UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**METODOLOGIA PARA COORDENAÇÃO
OTIMIZADA ENTRE RELÉS DE DISTÂNCIA E
DIRECIONAIS DE SOBRECORRENTE EM SISTEMAS
DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Autor: Vinícius de Cillo Moro

Orientador: Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior

São Carlos

2014

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**METODOLOGIA PARA COORDENAÇÃO
OTIMIZADA ENTRE RELÉS DE DISTÂNCIA E
DIRECIONAIS DE SOBRECORRENTE EM SISTEMAS
DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

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. José Carlos de Melo Vieira Júnior

São Carlos
2014

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.

D867m de Cillo Moro, Vinícius
Metodologia para Coordenação Otimizada entre Relés
de Distância e Direcionais de Sobrecorrente em Sistemas
de Transmissão de Energia Elétrica / Vinícius de Cillo
Moro; orientador José Carlos de Melo Vieira Júnior .
São Carlos, 2014.

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, 2014.

1. Coordenação. 2. Otimização por enxame de
partículas. 3. Proteção de linhas de transmissão. 4.
Relés de distância. 5. Relés de sobrecorrente. 6.
Seletividade. 7. Sistema Elétrico de Potência. I.
Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **VINICIUS DE CILLO MORO**.

Título da dissertação: Metodologia para coordenação otimizada entre relés de distância e direcionais de sobrecorrente em sistemas de transmissão de energia elétrica".

Data da defesa: 05/09/2014

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. **José Carlos de Melo Vieira Júnior**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

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

APROVADO

Prof. Dr. **Fábio Bertequini Leão**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP- Ilha Solteira)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

Protocolo de Julgamento
Data: 05/09/2014
Assinatura: _____

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus por tudo que tens feito em minha vida.

Agradeço aos meus pais Juarez e Vera Lúcia, e à minha irmã Natália por todo suporte, amor e carinho a mim oferecidos em todos os momentos dessa vida.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior pelos ensinamentos pessoais e profissionais, pela dedicação, atenção, paciência e incentivos a mim concedidos.

Aos professores Dr. Denis V. Coury, Dr. Mário Oleskovicz e Dr. Eduardo N. Asada, pelo auxílio nessa pesquisa.

A todos meus familiares, por todo o afeto e apoio dedicados a mim.

A todos os meus amigos, em especial: Gustavo, Guilherme, Marcel, Rubens, Richard, Juliana, Paulo, Rui, Alexandre, Carlos, Beatriz, Gabriela, Laís, Izabella, Daniel, Aline, Fabricio, Laura, Bruna, Murilo.

Aos amigos que participaram do projeto de P&D e contribuíram com esta pesquisa: Wellington, Fabio, Fernando, Ulisses e Danilo.

Aos amigos do Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica (LSEE) e da pós-graduação da Engenharia Elétrica.

Ao Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação da EESC e aos seus funcionários.

Ao programa de P&D da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) (projeto 68-20-2011) e à CTEEP (Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista) por proporcionarem o desenvolvimento e financiamento desta pesquisa.

Resumo

MORO, V. C. **Metodologia para Coordenação Otimizada entre Relés de Distância e Direcionais de Sobrecorrente em Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica**. 2014, 112 p.. Dissertação (Mestrado em Ciências, Programa de Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

A proteção de sistemas de energia elétrica possui papel extremamente importante no aspecto de garantir o fornecimento de energia de maneira segura e confiável. Assim, a ação indevida ou a não atuação deste sistema de proteção pode causar danos materiais ou econômicos tanto para as concessionárias quanto para os consumidores de energia elétrica. Dessa forma, o sistema de proteção deve estar bem ajustado para que possa garantir suas funções, sendo sensível, seletivo, confiável e rápido. Para tanto, uma boa coordenação entre os relés de proteção deve ser estabelecida. No caso de um sistema de transmissão, o qual costuma ser um sistema malhado, a proteção é comumente realizada por relés de distância aliados a relés de sobrecorrente com unidade direcional, sendo que estes funcionam como elemento de retaguarda daqueles. O processo de ajuste desses relés é um trabalho muito difícil e demorado, que pode ainda estar sujeito a erros do engenheiro de proteção responsável pelo estudo. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo desenvolver uma metodologia baseada na otimização por enxame de partículas que obtenha automaticamente os ajustes desses relés de forma a garantir a coordenação e seletividade entre eles, tornando assim o processo de ajuste mais rápido e preciso. Dessa forma, essa metodologia pode constituir uma ferramenta de auxílio muito favorável ao engenheiro de proteção. Além disso, como em todo problema de otimização, a função objetivo e as restrições foram definidas de maneira a retratar o problema de coordenação envolvendo tanto os relés de distância quanto os direcionais de sobrecorrente. A metodologia foi aplicada a dois sistemas, um fictício com 16 relés e um sistema de transmissão real com 44 relés, sendo que em ambos os casos ela apresentou resultados bastante satisfatórios proporcionando ajustes bem coordenados.

Palavras-chave: Coordenação, otimização por enxame de partículas, proteção de linhas de transmissão, relé de distância, relé direcional de sobrecorrente, seletividade, sistema elétrico de potência.

Abstract

MORO, V. C. **Methodology for Optimized Coordination of Distance and Directional Overcurrent Relays in Electrical Transmission Systems**. 2014, 112 p.. Dissertation (Master Degree, Electrical Engineering Program) – Engineering School of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2014.

Electrical power systems protection has a very important role in the aspect of ensuring energy supply with safety and reliability. Thus, improper action or non-actuation of this protection system can cause materials and/or economics damages to electricity utilities as well as ordinary energy consumers. Therefore the protection system must be well adjusted so it can ensure its functions and thus being sensible, selective, reliable and fast. In order to achieve these characteristics, the protective relays must be well coordinated. In the case of meshed transmission systems, the protection is generally performed by distance relays as primary protection associated with directional overcurrent relays as backup protection. The process of adjusting these relays is very tough, slow and it can even be subject to the protection engineer mistakes. In this context, this work aims to develop a particle swarm optimization based methodology that can automatically obtain these relays adjusts so they can ensure relays coordination and selectivity, and then make this setting process faster and more precise. Thus, this methodology may provide a very favorable tool to aid the protection engineer. Moreover, as in any optimization problem, the objective function and the constraints were defined to represent the coordination problem involving both distance and directional overcurrent relays. The methodology was applied to two systems, a fictitious with 16 relays and a real transmission system with 44 relays, and in both cases it showed satisfactory results providing well-coordinated settings.

Keywords: Coordination, directional overcurrent relay, distance relay, electrical power system, particle swarm optimization, selectivity, transmission line protection.

Lista de Figuras

Figura 1: Fluxo de corrente para uma falta F em um sistema malhado e com duas fontes. Adaptado de (ANDERSON, 1999).	28
Figura 2: Sistema protegido por relés de distância com unidade direcional. Adaptado de (ANDERSON, 1999).	29
Figura 3: Tipos de características de operação de relés de distância. Adaptado de (IEEE STD C37.113-1999, 1999)	30
Figura 4: Relé direcional de atração eletromagnética. Adaptada de (MASON, 1956).....	33
Figura 5: Diagrama fasorial de um relé direcional.	35
Figura 6: Diagramas de operação para as conexões mais usuais.	35
Figura 7: Curvas ajustas dos relés direcionais de sobrecorrente, com unidades instantâneas. (PÉREZ e URDANETA, 1999).	39
Figura 8: Curvas ajustadas dos relés direcionais de sobrecorrente, relés de distância, unidades instantâneas e relé de falha de disjuntor. (PÉREZ e URDANETA, 1999).....	40
Figura 9: Esquema de coordenação entre relés de distância e direcional de sobrecorrente.....	54
Figura 10: Atualização do vetor posição realizada pelo PSO. Adaptado de (LEE e EL-SHARKAWI, 2008).....	61
Figura 11: Fluxograma básico para o algoritmo PSO clássico.	62
Figura 12: Fluxograma do algoritmo restritivo.....	63
Figura 13: Fluxograma do algoritmo PSO modificado.....	64
Figura 14: Codificação do vetor de posições das partículas.	67
Figura 15: Sistema de transmissão simples fictício. Adaptado de (LEITE, BARROS e MIRANDA, 2010).	71
Figura 16: Evolução do processo de minimização da função objetivo.	75
Figura 17: Coordenograma para os relés RD-7, RDS-6 e RDS-7.....	76
Figura 18: Coordenograma para os relés RD-4, RDS-4 e RDS-1.....	77

Figura 19: Diagrama unifilar do sistema de transmissão real usado no estudo (Sistema CTEEP).	
.....	79
Figura 20: Minimização da função objetivo, utilizando-se apenas curvas NI.....	84
Figura 21: Coordenação entre os relés RD-15, RDS-15 e RDS-17, utilizando curva NI.	84
Figura 22: Valor da função objetivo para o estudo utilizando curva MI.....	87
Figura 23: Coordenograma para os relés RD-15, RDS-15 e RDS-17, utilizando curvas MI.	88
Figura 24: Função objetivo (incluindo o valor da penalização pela restrição violada).	90
Figura 25: Coordenograma envolvendo os relés RD-10, RDS-10 e RDS7.....	90
Figura 26: Comportamento da função objetivo para o caso utilizando dois tipos de curva (NI e MI).	94
Figura 27: Coordenograma para os relés RD-15, RDS-15 e RDS-17 utilizando curvas MI resultantes do teste com os tipos de curva NI e MI.	94

Lista de tabelas

Tabela 1: Tipos de curva e seus respectivos parâmetros, segundo a norma IEC 60255-3.	32
Tabela 2: Valores de curtos-circuitos trifásicos para uma falta do tipo close-in.	71
Tabela 3: Valores de curtos-circuitos trifásicos para uma falta do aplicada a uma distância de 80%.	72
Tabela 4: Valores de curtos-circuitos trifásicos para uma falta aplicada na barra remota.	72
Tabela 5: Parâmetros utilizados no algoritmo PSO para o sistema teste.	74
Tabela 6: Ajustes encontrados pelo algoritmo para os relés RD e RDS	75
Tabela 7: Pares de relés primário/retaguarda e seus respectivos valores de curto-circuito para os diferentes locais de faltas (close-in, 80% da linha e barra remota).	80
Tabela 8: Valores dos limitantes inferiores de corrente para cada relé.	81
Tabela 9: Parâmetros do PSO utilizado no sistema de transmissão real, utilizando a curva normal inversa.	82
Tabela 10: Ajustes obtidos pelo algoritmo para os relés RD e RDS, usando-se curva normal inversa.	82
Tabela 11: Parâmetros do PSO utilizado no sistema de transmissão real, utilizando a curva MI.	85
Tabela 12: Ajustes para os relés RD e RDS para o sistema em questão, utilizando a curva MI.	86
Tabela 13: Parâmetros utilizados para o PSO.	89
Tabela 14: Ajustes para cada relé, utilizando o tipo de curva EI.	89
Tabela 15: Parâmetros do algoritmo PSO.	92
Tabela 16: Ajustes dos relés para o estudo considerando as curvas NI e MI.	93
Tabela 17: Principais características para cada teste.	95
Tabela 18: Dados das linhas para o sistema fictício.	107
Tabela 19: Dados dos geradores do sistema fictício.	107
Tabela 20: Dados de barra do Sistema CTEEP, utilizando um equivalente de 46 barras.	109

Tabela 21: Dados de linha para o Sistema CTEEP utilizado.110

Lista de siglas

AG – Algoritmo Genético
AGI – Algoritmo Genético Imune
Anafas – Análise de Faltas Simultâneas
CAPE – *Computer-Aided Protection Engineering*
CGPSO – *Constricted Global Particle Swarm Optimization*
CLPSO – *Constricted Local Particle Swarm Optimization*
CPSO – *Chaotic Particle Swarm Optimization*
CTEEP – Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista
EI – Extremamente Inversa
EPSO – *Evolutionary Particle Swarm Optimization*
GAMS – *General Algebraic Modeling System*
GPSO – *Global Particle Swarm Optimization*
ITC – Intervalo de Tempo de Coordenação
LPSO – *Local Particle Swarm Optimization*
LT – Linha de Transmissão
MAPSO – *Modified Adaptive Particle Swarm Optimization*
MI – Muito Inversa
MINLP – *Mixed Integer Nonlinear Programming*
NI – Normal Inversa
ONS – Operador Nacional do Sistema
PIM – Programação Inteira Mista
PL – Programação Linear
PNL – Programação Não Linear
PNLIM – Programação Não Linear Inteira Mista
PSO – *Particle Swarm Optimization*
RD – Relé de Distância
RDS – Relé Direcional de Sobrecorrente
RST2 – *Random Search Techniques*
SA – *Simulated Annealing*
SEP – Sistema Elétrico de Potência
SOMA – *Self Organizing Migrating Algorithm*
SOMGA – *Self Organizing Migrating Genetic Algorithm*
TC – Transformador de Corrente

TDC – Tipo de Curva

TMS – *Time Multiplier Setting*

TP – Transformador de Potencial

Lista de símbolos

A – Parâmetro específico para cada tipo de curva inversa

B – Parâmetro específico para cada tipo de curva inversa

C_1 – Parâmetro cognitivo

C_2 – Parâmetro social

F – Força que tende mover a armadura

$f(x)$ – Função objetivo

$f'(x)$ – Função objetivo modificada

$g_i(x)$ – Restrições

$gbest_k$ – Melhor vetor, dentre todas as partículas do enxame, já encontrado até a iteração k

H – Sensibilidade do relé

h_s – Distância fracional

I – Corrente monitorada pelo relé

I_a – Corrente na bobina de acionamento

I_{bp} – Corrente na bobina de polarização

I_p – Corrente de disparo

$I_{close-in P}$ – Corrente vista pelo relé principal para um curto-circuito *close-in*

$I_{close-in R1}$ – Corrente vista pelo relé de retaguarda R1 para um curto-circuito *close-in*

$I_{close-in R2}$ – Corrente vista pelo relé de retaguarda R2 para um curto-circuito *close-in*

$I_{80\% P}$ – Corrente vista pelo relé principal para um curto-circuito a 80% da linha de transmissão

$I_{80\% R1}$ – Corrente vista pelo relé de retaguarda R1 para um curto-circuito a 80% da linha de transmissão

$I_{80\% R2}$ – Corrente vista pelo relé de retaguarda R2 para um curto-circuito a 80% da linha de transmissão

$I_{Brem P}$ – Corrente vista pelo relé principal para um curto-circuito na barra remota

$I_{Brem R1}$ – Corrente vista pelo relé de retaguarda R1 para um curto-circuito na barra remota

$I_{Brem R2}$ – Corrente vista pelo relé de retaguarda R2 para um curto-circuito na barra remota

ITC – Intervalo de tempo de coordenação

k – Índice da iteração atual

$k_{m\acute{a}x}$ – Número de iterações máxima

K_I – Constante de conversão de força

K_2 – Força de restrição incluindo fricção

MT – Multiplicador de tempo

n_1 – Número de relés direcionais de sobrecorrente

n_2 – Número de relés de distância

N_p – Índice da partícula

P – Expoente positivo da função de penalização

$pbest_k^{N_p}$ – Melhor vetor de posição da partícula N_p encontrado até a iteração k

r_1 – Valor aleatório entre 0 e 1 com probabilidade uniforme

r_2 – Valor aleatório entre 0 e 1 com probabilidade uniforme

R_P – Relé principal

R_{R1} – Relé de retaguarda 1

R_{R2} – Relé de retaguarda 2

t – Tempo de atuação do relé de sobrecorrente de tempo inverso

TDC – Tipo de curva

T_i – Tempo de atuação o i -ésimo relé principal

T_j – Tempo de atuação o j -ésimo relé de retaguarda

T_{RDS_i} – Tempo de atuação do i -ésimo relé direcional de sobrecorrente

T_{RD_i} – Tempo de atuação da segunda zona do i -ésimo relé de distância

t_P – Tempo de operação do relé direcional de sobrecorrente principal

t_R – Tempo de operação do relé direcional de sobrecorrente de retaguarda

t_{z1p} – Tempo de operação de primeira zona do relé principal

t_{z2p} – Tempo de operação de segunda zona do relé de distância principal

t_{z2p} – Tempo de operação de segunda zona do relé de distância de retaguarda

V_p – Tensão de polarização

$v_k^{N_p}$ – Velocidade da partícula N_p na iteração k

$v_{k+1}^{N_p}$ – Velocidade da partícula N_p na iteração $k+1$

$v_{max}^{N_p}$ – Velocidade máxima permitida para a partícula N_p .

$x_k^{N_p}$ – Posição da partícula N_p na iteração k

$x_{k+1}^{N_p}$ – Posição da partícula N_p na iteração $k+1$

Z_L – Impedância característica da linha

Z_R – Impedância aparente vista pelo relé

θ – Ângulo entre a tensão de polarização e corrente de acionamento

τ – Ângulo de sensibilidade máxima

ω_k – Coeficiente de inércia para a iteração k ;

ω_{max} – Coeficiente de inércia máximo

ω_{min} – Coeficiente de inércia mínimo

μ – Fator de peso das penalidades

$\alpha(x)$ – Função de penalidade para as restrições.

Sumário

Resumo.....	7
--------------------	----------

Capítulo 1

Introdução.....	23
------------------------	-----------

1.1 Objetivos	24
---------------------	----

1.2 Organização do trabalho	25
-----------------------------------	----

1.3 Publicação	25
----------------------	----

Capítulo 2

Proteção de Linhas de Transmissão	27
--	-----------

2.1 Relés de distância	28
------------------------------	----

2.2 Relé direcional de sobrecorrente	31
--	----

2.2.1 Unidade de Sobrecorrente	31
--------------------------------------	----

2.2.2 Unidade Direcional	32
--------------------------------	----

Capítulo 3

Técnicas Empregadas na Coordenação de Relés.....	37
---	-----------

3.1 Métodos baseados em técnicas tradicionais.....	37
--	----

3.2 Métodos baseados em técnicas inteligentes de otimização	43
---	----

Capítulo 4

Formulação do Problema de Coordenação.....	53
---	-----------

4.1 Apresentação do problema	53
------------------------------------	----

4.2 Formulação matemática.....	55
--------------------------------	----

Capítulo 5

Metodologia Baseada em <i>Particle Swarm Optimization</i>	59
--	-----------

5.1 Introdução	59
5.2 O Algoritmo PSO Clássico.....	59
5.3 Modificações no PSO clássico para tratar problemas com restrição	62
5.3.1 Inicialização e algoritmo restritivo	63
5.3.2 Penalização da função objetivo	65
5.4 Codificação dos vetores de posição do PSO	67

Capítulo 6

Resultados 69

6.1 Resultados para o Sistema Teste.....	69
6.2 Resultados para o Sistema CTEEP.....	77
6.3 Aplicação do Método: estudos de caso com o Sistema CTEEP.....	84
6.3.1 Avaliação do emprego de curvas do tipo muito inversa (MI).....	85
6.3.2 Avaliação do emprego de curvas do tipo extremamente inversa (EI).....	88
6.3.3 Avaliação do emprego simultâneo de curvas NI e MI.....	91
6.3.4 Comparação dos resultados para os testes no sistema real	94

Capítulo 7

Conclusões..... 97

7.1 Perspectivas futuras.....	98
-------------------------------	----

Referências Bibliográficas..... 101

Anexos 107

Anexo I - Dados do Sistema Teste	107
Anexo II - Dados do Sistema CTEEP.....	109

Capítulo 1

Introdução

Um sistema de proteção, em geral, possui diversos objetivos, mas os principais que podem ser destacados são (HEWITSON, BROWN e BALAKRISHNAN, 2004):

- Proteger o sistema elétrico de potência (SEP) visando manter a continuidade do fornecimento da energia elétrica;
- Evitar ou minimizar os danos e os custos de manutenção corretiva (reparos em equipamentos);
- Garantir a integridade física dos envolvidos, ou seja, operadores e usuários do sistema elétrico.

Para atingir tais objetivos, o sistema de proteção deve atender a quatro características funcionais conhecidas como confiabilidade, seletividade, sensibilidade e rapidez de atuação.

A *confiabilidade* é definida como sendo a probabilidade de um componente, equipamento ou sistema em realizar sua função prevista, sob dadas circunstâncias. A *seletividade* caracteriza-se pela propriedade do sistema de proteção ser capaz de detectar e selecionar em quais situações a rápida atuação se faz necessária, ou então, quando nenhuma operação ou um retardo de atuação é exigido. Além disso, o sistema de proteção deve isolar completamente o componente defeituoso respeitando a restrição de desconectar a menor parcela possível do SEP. À capacidade da proteção em responder às anormalidades nas condições de operação e aos curtos-circuitos para os quais foi projetado, dá-se o nome de *sensibilidade*. Finalmente, a *rapidez de atuação* refere-se ao quão rápido se dá a atuação da proteção quando esta é requerida. Esta característica tem como principais objetivos, minimizar a extensão dos danos aos equipamentos que compõem o SEP e também garantir a segurança do próprio pessoal envolvido em sua operação (COURY, OLESKOVICZ e GIOVANINI, 2007).

Em um SEP existem diversos elementos que necessitam ser protegidos pelo sistema de proteção. Para efeitos didáticos, pode-se dividir a proteção entre proteção de geradores (e máquinas rotativas em geral), proteção de barramentos, proteção de transformadores e proteção de linhas de transmissão, sendo dentro deste último tipo que o presente trabalho se enquadra.

A proteção de linhas de transmissão é realizada comumente por meio do uso de relés de distância, atuando como relé principal, e de relés de sobrecorrente, desempenhando a função de retaguarda. Assim como em qualquer sistema de proteção, esses relés devem estar bem coordena-

dos entre si, de forma que a proteção possa atuar da maneira mais adequada possível, garantindo rapidez e seletividade.

Normalmente, os sistemas de transmissão de energia elétrica são malhados e, nestes casos, os relés de sobrecorrente a serem empregados devem possuir unidade direcional para atuar somente para sentidos específicos das correntes de curto-circuito. Logo, ajustar adequadamente os relés de distância e os relés de sobrecorrente direcionais exige o emprego de ferramentas de apoio, mais especificamente, de programas computacionais para este propósito. O uso desses programas tem contribuído significativamente para tornar o processo de ajuste mais eficiente. Mesmo assim, o número de informações necessárias para efetuar um estudo de proteção é grande e aumenta na medida em que aumenta a complexidade do sistema elétrico sob estudo.

Como exemplo, pode-se citar que o engenheiro de proteção necessita conhecer os principais valores e locais das correntes de curto-circuito, a localização dos relés de proteção, o carregamento do sistema elétrico e suas diferentes topologias de operação, as características de operação dos dispositivos de proteção e os critérios de ajuste. Portanto, percebe-se que o processo de ajustes pode ser uma tarefa que demande muito tempo e ainda sujeita a erros humanos. Dessa forma, a existência de ferramentas computacionais para automatizar a execução de estudos de coordenação da proteção e seletividade seria de grande auxílio para as empresas concessionárias de transmissão de energia elétrica, uma vez que reduziria o tempo para completar esta tarefa e resultaria em ajustes mais precisos. Dentro deste contexto, este trabalho propõe pesquisar uma metodologia que automatize o processo de cálculo dos ajustes dos relés de distância e de sobrecorrente direcionais, de forma a garantir a coordenação entre eles.

O problema de coordenação pode e tem sido encarado como um problema de otimização, no qual é definida uma função objetivo, que normalmente é descrita em termos da minimização do somatório dos tempos de atuação de cada relé presente em um sistema. Além disso, de acordo com a filosofia de proteção envolvida e os tipos de relés presentes no sistema, que podem ser digitais ou eletromecânicos, definem-se as restrições do problema. Dessa forma, para lidar com esse problema de otimização e obter os ajustes coordenados, muitos algoritmos inteligentes são comumente empregados na literatura científica, destacando-se principalmente o Algoritmo Genético, o *Particle Swarm Optimization* (Otimização por Enxame de Partículas) e variantes de ambos algoritmos.

1.1 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é desenvolver um método para determinar a coordenação otimizada entre os relés de distância e de sobrecorrente direcionais, de forma a garantir as quatro características funcionais de um sistema de proteção citadas previamente. Dessa forma,

espera-se contribuir positivamente com o engenheiro de proteção responsável por elaborar o estudo de coordenação da proteção, tornando-o mais rápido e mais preciso. Ressalta-se, no entanto, que não se pretende que a ferramenta computacional substitua o engenheiro de proteção, pois o seu julgamento ainda será essencial para a implementação dos ajustes calculados pela metodologia proposta.

Como dito anteriormente, algumas técnicas inteligentes são empregadas no problema de coordenação, neste trabalho a técnica utilizada foi baseada no *Particle Swarm Optimization*, o qual precisou de alguns ajustes para que sua implementação fosse adequada ao problema em questão. Esta técnica costuma ser comumente empregada em problemas de otimização, apresentando resultados satisfatórios não apenas no problema de coordenação de relés mas também em outras áreas de aplicação. Este algoritmo foi escolhido a partir do estudo do estado da arte realizado através da literatura técnica, a qual mostrou resultados satisfatórios do PSO, bem como sua facilidade de implementação e sua grande aplicabilidade em problemas de otimização fazendo desses, grandes motivos para seu uso neste trabalho. As explicações mais detalhadas acerca deste algoritmo e as adaptações realizadas serão tratadas ao longo deste trabalho.

1.2 Organização do trabalho

Esta dissertação de mestrado está organizada conforme os seguintes tópicos:

- O Capítulo 2 mostra uma explicação sobre a proteção de linhas de transmissão, abordando principalmente os relés de distância e direcional de sobrecorrente;
- O Capítulo 3 contempla uma revisão bibliográfica envolvendo trabalhos que utilizam técnicas convencionais e técnicas inteligentes para a resolução do problema de coordenação;
- O Capítulo 4 aborda a formulação matemática acerca do problema de coordenação.
- O Capítulo 5 explana sobre a metodologia proposta para resolução do problema de coordenação
- O Capítulo 6 apresenta os resultados obtidos deste trabalho;
- O Capítulo 7 mostra as conclusões e trabalhos futuros para esta dissertação.

1.3 Publicação

Dentro do tema deste trabalho, destaca-se a publicação aceita no Congresso Brasileiro de Automática 2014:

- Moro, V. C.; Vieira, J. C. M.; Souza, S. A. **Coordenação otimizada de relés direcionais e de distância em sistemas elétricos malhados.** Congresso Brasileiro de Automação, Belo Horizonte, Setembro de 2014.

Capítulo 2

Proteção de Linhas de Transmissão

Em sistemas elétricos de potência, a maioria das falhas ocorre nas linhas de transmissão, sendo que a mais frequente é de natureza fase-terra. Este tipo de falta pode ocorrer por inúmeros fatores, como por exemplo, as descargas atmosféricas, queimadas, defeitos nos isoladores, entre outros. Com menor frequência, mas muito relevante do ponto de vista da proteção, ocorrem faltas entre fases. Geralmente, 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 (COURY, OLESKOVICZ e GIOVANINI, 2007).

Se um dado sistema é radial e com apenas um gerador, para uma falta em certo ponto, basta abrir o disjuntor que está localizado entre o gerador e a falta por meio de um relé de sobrecorrente ou relé de distância. Caso existam vários consumidores atendidos por tal sistema, a proteção deve ser seletiva, combinando correntes e tempo de atuação dos dispositivos de proteção.

Considerando um sistema malhado, como mostrado na Figura 1, a solução anterior não é a mais conveniente, pois as direções de corrente podem ser explicadas por diversas combinações, dependendo da localização do defeito, do tipo de falta e da condição de operação de pré-falta. Neste caso, a ocorrência de um curto-circuito em F não deverá requerer a abertura do trecho 3-4, mas apenas do trecho 3'-4'. Para atingir este objetivo e garantir a seletividade para outras condições de faltas, o uso de relés de sobrecorrente 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 mais adiante neste capítulo (ANDERSON, 1999).

Além dos tipos de proteção mencionados anteriormente, há também a teleproteção (relés pilotos). A teleproteção é um sistema em que um dado terminal da linha recebe informações de seu terminal remoto quando um defeito é detectado. Esta informação é transmitida através de um canal de comunicação que pode ser por micro-ondas, *carrier*, fibra ótica ou telefonia, de modo que seja comandada 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. Isto é possível uma vez que o terminal remoto, possuindo sensores adequados para sentirem a direção do fluxo da corrente de defeito, fornece quase que imediatamente essa informação ao outro terminal

(ANDERSON, 1999). Porém este tipo de proteção não é objeto de estudo deste trabalho, por isso será dada atenção apenas para as proteções de distância e direcional de sobrecorrente.

Figura 1: Fluxo de corrente para uma falha F em um sistema malhado e com duas fontes. Adaptado de (ANDERSON, 1999).

2.1 Relés de distância

Os relés de distância são amplamente empregados na proteção de linhas de transmissão (LTs). Seu funcionamento é baseado na comparação entre a impedância característica da linha (Z_L) e a impedância aparente (Z_R) vista pelo relé, a qual é obtida em função da estimativa da corrente e tensão, considerando-se a componente fundamental dessas grandezas, para uma situação de incidência de falha (ANDERSON, 1999).

Para analisar a proteção de distância, tome como base o sistema ilustrado na Figura 2, e considere que o trecho de linha entre os relés C e D possua uma impedância equivalente Z_E . Além disso, a linha entre os relés A e B é o elemento deste sistema que sofre uma falha. Continuando as considerações, deseja-se que o relé A atue para faltas dentro de uma fração h_s do comprimento total da linha. Esta fração é chamada de alcance do relé e determina sua zona de proteção instantânea. Isto significa que a função instantânea deste relé será sensibilizada e atuará somente para faltas dentro desta distância fracional h_s . Para o caso de faltas fora deste alcance, a proteção de segunda zona é acionada e além disso, o relé B já terá sido sensibilizado em sua primeira zona também (ANDERSON, 1999).

Nesta mesma Figura 2, pode-se visualizar o alcance da proteção primária (zona 1) dos relés A e B. Segundo Anderson (1999), este alcance geralmente varia entre 80% e 90% do comprimento da linha em questão para que se evite a perda de seletividade da proteção, já que um ajuste em 100% poderia causar problemas de sobre alcance da proteção, o qual pode ocorrer devido aos efeitos provocados pelo carregamento da linha, pela impedância de falta ou até mesmo por erros nos transformadores de instrumentação.

Tanto para faltas incidentes na zona de intersecção do alcance dos relés quanto para faltas próximas a um dos terminais, a atuação da proteção se dará com alta velocidade. Porém,

para as faltas fora dessas regiões a proteção atuará sequencialmente, ou seja, o relé mais próximo da falta atuará instantaneamente e o relé mais distante operará com um atraso de tempo. No caso em que essa atuação sequencial não puder ser admitida, deve-se empregar a teleproteção para dar maior segurança ao sistema de proteção (ANDERSON, 1999).

Figura 2: Sistema protegido por relés de distância com unidade direcional. Adaptado de (ANDERSON, 1999).

Ainda na Figura 2 e considerando-se o relé A, quando um defeito ocorrer dentro de seu de alcance (h_s) este relé realizará um cálculo que determina a impedância aparente (Z_R) relativa à sua localização e o ponto de incidência da falta. Em seguida, ele compara o valor de impedância aparente com a impedância característica da linha de transmissão (Z_L). Então, se o valor da impedância aparente calculada (Z_R) for menor do que a impedância de ajuste ($h_s \cdot Z_L$), o relé atuará. A Equação 1 mostra a comparação feita pelo relé (ANDERSON, 1999).

$$Z_R \leq h_s \cdot Z_L \quad (1)$$

Devido ao fato de a impedância por quilômetro de uma linha de transmissão ser um parâmetro aproximadamente constante, não há dependência das condições de operação do sistema, tornando este método bastante conveniente para a proteção de linhas. (ANDERSON, 1999)

O restante da linha que não é protegido pela zona 1, é coberto pela zona 2, a qual possui um sobre alcance que cobre 100% da linha a ser protegida, mais uma porcentagem, que pode variar entre 20% a 50%, da menor linha adjacente. A zona 2 deve possuir um atraso de operação em relação à zona 1 para garantir a coordenação entre elas; esta temporização gira em torno de 300-400 ms.

Os relés de distância são normalmente classificados de acordo com a forma de sua característica de operação, em um diagrama R-X. A representação de uma falta franca é dada por meio de um ponto no plano complexo, coincidente com a representação fasorial da linha a ser

protegida (Z_L). Todavia, tendo em vista considerar as imprecisões inerentes ao processo que envolve o cálculo da impedância aparente (Z_R), é preciso definir uma região no plano R-X que englobe a linha de transmissão. O tipo dessa região é o que determina a característica de operação do relé (COURY, OLESKOVICZ e GIOVANINI, 2007).

As principais características de operação para relés de distância são: impedância, admitância (ou mho), reatância e quadrilateral. Estas características estão ilustradas na Figura 3.

O relé de impedância promove uma zona de proteção que é um círculo centrado na origem do plano R-X, com o raio igual à fração da linha a ser protegida (h_S). Assim, para faltas interiores a esse círculo (região de conjugado positivo) o relé atuará, caso contrário não haverá atuação. A característica direcional não é inerente a esse tipo de relé, por isso uma unidade direcional pode ser utilizada para restringir a região de conjugado positivo a um semicírculo (ANDERSON, 1999).

Figura 3: Tipos de características de operação de relés de distância. Adaptado de (IEEE STD C37.113-1999, 1999)

A característica de operação do relé de admitância (ou mho) é definida por um círculo que tangencia a origem do plano R-X. Esse relé já possui inerente em suas características a direcionalidade (ANDERSON, 1999).

O relé de reatância possui como característica de operação uma reta que é paralela ao eixo real do plano R-X, ou seja, esta característica considera apenas a parte reativa da impedância da linha, sendo que para as reatâncias menores do que a pré-estabelecida, o relé atuará. Este relé possui uma grande desvantagem em relação aos citados anteriormente, que é o fato de sua região de falta poder compreender os quatro quadrantes do plano complexo. Então, esse tipo de relé requer supervisão (ANDERSON, 1999).

A característica quadrilateral é própria de relés estáticos e digitais. A região de operação é delimitada por quatro linhas retas, sendo que formatos mais complexos (combinando logicamente as demais características de operação) podem ser alcançados por meio da programação do relé digital. Isso possibilita o ajuste das regiões de faltas para casos específicos e de difícil abordagem por relés convencionais (ANDERSON, 1999).

2.2 Relé direcional de sobrecorrente

Este tipo de relé, como o próprio nome sugere, é constituído pela combinação das unidades direcional e de sobrecorrente. Para a proteção de sistemas malhados, o controle direcional é altamente desejável, já que a unidade de sobrecorrente é inoperante independentemente da magnitude da corrente de falta, a menos que sua operação seja habilitada pela unidade direcional (MASON, 1956).

A unidade de sobrecorrente é caracterizada pela definição do ajuste da corrente de partida (*pick-up*) e do ajuste de tempo, o qual pode possuir característica de tempo inverso, tempo definido ou instantânea. Para a unidade direcional, definem-se as grandezas de atuação e de polarização. Para melhor compreensão, uma breve explicação sobre cada uma dessas unidades será dada a seguir.

2.2.1 Unidade de Sobrecorrente

Basicamente, essa unidade tem como grandeza de atuação a corrente elétrica do equipamento ou de parte do sistema elétrico que está sendo protegido. Essa unidade pode ter os seguintes tipos de atuação: instantânea e temporizada (tempo definido ou tempo inverso).

No caso da unidade de sobrecorrente com ação instantânea, assim que o valor da corrente é maior ou igual ao valor da corrente de partida, ocorre o comando de atuação do relé.

Para a unidade de tempo definido, o relé apenas dará o comando de abertura quando a corrente monitorada for maior ou igual ao ajuste da corrente de partida e, além disso, permanecer por um período de tempo que ultrapasse o limite de tempo também pré-estabelecido.

A ação temporizada de tempo inverso ocorre da seguinte maneira: o tempo de atuação do relé é inversamente proporcional ao valor da corrente monitorada, assim, quanto maior a corrente, menor é o tempo de atuação. Essa é a grande vantagem dessa característica de operação, já que possibilita maior flexibilidade de ajustes no sentido de garantir a coordenação e seletividade em comparação aos outros casos (instantâneo e tempo definido). A classificação desse tipo de relé é feita de acordo com sua curva característica, a qual indica sua velocidade de operação e pode ser padronizada ou não. Dentre as curvas padronizadas, as mais utilizadas corres-

pondem às curvas das normas IEC Std. 60255-3 (1989) e IEEE Std. C37.112 (1996). No presente trabalho considerou-se apenas a norma IEC Std. 60255-3 (1989), a qual define o tempo de atuação segundo a Equação 2.

$$t = MT \cdot \frac{A}{\left(\frac{I}{I_{pick-up}}\right)^B - 1} \quad (2)$$

Em que, t é o tempo de atuação; MT é o multiplicador de tempo; I é a corrente monitorada pelo relé; $I_{pick-up}$ é a corrente de partida; A e B são parâmetros específicos para o tipo de curva. Esses parâmetros e os respectivos tipos de curva podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1: Tipos de curva e seus respectivos parâmetros, segundo a norma IEC 60255-3.

Tipo de curva	A	B
Normal inversa	0,14	0,02
Muito inversa	13,5	1,0
Extremamente inversa	80,0	2,0
Inversa de tempo curto	0,05	0,04
Inversa de tempo longo	120	1,0

2.2.2 Unidade Direcional

A aplicação de um relé de sobrecorrente com um elemento direcional se faz necessária nos casos em que existem múltiplas fontes, nos quais é essencial que o relé atue apenas para faltas em uma direção específica (HOROWITZ e PHADKE, 1995).

Para responder à faltas apenas na direção necessária, o elemento direcional precisa de uma grandeza medida como referência (polarização), que pode ser tensão, corrente, ou ambas, e a grandeza que será monitorada (atuação). Usualmente, utiliza-se a tensão como grandeza de polarização e a corrente do sistema a ser protegido como grandeza de atuação. A direcionalidade aumenta a habilidade de um relé de sobrecorrente em determinar se uma falta está dentro de sua zona de proteção e permite ao relé ser mais sensível (IEEE STD C37.113-1999, 1999).

O princípio de operação desta unidade pode ser compreendido tomando-se como base a Figura 4, que mostra esquematicamente esse princípio em um relé direcional do tipo atração eletromagnética. No esquema, 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).

Figura 4: Relé direcional de atração eletromagnética. Adaptada de (MASON, 1956).

Desprezando-se a saturação, a força que tende a mover a armadura pode ser expressa como mostra a Equação 3:

$$F = K_1 \cdot I_{bp} \cdot I_a - K_2 \quad (3)$$

Em que K_1 é uma constante de conversão de força, I_{bp} é a magnitude da corrente na bobina de polarização, I_a é a magnitude da corrente na bobina de acionamento e K_2 é a força de restrição incluindo fricção (MASON, 1956).

No ponto de equilíbrio, quando $F=0$ e o relé está prestes a operar, tem-se a Equação 4 que mostra a característica de operação (MASON, 1956).

$$I_{bp} \cdot I_a = \frac{K_1}{K_2} = constante \quad (4)$$

As correntes I_{bp} e I_a são admitidas em uma única direção, na qual uma força de *pick-up* é produzida, ou seja, a força exercida para fechar os contatos precisa ser maior do que a força da mola. É evidente que se a direção de I_{bp} ou I_a , mas não de ambas, for inversa à direção estabelecida pelo ajuste inicial, a direção da força (F) também será contrária ao sentido de fechamento dos contatos, e com isso fará com que estes permaneçam abertos (MASON, 1956).

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 4 (MASON, 1956).

No caso em que se utiliza a polarização por um ímã permanente ou a bobina de polarização for conectada a uma fonte que promova uma corrente I_p constante, a operação característica do relé se torna como mostrada na Equação 5 (MASON, 1956).

$$I_a = \frac{K_1}{K_2 \cdot I_{bp}} = \text{constante} \quad (5)$$

No entanto, a corrente I_a ainda deve ter a correta polaridade, ou seja, a direção correta, bem como a magnitude especificada para que o relé atue.

A partir da Equação 6 pode-se fazer um diagrama de operação do relé, como o exemplo genérico mostrado na Figura 5, a qual torna o princípio da direcionalidade desse relé mais claro (CAMINHA, 1977).

$$H = I_a \cdot V_p \cdot \cos(\theta - \tau) \quad (6)$$

Em que H é a sensibilidade do relé, V_p é a magnitude da tensão de polarização, θ é ângulo entre a tensão V_p e I_a , e τ é o ângulo de sensibilidade máxima. Na Figura 5 veem-se as regiões para as quais o relé atua ou não, bem como os eixos mostrando a sensibilidade máxima e zero do relé.

Para um sistema trifásico, existem três tipos de conexões convencionais, que através de TCs (Transformadores de Corrente) e TPs (Transformadores de Potencial) permitem o uso de grandezas de polarização diferentes. Dessa forma, os diagramas de atuação de um relé para cada um dessas conexões serão diferentes entre si, já que o ângulo θ depende da escolha da grandeza de polarização. Além disso, o ângulo de sensibilidade (τ), que é um parâmetro de ajuste do relé, também depende da tensão de polarização e, por consequência, da escolha do tipo de conexão. As conexões mais comuns utilizadas em relés direcionais são as mostradas na Figura 6 e são denominadas: conexão 30° (ou adjacente), conexão 60° e conexão 90° (ou quadratura), sendo que esta última é a mais utilizada (HOROWITZ e PHADKE, 1995).

Analisando a Figura 6 é possível perceber a diferença entre os tipos de conexões, lembrando apenas que o ângulo τ foi tomado um valor genérico e considerado o mesmo para os três casos para que essa distinção pudesse ser melhor visualizada. É também importante ressaltar que nessa ilustração, apenas a fase A foi utilizada para monitoramento da corrente, porém para as outras fases o diagrama pode ser construído de maneira análoga a estes apresentados. Além disso, o fasor da corrente I_A foi utilizado como referência.

Figura 5: Diagrama fasorial de um relé direcional.

Figura 6: Diagramas de operação para as conexões mais usuais.

Capítulo 3

Técnicas Empregadas na Coordenação de Relés

Pela análise da literatura técnica, pode-se perceber a grande preocupação em encontrar uma coordenação eficiente entre dispositivos de proteção. É possível encontrar diversas propostas de soluções para o problema de coordenação de relés direcionais de sobrecorrente levando ou não em consideração o relé de distância. Alguns desses trabalhos propõem o uso de técnicas de otimização convencionais e outros utilizaram algoritmos inteligentes para realizar a otimização. Além disso, é possível encontrar técnicas convencionais aliadas a técnicas inteligentes para resolver o problema de coordenação. Esses trabalhos técnicos encontrados na literatura serão discutidos nas próximas seções deste capítulo.

3.1 Métodos baseados em técnicas tradicionais

No trabalho de Urdaneta, Nadira e Jiménez (1998) os autores propuseram um método para obter a solução do problema de coordenação entre relés de sobrecorrente, o qual é baseado na aproximação mostrada na Equação 7.

$$\min_{s \in S} \left[\max_{p \in P} z(s, p) \right] \quad (7)$$

Em que $z(s, p)$ é a relação que 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.

Esse trabalho utilizou um processo iterativo para lidar com o problema de coordenação, em que o ajuste de tempo foi calculado para uma dada corrente de *pick-up* (I_p), possibilitando o cálculo do novo valor de I_p . O processo é executado até atingir a precisão requerida. Inicialmente os autores abordaram o problema da coordenação ótima dos relés através do método *Simplex* (programação linear), já que a corrente de *pick-up* é previamente conhecida. A partir

da solução intermediária obtida em termos dos novos valores de corrente, a solução final foi obtida empregando o método do “gradiente reduzido generalizado” (LUENBERGER, 1984) apud (URDANETA, NADIRA e JIMÉNEZ, 1988). É importante observar que a obtenção do ponto de ótimo não foi garantida e conseqüentemente a obtenção da coordenação ótima dos relés foi prejudicada. Segundo os autores, quando diferentes configurações no sistema são relevantes (retirada ou inclusão de linha de transmissão, gerador ou transformador), torna-se necessário recalcular a coordenação para essas situações. Contudo, pode-se dizer que a metodologia apresentada possui potencial para a aplicação em situações de controle de emergência e *on-line* do sistema em questão. Além disso, em um sistema previamente coordenado, para quaisquer modificações em sua configuração, os ajustes devem ser avaliados, e caso necessário, recalculados para garantir a coordenação da proteção.

Segundo Henville e Hydro (1993), para sistemas de transmissão malhados, o uso apenas de elementos de tempo definido ou de apenas elementos de tempo inverso e instantâneos pode ser muito difícil. O que este artigo propõe é uma abordagem híbrida, ou seja, realizar a coordenação de relés temporizados de sobrecorrente de terra por meio da combinação das características de tempo definido e inverso. O problema de coordenação estudado nesse trabalho é restrito a um sistema de proteção de linhas de transmissão e, além disso, os exemplos de coordenação apresentados são aplicados apenas aos relés direcionais. Assim, para analisar a abordagem proposta, os autores apresentam dois exemplos de aplicação da característica híbrida, e os resultados encontrados mostraram uma melhoria em aspectos de velocidade e sensibilidade em relação à técnica tradicional. Segundo eles, as porções da curva com característica de tempo definido são úteis tanto para altas como baixas correntes. Para altas correntes, ela pode promover a rápida atuação enquanto mantém a coordenação com elementos remotos de características instantâneas e de tempo definido. Para baixas correntes, ela pode promover atuação rápida para baixos múltiplos da corrente de *pick-up*. A porção da curva com característica inversa auxilia na coordenação de dispositivos de proteção em sistemas malhados. Um problema encontrado na época em que o trabalho foi desenvolvido era realizar a coordenação dinâmica, ou seja, em que a corrente de falta pode variar de intensidade. Porém, atualmente esse problema já pode ser contornado com a tecnologia existente nos relés digitais, já que estes podem apresentar características de tempo definido e inverso ao mesmo tempo.

No trabalho de Pérez e Urdaneta (1999), os autores mostram que com a utilização de unidades instantâneas aliadas aos relés direcionais de sobrecorrente, a velocidade de extinção da falta é mais rápida, contribuindo assim para a redução do ajuste de tempo dos relés. A Figura 7 mostra as curvas considerando unidades instantâneas dos relés principal (t_p) e retaguarda (t_b), definidas nas cores rosa e azul respectivamente. Segundo os autores, baseando-se na Figura 7, as restrições mostradas nas Equações 8 e 9 devem ser respeitadas.

$$t_b(F1) - t_{inst} \geq ITC \quad (8)$$

$$t_b(F2) - t_p(F2) \geq ITC \quad (9)$$

Em que: p representa o relé principal, b o relé de *backup*, $t_b(F1)$ é o tempo de operação do relé b para uma falta em $F1$, $t_b(F2)$ e $t_p(F2)$ são, respectivamente, os tempos de operação dos relés b e p para uma falta em $F2$, ITC é o intervalo de coordenação e t_{inst} é o tempo da unidade instantânea.

Figura 7: Curvas ajustas dos relés direcionais de sobrecorrente, com unidades instantâneas. (PÉREZ e URDANETA, 1999).

Além disso, os autores também consideram os relés de falha de disjuntor e os relés de distância. A Figura 8 representa um coordenograma envolvendo relés de distância, direcionais de sobrecorrente e de falha de disjuntor. Nesta figura, as curvas em vermelho definidas por t_p e t_b correspondem às curvas inversas dos relés de sobrecorrente principal e de retaguarda, respectivamente; as curvas em verde pertencem aos relés de distância, nas quais t_{z2p} e t_{z2b} correspondem aos tempos de atuação para a segunda zona dos relés de distância principal e de retaguarda respectivamente; finalmente, a curva em preto corresponde ao relé de falha de disjuntor, representada por t_{BRF} . Sendo assim, as Equações 10, 11 e 12 mostram as restrições que devem ser consideradas para efetuar a coordenação dos relés de proteção.

$$t_{z2b} - t_p(F1) - t_{inst} \geq ITC \quad (10)$$

$$t_b(F2) - t_{z2p} \geq ITC \quad (11)$$

elementos paralelos. Se o mesmo intervalo de coordenação for utilizado tanto para os pares de relés que pertencem a elementos paralelos quanto para os que não pertencem, pode haver violação no intervalo de coordenação. Porém, usando intervalos diferentes para cada uma das duas situações, esse problema é então resolvido. A vantagem deste método reside em sua simplicidade. Os autores revelam que essa técnica pode ser implementada junto a alguma técnica de otimização para o cálculo do ajuste ótimo dos relés.

Os mesmos autores, em Pérez e Urdaneta (2001), dão continuidade ao trabalho iniciado em Pérez e Urdaneta (1999). Assim, nesse novo trabalho os autores abordam a questão da inclusão do tempo de operação da segunda zona do relé de distância (t_{Z2}) como uma das variáveis do problema de coordenação, ou seja, não pré-fixar um valor para t_{Z2} . Segundo os autores, a pré fixação pode levar a uma situação não factível, e neste caso t_{Z2} deve ser manualmente modificado até que o problema de otimização seja factível. A nova abordagem, portanto, visa encontrar automaticamente um valor ótimo (mínimo possível) para t_{Z2} através de uma rotina de otimização, levando em consideração os relés de distância e direcional de sobrecorrente. Os autores constataram, conforme era esperado, que o ajuste de t_{Z2} depende do intervalo de coordenação utilizado. Porém, além disso, eles mostraram que o melhor ajuste para t_{Z2} , que assegura a seletividade, pode ser maior do que o ajuste clássico de 0,3 segundos, isto foi observado inclusive para intervalos de coordenação pequenos.

O trabalho de Khederzadeh (2006) em relação a outros trabalhos de sua linha como, por exemplo, o trabalho de Pérez e Urdaneta (2001) citado anteriormente, manteve a abordagem simultânea dos relés de distância e direcional, porém ao invés de alterar o tempo de operação pra segunda zona (t_{Z2}), ele propõe alterar adaptativamente a forma da curva do relé direcional de sobrecorrente, de acordo com a localização da falta e a corrente. Assim, o objetivo é conseguir uma melhor coordenação da proteção através da modificação do formato das curvas de tempo dos relés direcionais de sobrecorrente, cujas características combinam tempo definido e tempo inverso, usando uma plataforma que facilita o projeto dessas curvas combinadas. Além disso, o trabalho foi desenvolvido utilizando relés multifuncionais, os quais proporcionam que essa combinação de características seja realizada. Segundo o autor, quando se faz essa combinação de tipos de curva, o tempo de resposta do dispositivo é mais rápido e mais preciso do que o convencional. Com o exemplo mostrado no artigo, constata-se que o ajuste clássico que compreende de 0,25 a 0,4 segundo, usado para t_{Z2} e que garante a seletividade é mantido com esse novo método, e as dificuldades de coordenação são resolvidas utilizando a combinação de curvas proposta, ou seja, combinando as características de curvas de tempo inverso com de tempo definido.

Dentre os relés existentes, muitos apresentam os ajustes de corrente ou de tempo em valores discretos. Por esse motivo, no trabalho Zeineldin, El-Saadany e Salama (2004), o principal objetivo é a proposição de uma nova formulação que introduz, no processo de otimização

da coordenação, valores discretos da corrente de *pick-up* (I_p). Esse artigo destaca a relevância da introdução deste aspecto na formulação do problema de coordenação, pois em geral, o que se encontra na literatura científica é a prática de arredondar os valores de I_p , obtidos do processo de otimização, para o valor inteiro mais próximo. Porém, segundo os autores, isso pode levar a soluções inviáveis na prática, invalidando o processo de otimização realizado e, consequentemente, comprometendo toda a coordenação do sistema de proteção. A principal contribuição desse trabalho pode ser vista nas Equações 13 e 14, em que uma variável binária (y_{im}) foi introduzida para que seja possível utilizar valores discretos de I_p e, além de tudo, garantir que apenas um valor discreto seja utilizado para cada relé.

$$Ip_i = \sum_m y_{im} \cdot Ip_{am} \quad (13)$$

$$\sum_m y_{im} = 1 \quad (14)$$

Sendo que Ip_i é o ajuste de corrente de *pick-up* para o relé i , y_{im} é a variável binária (0 ou 1) e Ip_{am} corresponde aos ajustes de corrente de *pick-up* disponíveis em um relé. O valor i corresponde ao número de relés, então $i=1,2,\dots,n$ e m é o número de ajustes disponíveis no relé e que se deseja trabalhar. A Equação 13 permite então o uso de valores discretos de corrente de *pick-up* (Ip_{am}) e a Equação 14 garante que não mais do que um ajuste de *pick-up* seja escolhido para um mesmo relé. Essa nova formulação tornou o problema em um problema de Programação Não-Linear Inteira Mista (do inglês, *Mixed Integer Nonlinear Programming – MINLP*) e então os autores utilizaram o programa GAMS (do inglês, *General Algebraic Modeling System*) para resolver esse problema. Esta abordagem utilizada pelos autores assegura resultados confiáveis para a coordenação do sistema de proteção, configurando-se como aspecto relevante a ser considerado em todo método eficaz para a coordenação ótima de relés direcionais.

Num trabalho posterior, Zeineldin, El-Saadany e Salama (2005), os autores abordaram as diferentes formulações para tratar o problema de coordenação ótima de relés direcionais de sobrecorrente. Os ajustes destes relés devem ser escolhidos de forma a minimizar o tempo de operação total dos relés e ao mesmo tempo manter as características de seletividade e confiabilidade do sistema de proteção. Segundo os autores, o tipo do problema de coordenação depende principalmente da corrente de *pick-up*, 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 Programação Não Linear – PNL e se é variável e discreto, caracteriza-se por um problema de Programação Não Linear Inteira Mista – PNLIM. No caso de PNLIM, a principal vantagem é que a corrente não é fixada em um valor pré-determinado, e o problema do ajuste discreto da corrente de *pick-up* 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 obter soluções ótimas globais para o problema de coordenação, os autores propuseram uma nova formulação, nomeada de Programação Inteira Mista – PIM que elimina a não-linearidade do problema com o objetivo de diminuir as chances de obter soluções ótimas locais. Dentre todos os resultados advindos de simulações computacionais com os tipos de programações mencionados, os melhores resultados se deram para o caso de PIM, quando a solução global para a coordenação é o alvo. Em termos de aplicação, em muitas ocasiões é interessante ter soluções factíveis alternativas como opções de implementação e neste caso, é melhor abordar o problema como uma PNLIM.

Em Chung *et al.* (2008) os autores abordam o problema de intersecção entre as curvas características de operação de relés de sobrecorrente direcionais em sistemas de subtransmissão. O trabalho propõe um novo método que, segundo os autores, é prático e efetivo para solucionar esse problema de intersecção entre as curvas de tempo inverso. O método é aplicável para sistemas de subtransmissão em geral, podendo ser tanto do tipo radial quanto de um ou mais anéis. Uma contribuição do trabalho é que nenhuma modificação nos relés, nem a substituição dos mesmos são necessárias. Outro ponto positivo é que o método desenvolvido é aplicável tanto para relés eletromecânicos quanto digitais. Além disso, não necessita que o intervalo de coordenação (ITC) seja alterado, o que segundo os autores constitui uma vantagem inclusive em relação a outros métodos propostos na literatura. Assim, o trabalho constituiu em desenvolver um programa computacional, o qual ajusta a inclinação da curva de operação que intercepta a outra tomando como base um ponto fixo, de modo que um novo ajuste de tempo seja encontrado. Em seguida, essa curva com esse novo ajuste de tempo é testada através de um programa computacional (*ASPEN One-Liner*) para que verifique se o problema de intersecção das curvas foi resolvido. Caso o problema não tenha sido resolvido, o programa calcula um novo ajuste de multiplicador de tempo e então calcula uma nova curva. Esse processo se repete por meio de um processo iterativo, chegando a uma curva final que não intercepta a outra curva. Todo esse processo foi testado em um sistema de subtransmissão real no qual a efetividade e aplicabilidade do método foram comprovadas.

3.2 Métodos baseados em técnicas inteligentes de otimização

Algoritmos inteligentes pertencem à família de métodos heurísticos ou metaheurísticos de otimização. A metaheurística pode ser considerada como uma evolução dos algoritmos heurísticos, os quais se constituem em uma técnica de otimização que por meio de passos bem definidos encontra uma boa solução para um problema complexo. Do ponto de vista teórico, uma técnica heurística não tem capacidade de encontrar uma solução ótima global, o que acon-

tece geralmente é encontrar um ótimo local pobre de qualidade. Porém, as heurísticas têm algumas vantagens tais como serem facilmente formuladas e implementadas além de serem rápidas e robustas (ROMERO e MANTOVANI, 2004).

A diferença entre os algoritmos heurísticos é determinada pela escolha do ponto inicial, a caracterização da vizinhança e o critério de escolha do próximo ponto (melhor vizinho). O processo de busca termina quando todos os vizinhos são de pior qualidade. A técnica heurística mais utilizada é o algoritmo heurístico construtivo, no qual a cada passo uma componente da solução é escolhida e o processo termina quando uma solução factível para o problema é encontrada (ROMERO e MANTOVANI, 2004).

As heurísticas simples são, portanto, métodos com procedimentos bem definidos e com número finito de passos. Geralmente as heurísticas encerram sua execução quando uma solução é encontrada e não há mais possibilidade de melhorá-la. Já as metaheurísticas representam uma evolução em relação às heurísticas simples, já que possuem vários mecanismos que permitem explorar outras regiões em busca da melhor solução possível. Por essa razão, são conhecidas como métodos de otimização globais. Uma característica que difere claramente uma metaheurística de uma heurística simples é a capacidade de aceitar temporariamente soluções de pior qualidade. As metaheurísticas podem ser classificadas como métodos inspirados ou não em processos naturais.

No contexto de utilização de técnicas inteligentes na coordenação de relés, algumas metaheurísticas têm sido bastante utilizadas, dentre elas estão o Algoritmo Genético (AG), o *Particle Swarm Optimization* (PSO) e algumas variantes dos dois tipos citados.

O algoritmo PSO origina-se dos estudos de Kennedy e Eberhart (1995a) com o objetivo de modelar o comportamento social de um grupo de aves. Segundo os autores, um grupo de aves possui uma inteligência coletiva que poderia ser artificialmente reproduzida e utilizada em problemas de otimização. Além disso, eles afirmam que parte da motivação de sua pesquisa vem de estudos anteriores, como por exemplo, a pesquisa de Reynolds (1987) e o trabalho de Heppner e Grenander (1990), uma vez que pretendiam simular computacionalmente o comportamento de animais em bando durante sua movimentação. O desempenho do algoritmo PSO foi testado por meio de diversos bancos de dados e também no treinamento supervisionado de redes neurais artificiais, revelando sua superioridade em relação ao conhecido algoritmo de treinamento supervisionado por retropropagação do erro (em inglês, *Backpropagation*). Esforços foram realizados com o intuito de aprimorar o algoritmo desenvolvido, considerando inclusão da modalidade de busca local sobre a superfície de soluções do problema de otimização, realizado em Kennedy e Eberhart (1995b). Entretanto, os autores relatam a obtenção de resultados pouco satisfatórios em termos de desempenho, afirmando a superioridade do algoritmo PSO originalmente concebido.

A partir de então, diversas pesquisas utilizando o algoritmo PSO foram realizadas no intuito de resolver o problema de coordenação de relés. Assim, na pesquisa de Zeineldin, El-Saadany e Salama (2006), foi realizada uma comparação entre o desempenho de um algoritmo de otimização baseado no PSO e os métodos de otimização disponíveis no programa GAMS. É importante ressaltar que os relés considerados nesse estudo, permitem somente o ajuste de tempo contínuo e ajuste de corrente de *pick-up* discreto, por isso o problema foi modelado como um caso de PNLIM. O objetivo do problema de coordenação 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 deste trabalho é o cálculo dos valores discretos da corrente de *pick-up*, que é realizado por meio do emprego de uma variável binária (y_{im}) adicionada à formulação do problema (ver Equações 13 e 14), semelhante à pesquisa de Zeineldin, El-Saadany e Salama (2004), citada na subseção 3.1. Nesse artigo, as correntes de *pick-up* foram inicializadas aleatoriamente e os valores de ajuste de tempo foram calculados usando o método de pontos interiores com o intuito de encontrar as soluções dentro da região de soluções factíveis e, com isso, economizar tempo e memória computacional. A partir dos resultados nota-se que o método baseado em PSO foi capaz de encontrar melhores soluções com menor número de iterações quando comparado à ferramenta GAMS. Esse trabalho, portanto, deixou claro o bom desempenho do PSO aplicada ao problema de coordenação dos relés direcionais, além do uso de valores discretos para a corrente de *pick-up*.

No trabalho de Mansour, Mekhamer e El-Kharbawe (2007) o problema de coordenação é modelado como sendo um caso de PL, em que os ajustes da corrente de *pick-up* são predefinidos para que posteriormente se obtenham os valores do ajuste de tempo via algoritmo PSO. Neste artigo, alguns pontos relevantes são abordados com detalhes, como por exemplo, a definição da função objetivo a ser minimizada. Os autores, ao invés de utilizarem uma função de penalização, a qual é prática comum encontrada na literatura, propuseram uma modificação nas velocidades das partículas, a qual é aplicada no momento em que as soluções apresentam-se fora do espaço de busca das soluções (soluções factíveis) e/ou violem as restrições do problema. Esse algoritmo PSO modificado foi testado em alguns sistemas elétricos modelados computacionalmente, e os resultados foram comparados com um método de PL disponível no programa *Matlab*. A partir destes resultados, foi possível perceber que o uso do algoritmo PSO modificado mostrou-se adequado na obtenção da coordenação ótima dos relés direcionais. É importante ressaltar que em alguns casos, o algoritmo inteligente desenvolvido foi superior à PL, pois este último não foi capaz de fornecer soluções factíveis para estes casos. O tempo de convergência para a obtenção da solução via algoritmo PSO se mostrou maior em comparação ao método de PL do *Matlab*, sendo este um ponto levantado pelos próprios autores e que merece uma melhor análise. Outro aspecto desfavorável a ser considerado é a obtenção dos parâmetros do algoritmo PSO, uma vez que os mesmos devem ser obtidos por tentativa e erro.

Em Bansal e Deep (2008) foi realizado um estudo de caso em que alguns algoritmos inteligentes, incluindo adaptações baseadas em PSO e AG, foram testados. Esse estudo utilizou dois sistemas de potência bastante simples (três e quatro barras) para analisar o desempenho de nove tipos de algoritmos, são eles: o RST2 (*Random Search Techniques*), o AG (Algoritmo Genético), o SOMA (*Self Organizing Migrating Algorithm*), o SOMGA (*Self Organizing Migrating Genetic Algorithm*), o GPSO (*Global PSO*), o CGPSO (*Constricted Global PSO*), o LPSO (*Local PSO*), o CLPSO (*Constricted Local PSO*) e o CPSO (*Chaotic PSO*). Ao todo, 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, o CPSO foi bastante superior aos demais algoritmos considerados, quando a variância das soluções fornecidas nos ensaios foi considerada. Segundo Vijayakumar e Nema (2008), dentre as principais vantagens de se utilizar o algoritmo PSO é possível citar que: é uma técnica com conceitos e implementação de código de baixa complexidade; possui menor sensibilidade à natureza da função objetivo; apresenta menor dependência em relação às condições iniciais e gera soluções de alta qualidade com baixo tempo de processamento e convergência estável.

Outra variante do PSO é apresentada nos trabalhos de Miranda e Fonseca (2002a) e em Miranda e Fonseca (2002b). Os autores incorporaram características evolutivas do algoritmo PSO, ou seja, a característica de gerar novos indivíduos em diferentes posições do espaço por sua lei de movimento, ao invés de apenas interpretá-lo em termos do movimento das partículas. Sendo assim, esse algoritmo foi denominado como *Evolutionary Particle Swarm Optimization* (EPSO), o qual engloba conceitos de algoritmos evolutivos e o do PSO. Para os autores, o EPSO é considerado um algoritmo evolutivo auto-adaptativo, sendo que toda a terminologia empregada é a mesma utilizada na teoria de algoritmos evolutivos. As modificações introduzidas no algoritmo PSO são as seguintes:

- Os pesos (parâmetros) sofrem mutação pela aplicação de uma variável aleatória $N(0,1)$ com distribuição gaussiana;
- O mínimo/máximo global são perturbados aleatoriamente por uma variável gaussiana $N(0,1)$.

Assim, o algoritmo EPSO pode ser interpretado tanto como uma variante do algoritmo de otimização PSO, em que a dependência externa para a inicialização dos parâmetros é eliminada (algoritmo auto-adaptativo), quanto como uma variante dos algoritmos evolutivos, em que o operador de recombinação é expresso por meio da regra do movimento de partículas do PSO, ao invés da abordagem de recombinação aleatória. A eficiência desse algoritmo EPSO é apresentada em Miranda e Fonseca (2002a) por uma aplicação ao problema de regulação de tensão e minimização de perdas em sistemas elétricos, comparando-se os resultados obtidos com as soluções alcançadas via algoritmo de *Simulated Annealing* (SA). A partir dos resultados é possível

constatar que para o algoritmo EPSO a solução é obtida mais rapidamente em termos de números de iterações; as melhores soluções são encontradas, incluindo os casos em que o algoritmo SA não foi capaz de fornecer soluções factíveis; o desvio padrão das soluções obtidas, em relação à solução ótima foi cerca de 5 vezes menor do que as fornecidas pelo algoritmo SA. Entretanto, é importante observar que o algoritmo EPSO exige maior esforço computacional quando comparado ao algoritmo SA. Porém, o EPSO mostrou-se mais eficaz, segundo os critérios adotados, ao fornecer soluções que são ótimas ou proximamente ótimas, quando comparado aos algoritmos PSO e SA.

O algoritmo EPSO também foi utilizado no problema não linear de coordenação de relés de sobrecorrente direcionais em um sistema de distribuição malhado, conforme a pesquisa de Leite, Barros e Miranda (2010). Neste trabalho os autores compararam com o método *Simplex* os resultados obtidos para o EPSO, mas para isso eles fixaram a corrente de *pick-up*, tornando o problema de coordenação de relés um caso de programação linear. O valor da função de restrições para o algoritmo EPSO apresenta-se com valor menor do que o obtido pela solução do método *Simplex*, evidenciando uma minimização mais eficaz, o que reflete um menor tempo de coordenação dos relés. Constata-se que o EPSO fornece resultados satisfatórios quando aplicado ao problema de coordenação de relés direcionais de sobrecorrente. Porém, deve ser feita uma análise mais aprofundada em relação ao número de ensaios realizados, pois como o algoritmo EPSO é fundamentado em conceitos probabilísticos, é muito aconselhável considerar, por exemplo, a média das soluções encontradas.

O trabalho de Sadeh, Amintojjar e Bashir (2011) aborda o problema de coordenação de relés direcionais de sobrecorrente levando em consideração o relé de distância, utilizando um algoritmo baseado no PSO. Nesse trabalho os autores propõem uma abordagem denominada PSO Híbrido. A contribuição do trabalho é considerar o tempo de operação de segunda zona do relé de distancia (t_{z2}) como uma das variáveis do problema de coordenação, além das variáveis *TMS* (multiplicador de tempo, do inglês *Time Multiplier Setting*) e $I_{Pick-up}$ (corrente de *pick-up*). O método proposto constitui-se de duas partes, que são a Programação Linear e o PSO. Assim, eles utilizaram a PL para obter t_{z2} e *TMS*, e para encontrar a corrente de *pick-up* mais adequada eles aplicaram o PSO. Porém, o PSO utilizado não foi o clássico, já que os autores modificaram os procedimentos para inicialização e atualização da população, de modo a deixar todas as partículas dentro de uma região de soluções factíveis. Neste estudo, os parâmetros *TMS* e $I_{Pick-up}$ foram considerados como valores contínuos, mas ao final de cada iteração, $I_{Pick-up}$ era arredondada para o valor mais próximo disponível. Para comparar os resultados obtidos com o método PSO Híbrido, os autores também aplicaram PL e AG. Assim, tanto o PSO quanto o AG superaram a PL, obtendo resultados bastante satisfatórios e próximos entre si, porém com o PSO obteve-se a coordenação ótima em menos iterações e com menor população, tornando-o mais rápido do que o AG.

No trabalho de Moravej, Jazaeri e Gholamzadeh (2012), os autores fizeram uma abordagem acerca do problema de coordenação de relés, considerando relés de distância e de sobre-corrente. Nesse trabalho, os autores abordaram duas situações diferentes para obter a coordenação. Um dos casos é o mais encontrado na literatura, que é o problema de coordenação de relés para um sistema sem compensação série, o outro caso (menos abordado) leva em consideração a compensação série no sistema elétrico. Segundo os autores, a compensação série pode alterar os níveis de corrente de falta e/ou a impedância aparente da linha e, com isso, levar a uma desco-ordenação entre os relés. Para ambas as situações (com e sem compensação série) os autores utilizaram o algoritmo MAPSO, do inglês *Modified Adaptive Particle Swarm Optimization*, o qual apresenta algumas modificações em relação ao PSO tradicional, tais como: a separação da parte cognitiva em componentes denominadas “melhor” e “não melhor”; troca da melhor posição individual; e um novo limite de velocidade. Os autores trabalharam simultaneamente com t_{z2} , TMS (multiplicador de tempo) e $I_{pick-up}$ (corrente de *pick-up*). Nesse estudo, os autores realizaram a coordenação para os dois casos e em dois sistemas diferentes, e em todos os testes obteve-se um resultado satisfatório através do MAPSO.

A outra técnica inteligente muito utilizada no problema de coordenação de relés é o algoritmo genético e algumas variantes, como citado anteriormente. Assim, nessa linha de pesquisa está o trabalho de Razavi *et al.* (2008), em que se considera um caso de programação linear, uma vez que os valores da corrente de *pick-up* são predeterminados (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, 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 PSO, é necessária a inclusão das restrições inerentes ao problema de coordenação dos relés de sobre-corrente na função objetivo a ser minimizada. Nesse artigo, os autores introduzem uma penalização na função objetivo, ou seja, quando soluções (indivíduos) não factíveis são encontradas pelo AG, o valor da função objetivo se eleva, e, conseqüentemente, estes indivíduos estarão sujeitos a não sobreviver nas próximas gerações. Esse termo de penalização tem como objetivo tratar de casos em que o tempo de operação do relé de *backup* é menor do que o tempo de operação do relé principal, o que leva a uma minimização da função objetivo, porém com soluções não factíveis. Da maneira como foi desenvolvido, este método de penalização permite o ajuste de certos parâmetros de tal modo a priorizar a redução do tempo de atuação dos relés, ou garantir ao máximo as soluções factíveis, elevando inevitavelmente o tempo de atuação dos relés. A função objetivo proposta pelos autores é expressa como mostrada na Equação 15.

$$OF = \alpha_1 \sum (t_i)^2 + \alpha_2 \sum (\Delta t_{mb} - \beta_2(\Delta t_{mb} - |\Delta t_{mb}|))^2 \quad (15)$$

Em que: α_1 , α_2 e β_2 são controles de ponderação; t_i é o tempo de operação do *iésimo* 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, os pares de relés descoordenados farão com que Δt_{mb} seja menor que zero, elevando o valor da função objetivo que, conseqüentemente, conduzirá ao descarte da respectiva solução. Tal possibilidade de manipulação da função objetivo pode ser útil para a realização de estudos concernentes à coordenação. Porém, os parâmetros da parcela de penalização devem ser cuidadosamente ajustados de modo a obter uma coordenação segura no caso de uma aplicação real.

No trabalho realizado em Hosseinian *et al.* (2008) foi apresentado um estudo comparativo envolvendo três algoritmos aplicados na resolução do problema de coordenação de relés de sobrecorrente. Os três algoritmos analisados foram: AG, AGI (Algoritmo Genético Imune) e PSO. Os três métodos considerados utilizam praticamente a mesma estrutura básica para encontrar a solução do problema. Porém, os mesmos se diferenciam no momento de gerar novas populações (soluções), dada a peculiaridade de cada algoritmo. Tendo em vista o problema de arredondamento das soluções, 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 das soluções obtidas pelo algoritmo PSO pode ser justificada pelo maior número de iterações realizadas por esse algoritmo, aumentando assim as possibilidades de se encontrar as soluções desejadas.

Em Abyaneh *et al.* (2008) os autores trabalharam com o problema de coordenação envolvendo tanto os relés de sobrecorrente quanto os de distância e utilizaram um AG para resolver esse problema de coordenação. A contribuição do trabalho, segundo os autores, reside na modificação proposta por eles na função objetivo, com o intuito de realizar a coordenação entre os relés mencionados anteriormente. Essa modificação é justamente relacionada à restrição que é adicionada ao problema de coordenação quando se acrescenta o relé de distância nas considerações. Assim, a função objetivo proposta nesse artigo é dada como na Equação 16.

$$\begin{aligned}
OF = & \alpha_1 \cdot \sum_{i=1}^N (t_i)^2 + \beta_2 \cdot \sum_{k_1=1}^{P_1} (\Delta t_{mb|k_1|} - |\Delta t_{mb|k_1}|)^2 + \beta_3 \\
& \cdot \sum_{k_2=1}^{P_2} (\Delta t_{mbDISOC|k_2|} - |\Delta t_{mbDISOC|k_2}|)^2
\end{aligned} \tag{16}$$

Em que: α_1 , β_2 e β_3 são os fatores de ponderação; i é o número de relés de sobrecorrente e varia de 1 a N ; k_1 é o número de pares de proteção primária/*backup* de relés de sobrecorrente, que varia de 1 a P_1 ; k_2 é o número de pares de proteção primária (distância) e *backup* (sobrecorrente) e que varia de 1 a P_2 ; $\Delta t_{mb|k_1|}$ é a diferença do tempo de operação entre cada par de relés (primário e *backup*) relativo aos relés de sobrecorrente; $\Delta t_{mbDISOC|k_2|}$ é a diferença do tempo de operação entre cada par de relés de proteção primária (distância) e *backup* (sobrecorrente), esta diferença é calculada conforme a Equação 17.

$$\Delta t_{mbDISOC|k_2|} = t_{bOC|k_2|} - t_{mDIS|k_2|} - ITC \tag{17}$$

Em que, $t_{bOC|k_2|}$ é o tempo de operação do relé de sobrecorrente (*backup*); $t_{mDIS|k_2|}$ é o tempo de operação do relé de distância (principal); e ITC é o intervalo de coordenação, e equivale a 0,3 segundos. Como dito anteriormente, o AG foi utilizado nesse artigo e os resultados obtidos mostraram que o método desenvolvido, testado em um sistema elétrico, foi bem sucedido e bastante preciso.

Porém, em Chabanloo *et al.* (2008) os mesmos autores do trabalho anterior abordaram as várias curvas características de um relé de sobrecorrente, ou seja, o algoritmo utilizando o AG encontrará qual o melhor tipo de curva, com a qual a coordenação do sistema seja alcançada. Dessa forma, os autores definiram oito curvas características, as quais eles detalham em seu artigo. Com essa modificação realizada, os autores compararam os dois trabalhos e em geral, o último trabalho exposto obteve resultados melhores, já que o tempo de operação dos relés de sobrecorrente diminuiu e ao mesmo tempo manteve o sistema coordenado.

Em Bedkar e Bhide (2011) os autores utilizam um AG na metodologia de coordenação de relés de sobrecorrente. Porém, são utilizados números reais ao invés de adotar uma codificação binária para os cromossomos, conforme a prática usual. Segundo os autores, este tipo de codificação reduz 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 (TMS). Além disso, observa-se que é possível alcançar uma maior

precisão, em termos da busca pela ótima coordenação, sem a necessidade de aumentar significativamente o tamanho dos cromossomos, 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 *pick-up* foi prefixada. Os testes realizados em sistemas elétricos modelados computacionalmente mostraram que o uso do AG, com as características supracitadas, foi capaz de fornecer soluções consistentes para a coordenação do sistema de proteção.

No trabalho de Sadeh, Aminotojari e Bashir (2011) os autores também abordaram a questão do problema de coordenação incluindo o relé de distância em suas considerações. Segundo outros trabalhos científicos já citados anteriormente como em Pérez e Urdaneta (1999) e Pérez e Urdaneta (2001), o tempo de atuação para segunda zona (t_{z2}) do relé de distância pode ser maior que o ajuste convencional, por isso os autores justificam a importância de se considerar o relé de distância no problema de coordenação, assim, nesse artigo, um método utilizando AG híbrido foi proposto. Este método foi denominado híbrido, pois mescla a utilização do AG aliado à Programação Linear. Para resolver a parte não linear do problema (relacionada à determinação da corrente de *pick-up* dos relés de sobrecorrente) os autores utilizaram o AG, e para determinar os ajustes de TMS e t_{z2} foi utilizada a PL. Para o caso de t_{z2} os autores fizeram duas abordagens: a primeira considerou que os t_{z2} fossem os mesmos para todos os relés de distância, e a segunda considerou t_{z2} variáveis para todos os relés. Além disso, para efeitos comparativos, os autores resolveram o problema tanto com o método AG proposto quanto com PL. Para todos os casos, os melhores resultados foram atingidos com o AG. Além disso, para as duas abordagens relacionadas ao t_{z2} , a que apresentou melhor resultado foi considerando os tempos variáveis. Assim, os autores concluíram que se devem considerar separadamente os tempos de cada relé de distância, para atingir a ótima coordenação entre os relés.

Nos trabalho de Bernardes (2013), Santos (2013) e Bottura (2014) os autores também abordaram o problema de coordenação de relés direcionais. Particularmente em Bernardes (2013), o problema de coordenação foi resolvido utilizando o DPSO (*Discrete PSO*) e modelado como um problema de otimização não linear inteira mista. Em Santos (2013), o problema de coordenação foi resolvido usando outro método baseado no PSO, denominado EPSO (*Evolutionary PSO*), o qual possui características evolucionárias. Finalmente em Bottura (2014) o problema foi resolvido através de um método híbrido, o qual era composto por Programação Linear para resolver a parte linear do problema e AG para resolver a parcela não linear. Além disso na metodologia, o autor tratou de considerar uma possível variação topológica do sistema em relação à topologia normal de operação. É possível destacar que em nenhum desses três recentes trabalhos, o relé de distância foi considerado, assim como a possibilidade de se comparar o uso de tipos de curvas diferentes para a coordenação.

A partir de toda essa revisão bibliográfica, envolvendo tanto técnicas convencionais como inteligentes, foi possível notar a grande variedade de trabalhos concernentes ao problema de coordenação de relés. Dentre esses trabalhos alguns consideraram o relé de distância na formulação do problema e outros não. Pode-se dizer que considerar o relé de distância no processo de coordenação é um fato bastante relevante, dada a importância da proteção de distância para o sistema de proteção.

Nesta dissertação, o relé de distância será considerado aliado ao relé direcional de sobrecorrente na metodologia que será exposta em breve, tornando, assim, o estudo um pouco mais abrangente do que os estudos que consideram apenas os relés direcionais de sobrecorrente no problema de coordenação. Além de tratar do relé de distância, na formulação do problema feito nesta dissertação, serão analisados três pontos de falta para se encontrar a coordenação dos relés, enquanto na literatura técnica normalmente se usam um ou dois pontos apenas. Ademais, buscou-se obter a coordenação variando-se tipos de curva individualmente (um tipo específico de curva) e utilizando dois tipos de curva simultaneamente.

Capítulo 4

Formulação do Problema de Coordenação

O intuito deste capítulo é apresentar o problema de coordenação aliado à formulação matemática do mesmo, a qual será resolvida pela técnica de otimização proposta para a resolução desse problema.

4.1 Apresentação do problema

Em um sistema de proteção os dispositivos que o compõem não devem ser ajustados de maneira independente uns dos outros, ou seja, é preciso que seja respeitada uma sequência de operações entre os mesmos para que possa garantir o bom funcionamento desse sistema.

Considerando-se o caso em que dois elementos de proteção estão dispostos em série, garante-se que eles estejam coordenados entre si se os seus ajustes permitirem que o elemento situado mais próximo do defeito atue prioritariamente em relação ao outro elemento. No caso de falha do elemento prioritário em eliminar a falta, o outro dispositivo de proteção deve atuar. Porém deve haver um tempo de espera entre a atuação do segundo elemento em relação ao prioritário, a esse tempo dá-se o nome de Intervalo de Tempo de Coordenação (ITC).

Como já mencionado anteriormente, a proteção de linhas de transmissão envolve o emprego de relés de distância (RD) aliados a relés direcionais de sobrecorrente (RDS), sendo que no esquema de proteção, os relés de distância podem atuar como proteção primária e retaguarda remota enquanto que os relés direcionais de sobrecorrente como proteção de retaguarda local e remota. Na Figura 9, a ideia do esquema de coordenação utilizado nesta dissertação é apresentada. Nesta figura estão representadas duas linhas de transmissão (LT1 e LT2) e a cada uma delas estão associados um relé de distância e um relé direcional de sobrecorrente como elementos de proteção. O objetivo é obter os ajustes desses relés que garantam a coordenação entre a proteção principal e suas respectivas retaguardas (local e remota).

No esquema de proteção mostrado na Figura 9, como elemento de proteção principal está o relé de distância (localizado em LT2), cuja atuação para sua zona 1 é representada na cor preta e denominada t_{z1p} e para zona 2 denominada t_{z2p} . A proteção de retaguarda local é realizada pelo relé direcional de sobrecorrente (localizado em LT2), cuja curva está representada em ver-

melhor e denominada t_P . A proteção de retaguarda remota é feita por outro RDS (localizado em LT1) cuja curva é definida por t_R , também na coloração vermelha.

Para realizar a coordenação, deve-se respeitar um determinado ITC entre um relé principal e seu respectivo relé de retaguarda. Este intervalo de coordenação está representado na figura como ITC_1 e ITC_2 , o primeiro refere-se à coordenação entre os relés de sobrecorrente entre si, e o segundo refere-se à coordenação entre relé de distância e relé de sobrecorrente.

Figura 9: Esquema de coordenação entre relés de distância e direcional de sobrecorrente.

Tomando uma falta em F1, na linha de transmissão 2 (LT₂), como exemplo, o relé de distância principal deve atuar para um tempo praticamente instantâneo definido por t_{z1p} , que é o tempo de atuação para a zona 1. Como dito anteriormente, o relé de retaguarda local é o RDS, cuja curva é dada por t_p . Este relé só deve atuar para um tempo superior ao intervalo de coordenação ITC₂ mostrado na Figura 9. Além disso, existe ainda o RDS de retaguarda remota, representado pela curva t_R . Este relé deve atuar depois do relé de retaguarda local, por isso é definido que esse tempo deve ser superior ao intervalo ITC₁.

Partindo agora para o ponto de falta F2 (LT₂), que está caracterizada no começo da segunda zona do relé de distância principal, pode-se observar que o tempo de atuação para essa zona é definido por t_{z2p} . Neste ponto também é estabelecido um intervalo de coordenação do RD principal e o RDS de retaguarda local; esse intervalo também deve ser superior ao valor ITC₂ estabelecido.

Finalmente, para uma falta em F3, o relé de distância ainda atua no tempo t_{2p} . Além disso, existe também outro intervalo de coordenação que deve ser respeitado entre o RDS de

retaguarda local e o RDS de retaguarda remota e também deve ser superior ao valor ITC_1 estabelecido.

O tempo de atuação representado no gráfico por t_{z1r} corresponde ao tempo de atuação da zona 1 do RD de retaguarda remota, porém este tempo não é considerado na coordenação do relé RDS principal.

Nesta abordagem, o sobre alcance da segunda zona foi desabilitado, ou seja, como pode ser visto ainda na Figura 9, a zona 2 é restrita à barra remota. Isso foi feito para que não houvesse perda de seletividade no caso em que a segunda zona do relé de retaguarda remota (t_{z2r}) atuasse antes do RDS de retaguarda local (t_R).

4.2 Formulação matemática

Para modelar o problema de coordenação como um problema de otimização, é preciso definir uma função objetivo. No caso deste trabalho a função objetivo foi inspirada no trabalho de Sadeh, Amintojjar e Bashir (2011), no qual ela foi definida como a minimização dos tempos de atuação de segunda zona dos RD e dos tempos de atuação dos RDS, como mostrado na Equação 18.

$$Obj = \min \left(\sum_{i=1}^{n1} T_{RDS_i} + \sum_{i=1}^{n2} T_{RD_i} \right) \quad (18)$$

Em que $n1$ e $n2$ correspondem ao número de relés RDS e RD respectivamente; T_{RDS_i} corresponde ao tempo de atuação do i -ésimo RDS; T_{RD_i} corresponde ao tempo de atuação de segunda zona do i -ésimo RD. Para o cálculo do tempo de atuação dos relés de sobrecorrente utilizou-se a Equação (2), definida previamente na subseção 2.2.1.

Definida a função objetivo é preciso estabelecer as restrições que envolvem o problema de coordenação, sendo assim, uma das mais importantes restrições desse problema diz respeito ao intervalo de coordenação que deve haver entre os pares de relés primário/retaguarda. Essa restrição pode ser generalizada da forma mostrada na Equação 19.

$$T_j - T_i \geq ITC \quad (19)$$

Na qual, T_i corresponde ao tempo de atuação do i -ésimo relé principal; T_j representa o tempo de atuação do respectivo j -ésimo relé de retaguarda; e ITC corresponde ao Intervalo de Tempo de Coordenação.

Tomando como base a Figura 9 ainda, pode-se reescrever a Equação 19 para cada par de relés, de acordo com os pontos de falta F1, F2 e F3, isso é mostrado nas Equações 20, 21, 22 e 23.

$$T_{RDS_j}^{F1} - T_{RDS_i}^{F1} \geq ITC_1 \quad (20)$$

$$T_{RDS_j}^{F3} - T_{RDS_i}^{F3} \geq ITC_1 \quad (21)$$

$$T_{RDS_j}^{F1} - T_{RD_{z1}i} \geq ITC_2 \quad (22)$$

$$T_{RDS_j}^{F2} - T_{RD_{z2}i} \geq ITC_2 \quad (23)$$

Em que $T_{RDS_j}^{F1}$, $T_{RDS_j}^{F2}$ e $T_{RDS_j}^{F3}$ são os tempos de atuação do j -ésimo RDS de retaguarda para a falta em F1, F2 e F3 respectivamente; $T_{RDS_i}^{F1}$ e $T_{RDS_i}^{F3}$ são os tempos de atuação do i -ésimo RDS principal para faltas em F1 e F3 respectivamente; $T_{RD_{z1}i}$ é o tempo de operação de primeira zona do i -ésimo RD; $T_{RD_{z2}i}$ é o tempo de operação de segunda zona do i -ésimo RD.

Além das restrições definidas anteriormente, existem também restrições para definir a faixa de valores mínimos e máximos para:

- o múltiplo de tempo, mostrada na Equação 24;
- a corrente de *pick-up*, evidenciada na Equação 25;
- os tempos de operação para a segunda zona do relé de distância, definida na Equação 26.

$$MT_{\min i} \leq MT_i \leq MT_{\max i} \quad (24)$$

$$I_{pick-up_{\min i}} \leq I_{pick-up_i} \leq I_{pick-up_{\max i}} \quad (25)$$

$$T_{RD_{z2} \min i} \leq T_{RD_{z2} i} \leq T_{RD_{z2} \max i} \quad (26)$$

Nas quais, $MT_{\min i}$, $I_{pick-up_{\min i}}$ e $T_{RD_{z2} \min i}$ correspondem respectivamente aos valores mínimos permitidos para os ajustes do múltiplo de tempo, da corrente de *pick-up* e do tempo de segunda zona para o relé i ; $MT_{\max i}$, $I_{pick-up_{\max i}}$ e $T_{RD_{z2} \max i}$ definem os valores máximos possíveis para os ajustes do múltiplo de tempo, da corrente de *pick-up* e do tempo de segunda zona, respectivamente, para o relé i ; MT_i , $I_{pick-up_i}$ e $T_{RD_{z2} i}$ são os respectivos ajustes para o relé i .

Dessa forma, o problema de otimização que foi apresentado nessa seção pode ser representado de maneira resumida conforme mostrado em (27).

$$Obj = \min \left(\sum_{i=1}^{n1} T_{RDS_i} + \sum_{i=1}^{n2} T_{RD_i} \right) \quad (27)$$

$n1 = 1, 2, \dots$, número de RDS do sistema

$n2 = 1, 2, \dots$, número de RD do sistema

Sujeito a:

$$\text{para cada par } RDS_i - RDS_j : \begin{cases} T_{RDS_j}^{F1} - T_{RDS_i}^{F1} \geq ITC_1 \\ T_{RDS_j}^{F3} - T_{RDS_i}^{F3} \geq ITC_1 \end{cases}$$

$$\text{para cada par de } RD_i - RDS_j : \begin{cases} T_{RDS_j}^{F1} - T_{RD_{z1}i} \geq ITC_2 \\ T_{RDS_j}^{F2} - T_{RD_{z2}i} \geq ITC_2 \end{cases}$$

$$\text{para cada relé } RD_i : \{ T_{RD_{z2} \text{ mín } i} \leq T_{RD_{z2} i} \leq T_{RD_{z2} \text{ máx } i}$$

$$\text{para cada relé } RDS_i : \begin{cases} MT_{\text{mín } i} \leq MT_i \leq MT_{\text{máx } i} \\ I_{\text{pick-up}_{\text{mín } i}} \leq I_{\text{pick-up}_i} \leq I_{\text{pick-up}_{\text{máx } i}} \end{cases}$$

Outro ponto importante a respeito do problema de otimização aqui exposto é em relação ao tratamento das variáveis, que pode ter uma abordagem discreta ou contínua. Neste trabalho a metodologia para a resolução do problema de coordenação considerou as variáveis no formato contínuo. A metodologia baseada no PSO será abordada no próximo capítulo.

Capítulo 5

Metodologia Baseada em *Particle Swarm Optimization*

5.1 Introdução

Em muitos casos da natureza os seres vivos se comportam como grupos. Uma das maiores linhas de pesquisa na área de inteligência artificial é estudar como esses seres se comportam dentro de um grupo e desenvolver métodos que modelem as características envolvidas para que estas possam ser reproduzidas e utilizadas dentro de um ambiente computacional (LEE e EL-SHARKAWI, 2008). Essas técnicas desenvolvidas podem ser chamadas de técnicas do tipo *swarm intelligence* (do inglês, inteligência de enxame) e dentre eles está o *Particle Swarm Optimization*.

O Capítulo 3 mostrou as técnicas que vêm sendo mais utilizadas para resolver o problema de coordenação, e dentre as apresentadas a escolhida para utilizar nesse trabalho foi o algoritmo PSO. Este método foi escolhido, pois a partir dos trabalhos estudados, foi possível perceber algumas vantagens: seus resultados são bastante satisfatórios quando aplicado na coordenação de relés; o seu algoritmo é de fácil implementação computacional; além disso, é uma técnica bastante consolidada em problemas de otimização. Portanto, esse capítulo visa esclarecer as características pertinentes a esse algoritmo utilizado.

5.2 O Algoritmo PSO Clássico

Como dito anteriormente, o PSO é considerado uma metaheurística que teve sua inspiração baseada no comportamento social de animais e foi proposto inicialmente por Kennedy e Eberhart (KENNEDY e EBERHART, 1995a). Os autores propuseram um método de otimização cujo comportamento de busca de uma solução ótima tem como base a troca de informações entre os agentes, que no caso do PSO podem ser chamados de partículas. Essas informações, que podem ser locais (específica de uma partícula) ou globais (de todas as partículas consideradas em conjunto), determinam a trajetória por onde esse conjunto (ou enxame de partículas)

explora o espaço de busca à procura de soluções que minimizem ou maximizem a função objetivo até que se atinja a convergência.

A cada partícula desse enxame de partículas está associada uma posição e, para que a mesma se movimente nesse espaço, define-se também uma velocidade (taxa de variação da posição). Além disso, as partículas possuem uma “memória” individual e uma social, sendo que a primeira caracteriza-se pela melhor posição encontrada especificamente para cada partícula até uma determinada iteração, e a segunda é definida pela melhor posição atingida por todo o enxame de partículas até uma dada iteração. Para deixar essas características mais claras, podem-se definir as equações que regem o movimento dessas partículas, como pode ser observado nas Equações 28 e 29.

$$v_{k+1}^{N_p} = \omega_k \cdot v_k^{N_p} + C_1 \cdot r_1 \cdot (pbest_k^{N_p} - x_k^{N_p}) + C_2 \cdot r_2 \cdot (gbest_k - x_k^{N_p}) \quad (28)$$

$$x_{k+1}^{N_p} = x_k^{N_p} + v_{k+1}^{N_p} \quad (29)$$

Em que:

k é o índice da iteração atual;

ω_k é o coeficiente de inércia para a iteração k ;

C_1 e C_2 são os parâmetros cognitivo e social respectivamente (ambos são valores constantes);

r_1 e r_2 são valores aleatórios entre 0 e 1, com probabilidade uniforme;

N_p é o índice da partícula, que varia de 1 a N , sendo N o número total de partículas existentes;

$pbest_k^{N_p}$ corresponde ao melhor vetor de posição da partícula N_p encontrado até a iteração k ;

$gbest_k$ é o melhor vetor, dentre todas as partículas do enxame, já encontrado até a iteração presente k .

$x_k^{N_p}$ e $x_{k+1}^{N_p}$ correspondem à posição da partícula N_p na iteração k e $k+1$ respectivamente;

$v_k^{N_p}$ e $v_{k+1}^{N_p}$ são as velocidades da partícula N_p na iteração k e $k+1$ respectivamente.

A Figura 10 demonstra, em apenas duas dimensões (x,y), como ocorre a atuação dos vetores no movimento de uma partícula dentro do espaço de busca. Todos os vetores envolvidos têm a dimensão $N_d \times 1$, em que N_d é o número de parâmetros a serem otimizados. Nessa figura, a velocidade denominada V_{pbest} corresponde ao termo “ $C_1 \cdot r_1 \cdot (pbest_k^{N_p} - x_k^{N_p})$ ” da Equação 28. Analogamente, V_{gbest} está relacionada ao termo $C_2 \cdot r_2 \cdot (gbest_k - x_k^{N_p})$ da mesma equação.

Figura 10: Atualização do vetor posição realizada pelo PSO. Adaptado de (LEE e EL-SHARKAWI, 2008).

O coeficiente de inércia presente na Equação 28 é importante para definir o espaço de busca já que um valor elevado direciona as partículas para uma exploração mais ampla do espaço, enquanto um valor pequeno permite uma busca mais local, tornando-se um tipo de ajuste fino. O coeficiente de inércia utilizado neste trabalho é atualizado a cada iteração k e à medida que o número de iterações vai aumentando, o valor desse fator de inércia vai diminuindo, conforme mostra a Equação 30 (LEE e EL-SHARKAWI, 2008).

$$\omega_k = \omega_{m\acute{a}x} - \frac{(\omega_{m\acute{a}x} + \omega_{m\acute{i}n})}{k_{m\acute{a}x}} \cdot k \quad (30)$$

Na qual, $\omega_{m\acute{a}x}$ e $\omega_{m\acute{i}n}$ são os valores máximo e mínimo permitidos para o coeficiente de inércia; $k_{m\acute{a}x}$ é o número máximo de iterações do algoritmo.

A Figura 11 mostra um fluxograma básico de um algoritmo PSO clássico. O primeiro bloco é responsável por gerar as condições iniciais para o algoritmo, ou seja, gerar um ponto de busca ($x_0^{N_p}$) e velocidade ($v_0^{N_p}$) iniciais de cada partícula. Estas condições são geralmente geradas aleatoriamente e dentro do espaço de busca permitido. Com isso define-se o $pbest$ para cada partícula e o melhor $pbest$ avaliado é definido como $gbest$, armazenando a informação de qual partícula possui esse melhor valor.

Em seguida, no bloco 2, ocorre a avaliação da função objetivo para cada partícula (para cada ponto de busca). Se o novo valor da função objetivo encontrado para uma determinada partícula é melhor do que o atual, então o algoritmo deve atualizar o $pbest$ com o novo valor para essa partícula. Além disso, avalia-se se há um novo $gbest$ melhor do que o atual; caso isso aconteça, o $gbest$ também deve ser alterado para o novo valor.

A partir daí, no bloco 3, as equações de movimento que regem o PSO são utilizadas para modificar as partículas. Primeiramente deve-se atualizar o coeficiente de inércia, através da Equação 30. Em seguida, a velocidade de cada partícula deve ser atualizada segundo a Equação 28 e por fim, a posição de cada uma delas também é atualizada, de acordo com a Equação 29.

O bloco 4 corresponde à verificação da condição de parada do algoritmo, que é o número máximo de iterações estabelecido. Se a condição de parada não estiver satisfeita, o algoritmo deve voltar para o bloco 2, caso contrário chega-se ao fim do processo iterativo e a saída do algoritmo são os valores contidos em *gbest*.

Figura 11: Fluxograma básico para o algoritmo PSO clássico.

O PSO clássico é bastante utilizado em problemas de otimização irrestritos, porém não é aplicável a problemas com restrições como é o caso do problema de coordenação de relés. Porém com algumas modificações, ele pode ser utilizado para o problema em questão. Essas modificações são esclarecidas no próximo subitem deste capítulo.

5.3 Modificações no PSO clássico para tratar problemas com restrição

Para tornar o PSO aplicável em um problema de otimização com restrições, três adaptações foram realizadas. Cada uma delas é apresentada na sequência deste tópico.

5.3.1 Inicialização e algoritmo restritivo

Uma das alterações em termos de algoritmo é a inicialização de todas as partículas em uma região factível do espaço de busca, ou seja, ocorre a inicialização aleatória da posição e da velocidade de cada partícula, porém respeitando-se o espaço de busca e as restrições do problema. Dentro do bloco 1 da Figura 11, o algoritmo irá gerar aleatoriamente a posição e a velocidade das partículas, então é feita uma verificação para determinar se a posição e velocidade geradas aleatoriamente respeitam as restrições e o espaço de busca do problema. O processo se repete até que todas as partículas estejam numa região factível do espaço de busca.

Figura 12: Fluxograma do algoritmo restritivo.

Outra modificação realizada foi incorporar ao PSO clássico uma rotina que impedisse o desvio das partículas para regiões de infactibilidade do problema, sendo que para isso adicionou-se um algoritmo restritivo, tal qual utilizado no trabalho de Bernardes (2013). Este algoritmo pode ser representado simplificada pelo fluxograma da Figura 12. O algoritmo verifica para cada partícula se a mesma se encontra fora da região de factibilidade do problema, caso isso ocorra, a partícula tem sua posição atual corrigida para a sua melhor posição (*pbest*) até a dada iteração, além de ter a sua velocidade atual normalizada conforme a Equação 31.

$$v_k^{N_p} = \frac{v_{k-1}^{N_p}}{v_{m\acute{a}x}^{N_p}} \quad (31)$$

Em que $v_{m\acute{a}x}^{N_p}$ é a velocidade máxima permitida para a partícula N_p .

Esse algoritmo restritivo ocorre assim que as velocidades e posteriormente as posições de cada partícula forem atualizadas. Isso pode ser evidenciado na Figura 13, que mostra um fluxograma mais detalhado do algoritmo implementado neste trabalho. Cabe dizer aqui que neste trabalho o critério de parada utilizado foi o número máximo de iterações.

Figura 13: Fluxograma do algoritmo PSO modificado.

5.3.2 Penalização da função objetivo

O problema de coordenação de relés possui várias restrições, além de ser um problema não linear por conta da equação utilizada para o cálculo do tempo de atuação, em que a corrente de *pick-up* é elevada a uma potência (ver Equação 2). Geralmente para tratar problemas não lineares e com restrições, costuma-se utilizar funções de penalidade.

Métodos usando essa característica transformam um problema com restrições em um único problema sem restrições ou em uma sequência de problemas sem restrições. As restrições são adicionadas na função objetivo com um parâmetro de peso para cada uma, de forma que ocorra a penalização para qualquer violação de restrição (BAZARAA, SHERALI e SHETTY, 1993).

Para melhor compreensão dessa penalização na função objetivo, tome como exemplo o caso simples mostrado na Equação 32.

$$\begin{aligned} &\min f(x) \\ &\text{s. a. } g_i(x) \leq 0, i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (32)$$

Em que, $f(x)$ é a função objetivo a ser minimizada e $g_i(x)$ são as n restrições do problema. Para que a penalização seja incorporada, define-se então uma nova função objetivo, tal como mostrada na Equação 33.

$$f'(x) = f(x) + \mu \cdot \alpha(x) \quad (33)$$

Na qual, $f'(x)$ é a nova função objetivo; μ é o fator de peso das penalidades; $\alpha(x)$ é uma função de penalidade para as restrições.

Na Equação 33, a função penalidade terá valor anulado se todas as restrições forem respeitadas, caso contrário, ela terá um valor positivo fazendo com que a função objetivo tenha um acréscimo em seu valor. No presente trabalho a função de penalidade utilizada é da forma mostrada na Equação 34.

$$\alpha(x) = \sum_{i=1}^n \{\max[0, g_i(x)]\}^P \quad (34)$$

Em que, n é o número de restrições; P é um expoente positivo. A partir desta equação, é possível notar que se a restrição $g_i(x)$ for atendida, ou seja, se $g_i(x) \leq 0$ a função penalidade será anulada. Porém se $g_i(x) > 0$, a função penalidade acrescerá um valor na função objetivo.

A partir dessa modificação apresentada, o problema de otimização incorporando a penalização na função objetivo se torna do formato mostrado em (35).

$$Obj = \min \left(\sum_{i=1}^{n1} T_{RDS_i} + \sum_{i=1}^{n2} T_{RD_i} + \mu \cdot (\alpha1 + \alpha2 + \alpha3 + \alpha4 + \alpha5) \right. \\ \left. + \alpha6 + \alpha7 + \alpha8 + \alpha9 + \alpha10 \right) \quad (35)$$

Sendo que,

A partir de

$$T_{RDS_j}^{F1} - T_{RDS_i}^{F1} \geq ITC_1 \rightarrow ITC_1 + T_{RDS_i}^{F1} - T_{RDS_j}^{F1} \leq 0$$

Chega – se a:

$$g1_k = ITC_1 + T_{RDS_i}^{F1} - T_{RDS_j}^{F1}$$

em que k é o índice referente ao par de relés em questão

$$\therefore \alpha 1 = \sum_{k=1}^{k1} \{\text{máx}[0, g1_k]\}^P$$

em que $k1$ é a quantidade de pares $RDS_i - RDS_j$

Analogamente:

$$g2_k = ITC_1 + T_{RDS_i}^{F3} - T_{RDS_j}^{F3}$$

$$\alpha 2 = \sum_{k=1}^{k1} \{\text{máx}[0, g2_k]\}^P$$

$$g3_k = ITC_2 + T_{RD_{z1}i} - T_{RDS_j}^{F1}$$

$$\alpha 3 = \sum_{k=1}^{k2} \{\text{máx}[0, g3_k]\}^P$$

em que $k2$ é a quantidade de pares $RD_i - RDS_j$

$$g4_k = ITC_2 + T_{RD_{z2}i} - T_{RDS_j}^{F2}$$

$$\therefore \alpha 4 = \sum_{k=1}^{k2} \{\text{máx}[0, g4_k]\}^P$$

$$T_{RD_{z2}i} \geq T_{RD_{z2} \text{ mín } i} \rightarrow T_{RD_{z2} \text{ mín } i} - T_{RD_{z2}i} \leq 0 \therefore g5_i = T_{RD_{z2} \text{ mín } i} - T_{RD_{z2}i}$$

$$\therefore \alpha 5 = \sum_{i=1}^{n2} \{\text{máx}[0, g5_i]\}^P$$

$$T_{RD_{z2}i} \leq T_{RD_{z2} \text{ máx } i} \rightarrow g6_i = T_{RD_{z2}i} - T_{RD_{z2} \text{ máx } i}$$

$$\therefore \alpha 6 = \sum_{i=1}^{n2} \{\text{máx}[0, g6_i]\}^P$$

$$MT_i \geq MT_{\text{mín } i} \rightarrow g7_i = MT_{\text{mín } i} - MT_i$$

$$\therefore \alpha 7 = \sum_{i=1}^{n1} \{\text{máx}[0, g7_i]\}^P$$

$$MT_i \leq MT_{\text{máx } i} \rightarrow g8_i = MT_i - MT_{\text{máx } i}$$

$$\therefore \alpha 8 = \sum_{i=1}^{n1} \{\max[0, g_{8i}]\}^P$$

$$I_{pick-up_i} \geq I_{pick-up_{\min i}} \rightarrow g_{9i} = I_{pick-up_{\min i}} - I_{pick-up_i}$$

$$\therefore \alpha 9 = \sum_{i=1}^{n1} \{\max[0, g_{9i}]\}^P$$

$$I_{pick-up_i} \leq I_{pick-up_{\max i}} \rightarrow g_{10i} = I_{pick-up_i} - I_{pick-up_{\max i}}$$

$$\therefore \alpha 10 = \sum_{i=1}^{n2} \{\max[0, g_{10i}]\}^P$$

5.4 Codificação dos vetores de posição do PSO

Neste trabalho, o vetor posição das partículas foi codificado da maneira mostrada na Figura 14. Neste vetor, as posições iniciais são ocupadas com as correntes de ajustes para cada relé a serem determinadas, em seguida os múltiplos de tempo e finalmente o tempo de segunda zona para todos os relés também. A dimensão (D) deste vetor varia de acordo com o número de relés, por exemplo, se existem 10 relés em um sistema, então a dimensão deste vetor será de 30 posições.

Figura 14: Codificação do vetor de posições das partículas.

Capítulo 6

Resultados

No intuito de testar a metodologia exposta anteriormente para obter os ajustes otimizados dos relés de distância e direcional de sobrecorrente, dois sistemas foram utilizados. O primeiro é um sistema de transmissão fictício empregado em Leite, Barros e Miranda (2010). O segundo sistema utilizado foi um sistema de transmissão real que está sob concessão da Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista (CTEEP).

Para o Sistema Teste, apenas um teste foi realizado, já que o objetivo principal de aplicar o método nesse sistema era validá-lo para poder utilizá-lo em um sistema maior. No caso do Sistema CTEEP quatro testes foram realizados, basicamente mudando os tipos de curva para os RDS em cada teste e, portanto, alguns parâmetros do algoritmo PSO foram alterados para contemplar essa mudança e com isso permitir ao algoritmo encontrar uma resposta otimizada.

Assim, para os três primeiros testes nesse Sistema CTEEP foram utilizadas exclusivamente as curvas: normal inversa, muito inversa e extremamente inversa. Por fim, no quarto teste para esse sistema, optou-se por deixar livre ao algoritmo a escolha das curvas, sendo assim, as opções deixadas ao algoritmo foram as curvas normal e muito inversa.

Para todos os exemplos que serão demonstrados neste capítulo, apenas faltas trifásicas foram analisadas, portanto considerou-se apenas a proteção de fase. Porém, vale salientar que o método pode ser estendido para a proteção de neutro, desde que as correntes de curto-circuito sejam alteradas, já que elas constituem um dos parâmetros de entrada para o problema.

6.1 Resultados para o Sistema Teste

Esse sistema foi escolhido por dois motivos: primeiramente para testar se o método havia sido implementado corretamente, já que no referido trabalho os autores utilizam uma das variações do PSO, chamada EPSO (*Evolutionary Particle Swarm Optimization*). Portanto, se o método apresentasse resultado satisfatório em comparação ao método utilizado no artigo, um importante passo na validação estaria dado. Em segundo lugar, esse sistema foi escolhido por

ser simples e de fácil modelagem no CAPE¹ (do inglês, *Computer-Aided Protection Engineering*), que foi o *software* utilizado para obter os valores das correntes de curto-circuito necessárias para esse estudo.

O sistema exemplo é constituído por 4 barramentos, 4 linhas, 2 geradores, 8 relés de distância (RD) e 8 relés direcionais de sobrecorrente (RDS). O sistema pode ser visualizado na Figura 15 e seus dados se encontram no Anexo I.

A Tabela 2 mostra as correntes sensibilizadas nos relés principais e seus respectivos relés retaguardas, para um curto-circuito trifásico do tipo *close-in*². A primeira coluna dessa tabela refere-se ao número do relé principal, por isso a notação R_p ; a segunda coluna mostra o valor de corrente que o relé principal enxerga em seus terminais para uma falta trifásica do tipo *close-in* ($I_{close-in P}$); os campos correspondentes à terceira e à quinta colunas devem ser preenchidos com os relés de retaguarda associados ao relé principal, por isso R_{R1} e R_{R2} respectivamente (no caso de não haver relé de retaguarda os campos ficam vazios); a quarta e a sexta colunas são reservadas para o valor da corrente que os respectivos relés de retaguarda enxergam ($I_{close-in R1}$ e $I_{close-in R2}$) e, assim como no caso anterior, se não houver retaguarda não haverá preenchimento nesses campos.

A Tabela 3 mostra as correntes para um curto-circuito trifásico localizado a 80% de distância do relé pertencente à linha a ser protegida. A coluna denominada $I_{80\% P}$ corresponde ao valor da corrente vista pelo relé para uma falta localizada a 80% de seus terminais. As colunas definidas por $I_{80\% R1}$ e $I_{80\% R2}$ correspondem ao valor de corrente visto pelos respectivos relés de retaguarda remota caso exista a proteção de retaguarda. As outras colunas restantes desta tabela são análogas às colunas da Tabela 2.

Finalmente, a Tabela 4 expõe valores de corrente para um curto-circuito trifásico na barra remota, em relação ao relé principal em análise. Nessa tabela as colunas são também bastante similares às Tabelas 2 e 3. As principais mudanças estão: na coluna denominada $I_{B_rem P}$, a qual corresponde ao valor de corrente correspondente ao curto-circuito aplicado na barra remota do relé principal; nas colunas denominadas $I_{B_rem R1}$ e $I_{B_rem R2}$, que mostram os valores de corrente para os respectivos relés de retaguarda se houverem.

Para esse sistema todos os relés são considerados do tipo digital e a curva normal inversa foi adotada para todos os relés direcionais de sobrecorrente. O sistema em questão é formulado seguindo o que foi apresentado nos Capítulos 4 e 5, portanto o problema de otimização para encontrar os ajustes dos relés (corrente de *pick-up* - $I_{pick-up i}$, múltiplo de tempo - MT_i e tempo

¹ O CAPE é um *software* desenvolvido e comercializado pela *Electrocon*. Ele constitui em uma ampla ferramenta para engenheiros responsáveis pela proteção de sistemas de transmissão e distribuição, e tem sido utilizado por algumas concessionárias tais como a CTEEP. Maiores informações sobre o *software* e a companhia podem ser encontradas em: <http://www.electrocon.com>.

² A falta do tipo *close-in* foi considerada como um curto-circuito aplicado a uma distância de 1% (referente ao tamanho da linha) do ponto de instalação do relé.

de segunda zona – $T_{RD_{zz}i}$) é equacionado da maneira mostrada em (36), mostrando a função objetivo e todas as restrições para esse caso.

Figura 15: Sistema de transmissão simples fictício. Adaptado de (LEITE, BARROS e MIRANDA, 2010).

Tabela 2: Valores de curtos-circuitos trifásicos para uma falta do tipo close-in.

R_P	$I_{close-in P} [A]$	R_{R1}	$I_{close-in R1} [A]$	R_{R2}	$I_{close-in R2} [A]$
1	6476,2	-	-	-	-
2	2705,2	5	1200,2	7	1505,1
3	4879,2	7	1505,1	1	3381,2
4	4576,6	5	1200,2	1	3381,2
5	9648,3	8	1008,4	-	-
6	9451,2	3	804,1	-	-
7	3502,9	6	3502,9	-	-
8	1764,2	4	1764,2	-	-

Tabela 3: Valores de curtos-circuitos trifásicos para uma falta do aplicada a uma distância de 80%.

R_p	$I_{80\% P} [A]$	R_{R1}	$I_{80\% R1} [A]$	R_{R2}	$I_{80\% R2} [A]$
1	3742,1	-	-	-	-
2	2061,7	5	914,7	7	1147,1
3	1261,0	7	165,3	1	1415,0
4	2049,3	5	285,3	1	1764,0
5	1575,0	8	822,7	-	-
6	4023,9	3	35,9	-	-
7	1751,6	6	1751,6	-	-
8	1192,9	4	1192,9	-	-

Tabela 4: Valores de curtos-circuitos trifásicos para uma falta aplicada na barra remota.

R_p	$I_{B_rem P} [A]$	R_{R1}	$I_{B_rem R1} [A]$	R_{R2}	$I_{B_rem R2} [A]$
1	3381,2	-	-	-	-
2	1946,6	5	863,6	7	1083,0
3	807,6	7	1000,0	1	1807,5
4	1765,5	5	125,7	1	1641,4
5	1202,0	8	1499,8	-	-
6	3505,2	3	124,3	-	-
7	1506,3	6	1506,3	-	-
8	1009,5	4	1009,5	-	-

$$\begin{aligned}
\min f(I_{pick-up_i}, MT_i, T_{RD_{z2i}}) = & T_{RDS_1}^{close-in} + T_{RDS_2}^{close-in} + T_{RDS_3}^{close-in} + \\
& T_{RDS_4}^{close-in} + T_{RDS_5}^{close-in} + T_{RDS_6}^{close-in} + T_{RDS_7}^{close-in} + T_{RDS_8}^{close-in} + \\
& T_{RD_{z21}} + T_{RD_{z22}} + T_{RD_{z23}} + T_{RD_{z24}} + T_{RD_{z25}} + T_{RD_{z26}} + T_{RD_{z27}} + T_{RD_{z28}}
\end{aligned} \quad (36)$$

Sujeito a:

$$\begin{aligned}
[1] T_{RDS_5}^{close-in} - T_{RDS_2}^{close-in} &\geq ITC_1 & [4] T_{RDS_7}^{close-in} - T_{RDS_3}^{close-in} &\geq ITC_1 \\
[2] T_{RDS_7}^{close-in} - T_{RDS_2}^{close-in} &\geq ITC_1 & [5] T_{RDS_1}^{close-in} - T_{RDS_4}^{close-in} &\geq ITC_1 \\
[3] T_{RDS_1}^{close-in} - T_{RDS_3}^{close-in} &\geq ITC_1 & [6] T_{RDS_5}^{close-in} - T_{RDS_4}^{close-in} &\geq ITC_1
\end{aligned}$$

- [7] $T_{RDS_8}^{close-in} - T_{RDS_5}^{close-in} \geq ITC_1$
- [8] $T_{RDS_3}^{close-in} - T_{RDS_6}^{close-in} \geq ITC_1$
- [9] $T_{RDS_6}^{close-in} - T_{RDS_7}^{close-in} \geq ITC_1$
- [10] $T_{RDS_4}^{close-in} - T_{RDS_8}^{close-in} \geq ITC_1$
- [11] $T_{RDS_5}^{b.rem} - T_{RDS_2}^{b.rem} \geq ITC_1$
- [12] $T_{RDS_7}^{b.rem} - T_{RDS_2}^{b.rem} \geq ITC_1$
- [13] $T_{RDS_1}^{b.rem} - T_{RDS_3}^{b.rem} \geq ITC_1$
- [14] $T_{RDS_7}^{b.rem} - T_{RDS_3}^{b.rem} \geq ITC_1$
- [15] $T_{RDS_1}^{b.rem} - T_{RDS_4}^{b.rem} \geq ITC_1$
- [16] $T_{RDS_5}^{b.rem} - T_{RDS_4}^{b.rem} \geq ITC_1$
- [17] $T_{RDS_8}^{b.rem} - T_{RDS_5}^{b.rem} \geq ITC_1$
- [18] $T_{RDS_3}^{b.rem} - T_{RDS_6}^{b.rem} \geq ITC_1$
- [19] $T_{RDS_6}^{b.rem} - T_{RDS_7}^{b.rem} \geq ITC_1$
- [20] $T_{RDS_4}^{b.rem} - T_{RDS_8}^{b.rem} \geq ITC_1$
- [21] $T_{RDS_1}^{close-in} - T_{RD_{1z1}} \geq ITC_2$
- [22] $T_{RDS_2}^{close-in} - T_{RD_{2z1}} \geq ITC_2$
- [23] $T_{RDS_3}^{close-in} - T_{RD_{3z1}} \geq ITC_2$
- [24] $T_{RDS_4}^{close-in} - T_{RD_{4z1}} \geq ITC_2$
- [25] $T_{RDS_5}^{close-in} - T_{RD_{5z1}} \geq ITC_2$
- [26] $T_{RDS_6}^{close-in} - T_{RD_{6z1}} \geq ITC_2$
- [27] $T_{RDS_7}^{close-in} - T_{RD_{7z1}} \geq ITC_2$
- [28] $T_{RDS_8}^{close-in} - T_{RD_{8z1}} \geq ITC_2$
- [29] $T_{RDS_1}^{80\%} - T_{RD_{1z2}} \geq ITC_2$
- [30] $T_{RDS_2}^{80\%} - T_{RD_{2z2}} \geq ITC_2$
- [31] $T_{RDS_3}^{80\%} - T_{RD_{3z2}} \geq ITC_2$
- [32] $T_{RDS_4}^{80\%} - T_{RD_{4z2}} \geq ITC_2$
- [33] $T_{RDS_5}^{80\%} - T_{RD_{5z2}} \geq ITC_2$
- [34] $T_{RDS_6}^{80\%} - T_{RD_{6z2}} \geq ITC_2$
- [35] $T_{RDS_7}^{80\%} - T_{RD_{7z2}} \geq ITC_2$
- [36] $T_{RDS_8}^{80\%} - T_{RD_{8z2}} \geq ITC_2$
- [37] $I_{pmin} \leq I_{pick-up_1} \leq I_{pmax}$
- [38] $I_{pmin} \leq I_{pick-up_2} \leq I_{pmax}$
- [39] $I_{pmin} \leq I_{pick-up_3} \leq I_{pmax}$
- [40] $I_{pmin} \leq I_{pick-up_4} \leq I_{pmax}$
- [41] $I_{pmin} \leq I_{pick-up_5} \leq I_{pmax}$
- [42] $I_{pmin} \leq I_{pick-up_6} \leq I_{pmax}$
- [43] $I_{pmin} \leq I_{pick-up_7} \leq I_{pmax}$
- [44] $I_{pmin} \leq I_{pick-up_8} \leq I_{pmax}$
- [45] $MT_{min} \leq MT_1 \leq MT_{max}$
- [46] $MT_{min} \leq MT_2 \leq MT_{max}$
- [47] $MT_{min} \leq MT_3 \leq MT_{max}$
- [48] $MT_{min} \leq MT_4 \leq MT_{max}$
- [49] $MT_{min} \leq MT_5 \leq MT_{max}$
- [50] $MT_{min} \leq MT_6 \leq MT_{max}$
- [51] $MT_{min} \leq MT_7 \leq MT_{max}$
- [52] $MT_{min} \leq MT_8 \leq MT_{max}$
- [53] $T_{RD_{z2min}} \leq T_{RD_{z21}} \leq T_{RD_{z2max}}$
- [54] $T_{RD_{z2min}} \leq T_{RD_{z22}} \leq T_{RD_{z2max}}$
- [55] $T_{RD_{z2min}} \leq T_{RD_{z23}} \leq T_{RD_{z2max}}$
- [56] $T_{RD_{z2min}} \leq T_{RD_{z24}} \leq T_{RD_{z2max}}$
- [57] $T_{RD_{z2min}} \leq T_{RD_{z25}} \leq T_{RD_{z2max}}$
- [58] $T_{RD_{z2min}} \leq T_{RD_{z26}} \leq T_{RD_{z2max}}$
- [59] $T_{RD_{z2min}} \leq T_{RD_{z27}} \leq T_{RD_{z2max}}$
- [60] $T_{RD_{z2min}} \leq T_{RD_{z28}} \leq T_{RD_{z2max}}$

As restrições de [1] a [36] são calculadas no algoritmo, usando-se os dados apresentados nas tabelas 1, 2, 3 e 4, além da Equação 2. Nas restrições de [21] a [28], $T_{RD_{z1}}$ foi adotado 0,02 segundos para todos os relés.

Para o sistema exemplo utilizado, o maior valor de corrente nominal que compõe os elementos do vão (*bay*) do relé (disjuntor, TC, linha e assim por diante) é de 500 A. Logo, para

garantir que o ajuste do relé não fique abaixo deste valor fazendo com que o mesmo atue indevidamente, um fator de sobrecarga de 20% foi considerado, por isso utilizou-se $I_{p_{min}} = 600$ A, para todos os relés. O limitante superior da corrente de disparo foi utilizado como o valor mínimo entre o valor de um curto-circuito trifásico na barra remota do relé e o valor máximo de ajuste disponível no relé. Com isso, busca-se garantir a sensibilidade do relé para faltas na barra remota.

Nas restrições de [45] a [52] utilizou-se $MT_{min} = 0,01$ e $MT_{max} = 1,0$ para todos os relés. Além disso, para as restrições de [53] a [60] utilizou-se $T_{RD_{z2} min} = 0,3$ s e $T_{RD_{z2} max} = 0,8$ s para todos os relés. Finalmente, os intervalos de coordenação ITC_1 e ITC_2 foram adotados 0,3 e 0,2 segundo respectivamente.

O algoritmo PSO para determinar os ajustes dos relés foi implementado em MATLAB® e os parâmetros utilizados para esse algoritmo estão mostrados na Tabela 5. Nesta tabela, os parâmetros 7 e 8 estão em função de x_{min} , que é um vetor com os valores mínimos possíveis para os ajustes a serem encontrados. Para este teste o vetor tem dimensão 1 x 24 (8 correntes, 8 múltiplos de tempo e 8 tempos de segunda zona). Estes parâmetros foram obtidos através de um processo de tentativa e erro, no qual vários parâmetros diferentes foram testados e a melhor configuração foi escolhida baseada no menor tempo de atuação total dos relés, esta configuração é a demonstrada na Tabela 5.

Tabela 5: Parâmetros utilizados no algoritmo PSO para o sistema teste.

Parâmetro	Valor
1. Número de iterações máximo (k_{max})	5000
2. Número de partículas (N)	500
3. Coeficiente de inércia mínimo (ω_{min})	0,3
4. Coeficiente de inércia máximo (ω_{max})	0,9
5. Parâmetro cognitivo (C_1)	2,0
6. Parâmetro social (C_2)	2,0
7. Velocidade mínima para a partícula ($v_{min}^{N_p}$)	$-0,1 \cdot x_{min}$
8. Velocidade máxima para a partícula ($v_{max}^{N_p}$)	$0,1 \cdot x_{min}$
9. Fator de peso das penalidades (μ)	50
10. Expoente da função de penalização (P)	1

Além disso, para a melhor configuração de parâmetros, o algoritmo foi executado 50 vezes e o melhor dos resultados é apresentado na Tabela 6, a qual contém os ajustes obtidos

para cada relé bem como o tempo de atuação para cada RDS e o tempo de atuação total de todos os relés.

Tabela 6: Ajustes encontrados pelo algoritmo para os relés RD e RDS .

RDS	Tempo de atuação (s)	MT_i	$I_{pick-up_i}$ (A)	RD	$T_{RD_{z2i}}$ (s)
1	0,61900	0,21092	630,06	1	0,31704
2	0,39121	0,07111	770,06	2	0,30027
3	0,22010	0,06725	600,88	3	0,30080
4	0,56406	0,14310	799,22	4	0,30055
5	0,22045	0,08984	601,97	5	0,30110
6	0,53084	0,19560	764,25	6	0,30054
7	0,56824	0,13933	647,92	7	0,30317
8	0,95479	0,10880	799,58	8	0,30160
Somatório do tempo de atuação dos relés (s)			6,654		

A Figura 16 evidencia a minimização da função objetivo através das 5000 iterações realizadas pelo algoritmo PSO. O tempo de simulação para este caso foi de aproximadamente 9,46 minutos.

Figura 16: Evolução do processo de minimização da função objetivo.

A Figura 17 mostra um exemplo de coordenograma, no qual está evidenciado o par RDS-7 (retaguarda local) e RDS-6 (retaguarda remota), além do RD-7 (principal). Nesta figura,

os pontos em azul indicam os valores de correntes correspondentes aos curtos-circuitos utilizados em cada uma das curvas inversas. Os pontos em azul em forma de losango representam os curtos-circuitos do tipo *close-in*, os pontos em “x” representam os curtos-circuitos a 80% da linha e, finalmente, os círculos ilustram os curtos-circuitos na barra remota. Constatou-se que os intervalos de coordenação foram respeitados: para o caso do curto-circuito *close-in* o valor de ITC encontrado ficou ligeiramente acima de 0,3 segundo; na situação do curto-circuito na barra remota, o ITC apresentou mais folga, ficando em torno dos 0,8 segundo. Portanto, ambos respeitaram uma das restrições do problema que era obter um ITC superior a 0,3 segundo para o caso de coordenação entre os RDS.

Observando ainda a Figura 16 e comparando o ponto onde se inicia a segunda zona do rele de distância pode-se notar que os outros intervalos de coordenação (entre o RD e os RDS) foram respeitados: o intervalo entre o tempo de atuação de segunda zona do RD-7 e o tempo de atuação do RDS-7 ficou por volta dos 0,6 segundo; além disso, o intervalo entre o RD-7 e o RDS-6 foi da ordem de 1,3 segundos. Portanto, ambos foram maiores do que o mínimo estabelecido, que foi de 0,2 segundo.

Figura 17: Coordenograma para os relés RD-7, RDS-6 e RDS-7.

O caso dos relés apresentados na Figura 17 retrata a situação em que os relés RDS enxergam os mesmos valores de corrente, por isso na Figura 18, está outro exemplo de coordenograma, desta vez para um par em que os relés não enxergam os mesmos valores de corrente. Inicialmente vê-se a intersecção das curvas inversas dos relés de sobrecorrente, podendo indicar

uma possível descoordenação entre eles. Porém, estudando os tempos de atuação como realizado para os relés da Figura 17, constata-se que os intervalos de coordenação foram novamente respeitados em todos os casos.

Os relés mostrados na Figura 18 são o RD-4 (relé principal), RDS-4 (retaguarda local) e RDS-1 (retaguarda remota). Para o caso do curto-circuito do tipo *close-in* o intervalo de coordenação entre os RDS foi de aproximadamente 0,4 segundo. Para o curto-circuito aplicado na barra remota, o valor mínimo estabelecido para o intervalo de coordenação também foi respeitado, já que nesse caso o valor ficou por volta dos 0,3 segundo. Analisando a coordenação entre a segunda zona do RD-4 e o RDS-4, o intervalo de coordenação foi de aproximadamente 0,7 segundo, já no caso do RD-4 com RDS-1 o valor foi de aproximadamente 1,1 segundos. Portanto, pode-se dizer que mesmo as curvas se interceptando, estes relés estão coordenados. A mesma análise realizada nesses exemplos foi feita para todos os outros relés e pode-se afirmar que os outros pares de relés também atingiram a coordenação entre eles, isso também pôde ser constatado já que nenhuma das restrições desse problema foi violada.

Figura 18: Coordenograma para os relés RD-4, RDS-4 e RDS-1.

6.2 Resultados para o Sistema CTEEP

No intuito de testar a metodologia em um sistema maior, expandiu-se o estudo aplicando o algoritmo num sistema elétrico real, o qual está sob concessão da Companhia de Transmis-

são de Energia Elétrica Paulista. Este sistema estudado, que pode ser visualizado na Figura 19, é composto por 19 barras, 11 linhas de transmissão, 22 relés de distância e 22 relés direcionais de sobrecorrente.

No banco de dados em formato Anafas (Análise de Faltas Simultâneas)³, na versão 1109B, disponibilizada pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), o sistema brasileiro completo possui 10016 barras e 5611 linhas. Porém utilizou-se um sistema reduzido, obtido por meio da equivalência, que foi possibilitado pelo *software* CAPE. Essa equivalência é representada pelos trechos em coloração vermelha na Figura 19. Os dados deste sistema elétrico podem ser encontrados no Anexo II.

Através do CAPE foi possível obter os valores de corrente que sensibilizam cada relé deste sistema. Os curtos-circuitos calculados foram todos do tipo trifásico franco e aplicados em três pontos, são eles: *close-in*, a 80 % da linha a ser protegida e na barra remota. Os valores de corrente obtidos, bem como os pares de relés (primário/retaguarda) são mostrados na Tabela 7.

Ainda em relação à Tabela 7, os pares de relés marcados com “*” não foram considerados nas restrições, já que os valores de corrente de falta observados nos relés de retaguarda são inferiores ao valor mínimo definido para as correntes de ajustes dos respectivos relés (terceira coluna da Tabela 8).

Assim como no caso do teste da subseção 6.1, nesse sistema todos os relés foram considerados digitais bem como a curva normal inversa foi utilizada em todos os RDS. Devido ao grande número de restrições que o problema em questão apresenta, elas não serão demonstradas como feito no item anterior, porém em ambos os testes os mesmos procedimentos foram seguidos para a definição da função objetivo e das suas restrições.

Para o sistema em questão, os valores dos limitantes inferiores de corrente para cada relé (máxima corrente de carga permitida) foram fornecidos pela CTEEP, estes valores estão apresentados na Tabela 8. Além disso, um fator de sobrecarga de 20 % foi admitido e também está demonstrado na Tabela 8. Os valores considerando o fator de sobrecarga entraram como restrições para o algoritmo.

Da mesma maneira proposta no caso anterior, para o limitante superior da corrente de disparo utilizou-se o valor mínimo entre o curto-circuito na barra remota do relé e o valor máximo de ajuste disponível no relé.

Para os múltiplos de tempo, os valores mínimo e máximo adotados foram: $MT_{\min} = 0,01$ e $MT_{\max} = 1,0$ para todos os relés. Além disso, o intervalo utilizado para o tempo de segunda zona dos RD foi: $T_{RD\ z2\ \min} = 0,3\ s$ e $T_{RD\ z2\ \max} = 0,8\ s$. Como dito anteriormente, o tipo

³ A base de dados em formato Anafas, desenvolvido pelo Centro de Pesquisa de Energia Elétrica (Cepel) é disponibilizada pelo ONS em:

http://www.ons.org.br/operacao/base_dados_curtoc_referencia.aspx#dados

Esta base de dados pode sofrer alterações sem aviso prévio a qualquer instante.

de curva utilizado para todos os relés foi a curva normal inversa (NI). Finalmente, os intervalos de coordenação ITC_1 e ITC_2 foram adotados iguais a 0,2 e 0,1 segundo respectivamente.

Os parâmetros para o PSO utilizado nesse teste estão evidenciados na Tabela 9. Alguns parâmetros, tais como o número máximo de iterações, o número de partículas e o fator de peso das penalidades, foram escolhidos num processo de tentativa e erro, no qual diferentes valores para esses parâmetros foram utilizados, as respostas para cada um foram analisadas e os parâmetros que proporcionaram a melhor resposta foram escolhidos e estão apresentados nesta tabela. Os outros parâmetros desta tabela foram adotados em conformidade com a literatura da área. O vetor x_{min} nesse caso tem a dimensão 1 x 66 já que são 22 ajustes para corrente de disparo, 22 para o múltiplo de tempo e 22 ajustes de tempo de segunda zona do relé de distância.

Figura 19: Diagrama unifilar do sistema de transmissão real usado no estudo (Sistema CTEEP).

Tabela 7: Pares de relés primário/retaguarda e seus respectivos valores de curto-circuito para os diferentes locais de faltas (close-in, 80% da linha e barra remota).

R_P	R_R	$I_{close-in P} [A]$	$I_{close-in R} [A]$	$I_{80 \% P} [A]$	$I_{80 \% R} [A]$	$I_{B. rem. P} [A]$	$I_{B. rem. R} [A]$
1	4	3273,6	2250,4	1167,1	372,1	2010,1	1489,5
2	3	10392,2	472,5*	2802,5	1721,2	2976,6	235,4*
2	6	10392,2	1755,9	2802,5	799,8	2976,6	485,4
2	10	10392,2	2089,1	2802,5	951,5	2976,6	577,5
2	12	10392,2	1660,4	2802,5	756,3	2976,6	459*
2	14	10392,2	1660,4	2802,5	756,3	2976,6	459*
3	2	3273,6	2250,4	1167,1	372,1	2010,1	1489,5
4	1	10392,2	472,5*	2802,5	1713,7	2976,6	235,4*
4	6	10392,2	1755,9	2802,5	800,2	2976,6	485,4
4	10	10392,2	2089,1	2802,5	952,1	2976,6	577,5
4	12	10392,2	1660,4	2802,5	756,7	2976,6	459*
4	14	10392,2	1660,4	2802,5	756,7	2976,6	459*
5	1	9105,6	472,5*	2878,6	172,3	2603,9	131,5*
5	3	9105,6	472,5*	2878,6	172,3	2603,9	131,5*
5	10	9105,6	2089,1	2878,6	350,1	2603,9	648,3
5	12	9105,6	1660,4	2878,6	592,1	2603,9	464,2*
5	14	9105,6	1660,4	2878,6	592,1	2603,9	464,2*
6	8	4564,3	3783,4	2097,7	1674,6	2046,7	1710,9
7	5	3203,6	2420,7	1923,9	1367,4	2058,4	1585
8	9	15685	1665,9	4483,7	35,1	3963,4	497
9	1	8783,8	472,5*	2277,7	169,1	2147,5	112,2*
9	3	8783,8	472,5*	2277,7	169,1	2147,5	112,2*
9	6	8783,8	1755,9	2277,7	150,6	2147,5	474,5
9	12	8783,8	1660,4	2277,7	557,5	2147,5	396,8*
9	14	8783,8	1660,4	2277,7	557,5	2147,5	396,8*
10	7	15625,5	1599,3	2666,5	647,8	2391,5	290*
11	1	9195,5	472,5*	4171,8	401,1	7157,1	318,4*
11	3	9195,5	472,5*	4171,8	401,1	7157,1	318,4*
11	6	9195,5	1755,9	4171,8	1487,2	7157,1	1184,2
11	10	9195,5	2089,1	4171,8	1768,5	7157,1	1409,2
11	14	9195,5	1660,4	4171,8	2210,4	7157,1	2076,5
12	13	6825,2	3210,7	2651,1	600,5	6486,5	3936
12	15	6825,2	1724,1	2651,1	1549	6486,5	1217,2
12	19	6825,2	1494,8	2651,1	1343,8	6486,5	1054,9
13	1	9195,5	472,5*	4171,8	401,1	7157,1	318,4*
13	3	9195,5	472,5*	4171,8	401,1	7157,1	318,4*
13	6	9195,5	1755,9	4171,8	1487,2	7157,1	1184,2
13	10	9195,5	2089,1	4171,8	1768,5	7157,1	1409,2
13	12	9195,5	1660,4	4171,8	2210,4	7157,1	2076,5
14	11	6825,2	3210,7	2651,1	600,5	6486,5	3936
14	15	6825,2	1724,1	2651,1	1549	6486,5	1217,2
14	19	6825,2	1494,8	2651,1	1343,8	6486,5	1054,9
15	17	5937,3	5373,7	2115,1	1868,3	2009,3	1825,4

R_P	R_R	$I_{close-in P} [A]$	$I_{close-in R} [A]$	$I_{80 \% P} [A]$	$I_{80 \% R} [A]$	$I_{B. rem. P} [A]$	$I_{B. rem. R} [A]$
16	11	8314,4	3210,7	2417,3	1096,6	2214,9	835,2
16	13	8314,4	3210,7	2417,3	1096,6	2214,9	835,2
16	19	8314,4	1494,8	2417,3	82,4	2214,9	442,1*
17	22	11851	1570,2	6041,3	612,6	5587,1	848
18	16	2559,9	1991,9	1965,5	1480,5	2189,9	1745,3
19	21	4519,7	3736,8	1829,9	1446,1	1770,5	1475,5
20	11	8542,4	3210,7	2376,9	1039,9	2149	789,3
20	13	8542,4	3210,7	2376,9	1039,9	2149	789,3
20	15	8542,4	1724,1	2376,9	163,5	2149	473,7*
21	18	12088,4	1807,6	4350,7	380,7	3909,9	656,1
22	20	2762,3	1972,3	1806,9	1211	1940,4	1420,5

Tabela 8: Valores dos limitantes inferiores de corrente para cada relé.

Relé	Máxima corrente permitida [A]	Valor corrigido (fator de sobrecarga = 120%) [A]
1	524	628,8
2	524	628,8
3	524	628,8
4	524	628,8
5	289	346,8
6	289	346,8
7	289	346,8
8	289	346,8
9	289	346,8
10	289	346,8
11	448	537,6
12	448	537,6
13	448	537,6
14	448	537,6
15	480	576
16	480	576
17	300	360
18	300	360
19	480	576
20	480	576
21	450	540
22	450	540

Tabela 9: Parâmetros do PSO utilizado no sistema de transmissão real, utilizando a curva normal inversa.

Parâmetro	Valor
1. Número de iterações máximo ($k_{m\acute{a}x}$)	2000
2. Número de partículas (N)	500
3. Coeficiente de inércia mínimo ($\omega_{m\acute{i}n}$)	0,3
4. Coeficiente de inércia máximo ($\omega_{m\acute{a}x}$)	0,9
5. Parâmetro cognitivo (C_1)	2,0
6. Parâmetro social (C_2)	2,0
7. Velocidade mínima para a partícula ($v_{m\acute{i}n}^{Np}$)	$-0,1 \cdot x_{m\acute{i}n}$
8. Velocidade máxima para a partícula ($v_{m\acute{a}x}^{Np}$)	$0,1 \cdot x_{m\acute{i}n}$
9. Fator de peso das penalidades (μ)	50
10. Expoente da função de penalização (P)	1

Após a execução do algoritmo obtiveram-se os ajustes para cada relé, os quais estão apresentados na Tabela 10. Assim como no teste anterior, para este caso o algoritmo também foi executado 50 vezes e a melhor solução é apresentada aqui.

Tabela 10: Ajustes obtidos pelo algoritmo para os relés RD e RDS, usando-se curva normal inversa.

RDS	Tempo de atuação (s)	MT_i	$I_{pick-up\ i}$ (A)	RD	$T_{RD\ z2\ i}$ (s)
1	0,23375	0,05168	713,01	1	0,30000
2	0,29522	0,11941	661,66	2	0,31198
3	0,22448	0,05379	628,80	3	0,30000
4	0,40708	0,16446	663,75	4	0,30000
5	0,60090	0,28951	348,26	5	0,31455
6	0,62624	0,23154	366,01	6	0,30000
7	0,48995	0,15724	355,86	7	0,31457
8	0,53997	0,30267	358,91	8	0,30441
9	0,66436	0,31185	364,43	9	0,30998
10	0,49300	0,27572	360,50	10	0,32062
11	0,48125	0,19735	564,14	11	0,30000
12	0,39616	0,13908	619,78	12	0,30052
13	0,52190	0,21782	537,60	13	0,33561
14	0,38397	0,13564	610,81	14	0,30828
15	0,30091	0,09664	658,51	15	0,30000

RDS	Tempo de atuação (s)	MT_i	$I_{pick-up_i}$ (A)	RD	$T_{RD_{z2i}}$ (s)
16	0,27636	0,10255	660,79	16	0,30000
17	0,45642	0,23597	360,00	17	0,30000
18	0,43896	0,12521	361,36	18	0,30000
19	0,26294	0,07342	664,37	19	0,30000
20	0,27130	0,10166	662,65	20	0,30000
21	0,33109	0,14963	562,57	21	0,30000
22	0,41057	0,08832	626,55	22	0,30000
Somatório do tempo de atuação dos relés (s)			16,267		

Na Figura 20 o gráfico de minimização da função objetivo é apresentado. O valor de 16,267 segundos é encontrado por volta da iteração de número 1100. O tempo de processamento foi de aproximadamente 33,94 minutos.

A Figura 21 mostra um exemplo de coordenograma, no qual está evidenciado o seguinte esquema de proteção: o relé de distância RD-15 como o elemento de proteção principal (com suas duas zonas de operação), o relé RDS-15 como proteção de retaguarda local e, finalmente, o RDS-17 como retaguarda remota. Assim como no exemplo da subseção 6.1, nesta figura, os pontos em azul indicam os valores de correntes correspondentes aos curtos-circuitos utilizados. Os pontos em forma de losango representam os curtos do tipo *close-in*, os pontos em “x” representam os curtos a 80% da linha e os círculos ilustram os curtos na barra remota. Analisando situação por situação tem-se que:

- o tempo de coordenação entre primeira zona de RD-15 com o relé de retaguarda local RDS-15 para o *close-in* foi de 0,2809 segundo, ou seja, maior do que o ITC estabelecido de 0,1 segundo;
- o ITC entre segunda zona de RD-15 com o RDS-15 para um curto-circuito a 80% da linha foi de 0,2730 segundo, o qual também foi maior do que o ITC estabelecido de 0,1 segundo;
- para um curto-circuito *close-in*, o par RDS-15/RDS-17 obteve um intervalo de coordenação de 0,2938 segundo, respeitando o intervalo de coordenação estabelecido de 0,2 segundo;
- dado um curto-circuito na barra remota, o intervalo de coordenação para o par RDS-15/RDS-17 foi de 0,4013 segundo, atendendo novamente o critério do intervalo de coordenação estabelecido em 0,2 segundo.

Figura 20: Minimização da função objetivo, utilizando-se apenas curvas NI.

Figura 21: Coordenação entre os relés RD-15, RDS-15 e RDS-17, utilizando curva NI.

Esse mesmo estudo de coordenação foi verificado para os outros relés, sendo que para todos os casos a coordenação também foi verificada. Isto pode ser comprovado pelo fato de que o algoritmo não violou nenhuma restrição a ele imposta.

6.3 Aplicação do Método: estudos de caso com o Sistema CTEEP

Esta subseção tem como finalidade mostrar a aplicação do algoritmo PSO no mesmo sistema utilizado na subseção 6.2, representado na Figura 19, porém, neste caso, realizando

alguns estudos de caso analisando o emprego de curva muito inversa, extremamente inversa e o emprego simultâneo de curvas normal inversa e muito inversa, para a coordenação dos relés.

6.3.1 Avaliação do emprego de curvas do tipo muito inversa (MI)

Para este estudo de caso, os valores dos limitantes inferiores de corrente para cada relé foram os mesmos utilizados na subseção 6.2 (ver Tabela 8). Para o limitante superior da corrente de disparo também são válidas as considerações feitas no exemplo anterior.

Os valores máximo e mínimo dos múltiplos de tempo ($MT_{\min}/MT_{\max}$) também se mantiveram inalterados para este caso. Além disso, o intervalo utilizado para o tempo de segunda zona dos RD também foi o mesmo. Os intervalos de coordenação ITC_1 e ITC_2 foram adotados iguais a 0,2 s e 0,1 s respectivamente como no caso anterior.

Os parâmetros utilizados para o PSO nesse teste estão evidenciados na Tabela 11, na qual os parâmetros 1 ($k_{\max}$) e 2 (N) tiveram valores diferentes dos utilizados na subseção 6.2. Diversos valores para esses parâmetros foram testados, e os que propiciaram o melhor resultado são os apresentados nessa tabela. Os melhores ajustes para cada relé encontrados em 50 execuções são apresentados na Tabela 12.

Tabela 11: Parâmetros do PSO utilizado no sistema de transmissão real, utilizando a curva MI.

Parâmetro	Valor
1. Número de iterações máximo ($k_{\max}$)	20000
2. Número de partículas (N)	66
3. Coeficiente de inércia mínimo ($\omega_{\min}$)	0,3
4. Coeficiente de inércia máximo ($\omega_{\max}$)	0,9
5. Parâmetro cognitivo (C_1)	2,0
6. Parâmetro social (C_2)	2,0
7. Velocidade mínima para a partícula ($v_{\min}^{Np}$)	$-0,1 \cdot x_{\min}$
8. Velocidade máxima para a partícula ($v_{\max}^{Np}$)	$0,1 \cdot x_{\min}$
9. Fator de peso das penalidades (μ)	50
10. Expoente da função de penalização (P)	1

Tabela 12: Ajustes para os relés RD e RDS para o sistema em questão, utilizando a curva MI.

RDS	<i>Tempo de atuação (s)</i>	MT_i	$I_{pick-up_i}$ (A)	RD	$T_{RD_{z2i}}$ (s)
1	0,16056	0,05000	629,06	1	0,30000
2	0,37527	0,43041	630,45	2	0,30000
3	0,19351	0,05000	729,39	3	0,30000
4	0,12243	0,11957	732,63	4	0,32668
5	0,12339	0,23084	346,80	5	0,30477
6	0,22856	0,17520	402,20	6	0,30079
7	0,24639	0,12824	399,13	7	0,30000
8	0,13119	0,36701	404,60	8	0,30000
9	0,19965	0,35979	346,80	9	0,30001
10	0,12509	0,40822	346,80	10	0,30000
11	0,17360	0,20707	537,67	11	0,30039
12	0,13831	0,11975	537,89	12	0,30000
13	0,16691	0,18410	578,70	13	0,30000
14	0,16145	0,13987	537,60	14	0,30000
15	0,12669	0,07353	672,00	15	0,30000
16	0,28143	0,27976	576,60	16	0,30000
17	0,21018	0,45679	390,61	17	0,30338
18	0,32698	0,14801	360,00	18	0,30015
19	0,12823	0,05707	644,91	19	0,31201
20	0,20348	0,20689	580,08	20	0,30000
21	0,24659	0,39064	540,00	21	0,30546
22	0,23900	0,06071	623,66	22	0,30000
Somatório do tempo de atuação dos relés (s)			10,963		

A Figura 22 mostra o gráfico de minimização da função objetivo, a qual atinge um valor de 10,963 segundos. O tempo de simulação para este caso foi de 28,83 minutos.

Figura 22: Valor da função objetivo para o estudo utilizando curva MI.

A Figura 23 mostra um coordenograma envolvendo os mesmos relés do caso anterior, ou seja, o RD-15 o RDS-15 e RDS-17. Estudando os mesmos pontos levantados no caso anterior constata-se que:

- o tempo de coordenação entre primeira zona de RD-15 com o RDS-15 para o *close-in* foi de 0,1067 segundo, ou seja, maior do que ITC_2 ;
- o intervalo de coordenação entre a segunda zona de RD-15 e RDS-15 para um curto a 80% da linha foi de 0,1622 segundo, também superior ao valor de ITC_2 ;
- para um curto *close-in*, o par RDS-15/RDS-17 obteve um intervalo de coordenação de 0,3567 segundo, respeitando o ITC_1 ;
- para um curto na barra remota, o ITC para o par RDS-15/RDS-17 foi de 1,1802 segundos, também acima do valor estabelecido de 0,2 segundo.

Dessa forma, vê-se que todos os intervalos de coordenação respeitaram seus valores mínimos, assim como aconteceu no exemplo anterior. Além disso, nenhuma restrição do problema foi violada e o somatório do tempo de atuação total dos relés para este caso foi menor do que o caso utilizando-se curva normal inversa.

Figura 23: Coordenograma para os relés RD-15, RDS-15 e RDS-17, utilizando curvas MI.

6.3.2 Avaliação do emprego de curvas do tipo extremamente inversa (EI)

Neste estudo apenas a curva extremamente inversa será testada na coordenação dos relés do Sistema CTEEP. Novamente todas as considerações, em relação aos limites mínimos e máximos e aos intervalos de coordenação permitidos, foram as mesmas utilizadas nos dois casos mostrados anteriormente nas subseções 6.2 e 6.3.1.

O algoritmo PSO deste teste utiliza os mesmos parâmetros dos casos anteriores exceto pelos que estão apresentados na Tabela 13. Os ajustes encontrados pelo algoritmo para este caso estão mostrados na Tabela 14, onde o tempo de atuação total dos relés está marcado com o sinal “***” pelo fato de que uma das restrições do problema foi violada.

A Figura 24 mostra a função objetivo para este exemplo ao longo das 15000 iterações. O tempo de execução do algoritmo foi de aproximadamente 24,07 minutos. Na Figura 24 pode-se reparar que a função objetivo atinge um valor bem maior do que 19,193 segundos, que é o tempo de atuação total dos relés. Isso ocorre justamente pelo fato de existir uma violação de restrição, já que para qualquer violação, um valor de penalização é acrescido na função objetivo.

Para esse estudo, diferentemente dos outros casos, será mostrado um coordenograma envolvendo os relés RD-10, RDS-10 e RDS-7, já que foi para este caso em que a única violação de restrição foi constatada. Portanto, de forma a ilustrar essa violação de restrição a Figura 24 mostra o coordenograma para os referidos relés.

Tabela 13: Parâmetros utilizados para o PSO.

Parâmetro	Valor
Número de iterações máximo ($k_{máx}$)	15000
Número de partículas (N)	66
Fator de peso das penalidades (μ)	100

Tabela 14: Ajustes para cada relé, utilizando o tipo de curva EI.

RDS	Tempo de atuação (s)	MT_i	$I_{pick-up_i}$ (A)	RD	$T_{RD_{z2i}}$ (s)
1	2,33515	0,74755	634,60	1	0,31858
2	0,33354	0,81189	742,81	2	0,34391
3	0,27579	0,08999	628,80	3	0,30000
4	0,25691	0,86797	630,96	4	0,30137
5	0,27765	0,90764	561,99	5	0,30069
6	0,55805	0,89286	401,87	6	0,30178
7	0,68070	0,71757	346,80	7	0,30151
8	0,22000	0,98928	825,83	8	0,30004
9	0,22012	0,98793	462,91	9	0,30001
10	0,03733	0,87089	361,59	10	0,30000
11	0,27535	0,98902	541,52	11	0,30035
12	0,49634	0,99379	537,60	12	0,30090
13	0,27104	0,98784	537,60	13	0,31582
14	0,51487	0,95595	558,14	14	0,34226
15	0,49640	0,65119	576,83	15	0,30000
16	0,22000	0,56894	576,66	16	0,30174
17	0,23431	0,87984	682,63	17	0,34376
18	1,07051	0,65804	361,39	18	0,33584
19	0,85561	0,64740	576,18	19	0,31326
20	0,27404	0,68764	601,43	20	0,30145
21	0,25936	0,93356	711,13	21	0,31536
22	1,75080	0,55078	540,00	22	0,30000
Somatório do tempo de atuação dos relés (s)				19,193**

Figura 24: Função objetivo (incluindo o valor da penalização pela restrição violada).

Figura 25: Coordenograma envolvendo os relés RD-10, RDS-10 e RDS7.

Na Figura 25, analisando os mesmos pontos em relação aos tempos de coordenação entre os relés, nota-se que:

- o tempo de coordenação entre a primeira zona do RD-10 com o RDS-10 para uma falta *close-in* foi de 0,01733 segundo, ou seja, menor do que $ITC_2=0,1$. Dessa forma, é possível constatar que foi essa restrição violada que por sua vez causou a penalização na função objetivo;
- o ITC entre a segunda zona de RD-10 e RDS-10 para um curto a 80% da linha foi 1,0 segundo, respeitando o valor de ITC_2 estabelecido;

- para o par RDS-10/RDS-7, dado um curto *close-in*, foi obtido um intervalo de coordenação de 2,79567 segundo, respeitando o ITC_I ;
- para um curto na barra remota, o par RDS-10/RDS-7 não foi utilizado como restrição do problema, pelo fato de o relé RDS-7 não estar sensível a esse tipo de falta, já que o mesmo está ajustado em um valor mais elevado (346A, conforme Tabela 14) do que o valor da corrente que passa por ele (290A, segundo a Tabela 7) para esse tipo de curto.

Muito embora tenha ocorrido uma violação de restrição para este estudo de caso, pode-se dizer que essa restrição violada não compromete a qualidade desse resultado. Observa-se que não ocorre perda de seletividade, pois tanto RD-10 quanto RDS-10 irão atuar para um curto-circuito do tipo *close-in*. Apenas o intervalo de tempo muito pequeno entre os dois é o fator negativo, porém mesmo esse intervalo sendo pequeno, RD-10 atuará antes de RDS-10 como era de se esperar.

Além disso, os outros pontos de intervalo de coordenação foram respeitados tanto para este caso, quanto para todos os outros conjuntos de relés, já que apenas essa violação de restrição foi constatada.

6.3.3 Avaliação do emprego simultâneo de curvas NI e MI

Tendo em vista os bons resultados obtidos tanto para a curva normal inversa quanto para a curva muito inversa, decidiu-se realizar outro teste com o algoritmo. Desta vez a escolha do tipo de curva ficou por conta do algoritmo PSO, o qual poderia escolher entre a curva normal inversa e a muito inversa, ou seja, o tipo de curva foi tratado como mais um ajuste a ser encontrado pelo algoritmo.

Com isso aumentou-se a dimensão do problema, que passou de 66 para 88 ajustes a serem encontrados pelo algoritmo. A principal característica associada com o fato de utilizar diferentes tipos de curva é que para um tipo de curva existem dois parâmetros associados (A e B, mostrados na Tabela 1) e que não podem ser escolhidos de forma independente. Para garantir que os parâmetros da mesma curva fossem utilizados, foi proposto um novo parâmetro a ser determinado pelo o algoritmo, denominado Tipo de Curva (*TDC*). Assim como os outros ajustes a serem determinados, no início da execução do algoritmo o *TDC* também é gerado aleatoriamente.

A utilização desse novo ajuste *TDC* promoveu a adição de uma nova restrição ao problema tal qual evidenciada na Equação 37. A partir dela, percebe-se que o valor desse novo parâmetro pode variar apenas entre 0 e 1. O significado dessa faixa de valores pode ser expresso da seguinte maneira:

- se $TDC \leq 0,5$ significa utilizar a curva normal inversa;

- se $TDC > 0,5$ significa o uso da curva muito inversa.

$$0 \leq TDC \leq 1 \quad (37)$$

Em relação às outras restrições do problema, todas foram admitidas as mesmas dos casos mostrados anteriormente nas subseções 6.2, 6.3.1 ou 6.3.2. No que diz respeito ao algoritmo PSO, pode-se dizer que os únicos parâmetros que foram diferentes desses outros exemplos estão mostrados na Tabela 15.

Tabela 15: Parâmetros do algoritmo PSO.

Parâmetro	Valor
Número de iterações máximo ($k_{máx}$)	5000
Número de partículas (N)	88

Na Tabela 16 estão apresentados os ajustes obtidos para este estudo. Um fato muito relevante que este exemplo mostrou foi o de que todos os relés apresentaram, ao final da execução do algoritmo, o tipo de curva muito inversa, ou seja, o mesmo tipo de curva usado na subseção 6.3.1. O valor de 11,941 segundos encontrado para o tempo total de atuação dos relés ficou próximo ao encontrado anteriormente na subseção 6.3.1, para a qual o tempo encontrado foi de 10,963 segundos. O tempo de execução do algoritmo foi de 21,45 minutos.

Na Figura 26 é mostrada a minimização da função objetivo para este caso, a qual converge para o valor, já apontado anteriormente, de 11,941 segundos.

A Figura 27 mostra novamente um coordenograma para os relés RD-15, RDS-15 e RDS-17. Mais uma vez, analisando os mesmos pontos chega-se às seguintes constatações:

- o tempo de coordenação entre a zona 1 de RD-15 com o RDS-15 para o *close-in* foi de 0,1021 segundo, ou seja, maior do que $ITC_2 = 0,1$ segundo;
- o intervalo de coordenação entre zona 2 de RD-15 e RDS-15 para um curto a 80% da linha foi de 0,1295 segundo, também superior ao valor de ITC_2 ;
- no caso do curto *close-in*, o par RDS-15/RDS-17 apresentou um intervalo de coordenação de 0,3955 segundo, respeitando o $ITC_1 = 0,2$ segundo;
- para um curto na barra remota, o ITC para o par RDS-15/RDS-17 foi de 1,3094 segundos, também acima do valor estabelecido para ITC_1 .

Tabela 16: Ajustes dos relés para o estudo considerando as curvas NI e MI.

RDS	<i>Tempo de atuação (s)</i>	MT_i	$I_{pick-up_i}$ (A)	RD	$T_{RD_{z2i}}$ (s)
1	0,18924	0,05000	716,80	1	0,30036
2	0,34400	0,33550	733,57	2	0,30000
3	0,16114	0,05000	630,89	3	0,30000
4	0,12525	0,14393	629,33	4	0,30000
5	0,13060	0,22841	369,99	5	0,30000
6	0,18245	0,16436	346,80	6	0,3008
7	0,23620	0,13812	360,19	7	0,31605
8	0,13541	0,43260	355,44	8	0,30000
9	0,13910	0,21596	400,00	9	0,30186
10	0,20672	0,65051	359,36	10	0,30577
11	0,25409	0,30312	537,60	11	0,30000
12	0,13620	0,10676	589,30	12	0,30000
13	0,18569	0,22152	537,60	13	0,30000
14	0,16182	0,14019	537,60	14	0,30027
15	0,12213	0,08104	596,25	15	0,30193
16	0,17996	0,16706	614,41	16	0,30056
17	0,22583	0,53393	360,01	17	0,32816
18	0,80490	0,36434	360,00	18	0,30009
19	0,15844	0,07103	640,89	19	0,31981
20	0,35461	0,36299	576,45	20	0,30059
21	0,14271	0,22592	540,34	21	0,30000
22	0,68780	0,20967	540,00	22	0,30000
Somatório do tempo de atuação dos relés (s)			11,941

Figura 26: Comportamento da função objetivo para o caso utilizando dois tipos de curva (NI e MI).

Figura 27: Coordenograma para os relés RD-15, RDS-15 e RDS-17 utilizando curvas MI resultantes do teste com os tipos de curva NI e MI.

6.3.4 Comparação dos resultados para os testes no sistema real

Essa subseção tem o intuito de analisar os estudos de caso de uma maneira geral, ou seja, comparar entre si os resultados obtidos para cada um, por isso a Tabela 17 mostra um resumo desses testes, em relação aos principais parâmetros utilizados no PSO e o tempo de atuação obtido ao final do processo iterativo.

Analisando os números dessa tabela, é possível observar uma razoável diferença entre os parâmetros utilizados no PSO para cada estudo, porém ressalta-se que o algoritmo PSO foi executado diversas vezes, com vários parâmetros diferentes e os resultados aqui apresentados foram as melhores respostas obtidas dentre as 50 execuções para cada situação. Além disso,

essas diferenças são explicadas pelo fato de o PSO ser um algoritmo relativamente dependente dos seus parâmetros e também da solução inicial aleatória, ou seja, para um determinado caso o algoritmo pode ter iniciado a busca a partir de uma solução de melhor qualidade do que em outro caso, sendo assim, um menor número de iterações é exigido. Analisando agora o tempo de processamento, pode-se dizer que este tempo é muito dependente do número de partículas e do número de iterações máximas utilizadas. Porém esse tempo de processamento elevado sob o ponto de vista da proteção, não constitui um problema pois o uso desse algoritmo não deve ser dado em tempo real. Além disso, ressalta-se o fato de que esse tempo de processamento elevado também está relacionado ao uso do MATLAB como linguagem de programação.

Para o teste utilizando apenas o tipo de curva extremamente inversa, nota-se que mesmo com um fator de peso equivalente ao dobro do utilizado para os outros casos, não foi possível encontrar uma resposta que não violasse nenhuma restrição. Isso indica que a coordenação utilizando esse tipo de curva é a mais difícil de ser realizada.

Outro ponto importante diz respeito à proximidade dos resultados entre o teste que utilizou a curva muito inversa e o teste com duas curvas (normal e muito inversa). Esse fato pode levar a duas conclusões. A primeira é de que para este sistema, para as considerações realizadas e para a formulação do problema utilizada, a curva muito inversa é a que apresentou melhor resultado, podendo ser assim a mais indicada para ser utilizada nesse sistema para a coordenação dos relés. A segunda conclusão é a de que a prática usual de se utilizar o mesmo tipo de curva para coordenar os relés foi confirmada por esse teste, já que o algoritmo utilizou o mesmo tipo de curva para obter a coordenação e, além disso, a resposta convergiu para uma resposta próxima à melhor resposta que havia sido encontrada.

Tabela 17: Principais características para cada teste.

Tipo de curva utilizada	Nº de Partículas	Nº de Iterações	Fator de peso	Restrições violadas	Tempo de atuação	Tempo de processamento
Normal inversa	500	2000	50	0	16,267 s	33,94 min
Muito inversa	66	20000	50	0	10,963 s	28,83 min
Extremamente inversa	66	15000	100	1	19,193 s	24,07 min
Normal inversa / Muito inversa	88	5000	50	0	11,941 s	21,45 min

Capítulo 7

Conclusões

A partir da revisão bibliográfica pôde-se notar que a utilização de técnicas inteligentes na coordenação de relés é uma prática bastante usual. Dentre as técnicas inteligentes, está o PSO, que foi a escolhida para fazer parte da metodologia deste trabalho. O PSO foi modificado para que pudesse ser aplicado ao problema de coordenação, o qual é um problema com muitas restrições. A utilização do PSO para esse problema mostrou-se de simples implementação computacional e também bastante eficiente na medida em que as adaptações necessárias para o problema em questão foram realizadas. Sua eficiência é comprovada através dos resultados apresentados no Capítulo 6, os quais demonstraram boas soluções no que diz respeito aos ajustes que garantiram a coordenação dos relés.

Um ponto de observação em relação a uma dificuldade encontrada na utilização do PSO é a escolha dos parâmetros, a qual é bastante dependente do problema em questão. Dessa maneira foi realizada a escolha dos parâmetros através de um processo de tentativa e erro e justamente por isso é explicada a variação de alguns parâmetros constatada entre um estudo e outro.

Outro ponto a ser comentado a respeito do PSO é que foi necessário executar o algoritmo repetidas vezes para o mesmo problema. Isso se deve à aleatoriedade envolvida no PSO, já que com a geração das condições iniciais de forma aleatória, há a possibilidade de em uma execução o algoritmo iniciar a busca a partir de um ponto melhor do que em outra execução. Por isso executando-se várias vezes é possível chegar a uma resposta melhor, mesmo utilizando os mesmos parâmetros do PSO.

Quanto aos tipos de curva diferentes utilizados nos testes é possível dizer que para as considerações realizadas a curva muito inversa levou vantagem, em termos de menor tempo de atuação total dos relés, em relação à curva normal inversa. O tipo de curva extremamente inversa se mostrou a mais difícil para a coordenação dos relés, já que este foi o único caso em que o algoritmo não encontrou uma resposta que não violasse nenhuma restrição. Finalmente, um outro aspecto a ser realçado a partir dos resultados obtidos é de que o algoritmo mostrou uma tendência em utilizar o mesmo tipo de curva para a coordenação dos relés. Isso pode ser justificado pela característica do algoritmo em buscar soluções que diminuam o tempo de atuação total dos relés. Dessa forma, isso pode indicar que a coordenação utilizando curvas muito diferentes torna o tempo de atuação total dos relés mais elevado. Portanto essa forma de utilização

pode não ser muito vantajosa no intuito de se obter uma boa coordenação aliada a um baixo tempo de atuação.

Em relação aos ajustes para a segunda zona do relé de distância, tanto para o Sistema CTEEP quanto para o Sistema Teste e independentemente do tipo de curva utilizado, os valores para esses ajustes ficaram em torno dos 300 ms. Isso mostra que para qualquer problema deste tipo, assumir um ajuste por volta desse valor é uma escolha bastante acertada.

Portanto, baseado em todos os resultados obtidos, pode-se dizer que considerar três correntes de curto-circuito diferentes na formulação do problema coordenação dos relés foi bastante válida. Isso permitiu ao algoritmo aproximar as curvas, contribuindo com a diminuição do tempo de atuação dos relés. Além disso, considerar a utilização de relés de distância aliados aos relés de sobrecorrente na formulação contribui para deixar o trabalho mais completo, aproximando-o do que é feito na prática, que é a utilização de ambos os relés no esquema de proteção de linhas de transmissão.

Tendo em vista a viabilidade prática de uma ferramenta para automatização da coordenação de relés baseada no PSO pode-se dizer que as expectativas são boas quanto a isso, já que esta ferramenta é totalmente factível e bastante útil. Pensando, por exemplo, no tempo de estudo que um engenheiro de proteção levará para coordenar 22 relés direcionais de sobrecorrente e 22 relés de distância, o ganho de tempo que essa ferramenta proporcionará é muito significativo, mesmo utilizando uma linguagem de programação não tão eficiente em termos de tempo de processamento, tal qual usada nesta dissertação (Matlab). Sobretudo, essa ferramenta promove cálculos com maior exatidão do que o engenheiro responsável pelo estudo, já que há uma minimização da incidência de erros humanos. Porém, é preciso ressaltar que o papel de um engenheiro de proteção ainda é muito relevante mesmo possuindo uma ferramenta que automatize o processo de ajustes dos relés. Afinal, proteção de sistemas de energia além de ser uma ciência, é também uma arte, ou seja, exige muito da experiência e habilidade do profissional responsável. Portanto, uma ferramenta que auxilie esse profissional e que minimize a sua chance de erros é de extrema importância para a área.

7.1 Perspectivas futuras

No presente trabalho, todas as considerações realizadas foram baseadas para o ajuste dos relés de fase, portanto um estudo futuro poderia contemplar o cálculo dos ajustes para os relés de neutro e dessa forma, dando um importante passo na concretização de uma ferramenta destinada à coordenação otimizada dos relés direcionais e de sobrecorrente.

Outro ponto a ser aprofundado é em relação aos tipos de curva, já que nesta dissertação foram considerados apenas curvas do padrão IEC. Uma possibilidade é estender esse estudo

também para as curvas do padrão IEEE e também para curvas não padronizadas, características de relés eletromecânicos.

Além disso, há também a questão do sobre alcance da segunda zona dos relés de distância que não foi considerada na formulação. Uma alternativa para não perder seletividade e melhorar o desempenho do sistema de proteção caso esse sobre alcance seja considerado é a utilização de elementos instantâneos para os relés direcionais de sobrecorrente já que dessa forma, há a garantia de que dada uma falta, o RDS local atue antes para esta falta do que a segunda zona do relé de distância de retaguarda remota.

Como forma de diminuir o tempo total de processamento para as simulações, o algoritmo pode ser programado em outras linguagens tais como C ou C++.

Por fim, mais um ponto para estudo futuro é obter um conjunto de ajustes dos relés que satisfaça não só a topologia normal de operação de um sistema, mas que também atenda a uma situação anormal de operação do sistema como a saída do sistema de uma linha de transmissão por exemplo.

Referências Bibliográficas

ABB. Type CO (Hi-Lo) Overcurrent Relay Instruction Leaflet, 1999. Disponível em: <[http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/eeb58a4be009595c85256eac0052e4a1/\\$file/41-100K.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/eeb58a4be009595c85256eac0052e4a1/$file/41-100K.pdf)>. Acesso em: 21 set. 2012.

ABYANEH, H. A.; KAMANGAR, S. S. H.; RAZAVI, F.; CHABANLOO, R. M. A New Genetic Algorithm Method for Optimal Coordination of Overcurrent Relays in a Mixed Protection Scheme with Distance Relays. **43rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC 2008)**. [S.l.]: [s.n.]. 2008. p. 1-5.

ANDERSON, P. M. **Power System Protection**. New York: McGraw-Hill, 1999.

BANSAL, J. C.; DEEP, K. Optimization of Directional Overcurrent Relay Times by Particle Swarm Optimization. **IEEE Swarm Intelligence Symposium**. St. Louis, MO: [s.n.]. 2008. p. 1-7.

BAZARAA, M. S.; SHERALI, H. D.; SHETTY, C. M. **Non Linear Programming - Theory and Algorithms**. 2^a. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1993.

BEDKAR, P. P.; BHIDE, R. S. Optimum coordination of overcurrent relay using continuous genetic algorithm. **Expert Systems with Applications - Elsevier**, v. 38, n. 9, p. 11286 – 11292, Setembro 2011.

BERNARDES, W. M. S. Algoritmo enxame de partículas discreto para coordenação de relés direcionais em sistemas elétricos de potência. São Carlos: Dissertação de mestrado, 2013.

BOTTURA, F. B. Algoritmo de otimização híbrido para a coordenação de relés direcionais de sobrecorrente em um sistema elétrico malhado. São Carlos: Dissertação de mestrado, 2014.

CAMINHA, A. C. **Introdução à proteção dos sistemas elétricos**. São Paulo: Edgard Blucher, 1977.

CHABANLOO, R. Z.; ABYANEH, H. A.; KAMANGAR, S. S. H.; RAZAVI, F. A New Genetic Algorithm Method for Optimal Coordination of Overcurrent and Distance Relays Considering Various Characteristics for Overcurrent Relays. **2nd IEEE International Conference on Power and Energy (PECon 2008)**. Johor Baharu, Malásia: [s.n.]. 2008. p. 569-573.

CHUNG, J.; LU, Y.; KAO, W.; CHOU, C. Study of Solving the Coordination Curve Intersection of Inverse-Time Overcurrent Relays in Subtransmission Systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 23, n. 4, p. 1780-1788, Outubro 2008.

COURY, D. V.; OLESKOVICZ, M.; GIOVANINI, R. **Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência**: dos relés eletromecânicos aos microprocessados inteligentes. São Carlos: EESC - USP, 2007.

HENVILLE, C. F.; HYDRO, B. C. Combined use of definite and inverse time overcurrent elements assistis in transmission line ground relay coordination. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 8, n. 3, p. 925-932, Julho 1993.

HEPPNER, F.; GRENANDER, U. A stochastic nonlinear model for coordinated bird flocks. The Ubiquity of Chaos, Krasner S. Washington DC: **American Association for the Advancement of Science**. 1990. p. 233-238.

HEWITSON, L. G.; BROWN, M.; BALAKRISHNAN, R. **Practical Power Systems Protection**. [S.l.]: Elsevier - Newnes, 2004.

HOROWITZ, S. H.; PHADKE, A. G. **Power System Relaying**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1995.

HOSSEINIAN, H.; ABYANEH, H. A.; RAZAVI, F.; GALVANI, S.; MOHAMMADI, R. Coordination of Overcurrent Relays Using Intelligent Methods: A Comparative study for GA, PSO and IGA. **The International Conference on Electrical Engineering 2008**. Okinawa, Japão: [s.n.]. 2008. p. 1-7.

IEC STD 60255-3. **Electrical relays - Part 3**: Single input energizing quantity measuring relays with dependent or independent time. [S.l.]: [s.n.], 1989.

IEEE STD C37.113-1999. **IEEE Guide for Protective Relay Applications to Transmission Lines**. [S.l.]: [s.n.], 1999.

IEEE STD.C37.112-1996. **IEEE Standard Inverse-Time Characteristic Equations for Overcurrent Relays**. [S.l.]: [s.n.], 1996.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle Swarm Optimization. **IEEE International Conference on Neural Networks**. Perth, Australia: [s.n.]. 1995a. p. 1942-1948 vol.4.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. A new optimizer using particle swarm theory. **6th Symp. Micro Machine and Human Science**. Nagoya, Japão: [s.n.]. 1995b. p. 34-44.

KHEDERZADEH, M. Back-Up Protection of Distance Relay Second Zone by Directional Overcurrent Relays with Combined Curves. **IEEE Power Engineering Society General Meeting**. [S.l.]: [s.n.]. 2006. p. 1-6.

LEE, K. Y.; EL-SHARKAWI, M. A. **Modern Heuristic Optimization Techniques**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008.

LEITE, H.; BARROS, J.; MIRANDA, V. The evolutionary algorithm EPSO to coordinate directional overcurrent relays. **10th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP, 2010)**. Manchester: [s.n.]. 2010. p. 1-5.

LUENBERGER, D. **Linear and nonlinear programming**. Canadá: Addison-Wesley, 1984.

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**, v. 22, n. 3, p. 1400-1410, Julho 2007.

MASON, C. R. **The Art and Science of Protective Relaying**. [S.l.]: John Wiley & 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.l.]: [s.n.]. 2002a. p. 745-750.

MIRANDA, V.; FONSECA, N. EPSO – Best-of-two-worlds meta-heuristic applied to power system problems. **IEEE Congress on Evolutionary Computation**. Honolulu, Hawaii, USA: [s.n.]. 2002b. p. 1080-1085.

MORAVEJ, Z.; JAZAERI, M.; GHOLAMZADEH, M. Optimal coordination of distance and over-current relays in series compensated systems based on MAPSO. **Energy Conversion and Management**, v. 56, p. 140-151, Abril 2012.

PÉREZ, L. G.; URDANETA, A. J. Optimal coordination of directional overcurrent relays considering definite time backup relaying. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 14, n. 4, p. 1276-1284, Abril 1999.

PÉREZ, L. G.; URDANETA, A. J. Calculation of Optimum Directional Overcurrent Relays Settings: The Parallel Lines Case. **IEEE Power Engineering Review**, v. 20, n. 5, p. 68-69, Maio 2000.

PÉREZ, L. G.; URDANETA, A. J. Optimal Computation of Distance Relays Second Zone Timing in a Mixed Protection Scheme with Directional Overcurrent Relays. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 16, n. 3, p. 385-388, Julho 2001.

RAZAVI, F.; ABYANEH, H. A.; AL-DABBAGH, M.; MOHAMMADI, R.; TORKAMAN, H. A new comprehensive genetic algorithm method for optimal overcurrent relays coordination. **Electric Power Systems Research**, v. 78, n. 4, p. 713-720, Abril 2008.

REYNOLDS, C. W. Flocks, herds and schools: a distributed behavioral model. **ACM SIGGRAPH '87 Conference**. Anaheim, California: [s.n.]. 1987. p. 25-34.

ROMERO, R.; MANTOVANI, J. R. S. Introdução a Metaheurísticas. **Anais do 3º Congresso Temático de Dinâmica e Controle da SBMAC**. UNESP – Campus de Ilha Solteira: DINCON. 2004.

SADEH, J.; AMINOTOJARI, V.; BASHIR, M. Optimal Coordination of Overcurrent and Distance Relays with Hybrid Genetic Algorithm. **10th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)**, 2011. [S.l.]: [s.n.]. 2011. p. 1-5.

SADEH, J.; AMINTOJJAR, V.; BASHIR, M. Coordination of Overcurrent and Distance Relays Using Hybrid Particle Swarm Optimization. **The International Conference on Advanced Power System Automation and Protection**. [S.l.]: [s.n.]. 2011. p. 1130-1134.

SANTOS, F. M. P. Algoritmo enxame de partículas evolutivo para o problema de coordenação de relés de sobrecorrente direcionais em sistemas elétricos de potência. São Carlos: Dissertação de mestrado, 2013.

URDANETA, A. J.; NADIRA, R.; JIMÉNEZ, L. G. P. Optimal coordination of directional overcurrent relays in interconnected power systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 3, n. 3, p. 903-911, Julho 1988.

VIJAYAKUMAR, D.; NEMA, R. K. Superiority of PSO Relay Coordination Algorithm over Non-Linear Programming: A Comparison, Review and Verification. **Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference**. [S.l.]: [s.n.]. 2008. p. 1-6.

ZEINELDIN, H.; EL-SAADANY, E. F.; SALAMA, M. A. A Novel Problem Formulation for Directional Overcurrent Relay Coordination. **Large Engineering Systems Conference on Power Engineering - LESCOPE**. [S.l.]: [s.n.]. 2004. p. 48-52.

ZEINELDIN, H.; EL-SAADANY, E. F.; SALAMA, M. A. Optimal coordination of directional overcurrent relay coordination. **IEEE Power Engineering Society General Meeting**. [S.l.]: [s.n.]. 2005. p. 1101-1106.

ZEINELDIN, H.; EL-SAADANY, E. F.; SALAMA, M. A. Optimal coordination of overcurrent relays using a modified particle swarm optimization. **Electric Power Systems Research**, v. 76, Julho 2006. 988-995.

Anexos

Anexo I - Dados do Sistema Teste

Neste anexo são apresentados os dados das linhas na Tabela 18 e os dados de geradores na Tabela 19 para o sistema fictício usado no teste inicial na subseção 6.1.

Tabela 18: Dados das linhas para o sistema fictício.

	Linha 1-2	Linha 2-3	Linha 2-4	Linha 3-4
R (Ω/km)	1,385	6,930	3,774	1,947
X (Ω/km)	4,802	19,026	9,545	5,554
R₀ (Ω/km)	3,925	16,661	8,656	7,935
X₀ (Ω/km)	15,545	59,941	30,172	28,914
Comprimento (km)	12,670	48,460	24,350	27,230

Tabela 19: Dados dos geradores do sistema fictício.

Gerador	Potência (MVA)	Tensão (kV)	FP	X''_d (Ω)	X₀ (Ω)
G1	100	60	1	5,349	6,788
G2	90	63	1	3,997	10,104

Anexo II - Dados do Sistema CTEEP

Este anexo possui os dados para o sistema elétrico de transmissão real utilizado nas subseções 6.2, 6.3.1, 6.3.2 e 6.3.3. As tabelas aqui apresentadas não estão completas com todos os dados que o ONS fornece, porém aqui estão apresentados os dados necessários para a elaboração dessa dissertação. A Tabela 20 apresenta os dados de barra para o sistema equivalente utilizado. A Tabela 21 mostra os dados de linha para esse sistema.

Tabela 20: Dados de barra do Sistema CTEEP, utilizando um equivalente de 46 barras.

Barra	Nome da barra	V (pu)	Ang	V _{base}
11425	T#CAC138 13A	1	0	
11426	CAC.G1 13.8	1	0	13,8
11427	T#CAC138 13B	1	0	
11428	CAC.G2 13.8	1	0	13,8
11430	T#EUC138 13A	1	0	
11431	EUC.G1 13.8	1	0	13,8
11432	T#EUC138 13B	1	0	
11433	EUC.G2- 13.8	1	0	13,8
11440	T#LMO138 13A	1	0	
11441	LMO.G1 13.8	1	0	13,8
11442	T#LMO138 13B	1	0	
11443	LMO.G2 13.8	1	0	13,8
14247	ELFUSA 138	1	0	138
14493	SCRUZPA 138	1	0	138
14509	SJBVIST 138	1	0	138
19200	CACONDE 138	1	0	138
19210	EUCUNHA 138	1	0	138
19216	D#ASSOF 138	1	0	138
19217	D#ELFUS 138	1	0	138
19218	D#VGS 138	1	0	138
19219	SJRPARD 138	1	0	138
19220	LIMOEIR 138	1	0	138
19221	T#LMO138 11C	1	0	
19225	LIMOEIR 11.5	1	0	11,5
19226	D#CBRAN 138	1	0	138
19227	D#SCRUZ 138	1	0	138
19240	P.FERR. 138	1	0	138
19246	D#CABFE 138	1	0	138
19247	D#PSS2 138	1	0	138
19280	SJBVIST 138	1	0	138
19294	D#SJBV1 138	1	0	138

Barra	Nome da barra	V (pu)	Ang	V _{base}
33006	US FERR 138	1	0	138
33007	A#USFER 138	1	0	138
33008	A#USFER 138	1	0	138
33032	USABENS 138	1	0	138
33039	A#USABS 138	1	0	138
33040	A#USABS 138	1	0	138
33041	T#FER138 13	1	0	
33042	FERRARI 13.8	1	0	13,8
33045	S.JOAO 13.8	1	0	13,8
33046	US.ABEN 138	1	0	13,8
33047	A#USABS 138	1	0	138
33048	A#USABS 138	1	0	138
33049	S.JOAO 13.8	1	0	13,8
33052	S.LUIZ 13.8	1	0	13,8
33053	S.LUIZ 13.8	1	0	13,8

Tabela 21: Dados de linha para o Sistema CTEEP utilizado.

Barra De	Barra Para	Circuito	Tipo	R1 (pu)	X1 (pu)	R0 (pu)	X0 (pu)
0	11426	1	G	0	54.350	999999	999999
0	11428	1	G	0	54.350	999999	999999
0	11431	1	G	0	64.140	999999	999999
0	11433	1	G	0	21.380	999999	999999
0	11441	1	G	0	154.28	999999	999999
0	11443	1	G	0	154.28	999999	999999
0	14493	99	c	999999	999999	0	134.00
0	19200	99	c	999999	999999	0	65.400
0	19210	99	G	13.967	44.411	53.485	43.037
0	19218	99	c	999999	999999	0.0000	44.143
0	19226	99	c	999999	999999	0.0100	71.840
0	19240	99	G	11.675	42.579	24.084	10.091
0	19247	99	c	999999	999999	27.100	152.52
0	19280	99	G	0.6217	30.703	20.904	91.003
0	19294	99	c	999999	999999	0	102.00
0	33042	1	G	0	38.860	6301.2	18.240
0	33045	1	G	0	92.800	0	25.600
0	33045	2	c	999999	999999	0	35.000
0	33049	1	G	0	92.800	3150.6	25.600
0	33049	2	G	0	108.00	3150.6	28.000
0	33049	3	c	999999	999999	0	35.000
0	33052	1	G	0	92.800	0	25.600
0	33052	2	c	999999	999999	0	35.000
0	33053	1	G	0	92.800	3150.6	25.600

Barra De	Barra Para	Circuito	Tipo	R1 (pu)	X1 (pu)	R0 (pu)	X0 (pu)
0	33053	2	G	0	108.00	3150.6	28.000
0	33053	3	c	999999	999999	0	35.000
19227	14493	1		0.0700	0.1900	0.2000	0.6500
19200	19210	1		36.300	95.200	10.080	33.610
19217	19218	1		17.700	38.400	42.300	13.400
19210	19218	1		37.000	79.200	89.300	27.460
19210	19220	1		0.8100	17.500	17.000	63.500
19210	19220	2		0.8100	17.500	17.000	63.500
19220	19226	1		17.000	44.500	47.200	15.730
19220	19227	1		39.100	10.240	10.860	36.200
19247	19240	1		13.000	34.200	36.200	12.070
19226	19246	1		0.5300	13.900	14.700	49.200
19217	19280	1		0.7000	18.300	19.400	64.500
19294	19280	1		0.8000	20.800	21.300	74.300
19216	19294	1		0.0100	0.0300	0.0300	0.0900
19240	33007	1		13.500	35.400	37.500	12.500
33007	33006	1		0.0965	0.2531	0.2681	0.8927
33008	33006	1		0.0965	0.2531	0.2681	0.8927
33008	19246	1		26.700	70.100	74.300	24.730
19216	33047	1		14.300	30.500	34.400	10.580
33048	19210	1		39.300	84.300	95.000	29.210
33048	33046	1		0.8500	21.940	29.300	90.000
33047	33046	1		0.8500	21.940	29.300	90.000
19227	33040	1		0.5200	14.500	13.700	48.300
33040	33032	1		0.8300	20.600	20.600	77.500
33032	33039	1		0.8300	20.600	20.600	77.500
33039	19247	1		0.5200	13.600	14.500	48.200
19200	19219	1		30.100	79.000	83.700	27.890
19219	19210	1		0.6200	16.200	17.200	57.200
11426	11425	1	T	0	12.300	999999	999999
0	11425	1	T	999999	999999	0	86.100
19200	11425	1	T	0	12.300	0	12.300
19200	11427	1	T	0	12.300	0	12.300
11428	11427	1	T	0	12.300	999999	999999
0	11427	1	T	999999	999999	0	86.100
11431	11430	1	T	0	15.000	999999	999999
0	11430	1	T	999999	999999	0	10.400
19210	11430	1	T	0	15.000	0	15.000
19210	11432	1	T	0	50.000	0	50.000
11433	11432	1	T	0	50.000	999999	999999
0	11432	1	T	999999	999999	0	34.700
11441	11440	1	T	0	24.120	999999	999999
0	11440	1	T	999999	999999	0	10.050
19220	11440	1	T	0	24.120	0	24.120
19220	11442	1	T	0	24.120	0	24.120

Barra De	Barra Para	Circuito	Tipo	R1 (pu)	X1 (pu)	R0 (pu)	X0 (pu)
11443	11442	1	T	0	24.120	999999	999999
0	11442	1	T	999999	999999	0	10.050
19220	19221	1	T	0	67.000	999999	999999
0	19221	1	T	999999	999999	0	67.000
19225	19221	1	T	0	67.000	0	67.000
33006	33041	1	T	0	16.000	999999	999999
0	33041	1	T	999999	999999	6301.2	16.000
33042	33041	1	T	0	16.000	0	16.000
33046	33045	1	T	0	35.000	999999	999999
33046	33049	1	T	0	35.000	999999	999999
33032	33052	1	T	0	35.000	999999	999999
33032	33053	1	T	0	35.000	999999	999999
19210	19240	99		124.32	180.10	632.44	1162.0
19210	19280	99		441.47	889.55	10733.	21978.
19240	19280	99		25.224	46.887	507.10	901.69
14247	19217	1		0	0.0010	0	0.0010
14509	19294	1		0	0.0010	0	0.0010