coordenados.

Tomando como exemplo o sistema da figura 3.2, em que $C=R=3$ e tomando $T = 10$, o número de soluções do problema é 27000.

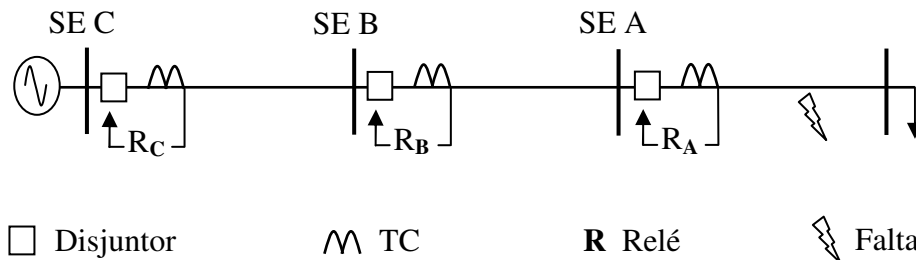


Figura 3.2 – Cadeia de proteção composta por dois níveis de retaguarda (relés *B* e *C*).

Os operadores cruzamento e mutação utilizados serão descritos a seguir. O tamanho da população foi considerado fixo, onde os filhos substituem os pais a cada geração.

O cruzamento é iniciado selecionando-se dois indivíduos da população atual, denominados de pais, estando baseado na soma e subtração dos genes que ocupam a mesma posição nos dois cromossomos selecionados (genes alelos). O processo é exemplificado na figura 3.3. O fato de estarmos empregando cromossomos onde os primeiros n genes contém informações distintas das contidas nos n genes restantes torna necessário maior controle durante os cruzamentos. Para indivíduos formados a partir da soma de genes alelos, os genes defeituosos são corrigidos subtraindo-se destes um fator f . No caso dos indivíduos formados a partir da subtração de genes alelos, os genes defeituosos são corrigidos somando-se a estes o mesmo fator f . O valor do fator f depende do local ocupado no cromossomo pelo gene defeituoso. Estando os genes defeituosos no setor do cromossomo referente ao TD, f será igual a TDM_{\max} . Por outro lado, sendo o gene defeituoso referente à classe da curva, f será igual a γ_{\max} .

Outro operador genético empregado é a mutação, o qual consiste em alterar um gene do cromossomo escolhido aleatoriamente. Ao ser escolhido o gene terá seu valor modificado para um outro valor válido, mas obrigatoriamente distinto do valor original

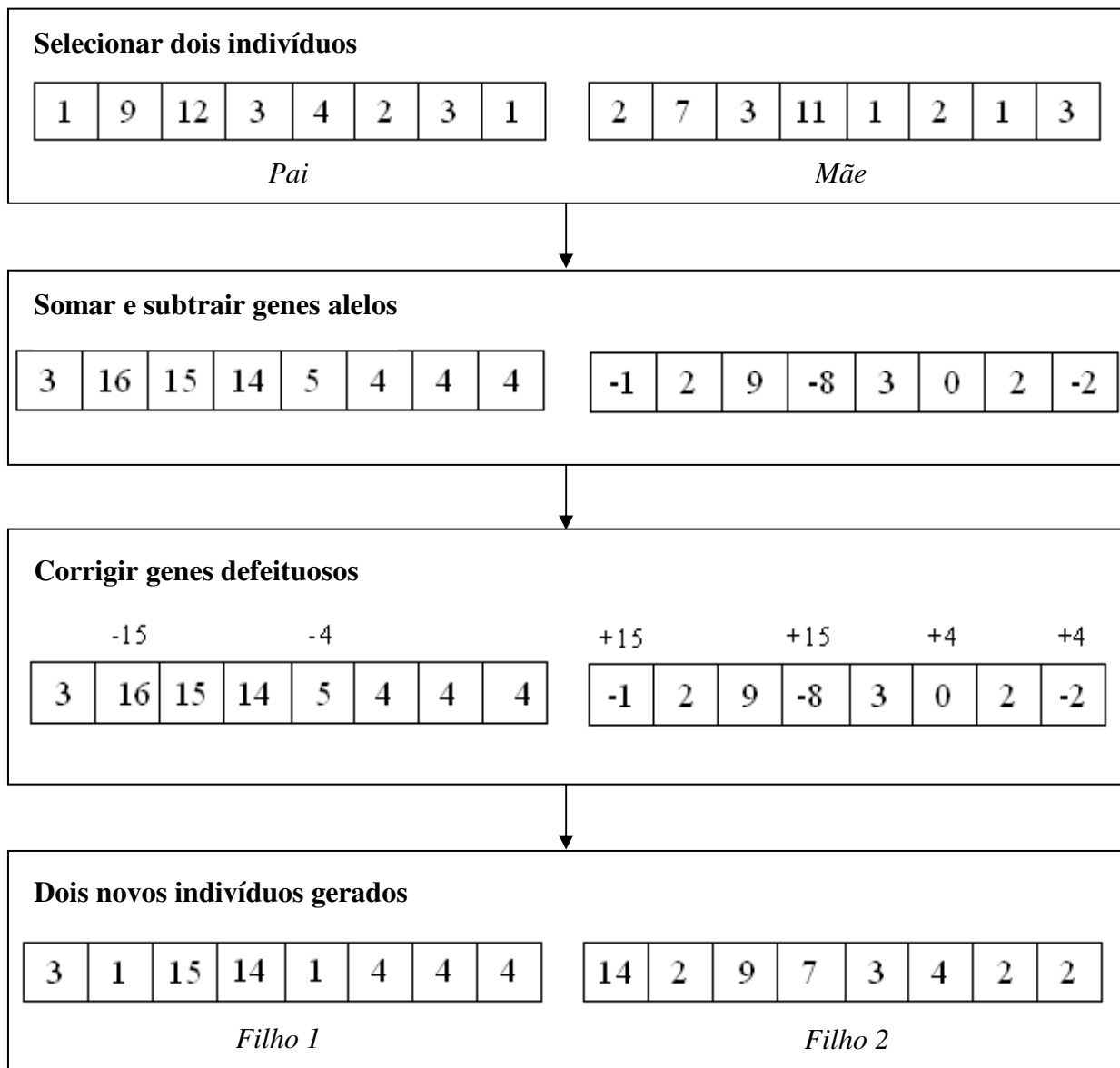


Figura 3.3 – Exemplo de cruzamento

3.2.2 Função Objetivo

Durante o início da pesquisa, a função objetivo empregada pelo algoritmo genético na avaliação das soluções foi estruturada com base nos tempos para atuação de cada relé como dispositivo de proteção primário e de retaguarda, segundo equação (3.2):

$$\text{Minimizar } F = \alpha \times T_1 + \beta \times \sum_{j=1}^{n-1} [(T_{j+1} - T_j) - \Delta t_1]^2 + \varphi \times \sum_{j=1}^{n-1} [(t_{j+1} - t_j) - \Delta t_2]^2 \quad (3.2)$$

sendo:

$\alpha, \beta, \varphi, \sigma$: constantes de ponderação;

n : número de relés que compõem a cadeia de proteção;

T_i : tempo para atuação do relé j para curto-circuito trifásico em sua barra;

T_{j+1} : tempo para atuação do relé $j+1$ para curto circuito trifásico aplicado na barra onde se encontra o relé j ;

t_j : tempo de atuação do relé j para o curto-circuito bifásico em sua barra;

t_{j+1} : tempo de atuação do relé $j+1$ para o curto-circuito bifásico na barra onde se encontra o relé j ;

Δt_1 : tempo de coordenação proposto como ótimo (empregou-se 0,4 segundos);

Δt_2 : tempo de coordenação obtido a partir de um incremento de 5% em Δt_1 .

Para obter os termos T_j e t_j , necessários ao cálculo da função objetivo, era necessário implementar sub-rotinas de cálculo específicas para cada função de proteção presente no sistema, o que desmotivava o uso do algoritmo proposto. A busca por uma forma de tornar o algoritmo independente da função de proteção a ser coordenada, levou a adoção de uma estratégia onde um programa de computador destinado a cálculos de ajuste e coordenação dos dispositivos de proteção operaria em conjunto com o algoritmo proposto de modo a fornecer a este último os termos de sua função objetivo.

Por dispor de características favoráveis as metas da pesquisa, o programa CAPE[®] de ajuste e coordenação de sistemas de proteção, foi utilizado como programa auxiliar do algoritmo proposto na determinação do valor de sua função objetivo. Para que a atuação conjunta entre algoritmo genético e programa auxiliar se desse de forma eficiente, foram necessárias adequações da função objetivo que resultaram na equação (3.3).

$$\text{Minimizar } F = \alpha \times ND + \beta \times NV + \varphi \times Tp + \sigma \times Ts \quad (3.3)$$

sendo:

$\alpha, \beta, \varphi, \sigma$: constantes de ponderação;

ND: número de descoordenações;

NV: número de violações ao intervalo de coordenação ótimo de 0,4 segundos

T_P : tempo para atuação da proteção primária;

T_S : tempo para atuação do último nível de retaguarda;

3.2.3 Fluxograma

A dinâmica do algoritmo genético de otimização da proteção de sobrecorrente em sistemas elétricos de distribuição pode ser resumida em um fluxograma, como o ilustrado na figura 3.4.

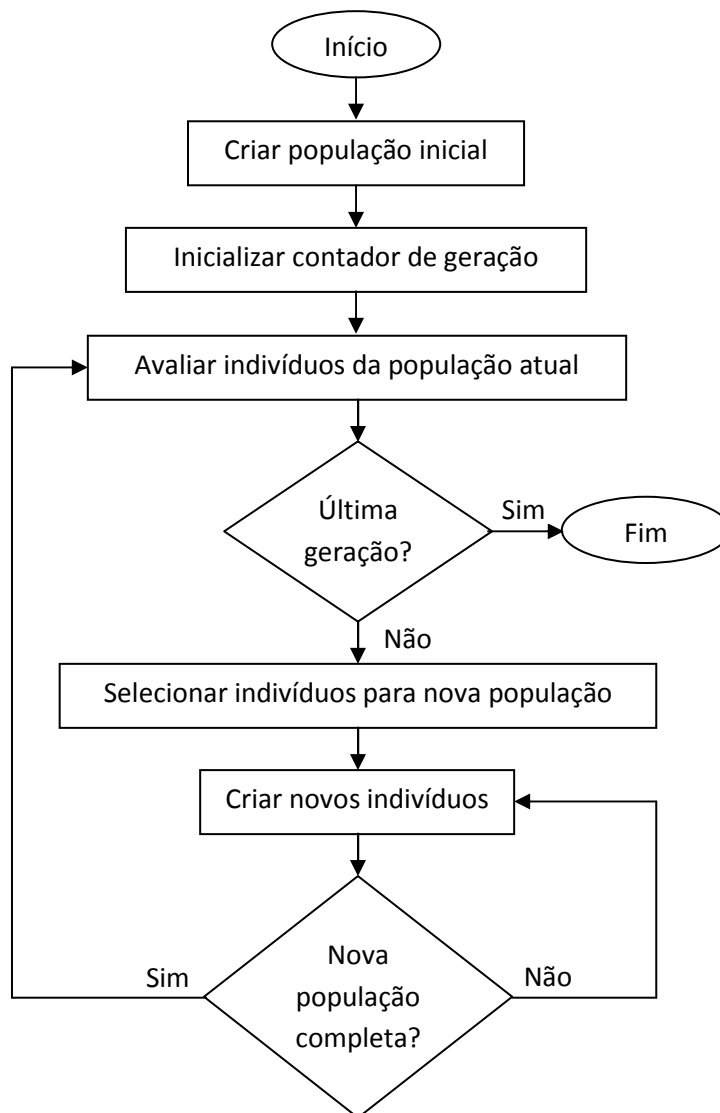


Figura 3.4 – Fluxograma do algoritmo genético de otimização da proteção de sobrecorrente em sistemas de distribuição.

Capítulo 4

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão discutidos os resultados obtidos utilizando-se dois sistemas testes, um sistema com 3 relés e outro com 5 relés. Os algoritmos foram implementados em linguagem C++ e os tempos de processamento foram obtidos utilizando-se um computador Intel[®] Core 2 Duo, 2 GHz e 4 GB de RAM.

4.1 SISTEMA TESTE 3 RELÉS

Um sistema teste composto de 3 relés, extraído do Regional Maceió pertencente à Eletrobrás Distribuição Alagoas, é apresentado na figura 4.1 e seus dados estão disponibilizados no apêndice A.1.

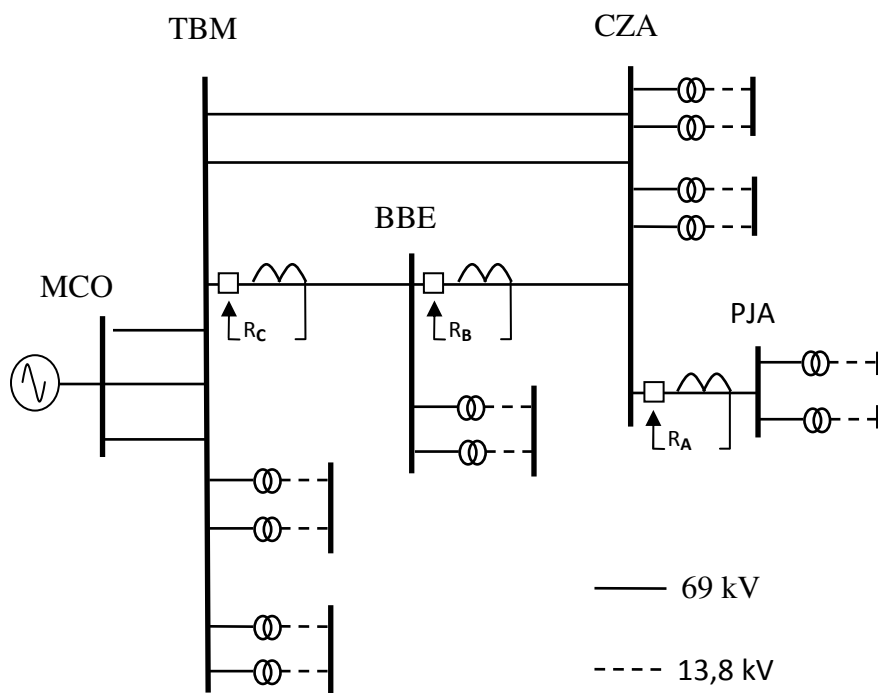


Figura 4.1 – Sistema teste com 3 relés.

Uma sequência de dez execuções do AG proposto foi realizada partindo-se da mesma população inicial composta por 100 indivíduos. Em todos os casos o limite de 200 gerações foi fixado. Na figura 4.2 podem ser visualizados o cromossomo da configuração ótima encontrada e as curvas de atuação dos relés que compõem a cadeia de proteção sob estudo associadas a este ótimo.

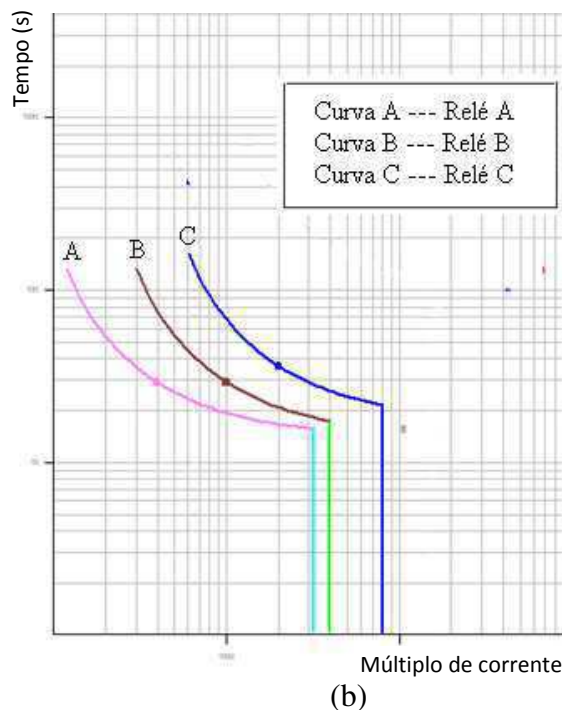
Segundo o cromossomo da configuração ótima, o ajuste da proteção de sobrecorrente do trecho sob estudo que emprega os tempos de coordenação mais próximos do ótimo proposto de 0,4 segundos é aquele em que o relé A deve atuar segundo a curva 0,1 extremamente inversa, relé B de acordo com a curva 0,3 muito inversa e o relé C conforme a curva 0,7 muito inversa.

Na figura 4.3 é mostrado o número da geração em que a solução ótima aparece e se mantém em todas as gerações subsequentes. Valores nulos de gerações significam que a solução ótima não foi encontrada nas 200 gerações tomadas como limite.

Na tabela 4.1 constam os tempos de coordenação da proteção (Δt) conseguidos com os ajustes atualmente empregados pela Eletrobrás Distribuição Alagoas e os que seriam observados caso os ajustes determinados pelo AG fossem empregados.

relé →	A	B	C	A	B	C
cromossomo →	0.1	0.3	0.7	3	2	2

(a)



(b)

Figura 4.2 – (a) Cromossomo da configuração ótima. (b) Coordenograma associado à coordenação ótima

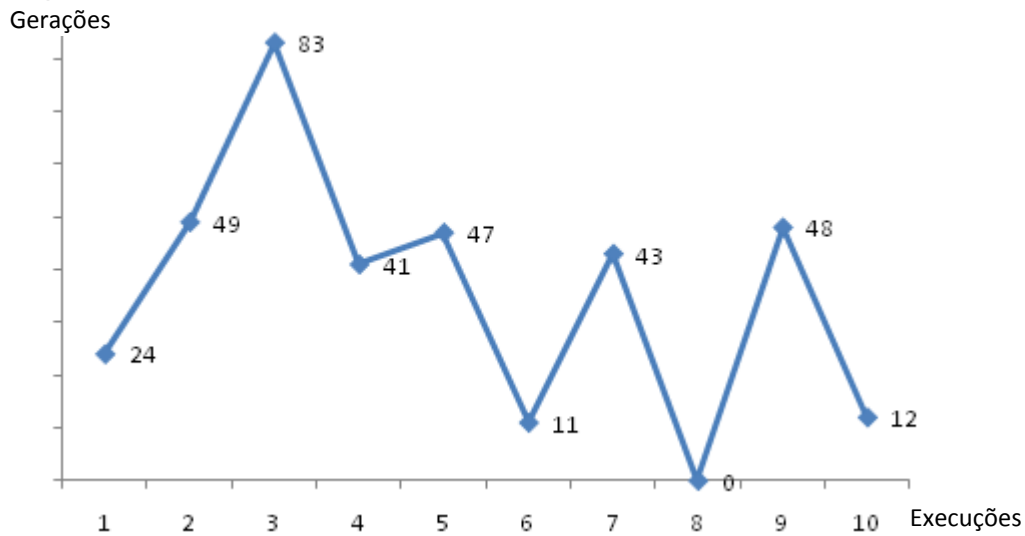


Figura 4.3 – Desempenho do algoritmo genético.

Tabela 4.1 – tempos de coordenação da proteção.

Coordenação	Ajustes em uso		Ajustes ótimos	
	Falta trifásica	Falta bifásica	Falta trifásica	Falta bifásica
A-B	-0,048 s	-0,050 s	0,318 s	0,529 s
B-C	0,610 s	0,661 s	0,447 s	0,553 s

De acordo com os resultados expressos na figura 4.3 o algoritmo é capaz de convergir para o ótimo global do caso proposto utilizando menos de 50% do número de gerações tomado como limite na maior parte de suas execuções. Da tabela 4.1, temos que o emprego dos ajustes sugeridos pelo algoritmo de coordenação proposto levaria a correção de casos de descoordenação observados no sistema teste.

4.2 SISTEMA TESTE 5 RELÉS

O sistema teste hipotético formado por 5 relés é apresentado na figura 4.4 e seus dados estão disponibilizados no apêndice A.1.

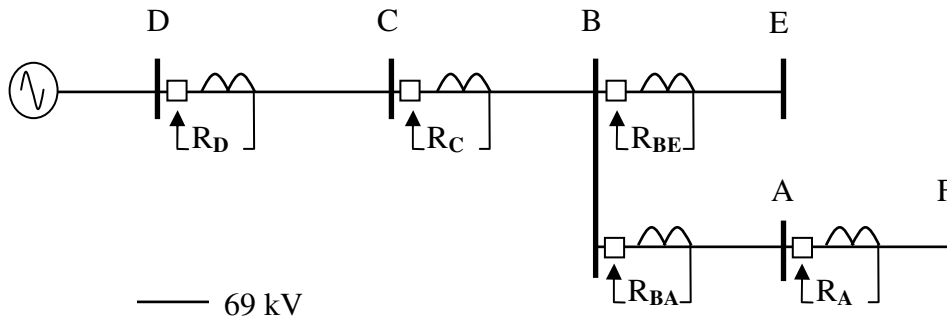


Figura 4.4 – Sistema teste hipotético com 5 relés.

Procedimentos para análise de desempenho semelhantes aos empregados no sistema teste de três relés foram novamente utilizados, partindo-se de uma população inicial fixa de 100 indivíduos. Em todos os casos o limite de 100 gerações foi assumido. Na figura 4.5 podem ser visualizados o cromossomo da configuração ótima encontrada e as curvas de atuação dos relés que compõem a cadeia de proteção sob estudo associadas a este ótimo.

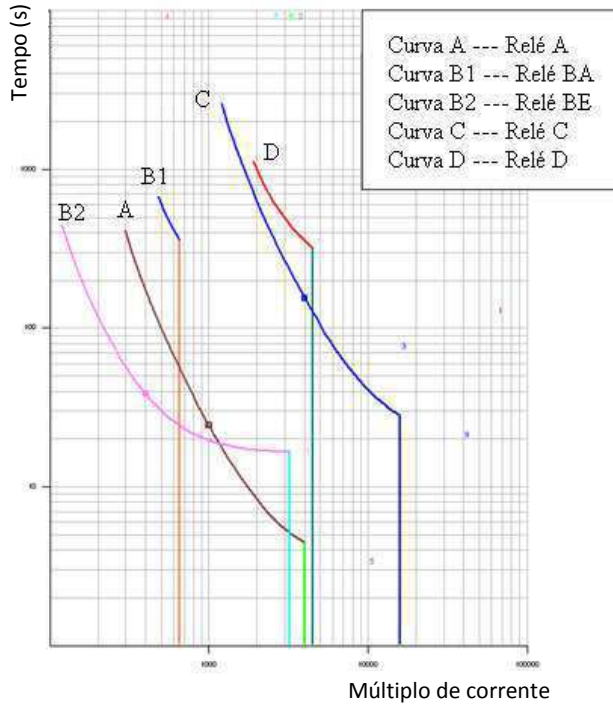
Neste caso, o cromossomo da configuração ótima determina que o ajuste da proteção de sobrecorrente do trecho sob estudo que emprega os tempos de coordenação mais próximos do ótimo proposto de 0,4 segundos é aquele em que o relé A deve atuar segundo a curva 0,5 muito inversa, relé BA de acordo com a curva 2 pouco inversa, o relé BE de acordo com a curva 1 inversa, o relé C segundo a curva 10 muito inversa e o relé D conforme a curva 12 pouco inversa.

Na figura 4.6 é mostrado o número da geração em que a solução ótima aparece e se mantém em todas as gerações subsequentes. Valores nulos de gerações significam que a solução ótima não foi encontrada nas 100 gerações tomadas como limite. Para a segunda execução do algoritmo, é ilustrado na figura 4.7 a variação da função objetivo até atingir o ótimo de 49995,36.

Na tabela 4.2 constam os tempos de coordenação da proteção (Δt) conseguidos com os ajustes determinados pelo AG fossem empregados.

relé →	A	BA	BE	C	D	A	BA	BE	C	D
cromossomo →	0.5	2	1	10	12	3	1	2	3	1

(a)



(b)

Figura 4.5 - (a) Cromossomo da configuração ótima. (b) Coordenograma associado à coordenação ótima

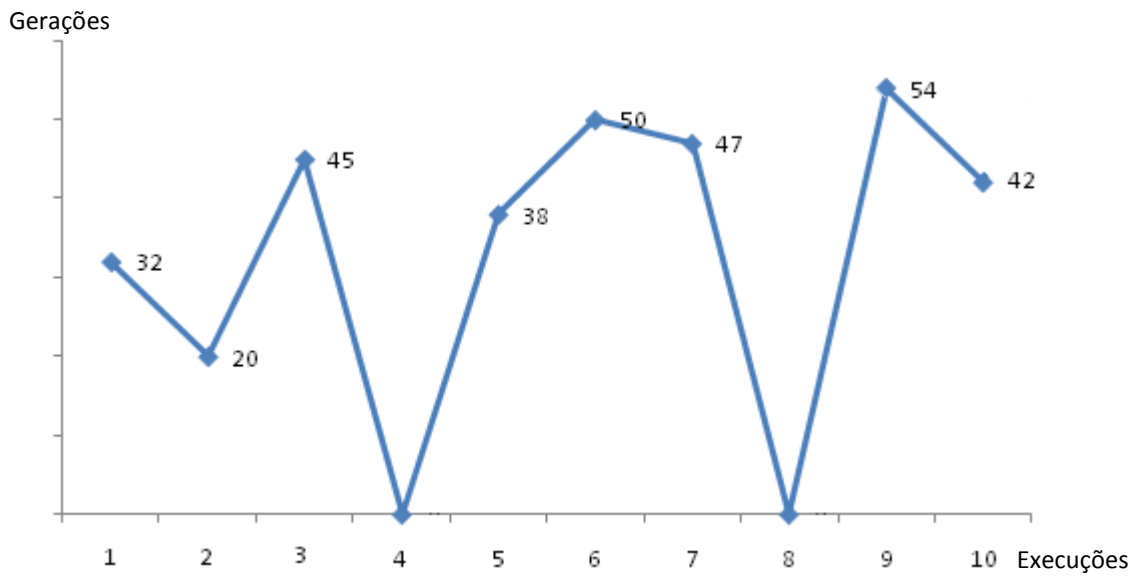


Figura 4.6 – Desempenho do algoritmo genético.

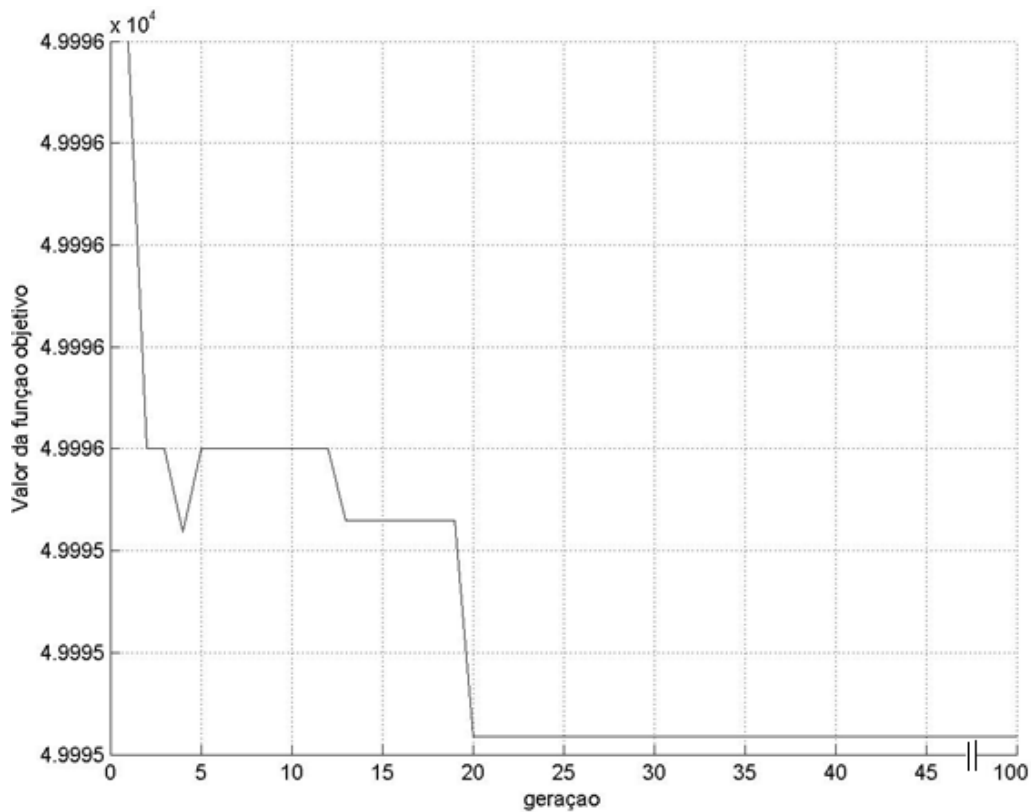


Figura 4.7 – Gráfico do mínimo valor da função objetivo versus número da geração.

Tabela 4.2 – Tempos de coordenação da proteção

Coordenação	Ajustes ótimos	
	Falta trifásica	Falta bifásica
BA-A	0,42 s	0,63 s
BA-C	0,5 s	0,73 s
BE-C	1,45 s	2,35 s
C-D	0,41 s	0,30 s

De acordo com os resultados expressos na figura 4.6 o algoritmo proposto teve desempenho semelhante diante das duas cadeias de proteção analisadas, sendo capaz de convergir para o ótimo global utilizando menos de 50% do número de gerações tomado como limite na maior parte de suas execuções. Da tabela 4.2, temos que o emprego dos ajustes sugeridos pelo algoritmo de coordenação levaria a uma proteção confiável, ou seja, sem atuações indevidas e veloz, na maior parte dos casos.

Capítulo 5

CONCLUSÕES

Um algoritmo genético para determinar a solução ótima para coordenação da proteção de sobrecorrente em sistemas elétricos de distribuição foi proposto. A estratégia de solução do problema alvo ficou centrada na escolha adequada da curva característica de cada relé que compõe a cadeia de proteção, não abrangendo o dimensionamento dos transformadores de corrente o qual é suposto adequado e realizado em etapa prévia.

Ao invés de despende esforços no desenvolvimento de rotinas auxiliares encarregadas dos estudos de proteção, preferiu-se empregar o CAPE[®] no lugar destas, um programa de computador utilizado no projeto e análise de sistemas de proteção de uso consolidado no mercado. Dessa forma além de focar as pesquisas no objetivo principal: o desenvolvimento de um algoritmo genético, ganha-se na qualidade das soluções encontradas, visto que as mesmas são validadas pelo CAPE[®] empregado como “motor” do algoritmo genético.

Uma estratégia de codificação decimal foi adotada onde os parâmetros necessários a escolha das curvas características são codificados em partes distintas do cromossomo. Na primeira parte, os genes indicam o TD da curva. Na segunda, os genes informam a classe da curva de cada relé. Modificações nos métodos usuais de cruzamento e mutação foram implementadas para impedir a geração de soluções ineficazes.

Como principal melhoria com relação ao trabalho que foi desenvolvido para efeito de elaboração desta dissertação pode-se citar o aprimoramento das rotinas que possibilitam a interação entre os programas de computador utilizados, o que agilizaria o processo de otimização.

Outra oportunidade para trabalhos futuros nesta mesma linha de pesquisa seria verificar o desempenho do algoritmo proposto frente à proteção direcional e a de distância, identificando pontos vulneráveis do algoritmo e propondo formas de corrigi-los.

Referências Bibliográficas

- BRAZ, H. D. de M. *Algoritmos Genéticos para configuração ótima de Redes de Distribuição de Energia Elétrica*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, dezembro de 2003
- CHATTOPADHYAY, B., SACHDEV, M. S. and SIDHU, T. S. An online relay coordination algorithm for adaptive protection using linear programming technique. *IEEE Trans. Power Del.*, Vol. 11, pp. 165-173, 1996.
- ENGLISH, W., ROGERS, C., *Automating Relay Coordination*, IEEE Computer Applications in Power, 1994.
- GIRGIS, A., Brahma, S., Effect of Distributed Generation on Protective Device Coordination in Distribution System. *Proc. Large Eng. Syst. Conf.*, 115-119. Halifax, NS, Canada, 2001.
- IEEE, “C37.112-1996 IEEE Standard Inverse-Time Characteristic Equations for Overcurrent Relays”, 1996.
- GOLDBERG, D. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley, 1989.
- KAWAHARA, K., SASAKI, H., SUGIHARA, H., An Application of Rule Based System to the Coordination of Directional Overcurrent Relays, *Developments in Power System Protection*, Conference Publication, n° 434, IEE, 1997.
- ORDUÑA, E., GARCÉS, F., HANDSHIN, E., Algorithmic-Knowledge-Based Adaptive Coordination in Transmission Protection, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, n°. 1, January 2003.
- PÉREZ, L. G., UURDANETA, A. J., SORRENTINO, E. S., GRAYAR, F. G., URIZAR, A., LEDEZMA, J. C., ALCALA, G., CARRION, N., CANACHE, C., FERNADEZ, J., SANZ, O., GUEVARA, F., Comparison of Time Coordination Feasibility Criteria for a Subtransmission System Protection Scheme. *Proc. of the 2nd IEEE International Caracas Conference on Devices, Circuits and Systems*, pp. 314-319. Isla de Margarita, Venezuela, 1998.
- SO, C. W., Li, K. K., *Time Coordination Method For Power System Protection By Evolutionary Algorithm*, IEEE Industrial Applications Society, 1999.

SO.W., Li,K., Intelligent Method for Protection Coordination, International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies, IEEE, 2004

URDANETA, A. J., PÉREZ, L. G., RESTREPO, H., SÁNCHEZ, J., FAJARDO J., Consideration of the Transient Configurations in the Optimal Coordination Problem of Directional Overcurrent Relays, First IEEE International Caracas Conference on Devices, Circuits and Systems, Caracas, Venezuela, 1995.

YINHONG, L., DONGYUAN, S., XIANZHONG, D., A Study on Optimal Coordination of Definite-time Relay Based on Genetic Algorithm, 2003 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2003.

Apêndice A

DADOS DOS SISTEMAS TESTE

Sistema teste 3 relés

Na figura A.1 é representado o sistema teste com 3 relés. Informações sobre o sistema são apresentadas na tabela A.1 e A.2.

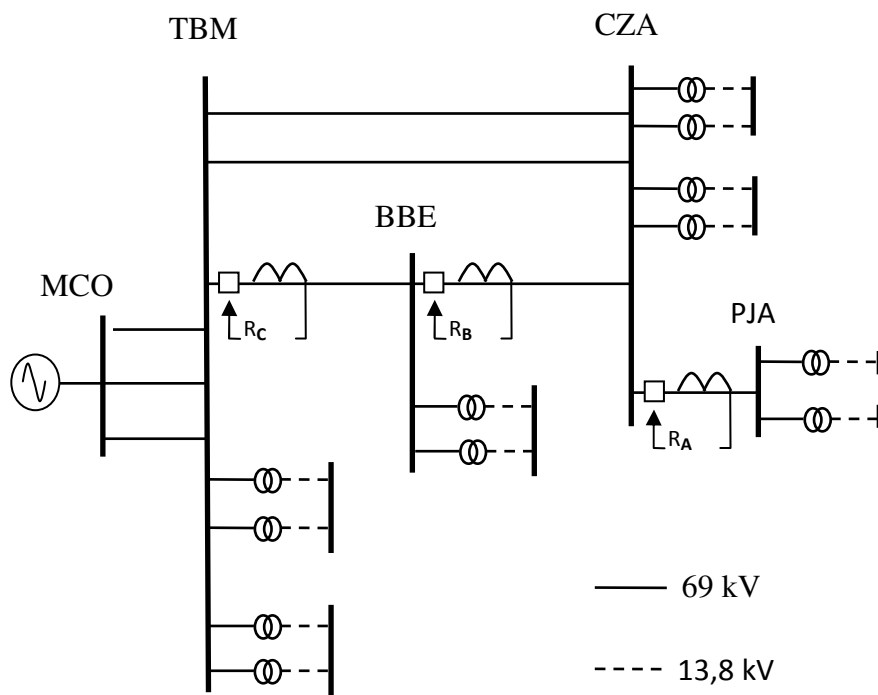


Figura A.1 – Sistema teste com 3 relés.

Tabela A.3 – Dados de linha e do gerador

Trecho	Seq. (+)		Seq. (0)		V(kV)
	R(Ω)	X(Ω)	R(Ω)	X(Ω)	
G – D	0,14	2,79	0	20	69
D – C	0,03	0,19	0,11	0,76	69
C – B	2,17	7,19	5,04	27,57	69
B – A	0,67	2,32	1,58	8,75	69
B – E	2,17	7,19	5,04	27,57	69
A – F	0,67	2,32	1,58	8,75	69

Tabela A.4 - Relação de TCs utilizadas.

Barra	RTC
D	160
C	160
B	40
A	40

Apêndice B

PARAMETRIZAÇÃO DO AG

Sistema teste 3 relés

Tabela B1 – Parametrização do AG

Parâmetro	Valor
Tamanho da população	100
Nº de gerações	200
Seleção	Torneio
Função objetivo	$\alpha = \beta = 100$ e $\gamma = 1$
Taxa de cruzamentos	0,25
Taxa de mutação	0,02

Sistema teste 5 relés

Tabela B2 – Parametrização do AG

Parâmetro	Valor
Tamanho da população	100
Nº de gerações	100
Seleção	Torneio
Função objetivo	$\alpha = \beta = 100$ e $\gamma = \sigma = 1$
Taxa de cruzamentos	0,60
Taxa de mutação	0,01

Apêndice C

PUBLICAÇÕES EM EVENTOS

Souza, B. A.; Oliveira, N. L. S.; Leite, L. R. P. *A coordenação da proteção de Sistemas de Distribuição como um problema de otimização*. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE, Belém – PA, Mai. 2010;

Oliveira, N. L. S.; Souza, B. A. *Coordenação ótima da proteção de sobrecorrente em sistemas elétricos de distribuição utilizando algoritmos genéticos*. Congresso Brasileiro de Automática, Bonito – MS, Set. 2010;

Souza, B. A.; Oliveira, N. L. S.; Júnior F. C. S. *Automatização da coordenação da proteção de sobrecorrente em sistemas elétricos de distribuição utilizando algoritmos genéticos*. IEEE/PES T&D 2010, São Paulo – SP, Nov. 2010.