Universidade de São Paulo Escola de Engenharia de São Carlos Departamento de Engenharia Elétrica Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

FÁBIO MARCELINO DE PAULA SANTOS

Algoritmo Enxame de Partículas Evolutivo para o problema de coordenação de relés de sobrecorrente direcionais em sistemas elétricos de potência

> São Carlos 2013

FÁBIO MARCELINO DE PAULA SANTOS

Algoritmo Enxame de Partículas Evolutivo para o problema de coordenação de relés de sobrecorrente direcionais em sistemas elétricos de potência

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Engenharia Elétrica

Área de concentração: Sistemas Elétricos de Potência

ORIENTADOR: Prof. Dr. Eduardo Nobuhiro Asada

São Carlos 2013

Trata-se da versão corrigida da dissertação. A versão original se encontra disponível na EESC/USP que aloja o Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica.

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Santos, Fábio Marcelino de Paula
S237a Algoritmo Enxame de Partículas Evolutivo para o problema de coordenação de relés de sobrecorrente direcionais em sistemas elétricos de potência / Fábio Marcelino de Paula Santos; orientador Eduardo Nobuhiro Asada. São Carlos, 2013.
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Sistemas Elétricos de Potência -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2013.
1. Coordenação de relés. 2. Enxame de Partículas Evolucionário. 3. Metaheurísticas. 4. Proteção inteligente. 5. Relés direcionais de sobrecorrente. I. Título.

Candidato: Engenheiro FÁBIO MARCELINO DE PAULA SANTOS.

Título da dissertação: "Algoritmo enxame de partículas evolutivo para o problema de coordenação de relés de sobrecorrente direcionais em sistemas elétricos de potência".

Data da defesa: 21/06/2013

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Eduardo Nobuhiro Asada (Orientador) (Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. Mário Oleskovicz (Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof^a. Dr^a. Marina Lavorato de Oliveira APROVADO (Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP-Ilha Solteira)

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Presidente da Comissão de Pós-Graduação: Prof. Titular Denis Vinicius Coury

Resultado:

Aprovado

"No que diz respeito ao desempenho, ao compromisso, ao esforço, à dedicação, não existe meio termo. Ou você faz uma coisa bem feita ou não a faz."

Ayrton Senna

Aos meus Pais, Daniel e Helena, e às minhas irmãs, Thais e Fernanda.

Agradecimentos

A Deus por tudo.

Ao professor Eduardo Nobuhiro Asada, pela orientação, conselhos e ensinamentos.

Aos professores Denis V. Coury, José Carlos de Melo Vieira Jr. e Mário Oleskovicz pela orientação concedida.

Aos colegas do Laboratório de Análise de Sistemas de Energia Elétrica, em especial aos colegas Wellington Bernardes e Eduardo Werley pelas discussões e contribuições.

A Camila Cota pelo companheirismo durante a árdua caminhada do Mestrado.

Ao apoio financeiro da Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista (CTEEP) por meio do projeto de P&D ANEEL 68-20/2011.

Resumo

Um sistema elétrico de potência agrega toda a estrutura pela qual a energia elétrica percorre, desde a sua geração até o seu consumo final. Nas últimas décadas observou-se um significativo aumento da demanda e, consequentemente, um aumento das interligações entre sistemas, tornando assim a operação e o controle destes extremamente complexos. Com o fim de obter a desejada operação destes sistemas, inúmeros estudos na área de Proteção de Sistemas Elétricos são realizados, pois é sabido que a interrupção desses serviços causam transtornos que podem assumir proporções desastrosas. Em sistemas elétricos malhados, nos quais as correntes de curto-circuito podem ser bidirecionais e podem ter intensidades diferentes devido a alterações topológicas nos mesmos, coordenar relés de sobrecorrente pode ser uma tarefa muito trabalhosa caso não haja nenhuma ferramenta de apoio. Neste contexto, este trabalho visa o desenvolvimento de uma metodologia eficiente que determine os ajustes otimizados dos relés de sobrecorrente direcionais instalados em sistemas elétricos malhados de forma a garantir a rapidez na eliminação da falta, bem como a coordenação e seletividade, considerando as várias intensidades das correntes de curto-circuito. Seguindo essa linha de raciocínio, observou-se que o uso de técnicas metaheurísticas para lidar com o problema da coordenação de relés é capaz de alcançar resultados significativos. No presente projeto, dentre os algoritmos inteligentes estudados, optou-se por pesquisar a aplicação do Algoritmo Enxame de Partículas Evolutivo (Evolutionary Particle Swarm Optimization) por este apresentar como características as vantagens tanto do Algoritmo Enxame de Partículas (Particle Swarm Optimization) quanto as dos Algoritmos Genéticos, possuindo assim grande potencial para solução destes tipos de problemas.

Palavras-chave: Algoritmo Enxame de Partículas, Algoritmo Enxame de Partículas Evolucionário, Coordenação de Relés, Proteção Inteligente, Relés Direcionais de Sobrecorrente.

Abstract

An electric power system aggregates all the structure in which the electric energy travels, from its generation to the final user. In the last decades it has been observed a significative increase of the demand and, consequently, an increment of the number of interconnections between systems, making the operation and control of them extremely complex. Aiming to obtain a good operation of this kind of systems, a lot of effort in the research area of power system protection has been spent, because it is known that the interruption of this service causes disorders that may assume disastrous proportions. In meshed power systems, in which the shortcircuit currents might be bidirectional and might have different magnitudes due to topological changes on them, to coordinate overcurrent relays may be a really hard task if you do not have a support tool. Look in this context, this work aims the development of and efficient methodology thats determine the optimal parameters of the directional overcurrent relays in a meshed electric power system ensuring the quickness in the fault elimination, as well as the coordination and selectivity of the protection system, considering the various intensities of the short-circuit currents. Maintaining this line, it has been noticed that the use of metaheuristics to deal with the problem of relay coordination is capable of achieving promissory results. In the present research, among the studied intelligent algorithms, it was chosen to use in it the Evolutionary Particle Swarm Optimization, due to its features thats is the advantages of the Particle Swarm Optimization as well as the Genetic Algorithms ones, hence it has great potential do solve theses kind of problems.

Keywords: Directional Overcurrent Relays, Evolutionary Particle Swarm Optimization, Particle Swarm Optimization, Protection Coordination, Relay Coordination.

Lista de llustrações

2.1	Subsistemas do sistema de proteção associado (COURY; OLESKOVICZ; GIOVA- NINI (2007))	28
2.2	Zonas de proteção primária delimitadas sobre um SEP qualquer (PHADKE; THORP (1990))	29
2.3	Princípio da sobreposição das zonas de proteção (COURY; OLESKOVICZ; GIO-	
	VANINI (2007))	29
2.4	Fluxos de corrente para uma falta F em um sistema em malha	31
2.5	Relé direcional do tipo atração eletromagnética (MASON (1956))	33
2.6	Diagrama fasorial de operação de um relé direcional polarizado por tensão (CAMI-	
	NHA (1977))	34
2.7	Conexão 0^o	34
2.8	Conexão 30^o	35
2.9	Conexão 60^o	35
2.10	Conexão 90^o	35
2.11	Linhas de transmissão paralelas interligando dois sistemas com fontes geradoras	
	(ANDERSON (1999))	36
2.12	Aplicação de relés direcionais de sobrecorrente ao sistema em estudo (ANDERSON	
	(1999))	37
2.13	Estudo de caso	38
2.14	Exemplo de aplicação de relés direcionais (ANDERSON (1999))	39
2.15	Curva característica de um relé de sobrecorrente com atuação instantânea	40
2.16	Curva característica de um relé de sobrecorrente com atuação de tempo definido	
	(SOARES (2009))	41
2.17	Curvas de tempo do tipo extremamente inversa segundo padrão ANSI (SOARES	
	(2009))	42
2.18	Curvas de tempo do tipo extremamente inversa segundo padrão IEC (SOARES	
	(2009))	43
3.1	Exemplo de busca pela solução ótima global.	46

3.2	Fluxograma de um AG básico.	48
3.3	Fluxograma de um PSO básico	51
3.4	Fluxograma de um EPSO básico	55
4.1	O subsistema proposto por (RAMASWAMI; DAMBORG; VENKATA (1990)) (Adap-	
	tado Sistema IEEE 30 barras).	59
4.2	Curvas ajustadas dos relés direcionais de sobrecorrente com unidades instantâneas	
	(PÉREZ; URDANETA (1999))	61
4.3	Curvas ajustadas dos relés direcionais de sobrecorrente, relés de distância, unidades	
	instantâneas e relé de falha de disjuntor (PÉREZ; URDANETA (1999))	61
5.1	Sistema de distribuição radial simples. Adaptado de (PRASHANT; SUDHIR; VI-	
	JAY (2009))	70
6.1	Fluxograma do Algoritmo Restritivo implementado	76
6.2	Fluxograma do algoritmo de discretização das variáveis.	77
6.3	Fluxograma do algoritmo que melhora a eficiência de convergência das metaheu-	
	rísticas	79
6.4	Analogia para a metodologia desenvolvida. Adaptado de (MOURAO; PINHO; SI-	
	MOES (2013))	80
6.5	Fluxograma do PSO implementado.	81
6.6	Fluxograma do EPSO implementado.	82
7.1	Alimentador teste 13 barras IEEE (Modificado)	86
7.2	Gráfico FO x Número de iterações das respostas otimizadas por meio do PSO	90
7.3	Gráfico FO x Número de iterações das respostas otimizadas por meio do EPSO	90
7.4	Sistema CTEEP de 19 barras	91
7.5	Gráfico FO x Número de iterações das respostas otimizadas por meio do PSO	98
7.6	Gráfico FO x Número de iterações das respostas otimizadas por meio do EPSO	98

Lista de Tabelas

2.1	Constantes referentes ao padrão ANSI	41
2.2	Constantes referentes ao padrão IEC	42
6.1	Exemplo de discretização das variáveis TMS	78
7.1	Caso 1 - Máxima corrente de carga permissível no circuito	86
7.2	Caso 1 - Relação de relés primários e secundários.	87
7.3	Caso 1 - Magnitude das correntes de falta	87
7.4	Caso 1 - Solução otimizada encontrada - Parâmetros dos dispositivos	88
7.5	Caso 1 - Solução otimizada encontrada - Tempos de atuação dos relés (s)	89
7.6	Caso 1 - Solução otimizada encontrada - Desempenho das Metaheurísticas	89
7.7	Caso 1 - Solução otimizada encontrada - Comparação de resultados	89
7.8	Caso 2 - Máxima corrente de carga permissível	92
7.9	Caso 2 - Relação de relés primário/retaguarda	92
7.10	Caso 2 - Solução otimizada encontrada - Parâmetros dos dispositivos	94
7.11	Caso 2 - Solução otimizada encontrada - Tempos de atuação dos relés (s)	96
7.12	Caso 2 - Solução otimizada encontrada - Resultados	98
7.13	Caso 2 - Solução otimizada encontrada - Comparação de resultados	99

Lista de Símbolos

ϕ	Ângulo de sensibilidade máxima
au	Parâmetro de aprendizado
au'	Parâmetro de aprendizado relativo a pg_k
θ	Ângulo entre a corrente de operação e a tensão de polarização
C_1	Constante congnitiva
C_2	Constante social
f	Função Objetivo
F_e	Força Elétrica
Н	Sensibilidade de um relé
i	Índice da partícula
Ι	Corrente vista pelo relé
I_a	Corrente da bobina de acionamento
I_b	Corrente da bobina de polarização
I_p	Corrente de magnetização do relé
ITC	Intervalo de tempo de coordenação.
k	Iteração atual
K_1	Constante da curva do relé definida por norma
K_2	Constante da curva do relé definida por norma
K_3	Constante da curva do relé definida por norma
Kd_1	Constante de Conversão de Força
Kd_2	Força de restrição
P^i	Melhor posição prévia da partícula i
pb_k^i	Melhor posição da partícula i na iteração k
pg_k	Melhor posição do enxame na iteração k
R_1	Constante aleatória com probabilidade uniforme entre 0 e 1

R_2	Constante aleatória com probabilidade uniforme entre 0 e 1
T_x	Tempo de atuação do relé x .
TMS	Múltiplo de corrente do relé
v^i	Velocidade da partícula i
V_P	Magnitude da tensão da bobina de polarização
x^i	Posição da partícula i
w	Coeficiente de inércia

Sumário

1	Introdução		23
	1.1	Justificativas e objetivos	24
	1.2	Organização da dissertação	25
2	Pro	teção de Sistemas Elétricos de Potência	27
	2.1	Proteção de linhas de transmissão	31
	2.2	Coordenação da proteção	37
	2.3	Modelos matemáticos para representar os relés direcionais de sobrecorrente	40
	2.4	Considerações finais sobre este capítulo	43
3	Met	aheurísticas	45
	3.1	Algoritmos Genéticos	47
	3.2	PSO	50
	3.3	O EPSO	53
	3.4	Critérios de parada	55
	3.5	Considerações finais sobre esse capítulo	56
4	Coo	rdenação de Relés Direcionais de Sobrecorrente Utilizando Metaheurísticas	57
	4.1	Os primeiros trabalhos	57
	4.2	Aplicações de técnicas convencionais	59
	4.3	Aplicação de algoritmos inteligentes para o problema de ajuste de coordenação	
		de relés direcionais	62
	4.4	Considerações finais sobre este capítulo	68
5	For	mulação do Problema	69
	5.1	Modelagem do problema	69
	5.2	Modelando um problema exemplo	70
	5.3	Considerações finais sobre esse capítulo	73

6	Met	odologia Utilizada	75
	6.1	As restrições do problema de coordenação de relés direcionais	75
	6.2	Discretização das variáveis	77
	6.3	Melhorando a eficiência da convergência	78
	6.4	Critérios de parada	80
	6.5	As metaheurísticas implementadas	81
	6.6	Considerações finais sobre esse capítulo	82
7	7 Resultados		85
	7.1	Caso teste 1: Alimentador teste 13 barras IEEE	85
	7.2	Caso teste 2: Sistema em malha	91
8 Conclusão		clusão	101
	8.1	Continuidade do trabalho	102
Re	Referências		

Capítulo 1

Introdução

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) agrega toda a estrutura pela qual a energia elétrica percorre, desde a sua geração até o seu consumo final. São partes de um SEP: o sistema de ge-ração, os sistemas de transmissão e distribuição, e as cargas. Nas últimas décadas observou-se um significativo aumento da demanda de energia elétrica e também a necessidade de sistemas com maior confiabilidade, o que causou um aumento das interligações entre os mesmos, tor-nando assim a operação e o controle destes extremamente complexos. Com o fim de obter a correta operação destes sistemas, inúmeros estudos na área de Proteção de Sistemas Elétricos são realizados, pois é sabido que a interrupção desses serviços causam transtornos que podem assumir proporções desastrosas.

Dada a complexidade de um SEP, intui-se que o sistema de proteção que o guarda tem de ser robusto, confiável e muito eficaz. Para apresentar essas características, este sistema é constituído por uma infraestrutura complexa que contém diversos componentes com funções e configurações de operação bem definidas. A falha ou defeito de um ou de vários componentes, bem como o ajuste (parametrização) inadequado dos mesmos pode comprometer, num primeiro momento, pequenas porções do sistema e, numa situação mais grave, acarretar na propagação do distúrbio para todo o restante do SEP. Sendo assim, os princípios básicos de operação dos dispositivos de proteção devem garantir uma correta análise e/ou diagnóstico do problema, bem como rapidez na resposta no sentido de retornar o sistema, o mais rápido possível, às suas condições normais de operação. Para isto, o sistema de proteção deve estar apto a detectar, selecionar e isolar o distúrbio manifestado de modo a salvaguardar as porções do SEP como um todo.

Os vários componentes de um SEP podem ser protegidos de diferentes formas. Dentre essas formas, uma simples e eficiente maneira de resguardar um determinado elemento ou seção do SEP, se dá pelo registro e análise da magnitude da corrente como um indicador de falta (defeito, ou de curto-circuito). Pela análise desta grandeza, o relé de sobrecorrente, assim nomeado em função da variável em observação, é então capaz de acionar manobras no sistema (isolando as partes faltosas) de modo a protegê-lo. Neste trabalho, a proteção de linhas de transmissão

estará em foco. Contudo, deve-se evidenciar que estas são comumente configuradas de forma malhada, ou seja, a contribuição de corrente de falta pode vir de direções distintas, tornando o uso exclusivo de relés de magnitude uma estratégia ineficiente. Assim, uma alternativa a ser utilizada de modo a contornar esse tipo de problema é a opção pelos relés direcionais de sobrecorrente. Este tipo de relé permite o ajuste direcional da corrente, privilegiando, dessa forma, uma melhor seletividade e coordenação dos dispositivos de proteção.

Situados os tipos de dispositivos a serem utilizados e o foco deste trabalho, pode-se então caracterizar o objetivo do mesmo. Deseja-se obter um sistema de proteção coordenado e seletivo, de modo a resguardar o SEP como um todo. Para isso, faz-se necessário o conhecimento acerca do perfil das possíveis faltas (situações de curtos-circuitos, defeitos) que podem ocorrer na área a ser protegida, das diferentes configurações topológicas a que estão sujeitas o SEP, das condições operativas dos equipamentos instalados, e ainda das opções de ajustes disponíveis nos relés. A análise destas informações é imprescindível para o sucesso deste trabalho.

Estabelecido o cenário de atuação desse projeto, nota-se que o problema supracitado é bastante complexo, e ainda apresenta forte dependência do tamanho do sistema elétrico a ser analisado e do número de dispositivos de proteção presentes no mesmo. Por conseguinte, à medida que o sistema cresce tem-se também um aumento significativo da complexidade do problema a ser trabalhado. Raciocinando sobre esse aspecto, desenvolver uma ferramenta computacional para a resolução desse tipo de situação ocasionará ganhos significativos de tempo, precisão e confiabilidade quando comparada à solução manual da mesma.

As características de múltiplas opções de ajustes de relés de proteção, aliadas ao atendimento de metas definem a questão como um problema de otimização do tipo combinatório com grande número de restrições. Não se sabe, atualmente, de softwares comerciais que são utilizados com a finalidade de solucionar esse tipo de problema. Dentre os softwares existentes na área de proteção de sistemas elétricos há, predominantemente, apenas uma forte ênfase referente a funções de verificação dos ajustes propostos pelo engenheiro de proteção e a possibilidade de realizar a coordenação manual de relés de diferentes tipos. Mesmo assim, essas aplicações exigem intensivos estudos e análises preliminares complexas que constituem o referido problema de coordenação.

Diante de tal realidade, o trabalho proposto visa à pesquisa e ao desenvolvimento de uma metodologia, combinada a sua implementação a um programa computacional baseado em técnicas inteligentes, que seja capaz de disponibilizar ao engenheiro de proteção a opção de ajustes que resultem em uma coordenação de excelente qualidade dos relés direcionais de sobrecorrente instalados em SEPs malhados.

1.1 Justificativas e objetivos

Por se tratar de um problema de otimização complexo, o ajuste de relés direcionais de sobrecorrente instalados em SEPs malhados pode ser solucionado por meio de algoritmos de

otimização baseados em conceitos de inteligência artificial. Dentre o algoritmos dessa classe usados para esse fim, tem-se o Algoritmo Genético (AG) e o Particle Swarm Optimizaion (PSO) em destaque sobre os demais. Adianta-se ainda, que em muitos dos trabalhos consultados os referidos algoritmos são combinados com técnicas convencionais de Programação Linear (PL) e de Programação Não Linear (PNL), a depender da formulação matemática do problema de ajuste da coordenação.

É de suma importância lembrar que o objetivo principal deste projeto contempla o desenvolvimento de um algoritmo fundamentado em técnicas inteligentes, que resultará em uma ferramenta cujo ideal será a obtenção dos ajustes otimizados dos relés direcionais de sobrecorrente numa área alvo qualquer. Salienta-se ainda que os ajustes dos dispositivos de proteção devem ser determinados visando à rapidez na eliminação das faltas, o atendimento dos critérios de coordenação e seletividade desejados, e ainda a robustez da proteção do sistema para os vários tipos e locais de incidências de faltas (defeitos e/ou curto-circuitos).

1.2 Organização da dissertação

Este documento está organizado da seguinte forma:

- O Capítulo 2 apresenta uma revisão da teoria de proteção de sistemas elétricos de potência. Tópicos como o princípio de coordenação de relés de sobrecorrente e características dos relés direcionais de sobrecorrente são abordados;
- Um estudo sobre Metaheurísticas que serão utilizadas nesse projeto é encontrado no Capítulo 3.
- No Capítulo 4 é apresentada uma revisão bibliográfica a respeito de métodos de coordenação de relés direcionais de sobrecorrente, os quais envolvem o emprego de técnicas de otimização, metaheurísticas e algoritmos genéticos;
- O Capítulo 5 a modelagem matemática do problema é descrita;
- A metodologia desenvolvida é enfatizada no Capítulo 6;
- No Capítulo 7 os resultados obtidos são discutidos;
- E por fim, o Capítulo 8 apresenta a conclusão do trabalho.

Capítulo 2

Proteção de Sistemas Elétricos de Potência

Em Hewitson, Brown e Balakrishnan (2004) destaca-se as principais funções de um sistema de proteção como as seguintes: (i) proteger o SEP de forma a manter a continuidade do fornecimento da energia elétrica; (ii) evitar ou minimizar os danos e os custos de reparos em equipamentos (manutenção corretiva); e (iii) garantir a integridade física dos envolvidos, ou seja, operadores e usuários do sistema elétrico. De forma a realizar tais funções com excelência, um sistema de proteção deve, essencialmente, possuir quatro características funcionais. São elas: sensibilidade, seletividade, velocidade de atuação e confiabilidade (HEWITSON; BROWN; BALAKRISHNAN (2004)).

Por sensibilidade entende-se ser a capacidade da proteção em responder às variações nas condições de operação e aos curtos-circuitos incidentes no SEP, tomando como parâmetro de-terminadas especificações de projeto (CAMINHA (1977)).

A seletividade caracteriza-se pela propriedade do sistema de proteção ser capaz de isolar completamente um componente defeituoso, procurando isolar a menor porção possível do SEP protegido (HEWITSON; BROWN; BALAKRISHNAN (2004); CAMINHA (1977)). Para isso, cada dispositivo de proteção deve detectar e selecionar em quais situações é necessária a sua rápida atuação, quando nenhum tipo de atuação deve ser realizada ou uma atuação com retardo de tempo é exigida, frente a uma ocorrência de defeito e/ou não conformidade na operação do SEP.

Como o próprio nome sugere, a velocidade de atuação refere-se ao quão rápido se dá a atuação da proteção quando esta é requisitada. Essa característica funcional está diretamente ligada à capacidade do sistema de minimizar a extensão dos danos aos equipamentos integrantes do SEP, e também garantir a segurança do próprio pessoal envolvido em sua operação (HEWIT-SON; BROWN; BALAKRISHNAN (2004)).

Por fim, entende-se por confiabilidade a probabilidade, sob certas circunstâncias, de um componente, um equipamento ou um sistema atuar apenas quando solicitado, ou seja, realizar adequadamente a sua função conforme previsto em projeto (ANDERSON (1999)).

De modo a trabalhar a complexidade de um sistema de proteção, dividiu-se o mesmo em subsistemas dotados de certos equipamentos básicos que atuam efetivamente na remoção do defeito incidente no SEP (HEWITSON; BROWN; BALAKRISHNAN (2004)). Os subsistemas dispõe dos seguintes equipamentos: Transformador de Corrente (TC), Transformador de Potencial (TP), disjuntor, relé e bateria. A Figura 2.1 ilustra os subsistemas citados.



Figura 2.1: Subsistemas do sistema de proteção associado (COURY; OLESKOVICZ; GIOVA-NINI (2007))

O TC e o TP são transdutores que reduzem, respectivamente, os níveis de corrente e de tensão do sistema de modo a obter valores aceitáveis para servirem de entradas ao relé. Outra função importante desses subsistemas é a de isolar eletricamente os equipamentos, no caso o relé, a estes conectados, do SEP de fato. O relé é a parte lógica do sistema de proteção. Ele é quem determina uma possível atuação do sistema e qual o tipo da ação a ser tomada. Aos disjuntores é atribuída a função de interromper a passagem da corrente para que seja possível isolar a parte defeituosa do restante do sistema elétrico. Por fim, a bateria é a responsável pelo fornecimento independente de energia elétrica ao relé.

Um importante conceito dentro da área de proteção de sistemas elétricos é o das chamadas zonas de proteção. Uma zona de proteção é uma área limite claramente definida sobre o diagrama unifilar do sistema que delimita a responsabilidade de determinado equipamento de proteção sobre aquela porção. Ou seja, os relés associados à mesma devem ser responsáveis por remover todas as faltas que incidam sobre a mesma de modo a proteger o SEP (PHADKE; THORP (1990)).

A delimitação das zonas de proteção, geralmente, se dá pelos disjuntores, porém se uma determinada zona de proteção não possuir um disjuntor dentro dos seus limites, o sistema de proteção pode acionar algum disjuntor remoto, transferindo o comando de abertura através de um canal de comunicação, com o intuito de desenergizar a zona sob falta (PHADKE; THORP (1990)).

A Figura 2.2 mostra um diagrama unifilar de uma parcela de um SEP, evidenciando seis zonas de proteção. Nesta figura, os números indicam a respectiva zona de proteção, sendo que as letras A, B e C referem-se aos barramentos, a letra G indica a fonte geradora e cada letra D representa um disjuntor. É possível notar que as zonas de proteção possuem regiões

de sobreposição entre si, sendo esta uma configuração desejável de maneira a garantir que nenhuma parte do SEP esteja sem a devida proteção primária de alta velocidade, ou seja, esta sobreposição de zonas de proteção garante que não haja pontos desprotegidos ("pontos cegos") no sistema elétrico (PHADKE; THORP (1990)).



Figura 2.2: Zonas de proteção primária delimitadas sobre um SEP qualquer (PHADKE; THORP (1990))

A sobreposição de zonas de proteção é de fundamental importância para que a proteção de um SEP seja bem executada. Como visto, esta pode ser alcançada por meio da escolha correta dos TCs designados ao respectivo sistema de proteção de cada zona. Para melhor explanar essa situação, considere a Figura 2.3(a). Assume-se que exista um TC para cada um dos lados do disjuntor e a sobreposição é realizada conforme mostrado. Todavia, quando os TCs não estão disponíveis em ambos os lados do disjuntor, um artifício utilizado para realizar a sobreposição é o uso de múltiplos enrolamentos secundários de um TC. Tal situação é mostrada na Figura 2.3(b) (COURY; OLESKOVICZ; GIOVANINI (2007)).

Finalmente, é desejável delimitar a menor área possível para cada zona de proteção para que, na ocorrência de uma condição de defeito, tenha-se a menor porção possível do sistema desconectada, afetando assim o menor número de consumidores ligados ao sistema (COURY; OLESKOVICZ; GIOVANINI (2007)).



(a) TC disponível em ambos os lados do disjuntor



(b) TC com múltiplos enrolamentos secundários

Figura 2.3: Princípio da sobreposição das zonas de proteção (COURY; OLESKOVICZ; GIO-VANINI (2007)).

O sistema de proteção deve ser altamente confiável, pois sabe-se que qualquer falha em sua atuação pode ocasionar prejuízos significativos. Dessa forma, uma proteção de retaguarda (ou de backup) agirá se a proteção primária (ou principal) não atuar. Costuma-se dizer que tem-se nessa situação a chamada proteção em dois níveis. A proteção primária deve atuar em caso de falta dentro de sua respectiva zona de proteção, isto é, deve ser a proteção a atuar de maneira instantânea na remoção da mesma. Já a proteção de retaguarda deve operar de maneira temporizada quando ocorrer uma falha por parte da proteção principal (PHADKE; THORP (1990); HEWITSON; BROWN; BALAKRISHNAN (2004)).

Os tipos de relés comumente utilizados em sistemas de proteção podem ser classificados conforme o que segue (PHADKE; THORP (1990)):

- Relés de magnitude: estes relés respondem à magnitude do valor de entrada. Por exemplo o relé de sobrecorrente.
- Relés direcionais: estes relés são capazes de distinguir o sentido da corrente medida, ou seja, em posição à frente ou reversa a sua localização física. Em um circuito de corrente alternada isso é feito pelo reconhecimento do ângulo de fase entre a corrente e a grandeza de polarização (ou de referência), geralmente associada à tensão. Há basicamente dois tipos de relés direcionais: aqueles que respondem ao fluxo de potência normal e os que respondem a condições de falta (COURY; OLESKOVICZ; GIOVANINI (2007))
- Relés de razão: respondem à razão entre duas entradas elétricas. A razão entre dois fasores é um número complexo e o relé de razão pode ser projetado para responder à magnitude deste número complexo. Os relés deste tipo mais comuns são os relés de distância.
- Relés diferenciais: respondem à soma algébrica de duas ou mais entradas elétricas. Na sua forma mais comum, esses relés respondem à soma algébrica de correntes entrando e saindo de sua zona de proteção.
- Relés pilotos ou com mídia de comunicação (COURY; OLESKOVICZ; GIOVANINI (2007)): esses tipos de relés utilizam um meio de comunicação para a troca de informações entre os pontos locais e remotos como entrada. Este tipo de proteção geralmente comunica a decisão feita por um relé local, de um dos quatro tipos citados anteriormente, para relés nos terminais remotos, por exemplo, de uma linha de transmissão.

Após apresentados os conceitos básicos de proteção de sistemas elétricos e alguns tipos de relés de proteção, relacioná-los à proteção dos equipamentos elétricos é de vital importância para o entendimento deste trabalho. Ao mesmo tempo, sabe-se que o foco do mesmo está voltado para a proteção de linhas de transmissão de energia elétrica, portanto este assunto será abordado mais detalhadamente nas próximas seções.

2.1 Proteção de linhas de transmissão

As linhas de transmissão são mais expostas que os outros componentes de um SEP, pois cruzam grandes distâncias em ambientes muitas vezes hostis. Por esse motivo apresentam a maior probabilidade de ocorrência de faltas dentre os componentes de um SEP. Dentre essas faltas, a mais frequente é de natureza fase-terra, que pode ocorrer por inúmeros fatores, tais como: descargas atmosféricas, queimadas, defeitos nos isoladores, o descuido em não retirar cabos-terra após a execução de tarefas corretivas, entre outros. Normalmente, em linhas de transmissão a proteção contra curtos-circuitos entre fases é feita com relés de distância e a proteção de falta a terra é feita por relés de sobrecorrente.

Em sistemas radiais com fluxo de potência de sentido único, para sanar uma falta em dado ponto, basta abrir o disjuntor que está localizado entre o gerador e a falta por meio de um relé de sobrecorrente, por exemplo. Caso existam vários consumidores atendidos por tal sistema, a proteção deve ser seletiva, combinando correntes e tempo de atuação. Já em um sistema com mais de uma alimentação, duplo circuito de transmissão e vários consumidores, como mostrado na Figura 2.4, a solução anterior não é a mais conveniente, pois as direções de corrente podem possuir diversas combinações, dependendo do local, do tipo de falta e da condição de operação de pré-falta. Neste caso, a ocorrência de um curto-circuito em F deverá requerer apenas a abertura do trecho 3'- 4'. Para atingir tal objetivo e garantir a seletividade para outras condições de faltas, o uso de relés de sobrecorrente convencional não é viável, uma vez que eles não discriminam o sentido da corrente de curto-circuito. Para sanar essa deficiência, aplicam-se os relés de sobrecorrente direcionais, os quais serão abordados em detalhe na seção seguinte.



Figura 2.4: Fluxos de corrente para uma falta F em um sistema em malha.

Uma outra forma de proteção existente é a teleproteção. Essa técnica é caracterizada por um sistema localizado em um terminal de linha que recebe informações de seu terminal remoto quando um defeito é detectado. Esta informação é transmitida via um canal de comunicação que pode ser por microondas, *carrier*, fibra ótica ou telefonia, e como resposta, comanda-se ou não a abertura do disjuntor da linha. A vantagem principal desse processo é o fato de ser altamente seletivo e possuir alta velocidade de atuação. Entretanto, é um tipo de proteção com custo de implantação elevado e que apresenta dificuldades para proteger sistemas que possuam grandes distâncias físicas.

Dentre os tipos de proteção mencionados previamente, os relés direcionais de sobrecorrente são os mais simples, mas, por outro lado, podem ser difíceis de aplicar. Esta dificuldade é decorrente da correta definição do sentido da corrente de falta para a qual eles devem atuar, aos parâmetros de tempo e de corrente de magnetização, entre outros. Além disso, eles podem requerer reajustes periódicos caso as condições operativas dos geradores e as condições topológicas do sistema elétrico sejam alteradas.

2.1.1 Proteção de linhas de transmissão por relés direcionais

Os relés de sobrecorrente direcionais (de agora em diante chamados apenas por relés direcionais) são parametrizados por meio da definição da corrente de partida (pickup), atuação a tempo inverso, tempo definido ou instantânea, e a definição do ângulo entre tensão e corrente, o qual indica o sentido de atuação desses relés. Dessa forma, os mesmos são ligados ao sistema elétrico a ser protegido por dois tipos de grandezas: uma de atuação, e outra de polarização. Normalmente, tem-se a corrente do circuito como a grandeza de atuação, e a tensão como a de polarização. O princípio de operação dos relés direcionais, bem como sua aplicação na proteção de linhas de transmissão serão melhor explanados nas seções seguintes.

Princípio de funcionamento

Os relés direcionais são constituídos por uma combinação das unidades direcional e de magnitude. No caso deste trabalho, tem-se a combinação com os relés de sobrecorrente. O controle direcional é uma característica altamente desejável para proteção de sistemas malhados, pois, como visto, as contribuições de corrente de falta nesses sistemas podem vir de direções distintas.

O princípio de operação da unidade direcional deste tipo de relé é mais facilmente compreendido tomando-se como base um relé direcional do tipo atração eletromagnética. Para tanto, considera-se a Figura 2.5, a qual ilustra esquematicamente o princípio de operação mencionado. Nesta, vê-se uma armadura móvel magnetizada pela corrente fluindo através da bobina de acionamento que envolve a armadura com uma polaridade definida de forma a fechar os contatos. Uma inversão na polaridade da bobina de acionamento inverterá consequentemente a polaridade da armadura e, com isso, os contatos ficarão abertos. (MASON (1956)).

A força elétrica (F_e) que tende a mover a armadura pode ser expressa, desprezando-se a saturação, conforme a Equação 2.1:

$$F_e = K d_1 I_b I_a - K d_2 \tag{2.1}$$

Em que Kd_1 é uma constante de conversão de força; I_b é a magnitude da corrente na bobina de polarização; I_a é a magnitude da corrente na bobina de acionamento; e Kd_2 é a força de restrição (incluindo fricção). No ponto de equilíbrio, quando $F_e = 0$ e o relé está prestes a operar, a característica de operação é dada pela Equação 2.2:

$$I_b I_a = \frac{K d_2}{K d_1} = cte \tag{2.2}$$



Figura 2.5: Relé directional do tipo atração eletromagnética (MASON (1956)).

As correntes I_b e I_a são admitidas em uma única direção na qual uma força de pickup é produzida, ou seja, a força elétrica exercida para fechar os contatos precisa ser maior do que a força da mola. Além disso, é evidente que se a direção de I_b ou I_a , mas não de ambas, for inversa à direção estabelecida pelo ajuste inicial, a direção da força (F_e) também será contrária ao sentido de fechamento do contato, e com isso fará com que estes permaneçam abertos. Portanto este relé recebe seu nome pela sua capacidade de distinguir entre direções opostas da corrente que flui na bobina de acionamento. Assim, se as direções estão corretas para operação, o relé atuará para valores acima da magnitude constante resultante do produto entre as duas correntes, como mostrado na equação 2.2.

No caso em que se utiliza a polarização por um imã permanente ou a bobina de polarização for conectada a uma fonte que promova uma corrente (I_b) constante, a operação característica do relé se torna como mostrada na Equação 2.3:

$$I_a = \frac{Kd_2}{Kd_1I_b} = cte \tag{2.3}$$

Porém I_a ainda deve ter a correta polaridade, ou seja, a direção correta, bem como a magnitude especificada para que o relé atue. Em relação à importância da polaridade, a Equação 2.4 fornece uma visão mais detalhada sobre a mesma (CAMINHA (1977)).

$$H = I_a V_b \cos(\theta - \phi) \tag{2.4}$$

sendo H a medida de sensibilidade do relé, V_b a magnitude da tensão de polarização, θ o ângulo entre a corrente de operação e a tensão de polarização e ϕ o ângulo de sensibilidade máxima. Com essa equação, pode-se construir um diagrama fasorial de operação do relé, apresentado na Figura 2.6. Nesta figura, tem-se de maneira genérica o esquema de atuação do relé direcional. A "Região de Atuação" do dispositivo é definida à direita da linha de "Sensibilidade Zero".



Figura 2.6: Diagrama fasorial de operação de um relé direcional polarizado por tensão (CAMI-NHA (1977)).

Em um sistema trifásico, são convencionadas várias conexões possíveis dos TCs e TPs que podem resultar em diagramas fasoriais diferentes do apresentado na Figura 2.6. Tais conexões são nomeadas de acordo com a defasagem angular do TP em relação ao TC, considerando as fases balanceadas e o fator de potência unitário (ANDERSON (1999)). As conexões mais comuns são 0°, 30°, 60° e 90° (CAMINHA (1977)) e são apresentadas nas Figuras 2.7 - 2.10, respectivamente. Com isso, o ângulo de sensibilidade máxima (τ) é um parâmetro de ajuste do relé, o qual depende do esquema de conexão e, consequentemente, da tensão de polarização.



Figura 2.7: Conexão 0°


Figura 2.10: Conexão 90°

Aplicação em linhas de transmissão

Quando um sistema de energia tem característica altamente malhada, um simples relé de sobrecorrente pode não ser capaz de promover uma proteção adequada (PHADKE; THORP

(1990)). No entanto, nesses sistemas, onde as correntes podem fluir em diferentes direções, os relés direcionais são comumente utilizados por causa da sua habilidade de diferenciar a direção da corrente de defeito. Para um melhor entendimento, considere duas linhas de transmissão paralelas que interconectam dois sistemas elétricos, conforme ilustra a Figura 2.11, sendo A, B, C e D, quatro relés de sobrecorrente instalados neste sistema. Para que os relés operem de forma coordenada e seletiva, faz-se necessária a manutenção de um intervalo de tempo de coordenação (ITC) específico entre os relés adjacentes. Assim, para uma falta na linha A-B, tem-se que:

$$T_A < T_C \tag{2.5}$$



Figura 2.11: Linhas de transmissão paralelas interligando dois sistemas com fontes geradoras (ANDERSON (1999)).

em que T é o tempo de atuação do relé para uma dada magnitude de corrente de falta e os índices A, B, C e D identificam os relés no esquema ilustrado na Figura 2.11. Analogamente, se a falta está presente na linha C-D, tem-se para uma coordenação apropriada:

$$T_A > T_C \tag{2.7}$$

$$T_B > T_D \tag{2.8}$$

Nota-se que o conjunto de restrições imposto é inconsistente, uma vez que não é possível satisfazer ambas as situações de faltas descritas, pois uma vai de encontro à outra. É evidente, portanto, que apenas o uso de relés de sobrecorrente não é capaz de estabelecer a proteção do sistema em questão, ou seja, os relés trabalham de forma descoordenada para o cenário exposto.

De modo a sanar o problema de coordenação discutido anteriormente o emprego de relés direcionais faz-se necessário, resultando no sistema da Figura 2.12. Neste, os relés A, B, C e D atuam para faltas indicadas nas direções apontadas pelas respectivas setas.

Nota-se que, neste caso, os relés adjacentes (A e C, B e D) não precisam estar coordenados entre si, tornando assim o conjunto de restrições possível de ser atendido. Em sistemas reais a escolha de qual relé deverá ser direcional é realizada caso a caso e, normalmente, depende da relação da corrente de falta e também da corrente de carregamento normal em ambos os terminais da linha de transmissão ou circuito a ser protegido.



Figura 2.12: Aplicação de relés direcionais de sobrecorrente ao sistema em estudo (ANDER-SON (1999)).

2.2 Coordenação da proteção

Garantir a coordenação e a seletividade num SEP não é uma tarefa trivial. Desta forma, os dispositivos e subsistemas que integram o sistema de proteção não devem atuar de forma independente, ou seja, devem respeitar uma hierarquia de operação existente entre os mesmos de maneira a garantir o funcionamento que foi planejado para aquele sistema de proteção.

Como mostrado na seção anterior, quando o foco principal é a proteção de linhas de transmissão, a coordenação da proteção é ainda mais complexa, pois estas, normalmente, se configuram como um sistema malhado. Assim, a atenção na elaboração do estudo de proteção das mesmas deve ser ainda maior. Na prática, tal proteção é comumente realizada utilizando relés de distância e/ou relés direcionais. Contudo, neste trabalho, a proteção das linhas de transmissão será realizada utilizando exclusivamente relés direcionais.

2.2.1 O processo de coordenação da proteção

Imagine dois elementos de proteção dispostos em série em um sistema geração-carga, em que há falta na barra de carga. Os dispositivos são considerados coordenados se seus ajustes são tais que permitam ao elemento de proteção mais próximo do defeito (proteção primária) atuar prioritariamente para eliminá-lo. Somente caso este elemento falhe em extinguir a falta, o dispositivo de proteção mais próximo da fonte (proteção de retaguarda) deve atuar subsequentemente para proteger o sistema elétrico (CAMINHA (1977)).

Para que a proteção de retaguarda permita a atuação da proteção primária, é importante que o chamado de Intervalo de Tempo de Coordenação (ITC) seja respeitado. Esse intervalo depende do tipo do relé (dispositivo eletromecânico ou microprocessado), velocidade de abertura das chaves seccionadoras e outros parâmetros do sistema de proteção. Tipicamente, o valor do ITC para relés eletromecânicos é de 0,3 a 0,4 s, enquanto para relés de proteção baseados em microcontroladores é da ordem de 0,1 a 0,2 s (MANSOUR; MEKHAMER; EL-KHARBAWE (2007)). Esta situação é descrita pela Equação 2.9:

$$T_{retaquarda} - T_{primario} \ge ITC \tag{2.9}$$

De modo a entender melhor o problema da coordenação da proteção em linhas de transmissão, um estudo de caso encontrado em STEVENSON (1986)) composto por um sistema geração-carga radial simples e dotado apenas de proteção de sobrecorrente será apresentado. A Figura 2.13(a) ilustra o sistema em questão.



Figura 2.13: Estudo de caso

No sistema em foco, a fonte de potência se encontra à esquerda das linhas de transmissão. Logo, para a proteção do mesmo é suficiente colocar apenas um disjuntor para cada linha no terminal de carga. Como consequência disso, a abertura de um disjuntor qualquer tira de operação todas as cargas que se encontram à jusante do mesmo. Por exemplo, se aberto o disjuntor associado ao relé (D12) para qualquer falha na linha 1-2, todas as cargas conectadas às barras à direita do mesmo serão desligadas.

Durante uma falta, a corrente que circula no sistema depende do local de incidência da contingência, e como a impedância do circuito aumenta com a distância do ponto de falta ao gerador, conclui-se que a corrente de falta será inversamente proporcional a tal distância. O comportamento dessa corrente com a distância da incidência em que a falta ocorreu é mostrado qualitativamente na Figura 2.13(b). Além disso, ressalta-se que as amplitudes das correntes de falta dependerão do tipo de falha e da quantidade de geração disponível na barra 1. Em geral, existirá uma curva com as mesmas características daquela apresentada na Figura 2.13(b) correspondentes aos níveis máximos de corrente de falta (obtidos quando a máxima geração estiver em serviço e quando for considerada uma falta trifásica franca), e aos níveis mínimos de corrente de falha (obtidos quando houver mínima geração em serviço e for considerada uma falta fase-fase ou fase-terra, através ou não de uma impedância para terra) (STEVENSON (1986)).

No cenário apresentado, cada relé é projetado para proteger sua respectiva linha, atuando como relé de proteção primária, e também para proteger a linha à jusante de sua localização, caracterizando uma proteção de retaguarda. Para atingir tal objetivo, o relé na barra 1 deve ser ajustado de tal forma que opere com um ITC suficiente para que o dispositivo da barra 2 tenha prioridade para operar em falhas incidentes na linha 2-3, e assim por diante.

Como visto anteriormente, nos casos em que os sistemas são malhados e com múltiplas fontes, o processo de coordenação torna-se mais complexo do que o apresentado anteriormente. Como um exemplo teórico deste tipo, observe o sistema elétrico da Figura 2.14 composto por dois geradores e relés direcionais como elementos de proteção, indicados pelos números de 1 a 10, tendo os sentidos de operação indicados pelas respectivas setas.



Figura 2.14: Exemplo de aplicação de relés direcionais (ANDERSON (1999)).

No exemplo da Figura 2.14, admitem-se todas as linhas com a mesma impedância e os geradores iguais. Ressalta-se que as características das linhas em série do exemplo anterior são encontradas nessa nova situação. Exemplo: tomando as linhas compreendidas entre as barras R e Q, tem-se que a corrente de falta medida pelo relé 1 decresce na medida em que o local de incidência do curto-circuito se distancia da barra R. Analogamente, a corrente de falta medida pelo relé 4 decresce na medida em que o local de incidência da falta se distancia da barra Q.

Definidos os sentidos de atuação dos relés e levando em consideração a idéia supracitada, pode-se dar início ao processo de coordenação do sistema de proteção. Entretanto, nestes tipos de redes malhadas com várias fontes não há um melhor ponto para iniciar o processo de coordenação (ANDERSON (1999)). Até existem alguns métodos baseados na definição de cortes para tornar o sistema radial e determinar, neste ponto, um relé pelo qual deve se iniciar a coordenação. No entanto, este é um processo de tentativa e erro que pode requerer inúmeras tentativas para apresentar sucesso.

Idealizando o sistema do caso em estudo coordenado, serão exemplificadas duas situações de falta para se mostrar a atuação dos dispositivos nesse cenário.

- Curto-circuito imediatamente à jusante do relé 1: este atua rapidamente porque está mais próximo da falta, portanto medirá uma elevada corrente. Com a abertura deste relé, parte do sistema se torna radial e, deve-se garantir t₄ − t₂ ≥ *ITC* para assegurar a seletividade, caso a falta não tenha sido extinta (t₄ e t₂ são os tempos de atuação dos relés 2 e 4, respectivamente);
- 2. Curto-circuito imediatamente à jusante do relé 4: a situação é análoga à descrita anteriormente. O relé 4 deve atuar rapidamente, e deve-se garantir $t_1 - t_3 \ge ITC$.

Como visto, a coordenação de relés direcionais em sistemas malhados é um problema complexo. Nos próximos capítulos o mesmo será modelado em um problema de otimização e solucionado pela metodologia proposta neste trabalho.

2.3 Modelos matemáticos para representar os relés direcionais de sobrecorrente

A modelagem dos relés direcionais de sobrecorrente é feita de acordo com sua característica de atuação. Tal característica pode ser classificada como:

• <u>Atuação instantânea</u>: o relé atua instantaneamente se a corrente medida atingir um valor predeterminado. A Figura 2.15 mostra uma curva genérica para este tipo de atuação.



Figura 2.15: Curva característica de um relé de sobrecorrente com atuação instantânea.

- <u>Atuação de tempo definido</u>: o relé atua se a corrente medida permanecer acima do valor ajustado para a corrente de disparo por um período de tempo superior a um valor ajustado. Uma curva genérica de atuação de tempo definido pode ser observada na Figura 2.16.
- Característica de atuação de tempo inverso: esta característica indica que o relé opera inversamente proporcional à corrente de falta. Este tipo de comportamento traz uma vantagem à aplicação em sistemas de proteção, já que favorece a seletividade e a adequada operação do sistema de proteção como um todo.

Os relés podem apresentar curvas de tempo inverso padronizadas ou próprias de determinados fabricantes. As curvas padronizadas mais comuns seguem os padrões ANSI (*American National Standards Institute*) e IEC (*International Electrotechnical Commission*), sendo estabelecidas pela expressão genérica da Equação 2.10, conforme a norma IEEE Std. C37.112 (1996):



Figura 2.16: Curva característica de um relé de sobrecorrente com atuação de tempo definido (SOARES (2009)).

$$T = TMS \times \left(K_1 + \frac{K_2}{((\frac{I}{I_p})^{K_3} - 1)}\right)$$
(2.10)

em que K_1 , K_2 , K_3 são constantes definidas pela norma, I é a corrente vista pelo dispositivo, I_p é a corrente de magnetização e TMS é o múltiplo do ajuste de tempo.

A Tabela 2.1 apresenta as constantes referentes ao padrão de curva de tempo inverso definido pelo padrão ANSI. Na definição dessas curvas, o ajuste de TMS normalmente varia entre 0, 5 a 15 conforme mostrado na Figura 2.17, onde se verifica um conjunto de curvas do tipo extremamente inversa.

Tabela 2.1: Constantes referentes ao padrão ANSI

Tipo de Curva	K_1	K_2	K_3
Moderadamente Inversa	0,0226	0,0104	0,0200
Inversa	0,1800	5,9500	2,0000
Muito Inversa	0,0963	3,8800	2,0000
Extremamente Inversa	0,0352	5,6700	2,0000
Inversa de Tempo Curto	0,00262	0,00342	0,0200

Na Tabela 2.2 são apresentadas as constantes da curva de tempo inverso relativas ao padrão IEC (IEC 60255-3, 1989). Neste padrão, o ajuste de TMS (*Time Multiplier Setting* varia de 0, 05 a 1. A Figura 2.18 mostra um exemplo da família de curvas do tipo extremamente inversa para o padrão IEC.



Figura 2.17: Curvas de tempo do tipo extremamente inversa segundo padrão ANSI (SOARES (2009)).

Tipo de Curva	K_1	K_2	K_3
Normalmente Inversa(C1)	0,00	0,14	0,02
Muito Inversa (C2)	0,00	13,50	1,00
Extremamente Inversa (C3)	0,00	80,00	2,00
Inversa de Tempo Longo (C4)	0,00	120,00	1,00
Inversa de Tempo Curto (C5)	0,00	0,05	0,04

Tabela 2.2: Constantes referentes ao padrão IEC

Esta pesquisa, visando desenvolver uma metodologia para buscar o ajuste ótimo dos relés direcionais de sobrecorrente presentes em um SEP qualquer, deve respeitar sempre os critérios de coordenação e considerar a filosofia de proteção adotada pelas empresas. Para tanto, cada relé deverá ser configurado individualmente utilizando da seguintes especificações:

- <u>Unidade de atuação instantânea:</u> as seguintes informações devem ser consideradas na metodologia:
 - Faixa de ajuste e passo do ajuste da corrente de pickup;
 - Faixa de ajuste e passo do ajuste de tempo.
- <u>Unidade de atuação de tempo definido:</u> os dados necessários são semelhantes aos da unidade de atuação instantânea:



Figura 2.18: Curvas de tempo do tipo extremamente inversa segundo padrão IEC (SOARES (2009)).

- Faixa de ajuste e passo do ajuste da corrente de pickup;
- Faixa de ajuste e passo do ajuste de tempo.
- <u>Unidade de atuação temporizada (tempo inverso)</u>: os dados necessários são mais completos que os anteriores:
 - Faixa de ajuste e passo do ajuste da corrente de pickup;
 - Curvas existentes: padrão (ANSI, IEC ou outro) e tipos (normalmente inversa, muito inversa, etc);
 - Faixa de ajuste a passo do ajuste do TMS para cada tipo e padrão de curva.

Devido à grande variedade de tipos de relés existentes no mercado, as grandezas descritas anteriormente podem não estar padronizadas. Entretanto, neste trabalho considera-se todos os dispositivos iguais e com os seus parâmetros padronizados.

2.4 Considerações finais sobre este capítulo

Neste capítulo, conceitos básicos sobre proteção de linhas de transmissão de energia elétrica empregando relés direcionais de sobrecorrente foram apresentados. Definiu-se também como

os mesmos serão utilizados na metodologia proposta, fornecendo assim subsídios básicos para que a formulação do problema de coordenação ótima de relés seja compreendida.

No capítulo a seguir, o foco será o estudo das Metaheurísticas mais utilizadas para lidar com o problema em questão. A fundamentação teórica e a formulação da técnica que será utilizada nesse trabalho também será apresentada.

Capítulo 3

Metaheurísticas

As metaheurísticas são técnicas inteligentes que, através de passos definidos, são capazes de lidar com problemas de otimização matemática. São ferramentas poderosas que lidam de forma eficiente com informações aproximadas ou imprecisas no seu objetivo de encontrar uma solução de qualidade para o problema trabalhado. Entretanto, é importante ressaltar que mesmo apresentando soluções de boa qualidade, a convergência destes tipos de algoritmos para o ótimo global do sistema não é garantida.

O objetivo de um algoritmo heurístico normalmente é uma métrica da qualidade da solução que se deseja obter. Pode ser, por exemplo, a minimização do número de manobras para restabelecimento de energia num sistema de distribuição radial atendendo todas as cargas conectadas a ele (SANCHES et al. (2012)). A vantagem desse tipo de algoritmo é mais visível em problemas extremamente complexos, pois mesmo que não se tenha garantias de que a solução global seja encontrada, o algoritmo inteligente é uma boa alternativa para se obter soluções viáveis.

O surgimento das metaheurísticas nasceu da necessidade de aumentar as chances de que o ótimo global seja encontrado. Essas, ao contrário das heurísticas que são mais simples, possuem vários mecanismos que permitem explorar de forma mais abrangente e eficiente o espaço de busca procurando a melhor solução para determinado problema.

Assim como suas predecessoras, as metaheurísticas são formuladas com procedimentos bem definidos e com número finito de passos. Todavia possuem uma característica importante em relação às heurísticas simples: a capacidade de aceitar, temporariamente, soluções de pior qualidade. Para um melhor entendimento veja o exemplo ilustrado na Figura 3.1.

Idealize nesse caso que a heurística simples ficaria estagnada no ponto A, enquanto a metaheurística seria capaz de aceitar piores soluções de forma temporária e partiria do ponto A, para o ponto B, onde se encontra a solução ótima global do problema.

A maior parte das metaheurísticas são classificadas como métodos inspirados em processos naturais. Dentre os mais conhecidos podem ser citados (ROMERO; MANTOVANI (2004)):

- Algoritmos Genéticos
- Simulated Annealing



Figura 3.1: Exemplo de busca pela solução ótima global.

- Particle Swarm Optimization (PSO)
- Algoritmo Colônia de Formigas

Todas as metaheurísticas compartilham de características e exigências semelhantes. O que as diferem é a forma como o algoritmo inteligente coleta as informações que as soluções candidatas carregam consigo e como as transições entre uma solução e outra ao longo das iterações do algoritmo é realizada. De modo geral, nas metaheurísticas supracitadas e em todo algoritmo inteligente que faça parte desse grupo, os seguintes itens devem ser especificados:

- Representação do problema ou codificação: O espaço das soluções possíveis (sejam elas factíveis ou não) é definido pela forma com que é representado. Por exemplo, se a representação for binária, teremos um número de possíveis elementos da ordem de 2ⁿ, em que n é a dimensão do vetor que representa esses elementos.
- Definição da função avaliação: Deve-se definir qual objetivo a ser alcançado. Por exemplo, minimizar o tempo de atuação do sistema de proteção em SEPs. Esta função avaliação basicamente fornece a qualidade de uma solução candidata e, preferencialmente, deve permitir o cálculo rápido.
- Definição dos critérios de transição: Dada uma solução corrente, deve-se definir como seguir para a próxima solução.
- Utilização de memória: Normalmente, nas metaheurísticas faz-se algum tipo de registro, quer seja das melhores, ou das piores soluções obtidas, com o objetivo de se aprimorar o método de busca.

As aplicações das metaheurísticas em problemas reais tem ganhado grande impulso em razão das seguintes vantagens:

- Facilidade na modelagem do problema;
- Rápida obtenção de soluções de boa qualidade;

- Incorporação rápida de outros critérios e restrições (extremamente adaptáveis);
- Obtenção de várias soluções factíveis.

As principais deficiências apontadas por essa classe de método são:

- Alto esforço computacional;
- As metaheurísticas, em sua grande maioria, não apresentam prova matemática da convergência para o ótimo global; e
- Seu desempenho é fortemente dependente da forma que foi implementado.

Explanadas as características e formas de atuação das metaheurísticas, entende-se o porquê do crescente uso das mesmas. Suas características adaptativas, de fácil implementação e de rápida obtenção de soluções viáveis e de boa qualidade as tornam ferramentas extremamente atrativas. A seguir, algumas das metaheurísticas que possuem potencial para utilização neste trabalho serão apresentadas brevemente.

3.1 Algoritmos Genéticos

Os Algoritmos Genéticos (AGs) são métodos de busca e otimização que utilizam conceitos advindos da Genética e possuem como base os mecanismos de evolução dos seres vivos. Estes algoritmos foram inspirados no princípio da sobrevivência do "mais apto", estabelecido por Charles Darwin em seu livro "A Origem das Espécies" (*The Origin Of Species*) em 1859 (DARWIN (1859)). Este princípio elucida que, em uma população de indivíduos, aqueles com "melhores" características genéticas (portanto "mais aptos") apresentam maiores chances de sobrevivência e reprodução, ao mesmo tempo em que indivíduos menos "aptos" tendem a desaparecer ao longo do processo evolutivo.

O AG apresenta passos semelhantes ao da evolução biológica que resultam em uma busca multidirecional no espaço de soluções potenciais do problema. Geralmente, se mantém constante um número de soluções potenciais (chamada nesse contexto de população) e, a cada geração, a população é modificada de maneira que as soluções "mais aptas" possam se "reproduzir" e passar à geração seguinte, enquanto que as consideradas "menos aptas" são eliminadas. O AG normalmente usa regras de transição probabilística para selecionar algumas soluções para a reprodução e outras para serem descartadas. Para fazer a distinção entre diferentes soluções utiliza-se de uma função objetivo (FO) que simula o papel da adaptabilidade do indivíduo ao ambiente.

Os princípios básicos dos AGs foram estabelecidos por Holland, em seu livro "Adaptação em Sistema Natural e Artificial" (*Adaptation in Natural and Artificial System*) em 1975 (HOL-LAND (1975)), e ainda podem ser encontrados em muitas outras referências bibliográficas (COLEY (1999); GOLDBERG (1989)).



Um fluxograma de um AG básico é exibido na Figura 3.2.

Figura 3.2: Fluxograma de um AG básico.

3.1.1 Operadores e parâmetros dos AGs

População

O primeiro passo de um AG é a criação da população inicial, geralmente de maneira aleatória, composta por indivíduos nos quais o algoritmo irá se basear para criar novas populações até encontrar a solução. Esta população deve ter diversidade grande o suficiente para que características necessárias estejam presentes em algum indivíduo da população, pois características não existentes na população inicial dificilmente aparecem durante o processo evolutivo. Com o intuito de aumentar a diversidade, pode-se desejar a unicidade dos indivíduos, ou seja, garantir que cada indivíduo na população seja único. Para tanto, é necessário comparar os novos indivíduos com todos os indivíduos criados anteriormente.

Em seguida, a população é avaliada, associando-se a cada indivíduo um valor de *fitness* que irá indicar o quão próximo da solução o indivíduo está, ou seja, mede o quanto o indivíduo apresenta características "boas". Depois que a população for avaliada, um subgrupo dela é

selecionado para que possam ser aplicados os operadores genéticos (reprodução, cruzamento e mutação). Como consequência, há a eliminação dos menos "aptos".

Recombinação

Um algoritmo genético simples emprega três operadores básicos: reprodução, recombinação e mutação. A reprodução é um processo no qual os indivíduos (soluções) são copiados, levando em consideração, o valor de sua função objetivo. A recombinação é a união de pelo menos dois indivíduos selecionados de forma aleatória. A informação destes indivíduos é parcialmente compartilhada de acordo com um ponto de recombinação selecionado aleatoriamente. O processo de recombinação se aplica para transmitir informações importantes dos pais para os filhos e é aplicado com certa probabilidade.

Os efeitos da recombinação, geralmente variam durante as gerações. Inicialmente, a população é aleatória de maneira que este apresente efeitos significativos, ou seja, deslocam indivíduos a grandes distâncias no espaço de busca. Com o passar das gerações, os indivíduos tendem a apresentarem valores similares (fitness) e por esta razão, a recombinação apresenta efeito relativamente pouco significante. Adicionalmente, a probabilidade de recombinação é, algumas vezes, modificada durante a evolução, começando com valores altos e terminando com valores muito pequenos, aumentando assim o grau de complexidade do algoritmo.

Mutações

A mutação é uma alteração ocasional do valor de um indivíduo e tem como objetivo a fuga do algoritmo de pontos ótimos locais. O seu efeito tende a ser oposto ao do cruzamento. Na fase inicial a mutação tem menos influência sobre a população, tendendo a aumentar com o passar das gerações. Isto se deve ao fato da população inicial aleatória fazer com que qualquer variação inicial dos indivíduos não cause uma mudança tão significativa. Já ao final do processo, quando a população converge, as variações podem ser mais perceptíveis. Assim, é comum aumentar a probabilidade do fator mutação com o decorrer das gerações.

Há muitas maneiras possíveis de executar uma mutação. A mais simples é a chamada mutação aleatória, que consiste na substituição (alteração) de um gene de um indivíduo escolhido aleatoriamente no intervalo permitido pelo problema.

Seleção

A função da seleção no AG é garantir a sobrevivência do mais apto. Essa é a ideia central estabelecida nesse tipo de algoritmo. A seleção pode ser implementada de várias formas, incluindo mecanismos como o torneio e a roleta. Na roleta a probabilidade de seleção é proporcional ao valor da função fitness do indivíduo. No torneio são escolhidos aleatoriamente dois indivíduos da população e aquele com melhor fitness é selecionado. Da exposição vista, evidencia-se que os valores dos parâmetros de mutação, cruzamento e seleção influenciam fortemente o desempenho global do algoritmo. Adicionalmente, existem outras constantes que o usuário deve definir antes de utilizar com sucesso um AG. São eles:

- Tamanho da população;
- A distribuição de probabilidade para gerar a população inicial; e
- Número máximo de iterações.

Os AGs pertencem à classe dos algoritmos probabilísticos, mas eles não são métodos de busca puramente aleatórios, pois combinam elementos de procura direcionada e estocástica. De acordo com Mitchel (MITCHEL, 1977), a popularidade dos AGs se deve, entre outros, ao fato de que a evolução é um método de adaptação reconhecidamente bem sucedido e robusto em sistemas biológicos e de poderem realizar buscas em espaços com hipóteses (soluções candidatas).

3.2 **PSO**

O *Particle Swarm Optimization* (PSO), ou Otimização por Enxame de Partículas, foi proposto por Kennedy e Eberhart (KENNEDY; EBERHART (1995a)). O PSO é um algoritmo evolutivo que surgiu da análise de experiência com algoritmos que modelam o "comportamento social" dos animais. Cardume de peixes, colônia de abelhas e bando de pássaros (este último base do PSO) são alguns dos "inspiradores" desses tipos de algoritmos. Uma característica encontrada no PSO, e que é similar ao AG, é o modo em que sua população evolui no espaço de busca através da melhoria das posições das partículas, a cada iteração, rumo a melhores soluções.

3.2.1 Modelagem do PSO

No algoritmo PSO cada partícula (solução candidata) da população (swarm ou conjunto de partículas) movimenta-se sobre o espaço de busca, procurando por regiões promissoras no ambiente que possuam valores da função objetivo melhores que outros, descobertos previamente. Neste contexto, a posição de cada partícula é ajustada, levando sempre em consideração informações coletivas e individuais, e cada partícula muda sua posição para um novo ponto buscando encontrar melhores valores de *fitness*.

Posicionando-se sob o ponto de vista das partículas, a cada uma delas é atribuída uma velocidade e as partículas passam a se movimentar pelo espaço de busca. Cada uma das partículas possui uma "memória", armazenando nesta a sua melhor posição prévia (pbest). Já o bando possui uma espécie de "memória coletiva", onde se registra a melhor posição prévia já alcançada pelo bando (gbest). A cada iteração, a atualização da partícula *i* dá-se pelo acréscimo da velocidade (taxa de variação da posição), em todas as dimensões, fazendo com que ela tenda gradualmente para melhores valores históricos, ou seja, *pbest* e *gbest*.

A Figura 3.3 a seguir apresenta o fluxograma de um algoritmo PSO básico.



Figura 3.3: Fluxograma de um PSO básico.

Para melhor entendimendo, um pseudo-algoritmo do PSO pode ser descrito como: Início;

- 1) Iniciar aleatoriamente a posição (X^i) e a velocidade (V^i) de cada partícula;
- 2) Calcular a função avaliação;
- 3) Enquanto (critério de parada) faça:
 - a) Atualizar pbest;
 - b) Atualizar gbest;
 - c) Atualizar velocidades conforme a Equação 3.1;
 - d) Atualizar posições utilizando a Equação 3.2;

Fim enquanto;

-Fim;

Onde:

Xⁱ = (xⁱ₁, xⁱ₂, ..., xⁱ_N): partícula *i*, candidata à solução do problema, na qual Xⁱ_N representa uma variável de solução;

- Pⁱ = (pⁱ₁, pⁱ₂, ..., pⁱ_N) melhor posição prévia de cada partícula, pbestⁱ (posição que possui o melhor valor de aptidão para a solução do problema). A melhor partícula prévia dentre todas as partículas da população é representado pelo símbolo g e mostra a posição da melhor partícula do bando. A posição p^g é também chamada de gbest, (KENNEDY; EBERHART (1995a)).
- $V^i = (v_1^i, v_2^i, ..., v_N^i)$: velocidade ou taxa de variação da posição da partícula i.

A Equação 3.1 atualiza a velocidade (v) para cada partícula, e a Equação 3.2 atualiza a posição da partícula numa dada iteração (k) (KENNEDY; EBERHART (1995a)).

$$v_{k+1}^{i} = wv_{k}^{i} + c_{1}r_{1}(pb_{k}^{i} - x_{k}^{i}) + c_{2}r_{2}(pg_{k}^{i} - x_{k}^{i})$$
(3.1)

$$x_{k+1}^i = x_k^i + v_{k+1}^i \tag{3.2}$$

Onde os parâmetros são:

- w é o coeficiente de inércia, que é importante para definir o espaço de busca;
- $c_1 e c_2$ são constantes, parâmetros cognitivos e social, respectivamente;
- $r_1 e r_2$ são valores randômicos (com probabilidade uniforme) entre 0 e 1;
- pb_k^i é o melhor vetor da partícula *i*;
- pg_k^i é a melhor posição do bando, ou seja, o melhor vetor de todas as partículas analisadas.
- $k = 1, 2, ..., it_m ax$: número da iteração corrente, com o limite máximo $it_m ax$;
- *i* índice da partícula que varia de 1 a *N*, em que *N* é a quantidade do número de partículas (tamanho do bando);
- x_k^i : vetor corrente da partícula *i*; e
- v_k = velocidade da partícula.

Todos os vetores na Equações 3.1 e 3.2 são de dimensões $n \ge 1$, onde n é o número de parâmetros otimizados. Os parâmetros $c_1 = c_2$ controlam o fluxo de informações entre o enxame e a partícula atual. Se $c_2 > c_1$, então a partícula deposita mais confiança no coletivo, caso contrário, a partícula assume maior confiança em si mesma. Outro parâmetro bastante influente na característica de busca do algortimo é o fator de inércia w. Um fator de inércia alto facilita uma exploração global do espaço de busca, enquanto que um valor pequeno desde parâmetro possibilita uma busca local (espécie de ajuste fino). Portanto, a apropriada seleção do fator w fornece um balanço entre a capacidade de busca local e de busca global do algortimo, exercendo assim influência sobre o número de iterações do mesmo.

A literatura propõe usar $0 < w < 1, 4, c_1 = c_2 = 2 \operatorname{com} c_1 + c_2 \leq 4$ para manter um equilíbrio entre a capacidade de busca global e local do algoritmo (KENNEDY; EBERHART (1995a,b); BERGH (2001)). Entretanto, sabe-se que os parâmetros supracitados são dependentes do problema estudado e que, devido a essa característica testes exaustivos devem ser realizados para encontrar o melhor conjunto de parâmetros para o bom funcionamento do algoritmo.

3.2.2 Críticas ao PSO

O ponto mais delicado do PSO clássico se deve à sua alta dependência dos parâmetros que o regem. Dessa forma, se estes se encontram mal sintonizados podem levar o algoritmo a se prender mais facilmente em ótimos locais, comprometendo assim as soluções encontradas. Outra desvantagem acontece pelo fato que tais parâmetros estão intimamente ligados a cada tipo de problema. Assim, para cada novo cenário analisado em que se pretende utilizar o PSO, os mesmos devem ser reajustados.

Devido ao fato mencionado, inclusive usuários experientes do PSO devem realizar testes exaustivos para encontrar o melhor conjuntos de parâmetros para aquela dada situação, enquanto que usuários menos experientes devem se preocupar em fornecer valores adequados evitando assim, a falha do algoritmo. De qualquer forma, uma variação do PSO que auxilie, ou mesmo isente, o usuário a fazer essa sintonia de parâmetros será um avanço para o algoritmo.

3.3 O EPSO

O Evolutionary Self-Adapting Particle Swarm Optimization (EPSO) é uma nova variação da familia dos algoritmos metaheurísticos, formulado sob os conceitos de Programação Evolucionária (PE) e do PSO (MIRANDA; FONSECA (2002a)).

As abordagens de otimizações realizadas por PEs tem provado serem bem sucedidas em várias áreas, permitindo-se obter soluções de alta qualidade para diferentes tipos de problemas complexos. No entanto, os modelos de PEs podem se apresentar lentos, com altíssimo esforço computacional e ainda, enfrentarem dificuldades para problemas muito grandes. Assim, qualquer nova metodologia que possa acelerar a convergência tende a ser encarada como um avanço.

Com o intuito de aproveitar os pontos fortes da PE e do PSO, uma nova visão se formou em torno do que, mais tarde, se consolidou nessa nova variação do PSO, o EPSO. Entende-se que no EPSO tem-se um enxame de partículas evoluindo pelo espaço de busca. Entretanto, essas partículas também estarão sujeitas à seleção sob o ponto de vista evolucionário. Essa seleção atuará nos pesos e parâmetros que governam o comportamento de cada partícula e, consequentemente, o que se observará é a manutenção das partículas que possuem maior fitness, ou seja, as mais bem "adaptadas" se sobressairão e se propagarão.

3.3.1 Modelagem e equacionamento

A ideia na qual essa nova metodologia se sustenta é a de garantir ao PSO um procedimento de seleção e de auto adaptação de seus parâmetros e, em consequência disso, de suas propriedades (MIRANDA; FONSECA (2002a)).

Uma síntese das mudanças propostas pelo EPSO pode ser simplificadamente explanada da seguinte forma. Numa dada iteração, considere o conjunto de soluções ou alternativas que continuarão se chamando partículas, sofrendo os seguintes processos:

- Replicação: cada partícula é replicada r vezes;
- Mutação: cada partícula sofrerá mudança em seus pesos;
- <u>Recombinação</u>: cada partícula, após passar pelo processo de mutação, gerará uma prole que se enquadra em suas regras de movimento;
- Avaliação: cada nova partícula tem seu fitness avaliado;
- <u>Seleção:</u> através de algum processo estocástico as "melhores" partículas sobreviverão para formar a nova geração.

A nova regra de movimentação das partículas para o EPSO é a seguinte: dada uma partícula X^i , uma nova partícula X^i_{new} é resultado de:

$$v_{new}^{i} = w_{i0}^{*}v^{i} + w_{i1}^{*}(pb^{i} - x^{i}) + w_{i2}^{*}(pg^{*} - x^{i})$$
(3.3)

$$x_{new}^i = x^i + v_{new}^i \tag{3.4}$$

À primeira vista, tem-se um equacionamento bem semelhante ao PSO clássico - a movimentação se mantém em termos de inércia, memória e cooperação. Entretanto, os pesos sofrem mutação obedecendo a equação:

$$w_{ij}^* = w_{ij} + \tau N(0, 1) \tag{3.5}$$

em que N(0,1) é uma variável aleatória com distribuição Gaussiana, de média 0 e variância 1; e o ótimo global é também aleatoriamente perturbado pela equação:

$$pg^* = pg + \tau N(0, 1) \tag{3.6}$$

Os termos τ e τ' são parâmetros de aprendizado que podem ser tratados como fixos ou como parâmetros estratégicos que, consequentemente, se enquadram nas variáveis que sofrem mutações. Um fluxograma da técnica é mostrado na Figura 3.4.

A variação do algoritmo proposta se beneficia de duas formas: do processo de seleção Darwinista clássico e da regra de movimentação das partículas. Assim, é natural se esperar



Figura 3.4: Fluxograma de um EPSO básico.

que a nova técnica apresente resultados de convergência vantajosos em relação ao PSO ou a PE apenas. Em adição, tem-se que o EPSO pode ser classificado como um algoritmo auto adaptativo, pois esse se baseia na mutação e seleção de parâmetros estratégicos como qualquer outra técnica de PE (MIRANDA; FONSECA (2002a)).

3.4 Critérios de parada

O critério de parada é determinante para o bom funcionamento de um algoritmo de otimização. Este sendo robusto evita avaliações adicionais da função objetivo após se encontrar a solução ótima. Idealmente o critério de parada escolhido não deve apresentar nenhum parâmetro relacionado ao problema.

Para os algoritmos presentes neste trabalho adotou-se um critério de convergência clássico. A máxima variação da FO foi monitorada para um número específico de iterações consecutivas. Se a variação máxima da mesma for menor que um valor predefinido, para essa quantidade determinada de iterações, se assume a convergência do algoritmo.

3.5 Considerações finais sobre esse capítulo

Neste capítulo, duas das Metaheurísticas mais comuns foram apresentadas. Para o AG focou-se mais no entendimento dos parâmetros e como estes afetam o algoritmo como um todo. Já para o PSO, acrescentou-se seu equacionamento ao estudo. A passagem por ambas as técnicas proporcionaram uma fundamentação teórica para melhor compreender o EPSO, que será de fato a técnica utilizada neste trabalho.

Na seção a seguir será apresentada a evolução da pesquisa sobre o problema da coordenação de relés.

Capítulo 4

Coordenação de Relés Direcionais de Sobrecorrente Utilizando Metaheurísticas

Para um melhor entendimento a respeito da coordenação de relés, optou-se por buscar na literatura os primeiros trabalhos sobre tal assunto. O que se nota é que estes abordam essa área num sentido mais amplo do que somente a coordenação de fato, tornando o problema ainda mais complexo. Dessa forma, nota-se que estes trabalhos são aplicados em situações singulares e apresentam resultados pioneiros, porém, a generalização dessas técnicas é muito complexa e com a capacidade de processamento da época, inviáveis.

Atualmente, o que se vê é uma concentração de esforços no problema da coordenação dos relés, ou seja, passa-se de um cenário geral para um trabalho mais elaborado e específico na área em questão. Pelos trabalhos técnicos estudados verifica-se, principalmente, o emprego de técnicas inteligentes de otimização para tratar do problema da coordenação supracitado, destacando-se o PSO e o AG. A aplicação destas técnicas, normalmente, é realizada em conjunto com programação linear e não-linear. Isto é, constata-se na literatura o desenvolvimento de metodologias fundamentadas em algoritmos híbridos que visam aprimorar soluções obtidas, de maneira independente, pelas técnicas de otimização tradicionais e inteligentes.

4.1 Os primeiros trabalhos

A partir do final da década de 50, e durante a década de 60, os estudos para calcular curtocircuitos usando ferramentas computacionais se intesificaram (COOMBE; LEWIS (1956); TO-ALSTON (1959); LANTZ (1957), entre outros). Por conseguinte, desperta-se o interesse em se desenvolver lógicas computacionais para realizar o ajuste de relés de sobrecorrente em SEPs. Fato esse consumado apenas na década de 80. Até houve alguns trabalhos na década de 70, estimulados pelos trabalhos de BEGIAN (1967) e STAGG; EL-ABIAD (1968), porém pouco significativos.

A importância da coordenação de relés de sobrecorrente é confirmada pela grande quantidade de pesquisas registradas e o esforço dedicado à área pelos pesquisadores desde a década de 80 até os dias atuais. Muito se descobriu, porém, por se tratar de um problema altamente complexo, muito se tem a contribuir ainda.

Visando criar um ambiente que mostra a evolução das pesquisas incidentes sobre a área de concentração deste trabalho, recorre-se ao trabalho de GASTINEAU (1977). Nesta pesquisa, os autores se apoiaram em trabalhos anteriores do grupo, que já haviam culminado na implementação de uma ferramenta computacional para o cálculo de curtos-circuitos, e desenvolveram um software que parametriza relés de distância para a proteção entre fases e relés de sobrecorrente para a proteção de retaguarda e fase-terra em sistemas radiais. A respeito do trabalho, entendese que o ponto principal deste é a maneira como foi confeccionado o banco de dados, de forma a facilitar e permitir que o software alcançasse a coordenação, num primeiro momento dos relés de distância e num segundo momento dos relés de sobrecorrente. Intui-se que o banco de dados seja tão importante pelo fato que o sucesso do método está intimamente ligado à facilidade de se percorrer a estrutura topológica do SEP a ser trabalhado e da leitura de onde se encontram os dispositivos de proteção no mesmo. Na abordagem desenvolvida, a coordenação é feita através de um método iterativo, que a realiza utilizando de testes exaustivos baseados em tentativa e erro. Os autores estabelecem um ponto de partida para o método que entra em loop, se alguma restrição definida não for atendida, muda-se o parâmetro infringido e retoma-se a tentativa. No trabalho, os autores afirmam que o método alcança resultados significativos, porém nenhum estudo de caso é demonstrado.

Em (RAMASWAMI; DAMBORG; VENKATA (1990)) um novo conceito chamado Coordenação por Subsistemas é introduzido. O objetivo primordial do *software* proposto pelos autores é recalcular os parâmetros dos relés direcionais de sobrecorrente num determindo SEP, em resposta às mudanças de topologia ou de níveis de carga, de forma eficiente computacionalmente, obtendo assim ganhos consideráveis de tempo. Basicamente, se no acontecimento de um evento (por exemplo uma mudança estrutural) existir a necessidade de recalcular os parâmetros de um determinado número de dispositivos, o algoritmo identifica a região que deverá ter seus dispositivos reajustados e forma um subsistema do SEP para ser trabalhado. O subsistema proposto é formado por duas regiões (ver Figura 4.1), chamadas pelo autor de "Janela" e região de "Restrições".

O algoritmo de formação do subsistema é muito complexo. O passo inicial acontece com o usuário selecionando um conjunto de barras que sofreram mudanças significativas após o distúrbio ocorrido. A técnica desenvolvida pelos autores chamada de DFS/BT identifica então, à partir dessas barras, quais relés serão incluídos na região "Janela". Mais tarde, baseando no princípio que as correntes de falta diminuem à medida que se afasta do distúrbio, define-se então a região de "Restrições" que possui relés que não terão seus parâmetros alterados, porém influenciarão os relés da região "Janela" para que a coordenação seja mantida. Definidos os



Figura 4.1: O subsistema proposto por (RAMASWAMI; DAMBORG; VENKATA (1990)) (Adaptado Sistema IEEE 30 barras).

relés da região "Janela" e como estes são afetados pelos dispositivos da região de "Restrições", aplica-se um algoritmo que realiza a coordenação destes e, consequentemente, a coordenação de todo o sistema trabalhado.

Nota-se que os trabalhos dessa época abordam a proteção de sistemas elétricos não se restringindo apenas ao problema de coordenação de relés. Assim, por se tratar de um problema muito complexo, o que se obtém são resultados, muitas vezes, pouco expressivos para aplicação genérica, porém que são importantes para a evolução vista na próxima década. Nos últimos anos da década de 80, principalmente com as contribuições de URDANETA; NADIRA; JIMÉ-NEZ (1988), surgem os trabalhos que atacam o problema em áreas mais específicas, e atingem resultados mais promissores.

4.2 Aplicações de técnicas convencionais

A partir deste momento, os trabalhos científicos estudados agem sobre o problema de uma forma mais específica (realizar a coordenação de relés de sobrecorrente direcionais ou não), diminuindo a complexidade do mesmo e obtendo resultados mais significativos. Dentre os trabalhos que empregam técnicas de otimização convencionais, ou seja, algoritmos que não se enquadram no grupo dos algoritmos inteligentes, é possível citar URDANETA; NADIRA; JIMÉNEZ (1988), em que os autores desenvolvem uma abordagem para obter a solução do problema de coordenação mencionado usando a seguinte aproximação:

$$min_{s\in S}[max_{p\in P}z(s,p)] \tag{4.1}$$

Em que: z(s, p) representa o melhor desempenho para a coordenação, (s) representa os

parâmetros dos relés, (S) representa o conjunto de parâmetros disponíveis, (p) representa as condições de falta ou de perturbação e (P) é o conjunto das piores e/ou mais relevantes perturbações. No referido trabalho, o problema de coordenação foi explorado por um processo iterativo, em que o ajuste de tempo (TMS) foi calculado para uma dada corrente de *pickup* (Ip), possibilitando o cálculo do novo valor da mesma. Este processo iterativo alternando entre se fixar TMS e calcular Ip e fixar Ip, encontrando assim TMS é executado até que a precisão estabelecida seja atingida. Por se tratar de um problema linear os ajustes de tempo são encontrados utilizando o método simplex, enquanto que as correntes, por se tratar de um problema não-linear, são obtidas através da aproximação do gradiente reduzido generalizado (LUENBERGER, 1984 apud URDANETA et al., 1988, p. 906). Salienta-se que a obtenção do ponto de ótimo não é garantida, prejudicando assim a obtenção da coordenação ótima dos relés. Conforme exposto pelos autores, quando diferentes configurações no sistema são relevantes, torna-se necessário recalcular a coordenação para essas várias situações. Afirma-se que a metodologia proposta apresenta potencial de aplicação em situações de controle de emergência e on-line do sistema elétrico em questão.

Em PÉREZ; URDANETA (1999), é demonstrado que o uso de unidades instantâneas juntamente com os relés direcionais de sobrecorrente, aumenta a velocidade associada à extinção da falta, o que contribui para a redução do ajuste de tempo dos relés. Nesse caso, conforme ressaltam os autores, duas restrições adicionais devem ser respeitadas:

$$t_j(F1) - t_{inst} \ge ITC \tag{4.2}$$

$$t_i(F2) - t_i(F2) \ge ITC \tag{4.3}$$

Em que: *i* representa o relé principal, *j* o relé de backup, $t_j(F1)$ é o tempo de operação do relé *j* para uma falta em F1, $t_j(F2)$ e $t_i(F2)$ são, respectivamente, os tempos de operação dos relés *i* e *j* para uma falta em F2, ITC é o intervalo de coordenação e t_{inst} é o tempo da unidade instantânea. A situação é mostrada na Figura 4.2.

A seguir, os autores propõe uma abordagem que considera relés de falha de disjuntor e os relés de distância. Após alguma modelagem, as seguintes restrições são também levadas em consideração para se efetuar a coordenação dos relés de proteção:

$$t_{z2j} - t_i(F1) - t_{inst} \ge ITC \tag{4.4}$$

$$t_j(F2) - t_{z2i} \ge ITC \tag{4.5}$$

$$t_{z2j} - t_{BRF} \ge sm \tag{4.6}$$

Em que, $(t_{z2i}) e(t_{z2j})$ são, respectivamente, os tempos de operação dos relés (i) e(j) em sua segunda zona de proteção; $t_i(F1) e t_j(F2)$ são, respectivamente, o tempos de operação do relé



Figura 4.2: Curvas ajustadas dos relés direcionais de sobrecorrente com unidades instantâneas (PÉREZ; URDANETA (1999)).

(*i*) para uma falta em F1, e o tempo de operação do relé (*j*) para uma falta em F2; (t_{BRF}) é o tempo de operação do relé de falha de disjuntor e (*sm*) é a margem de segurança entre o tempo da atuação do relé (*j*) e do relé de falha de disjuntor.

Essas restrições para uma coordenação adequada entre as partes envolvidas são ilustradas pela Figura 4.3.



Figura 4.3: Curvas ajustadas dos relés direcionais de sobrecorrente, relés de distância, unidades instantâneas e relé de falha de disjuntor (PÉREZ; URDANETA (1999)).

Ao se acrescentar o relé de backup local para falha do disjuntor no processo de coordenação, observa-se um aumento do tempo de atuação dos relés na zona secundária. Como uma alternativa ao relé de backup local, o emprego dos relés de backup remoto pode ser considerado, mas, salienta-se que em certas situações a quantidade de circuitos elétricos a serem interrompidos se torna maior, dificultando a seletividade da proteção.

A grande maioria dos relés existentes apresentam ajustes de corrente ou de tempo em valores discretos. Sendo assim, ZEINELDIN; EL-SAADANY; SALAMA (2004), desenvolveram um método que introduz no processo de otimização da coordenação alternativas para lidar com estes valores discretos. Para tanto foi utilizado o *software General Algebraic Modeling System* (GAMS) de forma a modelar, através de equações algébricas, as restrições do problema de otimização. Além disso, o artigo destaca a relevância da introdução deste aspecto na formulação do problema de coordenação, pois em geral, arredondam-se os valores de Ip, obtidos do processo de otimização, para o valor inteiro mais próximo. Esta prática pode tornar o sistema não coordenado, invalidando assim o processo de otimização realizado. No trabalho é demonstrada a possibilidade de se contornar os efeitos indesejáveis advindos do arredondamento posterior da variável Ip, tornando adequada a utilização de programação não-linear (PNL) com segurança. Para tanto, os autores introduzem uma variável binária e uma nova restrição que mantém os valores de Ip em valores discretos predeterminados. Tal abordagem assegura resultados confiáveis para a coordenação do sistema de proteção, sendo assim uma alternativa de aspecto relevante a ser considerado para a coordenação ótima de relés direcionais.

Já em ZEINELDIN; EL-SAADANY; SALAMA (2005) o foco é abordar, dentre diferentes formulações, a melhor forma para se lidar com o problema de coordenação ótima de relés direcionais de sobrecorrente em sistemas com mais de uma fonte conectada. Na parametrização destes relés, os ajustes de tempo (TMS) e correntes de pickup (Ip), devem ser escolhidos para que o tempo de operação total dos relés seja o mínimo possível, e a seletividade e a confiabilidade do sistema de proteção sejam mantidas. Um interessante ponto contido explicitamente nesse trabalho, e de uma forma mais sutil em muitos outros, é a classificação do problema da coordenação de relés de acordo com os parâmetros disponíveis. Dependendo da forma que se modela o mesmo, este se torna mais ou menos complexo. A classificação deste depende principalmente da corrente de pickup, de modo que se este parâmetro é fixo, tem-se um problema de programação linear (PL); se é variável e contínuo, trata-se de um problema de PNL, e se é variável e discreto, caracteriza-se por um problema de PNLIM (Programação Não-Linear Inteiro Misto). No problema de PNLIM, a principal vantagem é que a corrente não é fixada a um valor pré-determinado, e o problema do ajuste discreto da corrente de *pickup* pode ser contornado. Contudo, pelo fato de ser um problema não linear há chance de encontrar soluções ótimas locais na região de busca do problema de coordenação. Com o intuito de se obter soluções ótimas globais para o problema de coordenação, os autores propuseram uma nova formulação, baseada em PIM (Programação Inteira Mista) que elimina a não-linearidade do problema com o objetivo de diminuir as chances de se obter soluções ótimas locais. Nas simulações computacionais propostas, verificou-se que a ferramenta se sobressaiu sobre as demais, atingindo resultados mais significativos.

4.3 Aplicação de algoritmos inteligentes para o problema de ajuste de coordenação de relés direcionais

Analisando-se os trabalhos técnicos mais recentes nota-se que os algoritmos inteligentes se destacam, frente aos métodos clássicos, para a solução do problema de coordenação em questão.

Nessa seção, a afirmação supracitada será comprovada.

4.3.1 Aplicação do PSO para o problema de ajuste de relés

Conforme já mencionado, é visível o aumento do uso de algoritmos inteligentes na resolução de problemas similares ao da coordenação ótima de relés direcionais de sobrecorrente. Dentre as técnicas inteligentes, destaca-se nessa seção o uso do algoritmo PSO como uma alternativa aos métodos tradicionais de programação apresentados no item 4.2.

Diversos trabalhos utilizam do algoritmo PSO para tratar o problema de coordenação ótima de relés direcionais de sobrecorrente. Em ZEINELDIN; EL-SAADANY; SALAMA (2006), comparou-se o desempenho de um algoritmo de otimização fundamentado no PSO, e os métodos de otimização proporcionados pelo software GAMS. Como os relés considerados permitiam somente o ajuste de tempo contínuo e ajuste de corrente de *pickup* discreto, o problema foi modelado como sendo um problema de PNLIM. O objetivo do problema, como de costume, foi o de minimizar o tempo de atuação dos relés, adotando-se os critérios de coordenação entre os relés primários e seus respectivos relés de retaguarda. A principal contribuição que o algoritmo desenvolvido pelos autores proporciona, é a forma como o mesmo lida com os valores discretos da corrente de *pickup* dos dispositivos. Esta é realizada por meio do emprego de uma variável binária (y_mi) adicionada à formulação do problema, semelhante à pesquisa de ZEINELDIN; EL-SAADANY; SALAMA (2004), mencionada na seção 4.2. Sendo assim, para o relé (i), com (m) ajustes de corrente de pickup (Ip) disponíveis, tem-se:

$$Ip_i = \sum_m y_{mi} Ip_m \tag{4.7}$$

Em que se definiu $y_{mi} = 1$ caso um dado ajuste da corrente de *pickup* (Ip_m) seja escolhido para relé (*i*), e $y_{mi} = 0$, caso contrário. No algoritmo desenvolvido, a inicialização das correntes de pickup foi de forma aleatória. Os valores de ajuste de tempo foram calculados usando o método do ponto interior com o intuito de encontrar as soluções dentro da região de soluções factíveis, economizando, assim, tempo e memória computacional. Os resultados mostram que a técnica baseada em PSO foi capaz de encontrar melhores soluções com menor número de iterações quando comparado à ferramenta GAMS. Fato este que evidencia o bom desempenho desta ferramenta inteligente quando aplicada ao problema de coordenação dos relés direcionais.

Em MANSOUR; MEKHAMER; EL-KHARBAWE (2007) tal problema é modelado como sendo um problema de PL, em que os ajustes da corrente de *pickup* são predeterminados para se obter, posteriormente, os valores do ajuste de tempo via algoritmo PSO. Para tanto, ao invés de utilizar uma função de penalização, prática comumente encontrada na literatura que trata de problemas de otimização com restrições, um algorimo "reparador" foi desenvolvido para que as partículas permaneçam na região factível do problema. Tal algoritmo age modificando as velocidades das partículas, sendo este aplicado no momento em que as soluções apresentam-se fora do espaço de busca das soluções factíveis, violando assim as restrições predefinidas

no problema. O algoritmo foi testado em vários sistemas elétricos modelados computacionalmente, e os resultados obtidos foram comparados com um método de PL existente no *software* $Matlab^{(\mathbb{R})}$. Conclui-se dos resultados revelados que o uso do algoritmo PSO é adequado à obtenção da coordenação ótima dos relés direcionais, ressaltando ainda que no caso teste em que a modelagem dos tempos dos relés é polinomial, o algoritmo inteligente foi capaz de fornecer soluções factíveis, enquanto que a PL se mostrou ineficiente. O tempo de convergência para a obtenção da solução via algoritmo PSO se mostrou maior em comparação ao método de PL do $Matlab^{(\mathbb{R})}$, sendo este um ponto levantado pelos próprios autores e que merece melhor análise.

Na pesquisa de JAGDISH; KUSUM (2008) os autores utilizam várias metaheurísticas para solucionar o problema de otimização dos ajustes de tempo dos relés. O estudo de caso apresentado é composto de dois sistemas de potência simplórios os quais foram utilizados para analisar o desempenho de 9 tipos de algoritmos inteligentes de otimização, sendo os mesmos: RST2 (*Random Search Techniques*), AG (*Genetic Algorithm*), SOMA (*Self-Organizing Migrating Algorithm*), SOMGA (*Self-Organizing Migrating Genetic Algorithm*), PSOG (*Global PSO*), PSOGC (*Constricted Global PSO*), PSOL (*Local PSO*), PSOLC (*Constricted Local PSO*) e o CPSO (*Chaotic PSO*). Trinta ensaios foram realizados para cada um dos algoritmos considerados, sendo que a melhor solução dentre todas foi tomada como base para efetuar a comparação entre os mesmos. Em ambos os sistemas elétricos estudados, observou-se que o CPSO foi bastante superior aos demais algoritmos de otimização considerados, quando a variância das soluções fornecidas nos ensaios foi considerada.

Em ASADI; KOUHSARI (2009), é apresentada uma abordagem que lida com ajustes discretos e contínuos tanto para a corrente, quanto do tempo. Além disso, o trabalho proposto trata do problema de má coordenação existente entre relés de backup e principal. Para justificar a robustez do método desenvolvido em relação ao algoritmo PSO padrão, o artigo propõe um estudo de caso em que são abordadas quatro situações: (i) as constantes da função objetivo proposta possuem valores bem definidos (padrões) tomados da literatura; (ii) constantes com valores discrepantes ao padrão; (iii) emprego do algoritmo PSO padrão sobre a função objetivo desenvolvida; e (iv) o emprego do PSO padrão com arredondamentos dos ajustes discretos dos dispositivos ao final do algoritmo. Os autores ressaltaram a superioridade da abordagem proposta frente às outras aplicadas aos problemas de coordenação de relés direcionais. Entretanto, conforme os mesmos, mais testes devem ser realizados para analisar o comportamento do algoritmo proposto ao se elevar a complexidade do sistema.

Outra aplicação do algoritmo PSO no problema de coordenação de relés pode ser encontrada em BASHIR (2010), no qual os autores introduzem uma função "reparadora" (similar àquela vista em MANSOUR; MEKHAMER; EL-KHARBAWE (2007)) transformando assim o algoritmo num método de otimização com restrições. Outra característica relevante dessa pesquisa é o fato de que o valor da corrente de pickup é obtido em valores discretos (quantizados), eliminando possíveis casos de problemas com o arredondamento da mesma para o valor inteiro mais próximo, fato relevante também observado por outras pesquisas já mencionadas.

4.3. Aplicação de algoritmos inteligentes para o problema de ajuste de coordenação de relés direcionais

Em linhas gerais, o algoritmo apresentado tem o seu conjunto de valores de corrente de *pickup* inicializado com valores escolhidos aleatoriamente, dentro da região factível do problema. O valor do ajuste de TMS é então calculado como um problema de PL, sendo esses quantizados de forma a se obter valores inteiros. Logo após, são verificadas as restrições do problema a fim de gerar soluções factíveis à coordenação dos relés. Em seguida, ainda na mesma iteração, o novo valor do ajuste de tempo é obtido, novamente, por um problema de PL, utilizando-se os valores recém calculados da corrente de pickup. Este processo ocorre de forma iterativa até que se obtenha a minimização da função objetivo considerada. Para validar o método os autores comparam os valores encontrados por outros dois métodos, sendo o primeiro um problema de PL, e o outro utilizando AG num estudo de caso apresentado. Depreende-se que o algoritmo proposto apresentou o melhor resultado, revelando-se como uma alternativa para a solução do problema de coordenação. Contudo, cabe ressaltar que mais estudos devem ser dedicados a essa técnica e também deve-se observar seu comportamento para sistemas maiores e de maior complexidade.

A variante do PSO mais importante para o escopo desse trabalho, é apresentada pelas pesquisas de MIRANDA; FONSECA (2002a) e em MIRANDA; FONSECA (2002b)). Nestas, os autores acrescentam ao algoritmo PSO características evolutivas, resultando no algoritmo denominado *Evolutionary Particle Swarm Optimization* (EPSO). O emprego do algoritmo EPSO é observado no problema não-linear de coordenação de relés de sobrecorrente direcionais em um sistema de distribuição malhado, conforme exposto por LEITE; BARROS; MIRANDA (2010). Para avaliar a qualidade dos resultados alcançados pelo algoritmo EPSO na referida aplicação, os autores apresentam a solução obtida via algoritmo Simplex, tornando-se fixa a corrente de pickup, o que caracteriza o problema de coordenação mencionado em um caso de programação linear. O valor da função objetivo para o algoritmo EPSO apresenta-se com valor menor do que o obtido pela solução do simplex, evidenciando uma minimização mais eficaz, o que reflete num menor tempo de coordenação dos relés. Constata-se que a ferramenta metaheurística apresentada fornece resultados satisfatórios quando aplicada ao problema de coordenação de relés direcionais de sobrecorrente.

4.3.2 Aplicação de AG e suas variantes

Juntamente com o PSO, observou-se que o AG se encontra em evidência em um grande número de trabalhos técnicos ao ser aplicado no problema de otimização da coordenação de relés direcionais de sobrecorrente. Alguns destes serão citados adiante.

A pesquisa de SO (1997), aborda o problema de coordenação de relés de sobrecorrente utilizando AG, uma vez que, segundo os autores, este método é capaz de encontrar uma solução ótima global mais rapidamente do que métodos convencionais de PL e PNL. Os autores salientam que os ajustes dos relés devem ser obtidos de forma a atender a todos os possíveis casos de falta dentro do limite de coordenação previsto, sendo que alterações não previstas no sistema devem ser consideradas de forma a garantir a qualidade da coordenação do sistema. Porém, afirmam que tal questão deverá ser objeto de estudo da pesquisa em desenvolvimento, permitindo ao engenheiro de proteção julgar se há a necessidade, ou não, de novos ajustes para garantir a consistência da coordenação do sistema de proteção.

Em RAZAVI (2008), os autores tratam o problema como um caso de programação linear, uma vez que os valores da corrente de pickup são fixos. A questão da aproximação das soluções obtidas após o processo de otimização, nos casos em que o ajuste de tempo dos relés é discreto, conforme discutido nas seções 4.2 e 4.3.1, também foi considerada para a formulação de um novo algoritmo de otimização baseado em AG. Neste, os valores para o ajuste de tempo são inicializados com valores contínuos (valores reais), sendo que ao final de cada iteração, e antes de se avaliar a função objetivo, estes valores são aproximados para os valores inteiros mais próximos permitidos, para posteriormente dar continuidade ao processo de otimização. Por ser essencialmente um método de otimização irrestrita, assim como o algoritmo PSO, os autores incluem as restrições inerentes ao problema de coordenação dos relés de sobrecorrente na função objetivo a ser minimizada. Essa inclusão na função objetivo é realizada como penalização, ou seja, quando soluções (indivíduos) não factíveis (soluções em que a coordenação não é plenamente atendida, por exemplo) são encontradas pelo AG, o valor da função objetivo se eleva, e, por consequência, estes indivíduos estarão mais propícios a não sobreviver nas próximas gerações. A função objetivo proposta pelos autores é expressa da seguinte maneira:

$$OF = \alpha_1 \sum (t_i)^2 + \alpha_2 \sum (\Delta t_{mb} - \beta_2 (\Delta t_{mb} - |\Delta t_{mb}|))^2$$
(4.8)

Em que: $\alpha_1, \alpha_2, \beta_2$ são controles de ponderação; t_i é o tempo de operação do *i*-ésimo relé para uma falta próxima do disjuntor e Δt_{mb} é a diferença do tempo de operação entre cada par de relés (primário e *backup*). Dessa maneira, pares de relés que não atendam a restrição de coordenação farão com que Δt_{mb} seja menor que zero, elevando o valor da função objetivo e, consequentemente, tornando aquela partícula menos suscetível a sobreviver no processo de seleção. Tal possibilidade de manipulação da função objetivo é uma contribuição que pode ser útil para a realização de estudos concernentes à coordenação, entretanto deve-se agir com cautela quanto aos ajustes dos parâmetros da parcela de penalização, de modo a obter uma coordenação segura no caso de uma aplicação em sistemas reais.

HOUSSEINIAN (2008) promove um estudo comparativo envolvendo três algoritmos inteligentes para a resolução do problema de coordenação de relés. Os três algoritmos analisados foram: AG, AGI (Algoritmo Genético Imune) e PSO. Tendo em vista o problema de arredondamento das soluções, exposto anteriormente, os resultados comparativos contemplam tanto valores contínuos quanto discretos para o TMS. Dos estudos realizados o AG apresentou a melhor velocidade de convergência. Em contrapartida, a melhor confiabilidade nos resultados foi alcançada utilizando-se o PSO. O AGI apresentou-se inferior, em termos de desempenho, tanto em relação ao AG quanto ao PSO. Os autores afirmam que a maior velocidade de convergência para o AG se deu em virtude de o algoritmo PSO utilizar um espaço de busca mais amplo, e a maior confiabilidade obtida pelo PSO pode ser justificada pelo maior número de iterações realizadas pelo algoritmo.

Em CORREA et al. (2010), um AG híbrido é desenvolvido, levando em consideração valores discretos de múltiplos de corrente (Ip) e valores discretos de TMS. A metodologia implementada via *software Matlab*^(R), através de um processo iterativo calcula os valores atuais de Ip através do AG, sendo que o TMS da atual geração de soluções foi predeterminado como um problema de PL (simplex), tomando-se os valores de Ip da geração de soluções anteriores. Esse processo iterativo é repetido até que a tolerância seja atingida. Para este algoritmo, observa-se uma redução no tempo de operação dos relés quando comparados ao AG tradicional. Além disso, a velocidade de convergência do algoritmo híbrido também foi mais rápida em relação ao AG convencional. Todavia, é necessário enfatizar que o método considera que a configuração inicial dos parâmetros de ajuste do algoritmo deve ser realizada por tentativa e erro, o que representa uma dificuldade a ser transposta para aplicações práticas.

No trabalho de BEDKAR; BHIDE (2011a) é observado o uso de um AG modificado. Neste, são utilizados números reais ao invés de adotar uma codificação binária para os cromossomos, reduzindo assim o esforço computacional na execução do AG, pois não há necessidade de conversão da representação binária para a correspondente decimal quando se deseja obter, por exemplo, o ajuste de tempo. Essa mudança reflete diretamente no tamanho dos cromossomos, pois observa-se que é possível alcançar uma maior precisão, em termos da busca pela resposta ótima de coordenação, sem a necessidade de aumentar o tamanho dos mesmos, fato este que ocorre quando é utilizada a representação binária. Salienta-se que o problema de coordenação ótima dos relés de sobrecorrente foi concebido como sendo um problema de PL, já que a corrente de pickup foi prefixada. Os testes realizados mostraram que o uso do AG, com as características supracitadas, foi capaz de fornecer soluções consistentes para a coordenação do sistema de proteção. Entretanto, pecou-se na falta de um estudo comparativo entre o AG modificado e o AG clássico, para evidenciar a superioridade ou não das soluções apresentadas pelo algoritmo proposto, em termos, de esforço computacional e qualidade das soluções obtidas.

O emprego da PNL em conjunto com o AG na coordenação ótima é observada em BED-KAR; BHIDE (2011b). Tal algoritmo híbrido é justificado pelo fato de que o AG tem a capacidade de explorar um amplo espaço de soluções, evitando-se assim, que o método de PNL utilizado se prenda nos muitos mínimos locais do conjunto de soluções factíveis. A motivação maior deste trabalho é que os métodos de PNL tendem a convergir para a soluções de melhor qualidade caso a escolha inicial seja adequada, sendo uma característica bastante útil na tarefa de obter a solução ótima para a coordenação dos relés em questão. Assim, os autores apresentam um algoritmo híbrido que consiste em executar primeiramente o AG de modo a fornecer um ponto de partida adequado ao método de PNL, que é utilizado posteriormente para se obter a solução final para a coordenação. As soluções encontradas por este algoritmo híbrido mostram-se superiores àquelas disponibilizadas utilizandos apenas o AG ou a PNL.

4.4 Considerações finais sobre este capítulo

Os trabalhos avaliados apontam que os algoritmos inteligentes se destacam, quando comparados aos métodos clássicos, para a solução do problema de coordenação ótima de relés direcionais de sobrecorrente (SO (1997), URDANETA; NADIRA; JIMÉNEZ (1988)). Dentre as técnicas mais utilizadas tem-se o PSO e AG, bem como suas variantes, em evidência frente ao problema. O tratamento dos valores discretos existentes nos relés também foi abordado em algumas pesquisas, as quais forneceram diferentes alternativas para lidar com este tipo de problema.

Nos trabalhos estudados, os algoritmos híbridos, os quais dispõem de métodos convencionais de programação linear e não-linear, atuando conjuntamente com as técnicas inteligentes, também apresentaram bons resultados.

No próximo capítulo, a abordagem definida para este trabalho para solucionar o problema de coordenação de relés direcionais de sobrecorrente será explanada. Toda a fundamentação teórica do método e um exemplo prático para um melhor entendimento serão demonstrados.

Capítulo 5

Formulação do Problema

As ferramentas base para a formulação do problema de coordenação de relés já foram apresentadas no Capítulo 2 desta dissertação. No entanto, este capítulo trará uma apresentação formal da modelagem desse tipo de problema, bem como um exemplo simples que auxiliará na compreensão da mesma.

5.1 Modelagem do problema

O objetivo do problema de otimização da coordenação de relés direcionais é descobrir os parâmetros ($Ip \in TMS$) de cada relé do sistema estudado, de forma que os mesmos possam atuar o mais rápido possível frente a uma falta. Por conseguinte, o problema modelado apresenta dimensão da ordem \mathbb{R}^{2n} , em que n é o número de relés presentes no sistema estudado.

Visto que a minimização do tempo de atuação total dos dispositivos de proteção estudados é desejada, faz-se necessário recorrer à Equação 2.10 mostrada no Capítulo 2, em que o tempo de atuação (T_x) para um relé X genérico é dado por:

$$T_x = TMS_x \times \left(K_1 + \frac{K_2}{\left(\left(\frac{I_x}{I_{p_x}}\right)^{K_3} - 1\right)}\right)$$
(5.1)

onde: K_1 , K_2 , K_3 são constantes definidas pela norma IEEE Std. C37.112 (1996), TMS_x é o valor do múltiplo de tempo do relé, I_x é a corrente lida pelo dispositivo e Ip_x é a corrente de *pickup* configurada. Entretanto, neste trabalho, para fins de simplificação, todos os dispositivos do SEP são considerados com curvas normalmente inversas. Logo, a Equação 5.1 se torna:

$$T_x = TMS_x \times \left(\frac{0, 14}{\left(\left(\frac{I_x}{I_{P_x}}\right)^{0.02} - 1\right)}\right)$$
(5.2)

Definida a equação do tempo de atuação de cada relé, pode-se formular a função objetivo do problema que deverá ser minimizada.

$$Minimizarf = \sum_{i=1}^{n} T_i(TMS_i, Ip_i, I_i)$$
(5.3)

de forma que as restrições presentes na Equação 5.4 sejam satisfeitas.

$$sa \begin{cases} T_{ij} - T_i \ge ITC \quad [1] \\ TMS_i^{min} \le TMS_i \le TMS_i^{max} \quad [2] \\ I_{in}^{min} < I_{in} < I_{in}^{max} \quad [2] \end{cases}$$

$$\begin{cases}
Image is a p_i = Image i mage i$$

em que, T_{ij} corresponde ao tempo de atuação do relé j quando este se configura como retaguarda de i; ITC é o valor correspondente ao intervalo de tempo de coordenação adotado; $TMS_i^{min} \in TMS_i^{max}$ são os limites inferiores e superiores de TMS, respectivamente; $Ip_i^{min} \in Ip_i^{max}$ são os limites inferiores e superiores de Ip; fs é o fator de sobrecarga definido; e $I_i^{nominal}$ é a corrente nominal que circula pelo circuito no qual o relé i está instalado para carga máxima do sistema.

Na Equação 5.4 a restrição [1] é responsável pela coordenação entre os pares de relés primário/retaguarda. Em [2] e [3] são abrangidas as restrições limites dos parâmetros TMS e Ip dos dispositivos de proteção e, por fim, a restrição [4] limita a atuação do relé a apenas acima da corrente de carga do sistema.

Na próxima seção, a modelagem de um sistema radial será realizada para melhor elucidar a formulação do problema apresentada.

5.2 Modelando um problema exemplo

O desenvolvimento de um modelo para um problema de coordenação da proteção de um SEP é um tarefa fortemente dependente do tamanho do mesmo. Dessa forma, quanto maior o sistema, mais complexa e mais trabalhosa será a mesma. Nessa seção a modelagem do sistema radial da figura 5.1 será apresentada.



Figura 5.1: Sistema de distribuição radial simples. Adaptado de (PRASHANT; SUDHIR; VI-JAY (2009)).

O processo de desenvolvimento da modelagem desejada pode ser dividido em duas partes: num primeiro momento, atende-se aos critérios pertinentes à modelagem dos dispositivos de proteção e às relações primário/retaguarda estabelecidas entre eles, enquanto que num segundo passo, as restrições dos parâmetros dos dispositivos serão modeladas.

Para encontrar as relações que descrevem a primeira parte do problema é necessário saber as características nominais e de curto do SEP estudado, onde os dispositivos de proteção se
encontram no mesmo, quais os tipos de curvas presentes em tais dispositivos, quais as relações primário/retaguarda estabelecidas e a filosofia de proteção adotada pela empresa responsável.

Com as relações dos pares de relés definidas, as restrições que manterão os relés coordenados para atuação podem ser descritas. Neste exemplo, como se trata de um sistema radial simples, é fácil identificar o par de relés primário (relé B) e retaguarda (relé A), porém para sistemas malhados maiores essas relações são mais trabalhosas de se definir.

Definida a relação primário/retaguarda dos dispositivos deste estudo, pode-se escrever as equações dos tempos de atuação dos mesmos. Como mostrado na seção anterior, neste trabalho todos os relés são considerados configurados com curvas normalmente inversas. Assim, da Equação 5.2 é possível calcular os valores de T_A e T_B , que são os tempos de atuação dos dispositivos A e B, respectivamente, e de T_{BA} , que é o tempo de atuação do dispositivo A quando este atua como retaguarda de B.

Por conseguinte, a primeira metade da modelagem se torna:

$$T_A = TMS_A \times \left(\frac{0.14}{((\frac{I_A}{I_{P_A}})^{0.02} - 1)}\right)$$
 [1]

$$T_{BA} = TMS_A \times \left(\frac{0.14}{((\frac{I_B}{I_{BA}})^{0.02} - 1)}\right)$$

$$T_B = TMS_B \times \left(\frac{0.14}{((\frac{I_B}{I_{P_B}})^{0.02} - 1)}\right)$$
[3]
$$T_{BA} - T_B \ge ITC$$
[4]

A segunda parte da modelagem está associada às restrições impostas sobre os parâmetros que configuram os dispositivos de proteção. Por exemplo, são utilizadas restrições associadas a um tempo mínimo de atuação dos dispositivos, a limites extremos definidos para os parâmetros, entre outras. Tem-se então:

$$\begin{cases} TMS_A^{min} \leq TMS_A \leq TMS_A^{max} & [5] \\ TMS_B^{min} \leq TMS_B \leq TMS_B^{max} & [6] \\ Ip_A^{min} \leq Ip_A \leq Ip_A^{max} & [7] \\ Ip_B^{min} \leq Ip_B \leq Ip_B^{max} & [8] \\ Ip_A^{min} \geq fs \times I_A^{nominal} & [9] \\ Ip_B^{min} \geq fs \times I_B^{nominal} & [10] \end{cases}$$

Em alguns casos o limite inferior TMS_i^{min} aparece como restrição de tempo mínimo de atuação do dispositivo, enquanto que o limite máximo TMS_i^{max} , normalmente é arbitrado. Já os limites de Ip são definidos de forma que a corrente de magnetização selecionada possua valores que diferencie a corrente nominal do sistema de uma corrente de falta.

Agrupando as modelagens realizadas, obtém-se então:

$$Minimizarf = T_A + T_B \tag{5.5}$$

[2]

[2]

$$T_A = TMS_A \times \left(\frac{0.14}{((\frac{I_A}{I_{P_A}})^{0.02} - 1)}\right)$$
[1]

$$=TMS_A \times (\frac{0.14}{((\frac{I_B}{I_{D+1}})^{0.02}-1)})$$

$$T_{BA} = TMS_A \times \left(\frac{0,14}{(\frac{I_B}{I_{PA}})^{0.02} - 1}\right)$$
[2]
$$T_B = TMS_B \times \left(\frac{0,14}{((\frac{I_B}{I_{PA}})^{0.02} - 1)}\right)$$
[3]
$$T_{BA} - T_B \ge ITC$$
[4]

$$sa \left\{ \begin{array}{c} TMS_A^{min} \leq TMS_A \leq TMS_A^{max} \end{array} \right. [5]$$

$$TMS_{B}^{min} \leq TMS_{B} \leq TMS_{B}^{max} \qquad [6]$$

$$Ip_{A}^{min} \leq Ip_{A} \leq Ip_{A}^{max} \qquad [7]$$

$$Ip_{B}^{min} \leq Ip_{B} \leq Ip_{B}^{max} \qquad [8]$$

$$Imin \leq Ip_{B} \leq Ip_{B}^{max} \qquad [8]$$

$$Ip_A^{min} \ge fs \times I_A^{nominal} \qquad [9]$$

$$Ip_B^{min} \ge fs \times I_B^{nominal}$$
 [10]

Observa-se que mesmo para um exemplo simples, o número de equações que descrevem o problema é considerável. Para torná-lo ainda mais complexo, as equações que relacionam os parâmetros dos dispositivos com o seu tempo de atuação é uma equação não-linear, o que exige ainda um método de solução mais sofisticado.

Para facilitar a compreensão, serão adicionados valores ao problema exemplo em estudo.

5.2.1 Modelagem matemática

Suponha agora que o SEP da Figura 5.1 possua as correntes nominais $I_A = I_B = 500A$ e que a mínima corrente de falta próxima das barras A e B são $I_A = 4000A$ e $I_B = 3000A$, respectivamente. Idealize ainda, a razão do TC do relé R_A em 300:1, a do relé R_B em 100:1 e ambos os relés ajustados com curvas normalmente inversa e parâmetros contínuos.

Imagine que os dispositivos tenham limitação de atuação que exige tempo mínimo de operação para cada relé de 0, 2s. A filosofia de proteção adotada arbitra ITC em 0, 57s e o limite superior do TMS de ambos os relés em 1, 2. Para as correntes de magnetização Ip, seu limite inferior será o limite da margem de sobrecarga escolhida em 120% do valor da corrente nominal e o superior será 140% do mesmo valor.

A modelagem dos dispositivos e as relações primário/retaguarda entre eles foi realizada na seção anterior e é dada por:

$$\begin{array}{l} T_A = TMS_A \times \left(\frac{0,14}{((\frac{I_A}{I_{P_A}})^{0.02}-1)}\right) & [1] \\ T_{BA} = TMS_A \times \left(\frac{0,14}{((\frac{I_B}{I_{P_A}})^{0.02}-1)}\right) & [2] \\ T_B = TMS_B \times \left(\frac{0,14}{((\frac{I_B}{I_{P_B}})^{0.02}-1)}\right) & [3] \\ T_{BA} - T_B \ge 0,57 & [4] \end{array}$$

Encontradas as relações de coordenação e as equações que descrevem os tempos de atuação dos dispositivos de proteção, restam as restrições de atuação dos dispositivos a serem modeladas. De acordo com a filosofia estabelecida, obtém-se:

$$\begin{cases} T_A \ge 0, 2 & [5] \\ T_B \ge 0, 2 & [6] \\ TMS_A \le 1, 2 & [7] \\ TMS_B \le 1, 2 & [8] \\ 1, 2 \times 500 \le Ip_A \le 1, 4 \times 500 & [9] \\ 1, 2 \times 500 \le Ip_B \le 1, 4 \times 500 & [10] \end{cases}$$

Observe que o fator de sobrecarga fs foi definido em 20% e incorporado em Ip_i^{min} e que a restrição de TMS_i^{min} foi substituída pela de tempo de atuação mínimo.

A modelagem matemática final do problema se tornará:

$$Minimizarf = T_A + T_B \tag{5.6}$$

$$sa \begin{cases} T_A = TMS_A \times \left(\frac{0.14}{((\frac{I_A}{I_{P_A}})^{0.02} - 1)}\right) & [1] \\ T_{BA} = TMS_A \times \left(\frac{0.14}{((\frac{I_B}{I_{P_A}})^{0.02} - 1)}\right) & [2] \\ T_B = TMS_B \times \left(\frac{0.014}{((\frac{I_B}{I_{P_B}})^{0.02} - 1)}\right) & [3] \\ T_{BA} - T_B \ge 0, 57 & [4] \\ T_A \ge 0, 2 & [5] \\ T_B \ge 0, 2 & [6] \\ TMS_A \le 1, 2 & [7] \\ TMS_B \le 1, 2 & [8] \\ 1, 2 \times 500 \le Ip_A \le 1, 4 \times 500 & [9] \\ 1, 2 \times 500 \le Ip_B \le 1, 4 \times 500 & [10] \end{cases}$$

Modelado o sistema, vários métodos de solução de problemas de otimização podem ser utilizados para se obter respostas de boa qualidade. No próximo capítulo, o algoritmo de otimização que será utilizado neste trabalho será explicado.

5.3 Considerações finais sobre esse capítulo

Esse capítulo objetivou uma melhor explanação a respeito da modelagem matemática do problema de coordenação de relés de sobrecorrente. Nos próximos capítulos dois sistemas testes mais complexos serão modelados e os resultados encontrados discutidos.

Capítulo 6

Metodologia Utilizada

O problema da coordenação de relés direcionais em sistemas malhados, como visto, é bastante complexo e necessita de métodos de solução não-lineares para ser solucionado. Neste trabalho, as metaheurísticas *PSO* e sua variante *EPSO* serão utilizadas. No entanto, tais algoritmos inteligentes precisaram ser adaptados para lidarem com algumas características do problema em questão e complementados com algoritmos auxiliares para que os seus desempenhos fossem melhorados. Nesse capítulo essas modificações pontuais serão esclarecidas.

6.1 As restrições do problema de coordenação de relés direcionais

Sabe-se que em suas essências o *PSO* e o *EPSO* clássicos (já explicados nas Seções 3.2 e 3.3 do Capítulo 3) são utilizados para tarefas de otimização irrestrita e, portanto são incapazes de lidar com as restrições encontradas no problema de otimização de relés. Assim, associou-se aos algoritmos inteligentes rotinas para sanarem essa deficiência.

Para que os algoritmos se tornem otimizadores que sejam capazes de trabalhar com as restrições do problema duas rotinas auxiliares foram implementadas em cada metaheurística. A primeira modificação do comportamento clássico é que as variáveis são inicializadas aleatoriamente, porém num espaço de busca limitado de forma que o enxame de partículas inicial obedeça todas as restrições pertinentes àquele determinado sistema. Já o segundo algoritmo auxiliar possui o mesmo objetivo no *PSO* e no *EPSO* porém foi implementado de maneiras diferentes para cada algoritmo inteligente.

Na próxima seção tais algoritmos serão explicitados.

6.1.1 O Algoritmo Restritivo

A primeira rotina desenvolvida, aqui chamado de Algoritmo Restritivo, tem como objetivo evitar que as partículas explorem regiões infactíveis no espaço busca do problema modelado.

Para o *PSO*, a rotina desenvolvida é dada da seguinte forma: após a atualização da posição das partículas realizadas a cada iteração, executa-se uma rotina que verifica se alguma destas se encontra em uma região infactível do espaço de busca. Se algum tipo de restrição for desrespeitada o algoritmo força a partícula infratora a se mover de volta para a região aceitável do problema.

O algoritmo restritivo pode ser melhor explicado como segue. Se alguma partícula violar alguma restrição imposta, essa é movida novamente para sua melhor posição já encontrada (pbest) e terá sua velocidade normalizada pela velocidade máxima estabelecida no algoritmo. A Figura 6.1 a seguir descreve a rotina desenvolvida.



Figura 6.1: Fluxograma do Algoritmo Restritivo implementado.

Dessa forma, as partículas são mantidas na região factível do problema e na próxima iteração com as influências impostas pelo vetor baseado no gbest essas retomam sua busca pela solução ótima.

Para o *EPSO* a solução encontrada é bem mais simples e tão eficaz quanto a mostrada para o *PSO*. Como a variante do *PSO* apresenta em sua composição comportamento dos Algoritmos Evolutivos, uma função penalidade foi elaborada da forma que, se a partícula extrapolar os limites factíveis do problema, essa sofrerá uma punição na sua função *fitness* e no próximo processo de "Seleção" possuirá alta probabilidade de ser descartada.

É importante ressaltar que os algoritmos desenvolvidos não apresentam demonstrações matemáticas e são frutos de um conjunto de idéias com fundamentos baseados em heurísticas, que apresentaram resultados satisfatórios após as realizações de inúmeros testes em ambientes de simulação.

6.2 Discretização das variáveis

No presente trabalho, de modo a se aproximar com o que acontece no mundo prático, as variáveis são assumidas da seguinte forma: as TMS são consideradas discretas e as Ip são definidas contínuas, de forma a caracterizar o problema modelado como sendo um problema de otimização inteiro misto. Dessa forma, os algoritmos utilizados para a solução do problema devem absorver essa característica em sua composição.

As metaheurísticas utilizadas, em suas versões clássicas, são desenvolvidas para trabalhar com variáveis contínuas, e no problema em questão, uma modificação nestes algoritmos inteligentes é exigida para que estes consigam lidar com a natureza discreta das variáveis. Tal modificação ocorre a cada iteração quando os valores nas variáveis são arredondados para o próximo valor de passo existente. O algoritmo que realiza a discretização é mostrado na Figura 6.2



Figura 6.2: Fluxograma do algoritmo de discretização das variáveis.

A Tabela 6.1 apresenta a saída do algoritmo para um passo de discretização igual a 0,0500. Observe que as variáveis que se apresentam adequadas ao passo (por exemplo TMS2 da Partícula 1), possuem seus valores mantidos após a execução da rotina de discretização. Já as variáveis que não se mostram discretizadas em relação ao valor de passo definido são arredondadas para o próximo valor discreto. Por exemplo, a variável TMS1 da Partícula 1 é arredondada de 0,0578 para 0,1000, que é o próximo valor discreto no passo desejado. É importante ressaltar que as variáveis Ip são contínuas e, por conseguinte, não sofrem influência do algoritmo de discretização.

Como visto, o algoritmo apresenta funcionamento simples e se apresenta efetivo para tornar possível que as metaheurísticas lidem com a natureza discreta das variáveis otimizadas.

Vetores Contínuos						
	TMS1	TMS2	TMS3	IP1	IP2	IP3
Partícula 1	0,0578	0,0500	0,2043	100,00	159,86	152,04
Partícula 2	0,1000	0,1432	0,2200	100,35	144,37	139,23
Partícula 3	0,1443	0,0784	0,2000	102,46	151,85	157,50
		Vetores	Discretiz	ados		
	TMS1	TMS2	TMS3	IP1	IP2	IP3
Partícula 1	0,1000	0,0500	0,2500	100,00	159,86	152,04
Partícula 2	0,1000	0,1500	0,2500	100,35	144,37	139,23
Partícula 3	0,1500	0,1000	0,2000	102,46	151,85	157,50

Tabela 6.1: Exemplo de discretização das variáveis TMS.

6.3 Melhorando a eficiência da convergência

O *EPSO* é uma ferramenta com grande potencial para solução de problemas de otimização e que apresenta resultados satisfatórios onde é aplicada. Todavia, por se tratar de um problema que pode vir a lidar com redes de grandes dimensões, e que quando modelado, apresentará uma vasta gama de equações, vislumbrou-se que uma melhoria no processo de convergência do algoritmo seria uma contribuição de valor para o trabalho.

Para o *EPSO* o processo de convergência já apresenta melhorias em relação ao *PSO* clássico pelo fato do primeiro apresentar as características do processo evolutivo que o ajudam a vencer os ótimos locais. Contudo, em problemas com muitos ótimos locais, esse processo ainda pode encontrar dificuldades para se estabelecer. Por conseguinte, ponderou-se a respeito dessa característica, e como resultado a rotina apresentada na Figura 6.3 foi elaborada.

O funcionamento do algoritmo desenvolvido pode ser explicado utilizando a seguinte analogia baseada em teoria eletromagnética: imagine que as particulas apresentem um carga elétrica q qualquer, e que cada região no espaço de busca possua um potencial elétrico proporcional ao seu valor de *fitness*, ou seja, quanto melhor fosse o valor da região, maior seria seu poder de atração das partículas. A Figura 6.4 ilustra esse cenário.

As partículas ao transitarem no espaço de busca sofrem ação das forças elétricas existentes nas diferentes regiões do mesmo. A intensidade dessas forças é dependente da velocidade das partículas, portanto, se as mesmas estiverem em alta velocidade essa influência será pouco significativa. Contudo, após certo número de iterações, se as partículas se encontrarem presas em um ótimo local, essa força de atração passa a ser significante e as influenciará.

Considerando a região na qual as partículas se encontram aprisionadas como um ótimo local (região A da Figura 6.4), as partículas após um certo tempo apresentarão pouca mobilidade. Como consequência, uma região próxima que apresente melhor valor de *fitness* (região B) exercerá uma força sobre as partículas no sentido de atraí-las para si, acelerando-as e, consequentemente, dando continuidade ao processo de busca pelo espaço.

Entendida a analogia descrita, a compreensão do processo visto no algoritmo inteligente é



Figura 6.3: Fluxograma do algoritmo que melhora a eficiência de convergência das metaheurísticas.

facilitada. A força que as partículas sofrem tem direção e sentido estabelecidas num processo rústico de tentativa e erro, em que a posição gbest sofrerá redução nos valores de suas variáveis para o valor de passo inferior, sempre seguidas de um teste para verificar se a mesma ainda se encontra na região factível do espaço. Ao final do processo, o vetor gbest, se modificado, apresentará o valor da sua função objetivo reduzido. Observe a Equação 5.1 da curva IEC normal inversa do relé transcrita a seguir:

$$T_x = TMS_x \times \left(\frac{0, 14}{\left(\left(\frac{I}{Ip_x}\right)^{0.02} - 1\right)}\right)$$
(6.1)

A equação mostra a relação diretamente proporcional de TMS com o tempo de atuação dos dispositivos e uma relação direta, porém não-linear, de Ip com o mesmo tempo T. Dessa forma, a redução de qualquer uma das variáveis influenciará no sentido de diminuir o tempo de atuação daquele dispositivo.

A interação do vetor gbest modificado sobre as partículas do algoritmo é análoga à força elétrica que as regiões exercem sobre as mesmas. Na metaheurística desenvolvida o raciocínio é melhor explicado observando a Equação 3.3 transcrita a seguir:



Figura 6.4: Analogia para a metodologia desenvolvida. Adaptado de (MOURAO; PINHO; SIMOES (2013))

$$v_{new}^{i} = w_{i0}^{*}v^{i} + w_{i1}^{*}(p_{b}^{i} - x^{i}) + w_{i2}^{*}(p_{g}^{*} - x^{i})$$
(6.2)

Na equação acima observa-se que se as partículas se encontram presas em um ótimo local a algumas iterações, a contribuição dos pesos inerciais e dos vetores pbest e gbest são mínimas. Por conseguinte, se alteradas as coordenadas de gbest, o peso w_{i2} a ele associado influenciará quase que exclusivamente sobre a velocidade das partículas impulsionando o processo da forma esperada.

O processo implementado será testado nos próximos capítulos.

6.4 Critérios de parada

O critério de parada é determinante para o bom funcionamento de um algoritmo de otimização. Este sendo robusto evita avaliações adicionais da função objetivo após se encontrar a solução ótima. Idealmente o critério de parada escolhido não deve apresentar nenhum parâmetro relacionado ao problema.

Para os algoritmos presentes neste trabalho adotou-se um critério de convergência clássico. Se o número de iterações máximo não for extrapolado, a máxima variação da função objetivo é monitorada para um número específico de iterações consecutivas. Se a variação máxima da mesma for menor que um valor tolerância predefinido, se assume a convergência do algoritmo. Neste trabalho, o critério de parada é acionado quando a função objetivo não varia mais que a tolerância de 1×10^{-5} durante um quinto do número máximo de iterações.

6.5 As metaheurísticas implementadas

Os fluxogramas que descrevem as metaheurísticas do *PSO* e do *EPSO* clássico foram apresentadas nas Figuras 3.3 e 3.4 do Capítulo 3. Agora, agregando a esses algoritmos as rotinas auxiliares implementadas e explanadas nesse capítulo, obtém-se as variantes dos algoritmos inteligentes desenvolvidas neste trabalho. A Figura 6.5 mostra como está configurado o *PSO* desenvolvido.



Figura 6.5: Fluxograma do PSO implementado.



Figura 6.6: Fluxograma do EPSO implementado.

6.6 Considerações finais sobre esse capítulo

Nesse capítulo, os algoritmos auxiliares desenvolvidos foram detalhadamente expostos em forma de fluxogramas e, por fim, as metaheurísticas que serão utilizadas neste trabalho foram

apresentadas.

Ambos os algoritmos serão aplicados em estudos de casos no próximo capítulo e os resultados alcançados serão discutidos.

Capítulo 7

Resultados

Dois estudos de caso foram desenvolvidos para demonstrar o comportamento da abordagem desenvolvida frente ao cálculo dos ajustes dos parâmetros dos relés do sistema. O primeiro caso é um sistema radial de 13 barras, enquanto o segundo é um sistema malhado real de 19 barras, operado pela Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista (CTEEP). Estes foram escolhidos com características distintas para mostrar a eficiência do algoritmo tanto para aplicações em sistemas de distribuição (normalmente radiais ou fracamente malhados), quanto para sistemas de transmissão (normalmente malhados).

Os sistemas são modelados matematicamente e solucionados por meio da utilização das metaheurísticas desenvolvidas. De modo a se estabelecer um padrão comparativo, os resultados obtidos pelo *EPSO* modificado foram comparados àqueles obtidos pelo *EPSO* clássico e pelos *PSOs* modificados e clássicos.

7.1 Caso teste 1: Alimentador teste 13 barras IEEE

O primeiro sistema trabalhado é o alimentador teste 13 barras IEEE (2012), que apresenta característica radial predominantemente presente em sistemas de distribuição. ELMATHANA (2010), em sua dissertação de mestrado, calcula as contribuições de corrente durante os curtoscircuitos, porém algumas simplificações são consideradas:

- O efeito do regulador de tensão no nó 650 não foi considerado nos cálculos;
- Cargas distribuídas entre os nós 632 e 671 não foram consideradas nos cálculos;
- A chave entre os nós 671 e 692 estava fechada;
- Tensão base de 4,16 kV.

Visto que o trabalho é focado no problema de coordenação de relés, as simplificações acima são aceitáveis. A representação topológica do sistema é apresentada na Figura 7.1 e seus dados complementares podem ser encontrados em (IEEE (2012))



Figura 7.1: Alimentador teste 13 barras IEEE (Modificado)

A filosofia de proteção adotada arbitra as restrições dos parâmetros dos dispositivos de proteção da seguinte forma:

- Todos os dispositivos de proteção são configurados com curvas do tipo normalmente inversa;
- ITC escolhido em 0,2 s;
- TMS mínimo igual a 0,05;
- TMS máximo é 1;
- Passo fixo do TMS igual a 0,01;
- Limite de corrente mínimo: 120% da corrente de carregamento nominal; e
- Limite de corrente máximo: 140% da corrente de carregamento nominal.

Tabela 7.1: Caso 1 - Máxima corrente de carga permissível no circuito.

Relé número:	1	2	3	4	5	6	7
I_p [A]	500	85	85	440	355	355	90

A relação dos relés primários e de retaguarda foi estabelecida analisando o circuito da carga para a geração. Os pares de relés primários/retaguarda para a falta monofásica é mostrada na Tabela 7.2.

Ponto de falta	Relé primário	Relé secundário
632	1	-
633	2	1
634	3	2
671	4	1
675	6	5
680	7	4
692	5	4

Tabela 7.2: Caso 1 - Relação de relés primários e secundários.

Aplicando um curto-circuito fase-terra franco em cada nó, a contribuição de corrente em cada trecho da área analisada no sistema de 13 barras do IEEE é mostrada na Tabela 7.2.

	<i>I_{cc}</i> 632	<i>I_{cc}</i> 633	<i>I</i> _{cc} 634	<i>I</i> _{cc} 671	<i>I_{cc}</i> 675	<i>I_{cc}</i> 680	<i>I_{cc}</i> 692
Visto por R_1	8444 A	5925 A	2191 A	4514 A	4163 A	3250 A	4514 A
Visto por R_2	-	5720 A	1995 A	-	-	-	-
Visto por R_3	-	-	1995 A	-	-	-	-
Visto por R_4	-	-	-	3395 A	3083 A	2444 A	3395 A
Visto por R_5	-	-	-	-	3463 A	-	3812 A
Visto por R_6	-	-	-	-	3463 A	-	-
Visto por R_7	-	-	-	-	-	3250 A	-

Tabela 7.3: Caso 1 - Magnitude das correntes de falta.

Obtidas as informações do sistema elétrico, o problema é equacionado, obtendo:

$$Minimizar f = \sum_{i=01}^{07} T_i$$

$$T_x = TMS_x \times \left(\frac{0.14}{(\frac{1f_x}{I_{Py}})^{0.02}-1}\right)$$

$$T_{xy} = TMS_y \times \left(\frac{0.14}{(\frac{1f_{xy}}{I_{Py}})^{0.02}-1}\right)$$

$$T_{21} - T_2 \ge 0, 2$$

$$T_{21} - T_2 \ge 0, 2$$

$$T_{32} - T_3 \ge 0, 2$$

$$T_{41} - T_4 \ge 0, 2$$

$$T_{65} - T_6 \ge 0, 2$$

$$T_{65} - T_6 \ge 0, 2$$

$$T_{51} - T_5 \ge 0, 2$$

$$TMS_x \ge 0, 05$$

$$TMS_x \le 1, 00$$

$$TMS_x \le 1, 00$$

$$TMS_x \le 140\% \times I_{Nominal}$$

$$Turner$$

em que os índices x e y indicam primário e retaguarda, respectivamente.

Após a modelagem matemática do sistema, a mesma é solucionada por meio das metaheurísticas desenvolvidas. Nas simulações realizadas os algoritmos foram utilizados com um número reduzido de partículas (28 partículas para o *PSO* e 14 para o *EPSO*) para que as características de busca de boas soluções dos mesmos sejam evidenciadas.

Os resultados dos parâmetros otimizados obtidos pelos algoritmos inteligentes são apresentados na Tabela 7.4. Já os tempos correspondentes a essa parametrização são mostrados na Tabela 7.5. É importante observar por meio dos tempos dos relés que todas as restrições de pares primário e retaguarda dos mesmos foram respeitadas.

Metaheurística	PSO clássico	PSO modificado	EPSO clássico	EPSO modificado				
	TMS - Múltiplo de tempo (s)							
TMS_1	0,24	0,24	0,24	0,24				
TMS_2	0,15	0,15	0,15	0,15				
TMS_3	0,05	0,05	0,05	0,05				
TMS_4	0,16	0,16	0,16	0,16				
TMS_5	0,12	0,12	0,12	0,12				
TMS_6	0,05	0,05	0,05	0,05				
TMS_7	0,05	0,05	0,05	0,05				
	Ip - C	orrente de magnet	ização (A)					
Ip_1	500	500	500	500				
Ip_2	85	85	85	85				
Ip_3	85	85	85	85				
Ip_4	440	440	440	440				
Ip_5	355	355	355	355				
Ip_6	355	355	355	355				
Ip_7	90	90	90	90				

Tabela 7.4: Caso 1 - Solução otimizada encontrada - Parâmetros dos dispositivos.

Por se tratar de um estudo menos complexo, todas as metaheurísticas utilizadas foram capazes de encontrar a mesma solução otimizada do sistema e, por conseguinte, apresentaram os mesmos parâmetros dos dispositivos.

Para que seja possível avaliar o comportamento dos algoritmos quanto às suas características de obter soluções de boa qualidade, criou-se o chamado "Critério β ". Realizadas as simulações para cada metaheurística, analisou-se o menor tempo (FO) encontrado em todas as simulações e somou-se ao mesmo um fator β arbitrariamente escolhido. Dessa forma, definidos os valores de β , se definem também os limites da FO as quais as soluções simuladas que apresentarem tempos otimizados menores que este limite, são consideradas como soluções de boa qualidade. A Equação 7.2 a seguir descreve esse processo.

$$T_{Boaqualidade} < T_{Min} + \beta; \tag{7.2}$$

A porcentagem que expressa o desempenho para obtenção de soluções de boa qualidade de cada algoritmo é apresentada na Tabela 7.6.

Metaheurística	PSO clássico	PSO modificado	EPSO clássico	EPSO modificado
T_1	0,5659	0,5659	0,5659	0,5659
T_2	0,2391	0,2391	0,2391	0,2391
T_3	0,1074	0,1074	0,1074	0,1074
T_4	0,5370	0,5370	0,5370	0,5370
T_5	0,3604	0,3604	0,3604	0,3604
T_6	0,1440	0,1440	0,1440	0,1440
T_7	0,0941	0,0941	0,0941	0,0941
T_{21}	0,6629	0,6629	0,6629	0,6629
T_{32}	0,3127	0,3127	0,3127	0,3127
T_{41}	0,7468	0,7468	0,7468	0,7468
T_{65}	0,3637	0,3637	0,3637	0,3637
T_{74}	0,6421	0,6421	0,6421	0,6421
$ T_{51}$	0,5641	0,5641	0,5641	0,5641
Tempo Otimizado	2,0480 s	2,0480 s	2,0480 s	2,0480 s

Tabela 7.5: Caso 1 - Solução otimizada encontrada - Tempos de atuação dos relés (s).

Tabela 7.6: Caso 1 - Solução otimizada encontrada - Desempenho das Metaheurísticas.

Metaheurística	PSO clássico	PSO modificado	EPSO clássico	EPSO modificado		
Função Objetivo	2,0480 s	2,0480 s	2,0480 s	2,0480 s		
Percentuais de obtenção de boas soluções. [%]						
$\beta = 0,0220s$	80	80	100	100		
$\beta = 0,0520s$	85	90	100	100		

Os algoritmos apresentaram a mesma solução otimizada com tempo total de atuação de 2,0480 s e alto percentual de obtenção de boas soluções. Como era de se esperar, o *EPSO* demonstrou-se superior ao *PSO* nesse quesito devido à sua capacidade de adaptabilidade advinda dos algoritmos evolutivos. Verifica-se também que o *PSO* modificado se apresenta ligeiramente superior que sua versão clássica.

A seguir, os gráficos das respostas otimizadas encontradas são apresentados.

Os gráficos mostram que a solução otimizada é rapidamente encontrada por todas as metaheurísticas desenvolvidas.

Com o propósito de comparar o desempenho dos algoritmos considerando todas as simulações realizadas, a Tabela 7.7 é apresentada.

Metaheurística	PSO clássico	PSO modificado	EPSO clássico	EPSO modificado
Média	2,0804 s	2,0689 s	2,0488 s	2,0480 s
Maior FO	2,3057 s	2,2393 s	2,0639 s	2,0480 s
Menor FO	2,0480 s	2,0480 s	2,0480 s	2,0480 s

Tabela 7.7: Caso 1 - Solução otimizada encontrada - Comparação de resultados.



(a) PSO clássico.







Figura 7.3: Gráfico FO x Número de iterações das respostas otimizadas por meio do EPSO.

O desempenho dos algoritmos desenvolvidos foi bastante similar para esse primeiro estudo de caso. Porém, nota-se pelos resultados da Tabela 7.7 que o *EPSO* clássico e sua variante atingiram a melhor solução otimizada encontrada pelas metaheurísticas na maioria das simulações, enquanto que o *PSO* clássico e sua variante, em parte das simulações, se mantiveram presos em algum ótimo local existente e não obtiveram soluções de boa qualidade.

7.1.1 Análise geral dos resultados

O primeiro estudo é realizado sobre um sistema radial. Tais sistemas, por não possuírem restrições conflitantes como aquelas que acontecem quando há malhas, apresentam uma convergência mais fácil. Unindo tal característica ao baixo número de barras, mesmo com as poucas partículas utilizadas, os algoritmos apresentaram resultados satisfatórios, encontrando soluções de boa qualidade. Os resultados mostram também que o fator evolutivo do *EPSO* o torna mais robusto que o seu antecessor no processo de busca das melhores soluções, e que o *PSO* modificado leva ligeira vantagem sobre sua versão clássica. Na seção a seguir, o caso malhado será abordado.

7.2 Caso teste 2: Sistema em malha

Com a intenção de demonstrar a robustez da abordagem desenvolvida o sistema malhado de 19 barras e 11 linhas de transmissão da Figura 7.4 é escolhido como o segundo caso teste. Neste exemplo, aplicou-se faltas monofásicas francas no meio das linhas de transmissão mantendo a topologia do mesmo fixa e completa. Os dados do sistema, os valores dos parâmetros dos relés para esse sistema foram cedidas pela CTEEP e estão presentes nas Tabelas 7.8 e 7.9. O padrão das restrições do caso anterior é mantido:



Figura 7.4: Sistema CTEEP de 19 barras.

- Os dispositivos de proteção são configurados com curvas do tipo normalmente inversa;
- ITC escolhido em 0,2 s;
- TMS mínimo igual a 0,05 e máximo igual a 1;
- Passo fixo do TMS igual a 0,01;
- Limite de corrente mínimo: 120% da corrente nominal; e
- Limite de corrente máximo: 140% da corrente nominal.

Relé	Circuito	ID Circuito	Corrente [A]
R1	1 - 2	LT1	524
R2	1 - 2	LT1	524
R3	1 - 2	LT2	524
R4	1 - 2	LT2	524
R5	2 - 3	LT3	289
R6	2 - 3	LT3	289
R7	3 - 4	LT4	289
R8	3 - 4	LT4	289
R9	2 - 4	LT5	289
R10	2 - 4	LT5	289
R11	2 - 7	LT6	448
R12	2 - 7	LT6	448
R13	2 - 7	LT7	448
R14	2 - 7	LT7	448
R15	5 - 7	LT8	480
R16	5 - 7	LT8	480
R17	5 - 6	LT9	300
R18	5 - 6	LT9	300
R19	7 - 8	LT10	480
R20	7 - 8	LT10	480
R21	6 - 8	LT11	450
R22	6 - 8	LT11	450

Tabela 7.8: Caso 2 - Máxima corrente de carga permissível.

Tabela 7.9: Caso 2 - Relação de relés primário/retaguarda.

Linha em curto	Relé primário	Relé retaguarda	Icc_{Rp} [A]	Icc_{Rr} [A]
LT1	02	03	2306	2228
LT1	02	06	2306	0843
LT1	02	10	2306	1025
LT1	02	12	2306	0759
LT1	02	14	2306	0759
LT2	04	01	2407	2254
LT2	04	06	2407	0844
LT2	04	10	2407	1025

LT2	04	12	2407	759
LT2	04	14	2407	759
LT3	06	08	1830	1377
LT4	07	05	1692	1064
LT5	09	06	1758	1020
LT5	09	12	1758	586
LT5	09	14	1758	586
LT5	10	07	2198	1273
LT6	11	06	3355	1547
LT6	11	10	3355	1861
LT6	11	14	3355	3252
LT6	12	13	1731	1621
LT6	12	15	1731	1617
LT6	12	19	1731	1347
LT7	13	06	3355	1547
LT7	13	10	3355	1861
LT7	14	15	1731	1617
LT7	14	19	1731	1347
LT8	16	11	2054	1036
LT8	16	13	2054	1036
LT9	17	22	5265	566
LT9	18	16	1947	1387
LT10	20	11	2044	970
LT10	20	13	2044	970
LT10	20	15	2044	970
LT11	21	18	3686	392
LT11	22	20	1615	1052

Apresentados os dados do sistema, é possível modelá-lo matematicamente obtendo-se:

$$Minimizarf = \sum_{i=01}^{22} T_i \tag{7.3}$$

ſ	$T_x = TMS_x \times \left(\frac{0.14}{(\sqrt{f_x})0.02 - 1}\right)$	[1]	$T_{1114} - T_{11} \ge 0, 2$	[21]
	$(\underbrace{(\frac{1}{Ipx})^{0.02}-1}_{T})$	[9]	$T_{1213} - T_{12} \ge 0, 2$	[22]
	$I_{xy} = I M S_y \times \left(\frac{I_{fxy}}{((\frac{I_{fxy}}{I_{py}})^{0.02} - 1)}\right)$	$\lfloor L \rfloor$	$T_{1215} - T_{12} \ge 0, 2$	[23]
	$T_{0203} - T_{02} \ge 0, 2$	[3]	$T_{1219} - T_{12} \ge 0, 2$	[24]
	$T_{0206} - T_{02} \ge 0, 2$	[4]	$T_{1306} - T_{13} \ge 0, 2$	[25]
	$T_{0210} - T_{02} \ge 0, 2$	[5]	$T_{1310} - T_{13} \ge 0, 2$	[26]
	$T_{0212} - T_{02} \ge 0, 2$	[6]	$T_{1415} - T_{14} \ge 0, 2$	[27]
	$T_{0214} - T_{02} \ge 0, 2$	[7]	$T_{1419} - T_{14} \ge 0, 2$	[28]
	$T_{0401} - T_{04} \ge 0, 2$	[8]	$T_{1611} - T_{16} \ge 0, 2$	[29]
	$T_{0406} - T_{04} \ge 0, 2$	[9]	$T_{1613} - T_{16} \ge 0, 2$	[30]
sa {	$T_{0410} - T_{04} \ge 0, 2$	[10]	$T_{1722} - T_{17} \ge 0, 2$	[31]
	$T_{0412} - T_{04} \ge 0, 2$	[11]	$T_{1816} - T_{18} \ge 0, 2$	[32]
	$T_{0414} - T_{04} \ge 0, 2$	[12]	$T_{2011} - T_{20} \ge 0, 2$	[33]
	$T_{0608} - T_{06} \ge 0, 2$	[13]	$T_{2013} - T_{20} \ge 0, 2$	[34]
	$T_{0705} - T_{07} \ge 0, 2$	[14]	$T_{2015} - T_{20} \ge 0, 2$	[35]
	$T_{0906} - T_{09} \ge 0, 2$	[15]	$T_{2118} - T_{21} \ge 0, 2$	[36]
	$T_{0912} - T_{09} \ge 0, 2$	[16]	$T_{2220} - T_{22} \ge 0, 2$	[37]
	$T_{0914} - T_{09} \ge 0, 2$	[17]	$TMS_x \ge 0,05$	[38]
	$T_{1007} - T_{10} \ge 0, 2$	[18]	$TMS_x \le 1,00$	[39]
	$T_{1106} - T_{11} \ge 0, 2$	[19]	$Ip_x \ge 120\% \times I_{Nominal}$	[40]
l	$T_{1110} - T_{11} \ge 0, 2$	[20]	$Ip_x \le 140\% \times I_{Nominal}$	[41]

novamente, os índices x e y indicam primário e retaguarda, respectivamente.

Modelado o sistema, os mesmos são solucionados por meio das metaheurísticas desenvolvidas e os resultados das correntes de *pickup* e dos tempos de atuação dos dispositivos são apresentados nas Tabelas 7.10 e 7.11.

Tabela 7.10: Caso 2 - Solução otimizada encontrada - Parâmetros dos dispositivos.

Metaheurística	PSO clássico	PSO modificado	EPSO clássico	EPSO modificado	
TMS - Múltiplo de tempo (s)					
TMS_1	0,16	0,11	0,10	0,12	
TMS_2	0,05	0,05	0,05	0,05	
TMS_3	0,10	0,11	0,10	0,10	
TMS_4	0,05	0,05	0,05	0,05	
TMS_5	0,24	0,24	0,18	0,19	
TMS_6	0,22	0,21	0,18	0,18	
TMS_7	0,26	0,23	0,19	0,19	

TMS_8	0,30	0,23	0,22	0,20				
TMS_9	0,05	0,06	0,06	0,05				
TMS_{10}	0,25	0,25	0,20	0,20				
TMS_{11}	0,07	0,07	0,06	0,06				
TMS_{12}	0,12	0,13	0,11	0,11				
TMS_{13}	0,19	0,19	0,15	0,15				
TMS_{14}	0,13	0,13	0,12	0,12				
TMS_{15}	0,17	0,17	0,15	0,15				
TMS_{16}	0,06	0,06	0,06	0,06				
TMS_{17}	0,05	0,07	0,05	0,05				
TMS_{18}	0,05	0,05	0,05	0,05				
TMS_{19}	0,14	0,16	0,13	0,13				
TMS_{20}	0,07	0,08	0,07	0,07				
TMS_{21}	0,05	0,06	0,05	0,05				
TMS_{22}	0,07	0,09	0,07	0,07				
	Ip - Corrente de magnetização (A)							
Ip_1	524	524	524	524				
Ip_2	524	524	524	524				
Ip_3	524	524	524	524				
Ip_4	524	524	524	524				
Ip_5	289	289	289	289				
Ip_6	289	289	289	289				
Ip_7	289	289	289	289				
Ip_8	289	289	289	289				
Ip_9	289	289	289	289				
Ip_{10}	289	289	289	289				
Ip_{11}	448	448	448	448				
Ip_{12}	448	448	448	448				
Ip_{13}	448	448	448	448				
Ip_{14}	448	448	448	448				
Ip_{15}	480	480	480	480				
Ip_{16}	480	480	480	480				
Ip_{17}	300	300	300	300				
Ip_{18}	300	300	300	300				
Ip_{19}	480	480	480	480				
Ip_{20}	480	480	480	480				
Ip_{21}	450	450	450	450				
Ip_{22}	450	450	450	450				

Metaheurística	PSO clássico	PSO modificado	EPSO clássico	EPSO modificado
T_1	0,9288	0,6385	0,5805	0,5805
T_2	0,2327	0,2327	0,2327	0,2327
T_3	0,5994	0,6594	0,5994	0,5995
T_4	0,2260	0,2260	0,2260	0,2261
T_5	0,7645	0,7545	0,5734	0,6371
T_6	0,8190	0,7818	0,6701	0,6701
T_7	1,0117	0,8950	0,7393	0,7393
T_8	0,7899	0,6056	0,5792	0,5792
T_9	0,1903	0,2284	0,2284	0,1903
T_{10}	0,8451	0,8451	0,6761	0,6701
T_{11}	0,2385	0,2385	0,2044	0,2044
T_{12}	0,6130	0,6641	0,5620	0,5620
T_{13}	0,6473	0,6473	0,5110	0,5110
T_{14}	0,6641	0,6641	0,6130	0,6641
T_{15}	0,8996	0,8996	0,7938	0,8467
T_{16}	0,2847	0,2847	0,2847	0,2847
T_{17}	0,1186	0,1661	0,1186	0,1187
T_{18}	0,1836	0,1836	0,1836	0,1836
T_{19}	0,8574	0,9799	0,7962	0,7962
T_{20}	0,3333	0,3809	0,3333	0,3333
T_{21}	0,1629	0,1955	0,1629	0,1629
T_{22}	0,3785	0,4867	0,3785	0,3786
T_{0203}	0,4766	0,5243	0,4766	0,4766
T_{0206}	1,4231	1,3584	1,1644	1,1644
T_{0210}	1,3648	1,3648	1,0918	1,0918
T_{0212}	0,5083	0,5506	0,4659	0,4659
T_{0214}	0,5506	0,5506	0,5083	0,5506
T_{0401}	0,7565	0,5201	0,4728	0,4728
T_{0406}	1,4215	1,3569	1,1631	1,1631
T_{0410}	1,3648	1,3648	1,0918	1,0918
T_{0412}	0,5083	0,5506	0,4659	0,4659
T_{0414}	0,5506	0,5506	0,5083	0,5506
T_{0608}	1,3242	1,0152	0,9710	0,9710
T_{0705}	1,2722	1,2722	0,9541	1,0602
T_{0906}	1,2057	1,1509	0,9865	0,9865

Tabela 7.11: Caso 2 - Solução otimizada encontrada - Tempos de atuação dos relés (s).

T_{0912}	0,6060	0,6565	0,5555	0,5555
T_{0914}	0,6565	0,6565	0,6060	0,6565
T_{1007}	1,2093	1,0698	0,8837	0,8837
T_{1106}	0,9026	0,8616	0,7385	0,7385
T_{1110}	0,9222	0,9222	0,7377	0,7377
T_{1114}	0,4500	0,4500	0,4154	0,4500
T_{1213}	1,0209	1,0209	0,8060	0,8060
T_{1215}	0,9394	0,9394	0,8288	0,8841
T_{1219}	0,9399	1,0742	0,8728	0,8728
T_{1306}	0,9026	0,8616	0,7385	0,7385
T_{1310}	0,9222	0,9222	0,7377	0,7377
T_{1415}	0,9679	0,9679	0,8540	0,9110
T_{1419}	0,9399	1,0742	0,8728	0,8728
T_{1611}	0,5796	0,5796	0,4968	0,4968
T_{1613}	1,5732	1,5732	1,2402	1,2402
T_{1722}	0,3641	0,4681	0,3641	0,3641
T_{1816}	0,3916	0,3916	0,3916	0,3916
T_{2011}	0,6294	0,6294	0,5394	0,5394
T_{2013}	1,7084	1,7084	1,3487	1,4387
T_{2015}	1,6796	1,6797	1,4820	1,5808
T_{2118}	1,3050	1,3050	1,3050	1,3050
T_{2220}	0,6195	0,7080	0,6195	0,6195
Tempo Otimizado	11,7902 s	11,6691 s	10,0482 s	10,1054 s

Novamente, verifica-se que as restrições modeladas são todas respeitadas. Entretanto, nesse segundo estudo, nota-se que os parâmetros otimizados pelo *EPSO* e sua variante se mostram com tempos de atuação consideravelmente menores que aqueles otimizados pelo *PSO* e sua variante. Quando comparadas as versões clássicas e modificadas, as alterações não são muito significativas.

Os gráficos da metaheurísticas para as soluções otimizadas são apresentados a seguir nas Figuras 7.5 e 7.6.

Os gráficos enaltecem o desempenho superior do *EPSO* em relação ao *PSO*. Contudo, observa-se que as curvas que representam o segundo ainda não se estabilizaram, ou seja, se houvesse mais iterações talvez o *PSO* encontraria soluções de melhor qualidade que aquelas apresentadas.

Para realizar o estudo de convergência, de maneira análoga à vista no estudo de caso anterior, as Tabelas 7.12 e 7.13 são apresentadas. Em concordância com os critérios adotados para o sistema radial, um número reduzido de partículas foi utilizado pelos algoritmos inteligentes (22



(a) PSO clássico.







Figura 7.6: Gráfico FO x Número de iterações das respostas otimizadas por meio do EPSO.

partículas para o *EPSO* e 44 para o *PSO*) no processo de solução do estudo de caso em questão. Dessa forma, é testada a capacidade dos algoritmos de solucionarem problemas de otimização restrita com complexidade maior.

Metaheurística	PSO clássico	PSO modificado	EPSO clássico	EPSO modificado	
Função Objetivo	11,7902 s	11,6691 s	10,0482 s	10,1054 s	
Percentuais de Convergência [%]					
$\beta = 1,9518s$	05	20	40	70	
$\beta = 4,9518s$	15	55	65	90	

Os valores mostrados na Tabela 7.12 comprovam que a adaptabilidade do *EPSO* o tornam muito superior que o *PSO* em problemas de maior complexidade. O segundo não conseguiu apresentar soluções de boa qualidade na maioria das simulações realizadas, segundo o Critério β definido. Quando comparadas as versões clássicas e modificadas, nota-se que os algoritmos modificados se mostram bastante superiores em relações aos seus antecessores. Tais fatos

Metaheurística	PSO clássico	PSO modificado	EPSO clássico	EPSO modificado
Média	19,9024 s	15,3842 s	13,1542 s	11,6096 s
Maior FO	26,6400 s	28,1586 s	17,5646 s	16,3226 s
Menor FO	11,7902 s	11,6691 s	10,0482 s	10,1657 s

Tabela 7.13: Caso 2 - Solução otimizada encontrada - Comparação de resultados.

são comprovados analisando-se os resultados da Tabela 7.13. Observe que as médias do *PSO* são muito maiores que aquelas encontradas por meio do *EPSO*, e que o algoritmo encontrou dificuldades para superar os vários ótimos locais presentes no espaço de busca do mesmo.

Comparando-se o *EPSO* modificado com sua versão clássica, nota-se que as soluções otimizadas encontradas são bastante próximas. Porém, ao se analisar as médias das soluções obtidas, que representam o comportamento dos algoritmos em todas as simulações, o desempenho da metaheurística modificada é consideravelmente melhor, demonstrando a eficiência da metodologia desenvolvida.

7.2.1 Análise geral dos resultados

O segundo estudo de caso é mais complexo que o anterior. Por se tratar de um sistema malhado, algumas restrições do problema são conflitantes e com isso tem-se o aparecimento de vários ótimos locais no espaço de busca das partículas, dificultando assim o processo de convergência dos algoritmos utilizados.

Para o estudo abordado, os resultados mostram que o *EPSO* se sobressaiu ao *PSO* apresentando os parâmetros dos dispositivos mais otimizados e com um percentual de convergência significantemente maior. Os resultados de convergência também mostram que os algoritmos modificados com as rotinas auxiliares desenvolvidas apresentam percentual de convergência bastante melhorado quando comparados às suas versões clássicas.

As conclusões do trabalho serão apresentados no próximo capítulo.

Capítulo 8

Conclusão

Este trabalho vislumbrou o desenvolvimento de uma ferramenta computacional baseada em metaheurísticas que seja capaz de realizar a coordenação de relés direcionais em SEPs, levando em consideração os princípios básicos de operação destes dispositivos de proteção e o atendimento dos critérios de coordenação e seletividade estabelecidos pela filosofia de proteção adotada.

Após modelado, o problema da coordenação de relés se torna do tipo de otimização restrita não linear. Por este motivo, o uso de algoritmos inteligentes capazes de lidar com tal tipo de tarefas, pode trazer benefícios importantes, como a obtenção de uma solução melhor. Dentre as metaheurísticas pesquisadas, escolheu-se a utilização do *PSO* e sua variante *EPSO*, pois, juntamente com o AG, apresentam bons resultados para esse tipo de problema. Entretanto, tais algoritmos inteligentes necessitaram ser complementados com algoritmos auxiliares para que os seus desempenhos fossem melhorados e os mesmos fossem capazes de lidar com as características específicas da temática abordada.

Para verificar a robustez do software desenvolvido, dois sistemas testes foram estudados: primeiro, um sistema radial (característica comumente encontrada em redes de distribuição), enquanto que o segundo trata de um sistema malhado (característica típica de sistemas de transmissão) maior e, consequentemente, mais complexo que o anterior. A metodologia desenvolvida obteve bons resultados em ambos os casos, atingindo uma coordenação da proteção otimizada e com todas as restrições impostas respeitadas. Tal resultado mostra que a implementação computacional pode ser utilizada em ambos os tipos de sistemas.

Quatro metaheurísticas foram implementadas: *PSO* clássico, *PSO* modificado, *EPSO* clássico e o *EPSO* modificado. Os estudos de caso mostraram que para sistemas radiais, todos os algoritmos inteligentes foram capazes de solucionar o problema. Entretanto, apesar da convergência dos algoritmos neste tipo de sistema ser mais facilmente atingida, a variante *EPSO* se configura melhor nesse quesito que o seu antecessor. As modificações desenvolvidas nesse trabalho também influenciaram ligeiramente de forma positiva nesse processo de convergência.

Para o segundo cenário, um estudo de caso real, em que o sistema é malhado e maior que o anterior, percebe-se uma dificuldade do *PSO* em obter soluções de boa qualidade. O *EPSO*, pela

sua maior facilidade de adaptação obtida do AG, se mostrou muito superior quando comparado a sua versão base, atingindo resultados melhores e com característica de convergência melhoradas. Para esse segundo estudo, observou-se também que os algoritmos auxiliares propostos nesse trabalho influenciaram significativamente no desempenho desses algoritmos, tornando-os mais robustos que suas versões clássicas.

É intuitivo que grandes sistemas malhados, que apresentem um vasto número de dispositivos a serem parametrizados e possuam com isso muitas restrições, por conseguinte, apresentarão muitos ótimos locais. Dessa forma, encontrar soluções de boa qualidade para esse tipo de problema utilizando algoritmos inteligentes se torna mais difícil e as rotinas auxiliares desenvolvidas nesse trabalho, que aumentam a probabilidade de encontrar tais soluções, se configuram como uma contribuição interessante nesse aspecto.

Como visto, a proteção de SEPs é uma tarefa trabalhosa e que exige muito tempo de um engenheiro de proteção para ser realizada. O tempo de conclusão da mesma ainda é fortemente dependente do tamanho do sistema elétrico a ser analisado e da quantidade de dispositivos de proteção presentes no mesmo. Diante de tal cenário, a implementação aqui desenvolvida possui grande valor prático e tem potencial para se tornar uma ferramenta extremamente útil a tal profissional.

8.1 Continuidade do trabalho

Este trabalho poderá ser estendido e melhorado. A seguir, algumas sugestões de temas para continuidade desta dissertação:

- Realizar a otimização considerando os vários tipos de curvas (normalmente inversa, extremamente inversa e etc);
- Utilizar técnicas híbridas (como algumas daquelas vista no Capítulo 4 desta dissertação) para a solução do problema de otimização;
- Inserir a coordenação de relés de distância em conjuntos com os relés direcionais de sobrecorrente.

Referências

ANDERSON, P. M. Power System Protection. [S.1.]: McGraw-Hill, 1999.

- ASADI, M. R.; KOUHSARI, S. M. Optimal Overcurrent Relays Coordination using particleswarm-optmization algorithm. **Power Systems Conference and Exposition**, [S.I.], p.1–7, 2009.
- BASHIR, M. e. a. A new hybrid particle swarm optimization for optimal coordination of overcurrent relay. INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEM TECHNO-LOGY (POWERCOM), [S.1.], 2010.
- BEDKAR, P. P.; BHIDE, R. S. Optimum coordination of overcurrent relay using continuous genetic algorithm. **Expert Systems with Application**, [S.I.], p.11286–11292, 2011a.
- BEDKAR, P. P.; BHIDE, R. S. Optimum coordination of directional overcurrent relays using the hybrid GA-NLP approach. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [S.l.], p.109–119, 2011b.
- BEGIAN, S. S. e. a. A Computer Approach to Setting Overcurrent Relays in a Network. **IEEE PICA Conference Records**, [S.1.], p.447–457, 1967.
- BERGH, F. V. D. An analysis of particle swarm optimizers. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — University of Pretoria.
- CAMINHA, A. C. Introdução à proteção de sistemas elétricos. [S.l.]: Edgard Blutcher, 1977.
- COLEY, D. A. An Introduction to Genetic ALgorithms for Scientists and Engineers. [S.l.]: World Scientific, 1999.
- COOMBE, L. W.; LEWIS, D. G. Digital Calculation of Short-Circuit Currents in Large Complex-Impedance Networks. Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, [S.1.], p.1394–1397, 1956.
- CORREA, R.; OBREGON, C. L.; MORAIS, A. P.; SANTOS, E. M.; FARIAS, P. E. Coordenação ótima de relés de sobrecorrente por meio de um algoritmo genético que incorpora

a programação linear. **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS**, [S.1.], p.1–6, 2010.

- COURY, D. V.; OLESKOVICZ, M.; GIOVANINI, R. Proteção digital de sistemas elétricos de potência: dos relés eletromecânicos aos microprocessados inteligentes. [S.l.]: EESC -USP, 2007.
- DARWIN, C. M. A. On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life. [S.1.]: Brown, 1859.
- ELMATHANA, M. T. M. The Effect of Distributed Generation on Power System Protection. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — University of Exeter.
- GASTINEAU, B. R. e. a. Using the computer to set Transmission Line Phase Distance and Ground Back-up Relays. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, [S.l.], p.478–484, 1977.
- GOLDBERG, D. E. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. [S.1.]: Addison-Weasley, 1989.
- HEWITSON, L. G.; BROWN, M.; BALAKRISHNAN, R. Practical Power Systems Protection. [S.1.]: Elsevier - Newnes, 2004.
- HOLLAND, J. H. Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control and artificial intelligence. [S.l.]: The University of Michigan, 1975.
- HOUSSEINIAN, H. e. a. Coordination of overcurrent relays using intelligent methods: a comparative study for ga, pso and iga. **THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELEC-TRICAL ENGINEERING**, [S.1.], 2008.
- IEEE. IEEE 13 Node Test Feeders. [S.l.: s.n.], 2012.
- JAGDISH, C. B.; KUSUM, D. Optimization of directional overcurrent relay times by particle swarm optimization. **IEEE SWARM INTELLIGENCE SYMPOSIUM**, [S.1.], p.1–7, 2008.
- KENNEDY, J.; EBERHART, R. A new optimizer using particle swarm theory. **6th SYMP. MICRO MACHINE AND HUMAN SCIENCE**, [S.1.], p.34–44, 1995a.
- KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optmization. **IEEE INT. CONF. NEURAL NETWORK**, [S.1.], p.1942–1948, 1995b.
- LANTZ, M. J. Digital Short-Circuit Solution of Power System Networks including Mutual Impedance. **Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, [S.l.], p.1230–1233, 1957.

- LEITE, H.; BARROS, J.; MIRANDA, V. The evolutionary algorithm EPSO to coordinate directional overcurrent relays. **DEVELOPMENTS IN POWER SYSTEM PROTECTION**, [S.1.], p.1–5, 2010.
- MANSOUR, M. M.; MEKHAMER, S. F.; EL-KHARBAWE, N. E. A modified particle swarm optimizer for the coordination of directional overcurrent relays. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [S.I.], p.1400–1410, 2007.
- MASON, C. R. The Art and science of protective relaying. [S.l.]: John Wiley and Sons, 1956.
- MIRANDA, V.; FONSECA, N. EPSO Evolutionary Particle Swarm Optimization, a new algorithm with applications in power systems. TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXHIBITION, [S.1.], p.745–750, 2002a.
- MIRANDA, V.; FONSECA, N. Best-of-two-worlds meta-heuristic applied to power system problems. **IEEE CONGRESS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION**, [S.l.], p.1080–1085, 2002b.
- MOURAO, A. B.; PINHO, M.; SIMOES, P. Campo Elétrico http://campoeletricosandro.blogspot.com.br. 2013.
- PHADKE, A. G.; THORP, J. S. Computer Relaying for Power Systems. [S.1.]: Research Studies Press LTD, 1990.
- PRASHANT, P. B.; SUDHIR, R. B.; VIJAY, S. K. Optimum Time Coordination of Overcurrent Relays using Two Phase Simplex Method. International Journal of Electrical and Computer Engineering, [S.1.], p.774–778, 2009.
- PÉREZ, L. G.; URDANETA, A. J. Optimal coordination of directional overcurrent relays considering definite time backup relaying. IEEE Transactions on Power Delivery, [S.l.], p.1276– 1284, 1999.
- RAMASWAMI, R.; DAMBORG, M. J.; VENKATA, S. S. Coordination of Directional Overcurrent Relays in Transmission Systems - A Subsystem Approach. IEEE Transactions on Power Delivery, [S.1.], p.64–71, 1990.
- RAZAVI, F. e. a. A new comprehensive genetic algorithm method for optimal overcurrent relays coordination. **Electric Power Systems Research**, [S.l.], p.713–720, 2008.
- ROMERO, R.; MANTOVANI, J. R. S. Introdução à Metaheurística. 30 CONGRESSO TE-MÁTICO DE DINÂMICA E CONTROLE DA SBMAC, [S.1.], 2004.
- SANCHES, D. S.; MARQUEZ, R. A. C.; SILVA, M.; B., D. A. C.; LONDON JR., J. B. A. Integrando Relevantes Aspectos de Algoritmos Evolutivos Multi-Objetivo Para Tratamento do Problema de Restabelecimento de Energia em Sistemas de Distribuição de Grande Porte. XIX Congresso Brasileiro de Automática, [S.1.], 2012.

- SO, C. W. Application of genetic algorithm for overcurrent relay coordination. SIXTH INTER-NATIONAL CONFERENCE ON DEVELOPMENTS IN POWER SYSTEM PROTEC-TION, [S.1.], p.66–69, 1997.
- SOARES, A. H. M. Metodologia Computacional para a Coordenação Automática de Dispositivos de Proteção Contra Sobrecorrente em Sistemas Elétricos Industriais. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Escola de Engenharia de São Carlos.
- STAGG, G. W.; EL-ABIAD, A. H. Computer Methos in Power Systems Analysis. [S.l.]: McGraw-Hill, 1968.
- STEVENSON, W. D. Elementos de análise de sistemas de potência. [S.l.]: McGraw-Hill, 1986.
- TOALSTON, A. L. Digital Solution of Short-Circuit Currents for Networks including Mutual Impedances. Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, [S.I.], p.1720–1723, 1959.
- URDANETA, A. J.; NADIRA, R.; JIMÉNEZ, L. G. P. Optimal coordination of directional overcurrent relays in interconnected power systems. IEEE Transactions on Power Delivery, [S.1.], p.903–911, 1988.
- ZEINELDIN, H.; EL-SAADANY, E. F.; SALAMA, M. A. A novel problem formulation for directional overcurrent relay coordination. CONFERENCE ON POWER ENGINEERING (LESCOPE-04), [S.1.], p.48–51, 2004.
- ZEINELDIN, H.; EL-SAADANY, E. F.; SALAMA, M. A. Optimal coordination of directional overcurrent relay coordination. POWER ENGINEERING SOCIETY GENERAL MEE-TING, [S.1.], p.1101–1106, 2005.
- ZEINELDIN, H.; EL-SAADANY, E. F.; SALAMA, M. A. Optimal coordination of overcurrent relays using a modified particle swarm optimization. **Electric Power Systems Research**, [S.1.], p.988–995, 2006.