

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

ARIAN RODRIGUES FAGUNDES

**COORDENAÇÃO DE RELÉS DE SOBRECORRENTE EM SISTEMAS
ELÉTRICOS DE POTÊNCIA UTILIZANDO METAHEURÍSTICAS
BIO-INSPIRADAS: UMA ABORDAGEM CONSIDERANDO O
ALGORITMO DE BUSCA DOS CUCOS VIA VOOS DE LÉVY**

Alegrete

2020

ARIAN RODRIGUES FAGUNDES

COORDENAÇÃO DE RELÉS DE SOBRECORRENTE EM SISTEMAS
ELÉTRICOS DE POTÊNCIA UTILIZANDO METAHEURÍSTICAS
BIO-INSPIRADAS: UMA ABORDAGEM CONSIDERANDO O
ALGORITMO DE BUSCA DOS CUCOS VIA VOOS DE LÉVY

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Elétrica (PPGEE) da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos

Alegrete
2020

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

F156c Fagundes, Arian Rodrigues

Coordenação de relés de sobrecorrente em sistemas elétricos de potência utilizando metaheurísticas bio-inspiradas: uma abordagem considerando o Algoritmo de Busca dos Cucos via voos de Lévy / Arian Rodrigues Fagundes.

147 p.

Dissertação(Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa,
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, 2020.

"Orientação: Eduardo Machado Dos Santos".

1. Proteção de Sistemas de Potência. 2. Relé de Sobrecorrente. 3. Coordenação e Seletividade. 4. Métodos de Otimização. 5. Heurísticas. I. Título.

ARIAN RODRIGUES FAGUNDES

COORDENAÇÃO DE RELÉS DE SOBRECORRENTE EM SISTEMAS
ELÉTRICOS DE POTÊNCIA UTILIZANDO METAHEURÍSTICAS
BIO-INSPIRADAS: UMA ABORDAGEM CONSIDERANDO O
ALGORITMO DE BUSCA DOS CUCOS VIA VOOS DE LÉVY

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Elétrica (PPGEE) da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas de Energia.

Dissertação defendida e aprovada em 13 de Agosto de 2020.

Banca examinadora:



Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos
Orientador
UNIPAMPA



Prof. Dr. Paulo Céero Fritzen
UTFPR



Prof. Dr. Chrystian Dalfa Lana da Silva
UNIPAMPA

Este trabalho é dedicado a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram, incentivaram e me deram forças para chegar até aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais Adão Joel e Maria Inêz, que sempre me estimularam aos estudos e à busca por conhecimento e não mediram esforços a fim de garantir que eu chegasse até aqui. Agradeço também por me ensinarem os valores de respeito, honestidade e dignidade, os quais foram transmitidos diariamente.

À minha sobrinha, pequena Eva, por alegrar diariamente minha vida.

À Priscila Xavier, amiga, companheira, noiva e meu grande amor, pelo apoio, compreensão e por todas as palavras encorajadoras.

Aos mestres que marcaram minha trajetória, pois, mais do que professores foram verdadeiros educadores, desde o pré-escolar, passando pelo ensino fundamental até chegar à pós-graduação. Agradeço a todas estas pessoas por proporcionarem o desenvolvimento de conhecimento, pensamento crítico e aos ensinamentos transmitidos, este foi o presente mais valioso que eu recebi e que jamais alguém poderá me tirar.

Agradeço aos funcionários, prestadores de serviço e corpo docente da Unipampa Campus Alegrete, enfatizando os amigos Luis Alberto Farias (vigilante) e o sempre muito solícito Thiago Eliandro (TAE); Ao professor da disciplina de Métodos de Otimização, Professor Doutor João Plínio Juchem Neto, por todo o conhecimento compartilhado e por instigar a realização desta pesquisa.

Ao orientador, amigo e nosso líder de grupo, Professor Doutor Eduardo Machado dos Santos, sem o qual esse trabalho não seria possível. Agradeço pela paciência, suporte, confiança e a oportunidade de trabalharmos juntos. Sou grato por toda a contribuição intelectual e humana, onde sempre procurou mostrar o caminho correto a ser percorrido e, principalmente pelo caráter, um exemplo de profissional.

Aos baita gremistas, os engenheiros eletricitistas: Alex “Polaco” Itczak, “Tio” Henrique Eichkoff, Marcel “Fanho” Stalter, Paulo “Loco” Fiuza Marques, e ao colega de trabalho Eduardo “Duni” Ceccon, grandes amigos que sempre estiveram dispostos a auxiliar nas mais variadas tarefas, sejam elas acadêmicas ou não. Sou grato a eles pela amizade e companheirismo antes, durante e após essa jornada.

Aos pesquisadores e cientistas da computação Anderson Fortes e Matheus Serpa que, mesmo a distância, contribuíram incondicionalmente para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

Aos ex-colegas e demais membros do Grupo de Pesquisa em Energia e Sistemas Elétricos de Potência pela companhia diária.

Ademais, é importante ressaltar que o presente trabalho foi realizado com apoio financeiro da Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação (PROPPI) da Unipampa e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior do MEC (CAPES). Portanto, deixo aqui também minha gratidão à PROPPI e a CAPES.

Agradeço a Deus, por tudo.

“As crianças aprendem pelas perguntas que recebem respostas, não pelas dúvidas que ficam”

Dante Ramon Ledesma

RESUMO

A segurança e a robustez do Sistema Elétrico de Potência (SEP) são garantidas por esquemas de proteção comandados por relés. Esses relés têm por função identificar anomalias, localizá-las e alertar a operação do sistema, realizando o disparo de alarmes, sinalizações e comandos. O primeiro mecanismo de socorro contra as falhas do sistema é o relé de proteção primária, que deverá atuar como a proteção de retaguarda somente em caso de irregularidade no funcionamento do sistema primário. Um dos problemas decorrentes do uso de Relés de Sobrecorrente (RSs) diz respeito à sua coordenação, que visa obter a configuração ótima de modo que as faltas sejam extintas rapidamente em qualquer que seja o local de sua ocorrência, mesmo quando o relé mais próximo ao defeito venha a falhar. No que tange à coordenação dos RSs, comumente podem ser citados dois ajustes a serem otimizados: a configuração do múltiplo de tempo e do múltiplo de corrente. Logo, a coordenação dos relés de sobrecorrente é definida como um problema de minimização do tempo de operação dos relés sob condições de seletividade. Diante disso, encontrou-se a motivação necessária para a realização desta pesquisa, que tem como objetivos abordar, avaliar e validar a aplicabilidade de metaheurísticas bio-inspiradas para resolução do problema de coordenação dos relés de sobrecorrente e compará-las com outras metodologias existentes, reportadas na literatura específica. Este trabalho foi desenvolvido nas instalações da UNIPAMPA, sendo o material utilizado disponibilizado pelo Grupo de Pesquisa em Energia e Sistemas Elétricos de Potência (Gesep). A proposta contempla a formulação matemática do problema de coordenação dos relés em quatro diferentes situações de teste, sendo dois sistemas radiais e dois sistemas malhados. Os relés de sobrecorrente utilizados seguem a Norma IEC de curva de tempo normal, e a solução da coordenação é obtida por meio da utilização das técnicas de otimização matemática conhecidas por metaheurísticas, inspiradas no comportamento de elementos da natureza, sendo elas: Algoritmo dos Vagalumes, Otimização por Enxame de Partículas e Algoritmo de Busca dos Cucos. A implementação e simulação dos casos foram realizadas em ambiente Matlab. Os resultados encontrados com os métodos testados são satisfatórios e mostram a possibilidade de alcançar soluções de qualidade igual ou superior quando comparados aos estudos de outras metodologias disponíveis na literatura específica. Dentre as três metodologias implementadas, os ajustes obtidos via Algoritmo dos Cucos reportaram as soluções de melhor qualidade para a parametrização dos relés de proteção dos casos simulados. À medida que aumenta a complexidade do problema, com o acréscimo de restrições e de variáveis de decisão, e, principalmente para problemas de programação não-linear, as heurísticas surgem como alternativa mais viável na busca da melhor solução.

Palavras-chave: Proteção de Sistemas de Potência. Relé de Sobrecorrente. Coordenação e Seletividade. Métodos de Otimização.

ABSTRACT

The integrity and robustness of the Electric Power System (EPS) are guaranteed by relay-controlled protection schemes. The function of these relays is to identify anomalies, locate them and alert the operation of the system, triggering alarms, signals and commands. The primary protection relay acts as the first assistance mechanism against system faults, the back-up protection should only act in the event of irregularity and non-operation of the primary system. One of the problems arising from the use of overcurrent relays (OCRs) relates to their coordination, with the function to obtain the optimum configuration so that faults are quickly extinguished wherever they occur, even when the relay closest to the fault fails. Therefore, the optimization of OCRs coordination is defined as a problem of minimizing the operating time of the relays under selective conditions. The necessary motivation for this research was found, which aims to approach, evaluate and validate the applicability of bio-inspired metaheuristics to solve the overcurrent relay coordination problem and compare it with other existing methodologies reported in the specific literature. This work was developed at UNIPAMPA facilities, being the material used made available by the Gesep, the proposal contemplates the mathematical formulation of the overcurrent relays coordination problem in four different test situations: a radial distribution system, a second system with 3 power generation fonts, an approach involving a realistic circuit, and finally, the complex 9-bus system. The OCRs used follow the IEC Standard of normal time curve, and the coordination solution is obtained through the use of mathematical optimization techniques known as metaheuristics, inspired by the behavior of elements of nature: Firefly Algorithm, Particle Swarm Optimization and Cuckoo Search Algorithm. The implementation and simulation of the were is done in Matlab. The results found with the tested methods are satisfactory and show the possibility of reaching solutions of equal or superior quality when compared to studies of other methodologies available in the specific literature. Among the three implemented methodologies, the adjustments obtained via Cuckoo Search reported the best quality solutions for the parametrization in the protection relays, of the simulated cases. As the complexity of the problem increases, with the addition of restrictions and decision variables, and, especially, for non-linear programming problems, heuristics emerge as the most viable alternative in the search for the best solution.

Key-words: Protection of Power Systems. Overcurrent Relay. Coordination and Selectivity. Optimization Methods.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Relé de atração eletromagnética. (a) Relé de êmbolo. (b) Relé de alavanca.	43
Figura 2 – Composição física do relé de disco de indução.	44
Figura 3 – Diagrama de blocos do funcionamento dos relés digitais de sobrecorrente.	47
Figura 4 – Atuação do relé de sobrecorrente.	49
Figura 5 – Curva de atuação do relé de sobrecorrente instantâneo.	52
Figura 6 – Curva de atuação do relé de sobrecorrente de tempo definido.	53
Figura 7 – Curvas NI de um relé de sobrecorrente da norma IEC de variando o ajuste do <i>TMS</i> e mantendo fixo o valor do <i>MC</i>	55
Figura 8 – Curvas NI de um relé de sobrecorrente da norma IEC, variando a corrente de ajuste e mantendo fixo o <i>TMS</i>	56
Figura 9 – Família de curvas de um Relé 51 da norma IEC.	58
Figura 10 – Curvas de ajuste dos relés proteção e a coordenação entre as zonas de atuação.	60
Figura 11 – Diferentes zonas de um sistema de proteção.	61
Figura 12 – Exemplo de sistema em malha com falta na linha entre as barras B e C.	63
Figura 13 – Linha do tempo das principais propostas de metodologias heurísticas de otimização desde os anos 70.	67
Figura 14 – Atualização do vetor posição no algoritmo PSO clássico.	69
Figura 15 – Fluxograma do PSO clássico com a adição de rotinas restritivas.	71
Figura 16 – Representação da forma como ocorre a atratividade entre os vagalumes.	73
Figura 17 – Comparação do Movimento Browniano ao Voo de Lévy.	77
Figura 18 – Fluxograma do CSA via voos de Lévy.	79
Figura 19 – Proteções primária e de retaguarda de um sistema radial simples.	83
Figura 20 – Diagrama unifilar simplificado do sistema teste 1.	89
Figura 21 – Sistema teste 1: Característica de convergência da FO via FFA em PL.	97
Figura 22 – Sistema teste 1: Característica de convergência da FO via PSO em PL.	98
Figura 23 – Sistema teste 1: Característica de convergência da FO via CSA em PL.	98
Figura 24 – Sistema teste 1: Característica de convergência da FO via FFA em PNL.	99
Figura 25 – Sistema teste 1: Característica de convergência da FO via PSO em PNL.	99
Figura 26 – Sistema teste 1: Característica de convergência da FO via CSA em PNL.	99
Figura 27 – Diagrama unifilar simplificado do sistema teste 2.	101
Figura 28 – Otimização da FO a cada execução do FFA(PNL) para o sistema teste 2.	108
Figura 29 – Otimização da FO a cada execução do PSO(PNL) para o sistema teste 2.	109
Figura 30 – Otimização da FO a cada execução do CSA(PNL) para o sistema teste 2.	109
Figura 31 – Sistema teste 2: Característica de convergência da FO via FFA em PL.	110
Figura 32 – Sistema teste 2: Característica de convergência da FO via PSO em PL.	110

Figura 33 – Sistema teste 2: Característica de convergência da FO via CSA em PL.	111
Figura 34 – Sistema teste 2: Característica de convergência da FO via FFA em PNL.	111
Figura 35 – Sistema teste 2: Característica de convergência da FO via PSO em PNL.	111
Figura 36 – Sistema teste 2: Característica de convergência da FO via CSA em PNL.	112
Figura 37 – Sistema teste 3: Trecho da LT da SE Serum Institute of India.	114
Figura 38 – Sistema teste 3: Característica de convergência da FO via FFA.	119
Figura 39 – Sistema teste 3: Característica de convergência da FO via PSO.	120
Figura 40 – Sistema teste 3: Característica de convergência da FO via CSA.	120
Figura 41 – Diagrama unifilar simplificado do sistema teste 4	122
Figura 42 – Sistema teste 4: Característica de convergência da FO em relação ao número de iterações via FFA.	129
Figura 43 – Sistema teste 4: Característica de convergência da FO em relação ao número de iterações via PSO.	129
Figura 44 – Sistema teste 4: Característica de convergência da FO em relação ao número de iterações via CSA.	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficientes da família de curvas da norma IEC.	57
Tabela 2 – Sistema teste 1: Níveis de curto-circuito e dispositivos de proteção. . .	90
Tabela 3 – Parâmetros utilizados no FFA.	93
Tabela 4 – Parâmetros utilizados no PSO.	93
Tabela 5 – Parâmetros utilizados no CSA.	93
Tabela 6 – Sistema teste 1: Resultados para FFA, PSO e CSA em PL.	94
Tabela 7 – Sistema teste 1: Resultados para FFA, PSO e CSA em PNL.	94
Tabela 8 – Sistema teste 1: Tempos de atuação dos relés obtidos via FFA em PL. . .	95
Tabela 9 – Sistema teste 1: Tempos de atuação dos relés obtidos via PSO em PL. . .	95
Tabela 10 – Sistema teste 1: Tempos de atuação dos relés obtidos via CSA em PL. . .	95
Tabela 11 – Sistema teste 1: Tempos de atuação dos relés obtidos via FFA em PNL. . .	96
Tabela 12 – Sistema teste 1: Tempos de atuação dos relés obtidos via PSO em PNL. . .	96
Tabela 13 – Sistema teste 1: Tempos de atuação dos relés obtidos via CSA em PNL. . .	96
Tabela 14 – Resumo dos resultados das simulações para o problema em PL.	96
Tabela 15 – Resumo dos resultados das simulações para o problema em PNL.	97
Tabela 16 – Comparativo entre os resultados deste trabalho e os reportados na literatura para o sistema radial de 4 barras.	100
Tabela 17 – Sistema teste 2: Pares de relés de proteção e níveis de curto-circuito para a configuração normal.	104
Tabela 18 – Sistema teste 2: Pares de relés de proteção e níveis de curto-circuito para a configuração transiente.	105
Tabela 19 – Sistema teste 2: Valores de <i>RTC</i> e TAPs ajustados.	105
Tabela 20 – Sistema teste 2: Solução da coordenação via FFA, PSO e CSA em PL.	106
Tabela 21 – Sistema teste 2: Solução da coordenação via FFA, PSO e CSA em PNL.	106
Tabela 22 – Tempos de atuação dos relés via FFA, PSO e CSA em PL.	107
Tabela 23 – Tempos de atuação dos relés para o sistema de 3 barras via FFA em PNL.	107
Tabela 24 – Tempos de atuação dos relés para o sistema de 3 barras via PSO em PNL.	107
Tabela 25 – Tempos de atuação dos relés para o sistema de 3 barras via CSA em PNL.	108
Tabela 26 – Resumo dos resultados das simulações para o sistema malhado de 3 barras.	110
Tabela 27 – Comparativo entre os resultados deste trabalho e os reportados na literatura para o sistema malhado de 3 barras.	113
Tabela 28 – Sistema teste 3: Localização dos pontos de falta e magnitude das correntes de curto-circuito.	114

Tabela 29 – Sistema teste 3: Valores de <i>RTC</i>	114
Tabela 30 – Sistema teste 3: Corrente dos pares de relés ponderada pela <i>RTC</i>	115
Tabela 31 – Sistema teste 3: Solução do problema de coordenação via FFA, PSO e CSA.	117
Tabela 32 – Sistema teste 3: Tempos de atuação dos relés obtidos via FFA.	118
Tabela 33 – Sistema teste 3: Tempos de atuação dos relés obtidos via PSO.	118
Tabela 34 – Sistema teste 3: Tempos de atuação dos relés obtidos via CSA.	119
Tabela 35 – Sistema teste 3: Comparativo dos resultados das simulações.	121
Tabela 36 – Correntes de carga do sistema teste de 9 barras.	122
Tabela 37 – Sistema teste 4: Pares de relés de proteção primária e de retaguarda e níveis da corrente de curto-circuito para cada linha defeituosa.	123
Tabela 38 – Sistema teste 4: Limites calculados para o ajuste do múltiplo de corrente.	124
Tabela 39 – Sistema teste 4: Ajustes obtidos através das simulações para parametrização dos relés.	125
Tabela 40 – Sistema teste 4: Tempos de atuação dos relés para ajustes via FFA.	126
Tabela 41 – Sistema teste 4: Tempos de atuação dos relés para ajustes via PSO.	127
Tabela 42 – Sistema teste 4: Tempos de atuação dos relés para ajustes via CSA.	128
Tabela 43 – Sistema teste 4: Comparativo com resultados da literatura.	131

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- A/D** Analógico-Digital
- ACO** Otimização por Colônia de Formigas - *Ant Colony Optimization*
- ADE** *Adaptive Differential Evolution*
- ANEEL** Agência Nacional de Energia Elétrica
- ANSI** *American National Standards Institute*
- BAA** Algoritmo de Busca dos Morcegos - *Bat Algorithm Inspired Algorithm*
- BCO** Otimização por Colônia de Abelhas - *Bee Colony Optimization*
- BH** Busca Harmônica
- CDE** *Chaotic Differential Evolution*
- CGPSO** *Constricted Global Particle Swarm Optimization*
- CLPSO** *Constricted Local Particle Swarm Optimization*
- CPSO** *Chaotic Particle Swarm Optimization*
- CSA** Algoritmo de Busca dos Cucos - *Cucko Search Algorithm*
- CTI** Intervalo de Tempo de Coordenação - *Coordination Time Interval*
- DE** Evolução Diferencial - *Differential Evolution*
- DS** Dual Simplex
- EI** Curva Extremamente Inversa
- FFA** Algoritmo dos Vagalumes - *Firefly Algorithm*
- FO** Função Objetivo ou Função Custo
- GA** Algoritmo Genético - *Genetic Algorithm*
- GAMS** *General Algebraic Modeling System*
- GD** Geração Distribuída
- Gesep** Grupo de Pesquisa em Energia e Sistemas Elétricos de Potência
- GPSO** *Global Particle Swarm Optimization*
- GWO** Algoritmo de Otimização dos Lobos Cinzentos - *Grey Wolf Optimizer*

IDMT Tempo Mínimo Definido Inverso - *Inverse Definite Minimum Time*

IEC *International Electrotechnical Commission*

IM Curva Inversa Moderada ou Inversa de Tempo Curto

LI Curva Longamente Inversa ou Inversa de Tempo Longo

LPSO *Local Particle Swarm Optimization*

LXPSO *Laplace Crossover Particle Swarm Optimization*

MC Múltiplo de Corrente

MDE *Modified Differential Evolution*

MFFA *Modification of the Classic Firefly Algorithm*

MI Curva Muito Inversa

MPSO *Modified Particle Swarm Optimization*

NI Curva Normal ou Normal Inversa

OBB Otimização Baseada em Biogeografia

PL Programação Linear

PNL Programação Não-Linear

PNLIM Problema de Programação Não-Linear Inteira Mista

PPL Problema de Programação Linear

PQS Programação Quadrática Sequencial

PSO Otimização por Enxame de Partículas - *Particle Swarm Optimization*

RS Relé de Sobrecorrente

RSD Relé de Sobrecorrente Direcional

RST *Random Search Techniques*

RSTD Relé de Sobrecorrente de Tempo Definido

SAO Algoritmo Seeker - *Seeker Algorithm Optimization*

SBB *Standard Branch-and-Bound*

SEP Sistema Elétrico de Potência

SOMA *Self Organizing Migrating Algorithm*

SOMGA *Self Organizing Migrating Genetic Algorithm*

TC Transformador de Corrente

TMS Múltiplo de Tempo - *Time Setting Multiplier*

TP Transformador de Potencial

Unipampa Universidade Federal do Pampa

LISTA DE SÍMBOLOS

Δt	Diferença de tempo
Φ	Fluxo magnético
A	Ampère
F_c	Fator de crescimento de carga
f_{mm}	Força magnetomotriz
FS	Fator de sobrecorrente dos transformadores de corrente
Hz	Hertz
I_{cc}	Corrente de curto-circuito
I_n	Corrente nominal
I_p	Corrente primária do TC
I_r	Corrente do relé
I_{set}	Corrente ajustada
I_s	Corrente secundária do TC
$iter$	Iteração atual
kHz	Quilohertz
kWh	Quilowatt-hora
M	Múltiplo do relé
MVA	Megavolt-Ampère
pa	Probabilidade de descoberta
s	Segundos
top	Tempo de operação do relé
$A.e.$	Ampère-espira
n	Número de ninhos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	Considerações Iniciais	27
1.2	Objetivos Principais	29
1.3	Justificativa	30
1.4	Metodologia	30
1.5	Revisão da Literatura	31
1.6	Estruturação do Trabalho	40
2	FUNDAMENTOS DA PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE	41
2.1	O Relé de Sobrecorrente	41
2.2	Tecnologias de Relés	42
2.2.1	Relés Eletromecânicos	42
2.2.2	Relés Estáticos	44
2.2.3	Relés Digitais	45
2.2.4	Relés Numéricos	48
2.3	Ajustes dos Relés de Sobrecorrente para Proteção de Linhas	49
2.4	Relés de Sobrecorrente Instantâneos	51
2.4.1	Ajuste da Corrente para Relés Instantâneos	52
2.5	Relés de Sobrecorrente de Tempo Definido	52
2.6	Relés de Sobrecorrente de Tempo Inverso	54
2.7	Ajustes da Unidade Temporizada	58
2.8	Seletividade e Coordenação	59
2.9	Zonas de Proteção	59
2.10	Tempo de Coordenação entre Atuação de dois Relés	61
2.11	Relé de Sobrecorrente Direcional	62
2.12	Considerações do Capítulo	63
3	MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO	65
3.1	Heurísticas	65
3.1.1	Otimização por Enxame de Partículas	68
3.2	Algoritmo dos Vagalumes	72
3.2.1	A Atratividade	73
3.2.2	Distância e Movimento	74
3.2.3	Algoritmo de Busca dos Cucos	75
3.2.3.1	Voos de Lévy	76
3.2.3.2	Funcionamento do Algoritmo dos Cucos	78
3.3	Considerações do Capítulo	80

4	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA DE COORDENAÇÃO DOS RELÉS DE SOBRECORRENTE	83
4.1	Apresentação do Problema e Considerações Iniciais	83
4.2	Função Objetivo	84
4.3	Restrições	85
4.3.1	Critério de Coordenação e de Seletividade	86
4.3.2	Limites nos ajustes do Relé	86
4.3.3	Limites nos Tempos de Operação	87
4.4	Considerações do Capítulo	88
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	89
5.1	Sistema Teste 1: Circuito Radial de 4 Barramentos	89
5.1.1	Resolução do Problema: Modelo Linear	90
5.1.2	Resolução do Problema: Modelo Não-Linear	91
5.1.3	Calibragem dos Algoritmos	92
5.1.4	Resultados: Sistema teste 1	93
5.2	Sistema Teste 2: Sistema em Malha com 3 Barras	101
5.2.1	Resultados: Sistema teste 2	105
5.3	Sistema Teste 3: Situação realista adaptada da SE de Serum-Índia	113
5.3.1	Resultados: Sistema teste 3	117
5.4	Sistema Teste 4: Sistema em Malha com 9 Barras	121
5.4.1	Resultados: Sistema teste 4	125
5.5	Considerações do Capítulo	131
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	133
6.1	Conclusão	133
6.2	Trabalhos Futuros	135
6.3	Trabalhos Desenvolvidos	136
	REFERÊNCIAS	137
	Índice	147

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

O SEP tem por finalidade disponibilizar ao consumidor final a energia elétrica necessária, com qualidade, baixo custo e em condições adequadas de segurança e utilização, que permitam o correto funcionamento de equipamentos elétricos-eletrônicos dos seus usuários.

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o SEP é composto por três grandes subsistemas: Geração, Transmissão e Distribuição, que, por sua vez, são responsáveis pela transmissão da energia desde a fonte de geração até o consumidor final. Porém, o sistema elétrico está sujeito à falhas e perturbações, decorrentes de vários fatores como (NEGRÃO, 2015):

- Operações indevidas;
- Erros técnicos ou de projeto;
- Falhas em equipamentos decorrentes de baixa qualidade, instalação indevida ou ajustes incorretos;
- Falhas do sistema de comunicação e aquisição de dados;
- Falhas relacionadas ao deterioramento e patologias de equipamentos; e
- Falhas resultantes das condições ambientais ou fatores climáticos adversos;

Conforme Hewitson, Brown e Balakrishnan (2004), o preceito da proteção do sistema elétrico, de maneira geral, deve possuir os seguintes tópicos:

- Assegurar a integridade física dos envolvidos, ou seja, dos usuários, operadores e trabalhadores mantenedores do sistema elétrico;
- Garantir o fornecimento contínuo da energia elétrica; e
- Evitar os danos aos equipamentos de forma a minimizar os custos decorrentes da manutenção e substituição dos mesmos.

De forma a atingir tais objetivos, o sistema de proteção deve estar condicionado a quatro premissas básicas (URDANETA; NADIRA; JIMENEZ, 1988): seletividade, sensibilidade, confiabilidade e velocidade.

A segurança e a robustez do SEP são garantidas por seus esquemas de proteção, os quais são, essencialmente, comandados por relés. Esses dispositivos têm por função identificar os defeitos, localizá-los da maneira mais exata possível e alertar a quem opera o sistema, realizando o disparo de alarmes e sinalizações.

Também, é função dos relés realizar a abertura de disjuntores de modo a isolar o defeito, mantendo o restante do sistema em condições normais de operação. Sendo assim, os relés assumem a posição mais importante no sistema de proteção, monitorando as condições de operação do SEP.

A proteção primária, ou principal, é composta, em grande maioria, por RSs. Estes também são usados como proteção de retaguarda (*back-up*) em sistemas de transmissão. O relé de proteção primária atua como o primeiro mecanismo de socorro contra faltas no sistema. Já a proteção de retaguarda deverá entrar em operação somente em caso de irregularidade no funcionamento do sistema de proteção primário.

Um dos problemas decorrentes do uso de relés de sobrecorrente diz respeito a sua coordenação, que visa obter a configuração ótima, de modo que as faltas sejam extintas rapidamente em qualquer que seja o local de sua ocorrência no sistema, mesmo quando o relé mais próximo ao ponto defeituoso venha a falhar.

Quanto a coordenação dos relés de sobrecorrente, além da escolha adequada do tipo de curva, comumente, dois são os ajustes que precisam ser otimizados: a configuração do Múltiplo de Tempo - *Time Setting Multiplier* (TMS) e a configuração do ajuste de TAP do relé, ou do Múltiplo de Corrente (MC) de atuação para os relés digitais. Logo, a otimização da coordenação dos relés de sobrecorrente pode ser abordada como um problema de otimização, de forma a se obter o melhor conjunto de ajustes que parametrizem os relés e contribuam para a correta atuação dos dispositivos de proteção no menor tempo de operação possível, sob condições de seletividade.

O problema de coordenação é declarado estabelecendo uma Função Objetivo ou Função Custo (FO), a qual é normalmente descrita em termos da minimização do somatório do tempo de operação dos relés envolvidos na proteção do sistema. Tal função é sujeita a um conjunto de restrições correspondentes as limitações próprias aos ajustes possíveis a cada caso, bem como as limitações impostas pelos critérios de coordenação e seletividade. Após, o problema de coordenação pode ser resolvido como um Problema de Programação Linear (PPL), considerando apenas como variável do problema o *TMS*, ou, também, pode ser tratado como um problema não-linear, onde além do múltiplo de tempo, o valor do TAP ou da corrente de operação são as variáveis a serem otimizadas. Em metodologias mais robustas, ainda pode ser inserido o ajuste da curva de operação do relé no processo iterativo de otimização.

Diversas técnicas de otimização têm sido utilizadas para a solução do problema de coordenação ótima de relés de sobrecorrente. Algumas metodologias tradicionais de otimização como o Método Simplex, Dual Simplex (DS) e metodologias de busca aleatória foram implementadas para coordenação de relés. Tais métodos, embora capazes de atingir a solução ótima em abordagens de problemas lineares, não apresentam bom desempenho em problemas não linearizados e, de acordo com a complexidade do problema, bem como com a topologia do sistema e os tipos de relés empregados na proteção, esses métodos

podem não apresentar uma forma de resolução trivial ou ainda não resultar em boas soluções.

Soluções ótimas necessitam algoritmos eficientes. Ao longo do tempo, muitos avanços em rotinas inteligentes para resolução do problema de coordenação dos relés de sobrecorrente têm sido alcançados por meio do desenvolvimento e proposição de heurísticas baseadas na natureza. Estes algoritmos inspiram-se no meio ambiente e em sistemas naturais muito conhecidos na área da biologia, dada a sua adaptabilidade e evolução natural, vista como uma estratégia eficaz e poderosa para resolução de diversos tipos de problemas de otimização.

Diante disto, o foco deste trabalho está na aplicação de metodologias bio-inspiradas de otimização matemática como forma de se atingir a coordenação ótima dos relés de sobrecorrente em diferentes situações, buscando minimizar os tempos de atuação destes ao se obter os valores de ajuste otimizados de suas variáveis de parametrização, sem comprometer a seletividade, sensibilidade e confiabilidade do sistema de proteção.

Como pode ser visto no decorrer deste trabalho, quando se torna possível a parametrização não somente do múltiplo de tempo, mas também do TAP do relé, ou seja, a formulação do problema como Programação Não-Linear (PNL), soluções de melhor qualidade podem ser obtidas sem o comprometimento da coordenação e seletividade da proteção.

1.2 **Objetivos Principais**

Este Trabalho tem como objetivo geral abordar, analisar, investigar, comparar, avaliar e validar o potencial da aplicabilidade de metaheurísticas bio-inspiradas para resolução do problema de coordenação dos relés de sobrecorrente em circuitos de distribuição e transmissão de energia elétrica. Como objetivos específicos citam-se:

- Formular o problema de coordenação dos relés de sobrecorrente na forma matemática de um problema de otimização;
- Implementar as metodologias:
 - Algoritmo dos Vagalumes - *Firefly Algorithm* (FFA);
 - Otimização por Enxame de Partículas - *Particle Swarm Optimization* (PSO);
 - e
 - Algoritmo de Busca dos Cucos - *Cuckoo Search Algorithm* (CSA).
- Aplicar os algoritmos implementados para resolução do problema de otimização destinado a minimização da função objetivo;

- Realizar a declaração e avaliar a qualidade das soluções obtidas através da resolução do problema de otimização linearizado e em comparação com o formato de programação não-linear;
- Obter a solução do problema de coordenação dos relés digitais de sobrecorrente direcionais de tempo inverso da Norma *International Electrotechnical Commission* (IEC), com curva de tempo normalmente inversa, em sistemas elétricos radiais e em anel com realimentação, por meio dos algoritmos estudados; e
- Realizar diferentes simulações sob diferentes condições de parametrização inicial dos algoritmos em diferentes sistemas testes, a fim de validar as metodologias e avaliar o desempenho de cada uma em situações distintas.

1.3 Justificativa

Tendo em vista a complexidade e robustez do SEP, o advento de relés digitais microprocessados e a aplicação dos mesmos em um processo crescente de substituição dos tradicionais relés eletromecânicos, torna-se imprescindível a proposição de metodologias contemporâneas, cada vez mais confiáveis e seguras para aumento da confiabilidade da rede. Concomitante a isso, enfatizar a importância da realização de estudos da coordenação e seletividade dos relés de sobrecorrente digitais, empregados na proteção do SEP.

Diante disso, encontra-se a motivação necessária para a realização desta pesquisa, onde se busca, principalmente, investigar e avaliar a aplicabilidade de metodologias de otimização ainda pouco utilizadas para este fim, capazes de realizar e obter os ajustes ótimos dos dispositivos de proteção contra sobrecorrente. Dessa forma, pretende-se garantir a operação desses relés de maneira rápida, coordenada e seletiva, contribuindo para a melhoria da confiabilidade dos esquemas de proteção do SEP, aprimorando o desempenho dos relés.

1.4 Metodologia

Este Trabalho foi desenvolvido dentro das instalações da universidade, sendo grande parte do material utilizado disponibilizado pelo Gesep, do Campus Alegrete da Universidade Federal do Pampa (Unipampa).

A proposta contempla a formulação matemática do problema de coordenação dos relés de sobrecorrente direcionais da Norma IEC de curva normal inversa, bem como sua resolução através da aplicação de algoritmos metaheurísticos, empregados em diferentes sistemas teste e formulados, primeiramente, em sua forma linearizada e, consequentemente, de mais simples implementação. Posteriormente, visando encontrar melhores

soluções para as funções objetivo de cada caso, são empregados os mesmos algoritmos, porém, com os problemas formulados no formato não-linear.

Com o intuito de avaliar e validar o emprego dos algoritmos, o procedimento metodológico proposto foi realizado conforme as seguintes etapas:

- Revisão da literatura;
- Estudo do problema de coordenação dos relés de sobrecorrente e possíveis ferramentas de solução;
- Implementação de algoritmos de otimização em Matlab®;
- Escolha dos sistemas teste;
- Modelagem matemática do problema e definição das restrições;
- Calibragem e adaptação dos parâmetros que envolvem os algoritmos de otimização candidatos a resolução do problema de coordenação;
- Aplicação dos algoritmos nos sistemas teste escolhidos;
- Análise dos resultados obtidos;
- Validação da utilização dos métodos propostos através da comparação dos resultados com os existentes na literatura específica;

Abaixo são descritas as configurações do equipamento utilizado nas simulações:

- Desktop HP Compaq Pro 6305;
- Processador AMD A8-6500B 3,5 GHz;
- Memória RAM 8 GB; e
- Sistema Operacional Windows 7 Professional (64 Bits).

1.5 Revisão da Literatura

Estudos associados ao desenvolvimento de metodologias capazes de realizar a parametrização de maneira veloz, eficiente e segura dos dispositivos empregados nos sistemas de proteção, avançaram significativamente a partir do emprego de computadores e com o advento dos microprocessadores. Isto ocorreu uma vez que estes dispositivos tem a capacidade de processar dados e realizar os procedimentos matemáticos necessários de forma rápida e confiável, substituindo o processo manual, onde muito tempo era necessário para realizar a tarefa de ajuste dos parâmetros dos relés de proteção (SOARES, 2009).

A partir de então, engenheiros e matemáticos dispõem grandes esforços no desenvolvimento de ferramentas computacionais dedicadas a modelagem e automatização dos processos da coordenação de relés de sobrecorrente em sistemas de potência (CORRÊA, 2012).

Basicamente, para a operação dos relés de sobrecorrente de tempo inverso, três são os ajustes necessários: ajuste do múltiplo de tempo, ajuste do múltiplo de corrente, e a escolha do tipo de curva de operação, sendo que, comumente o tipo de curva é previamente escolhido de acordo com a aplicação ou então selecionada seguindo critérios práticos (KIDA, 2016).

Raza et al. (2013), divide de maneira generalista em três classes as técnicas de coordenação dos relés de sobrecorrente, sendo estas desde cálculos convencionais de tentativa e erro, metodologias baseadas na análise topológica do sistema, até robustos modelos matemáticos de otimização e algoritmos de busca.

As primeiras metodologias utilizadas para coordenação dos relés empregavam técnicas manuais de cálculos envolvendo tentativa e erro, realizando combinações a cada conjunto de configurações encontradas para os relés, onde o engenheiro de proteção realizava diferentes simulações para distintos pontos de falha e combinações entre os relés, até que se obtivesse uma resposta adequada (URDANETA; NADIRA; JIMENEZ, 1988). Uma das primeiras propostas que sugere a utilização de computadores, tem como foco a proteção para curto-circuito. Nesse contexto, Albrecht et al. (1964) propõem a utilização de um software para avaliar a coordenação entre relés de sobrecorrente, fusíveis e religadores que compõe determinado circuito, onde, baseando-se no conhecimento prévio da topologia do sistema elétrico, seriam realizados os cálculos necessários para o ajuste dos relés e, a partir dos ajustes, seriam obtidos os tempos de atuação para diferentes níveis de curto-circuito e, finalmente, verificada a coordenação entre os dispositivos empregados. A proposta permitia ainda que, de acordo com a curva de atuação, o relé mais adequado para a proteção de determinado circuito fosse selecionado.

Já em Langhans e Ronat (1980), os autores desenvolveram um programa para analisar a coordenação automática entre relés de sobrecorrente, fusíveis e disjuntores para a proteção contra curto-circuito em baixa tensão, por meio de coordenogramas. Porém, este modelo não solucionava o problema da coordenação, apenas o evidenciava caso existisse falta de coordenação, para que, assim, o engenheiro pudesse contorná-lo.

Mais tarde, também utilizando metodologias baseadas na análise prévia da topologia do sistema a ser protegido, em Damborg et al. (1984) e Ramaswami et al. (1984), a teoria dos grafos foi empregada para realizar a ordenação de operação e coordenação dos relés de sobrecorrente. Porém, a resposta obtida é a melhor somente em comparação com as outras testadas, não podendo afirmar ser um ótimo global.

Também, na década de 80, o problema de coordenação dos relés de sobrecorrente começa a ser abordado como um problema de otimização, no trabalho de Urdaneta, Nadira

e Jimenez (1988), onde é realizada a modelagem matemática de uma função objetivo para tal problema, sujeita a um conjunto de restrições. Os autores propuseram uma técnica iterativa para ajustar o *Dial* de tempo e o TAP, demonstrando que o problema de coordenação dos relés é um problema de otimização não-linear. Porém, se definida a curva do relé e estabelecido previamente o TAP, o problema passa a ser linear, dependendo apenas da busca dos valores ótimos das variáveis referentes ao dial de tempo e, assim, solucionado através de um resolvidor de Programação Linear (PL).

Destaca-se, ainda, que o ajuste do TAP dos relés pode ser definido previamente, através de rotinas que envolvem cálculos convencionais, levando em consideração a menor magnitude da corrente de curto-circuito vista pelo relé e sua máxima corrente de carga. Dessa forma, não é necessário incluir a busca por estas variáveis no processo iterativo de resolução do problema e, mesmo assim, garantir convergência em baixo esforço computacional. Porém, como muitos resultados dos *Dials* de tempo são contínuos os arredondamentos podem ocasionalmente resultar soluções inviáveis na prática, tornando falho o processo de coordenação (CORRÊA, 2012).

Em Elrafie e Irving (1993), foi utilizado o método DS revisado, aplicado para coordenar os relés de sobrecorrente direcionais em um sistema interconectado com seis barramentos e sete linhas.

Chattopadhyay, Sachdev e Sidhu (1996) solucionaram a coordenação dos relés de sobrecorrente de tempo inverso através do método Simplex de duas fases. Assim, na fase 1, eram determinadas se eram viáveis as restrições condicionadas à coordenação entre a proteção primária e de retaguarda. Já, na fase 2, era realizada a otimização dos ajustes dos relés.

Em Urdaneta et al. (1996), foi apresentado um estudo de um sistema de potência em operação, onde a alteração das configurações dos relés existentes seria indesejada. Foi proposta então a coordenação através da declaração de vários pequenos PPL em função do múltiplo de tempo, resolvendo-os até encontrar uma solução viável. Dessa forma, seria reduzida significativamente a dimensão do problema de otimização bem como a complexidade para resolução de um único problema com muitas variáveis.

Já em Perez e Urdaneta (2001), foi realizado um estudo de coordenação mista entre relés direcionais de sobrecorrente e relés de distância em um sistema realista. A metodologia proposta utiliza o algoritmo primal-dual predictor corretor de pontos interiores ao invés do tradicional Simplex. A metodologia exibe considerável redução no tempo de execução, sendo viável para aplicações em tempo real. Porém, como desvantagem, é apontada a grande complexidade matemática.

Swief, Abdelaziz e Nagy (2014) utilizou técnicas de PL para a coordenação de redes interconectadas. Seu algoritmo se adaptava de acordo com as alterações do sistema, como novas configurações de relés, alterações de carga ou topologia do sistema.

Destacam-se como trabalhos relevantes que também utilizaram resolvidores de

PL para obter a coordenação de relés de sobrecorrente: Zapata e Mejia (2003b) e Zapata e Mejia (2003a), os quais solucionaram o problema de coordenação com o método Simplex para sistemas radiais e malhados, respectivamente; Estrada, Carmona e Ruiz (2006), que apresentaram uma metodologia matemática baseada em pontos interiores para relés de sobrecorrente associados à relés de distância e, mais recentemente, o trabalho de Niyomphant et al. (2012), o qual realizou a coordenação de relés direcionais de sobrecorrente em sistemas de 6 e 9 barras.

Outro trabalho que propôs a utilização de valores discretos para o ajuste dos múltiplos de tempo e da corrente do relé foi desenvolvido por Zeienldin, El-Saadany e Salama (2004). Nesse trabalho, os autores propuseram uma metodologia que introduz valores discretos para o múltiplo de corrente no processo de otimização. Para tal, foi utilizado o sistema de modelagem *General Algebraic Modeling System* (GAMS) para tratar das restrições do problema. Os autores contornaram o efeito da perda de coordenação pelo arredondamento para o valor inteiro mais próximo, através da introdução de variáveis binárias e a adição de restrições que mantêm o valor encontrado em valores discretos viáveis pré-determinados, tornando aceitável a utilização da programação não-linear.

Diferentes formulações para declarar o problema de otimização da coordenação de relés direcionais de sobrecorrente foram propostas. Ainda em Zeienldin, El-Saadany e Salama (2004) e, em Zeienldin, El-Saadany e Salama (2005), os autores definem o tipo de problema de coordenação conforme a dependência de se adicionar ao processo de iteratividade o ajuste de corrente. Sendo assim, segundo os autores quando este parâmetro é fixo, tem-se um problema de PL. Já, quando este é variável e possibilita ajustes contínuos, refere-se então a um problema PNL. Por fim, para o referido parâmetro variável e de ajuste discreto, diz-se que se trata de um problema com característica mista, ou seja, um Problema de Programação Não-Linear Inteira Mista (PNLIM). Quando o problema de coordenação é tratado como PNLIM, a grande vantagem é obtida pelo fato da corrente de ajuste não ser um valor previamente estabelecido. Outra vantagem é que a dificuldade relacionada ao ajuste discreto do múltiplo de corrente pode ser contornada. Porém, como se trata de um problema não-linear, existe a possibilidade de se encontrar soluções factíveis em ótimos locais. Em Zeienldin, El-Saadany e Salama (2004) foi proposto a solução através da utilização de um resolvidor exato para o problema declarado como PNLIM, sendo determinados, simultaneamente, os ajustes dos múltiplos de corrente e de tempo de cada relé em ajustes discretos e contínuos, respectivamente. Entretanto em Zeienldin, El-Saadany e Salama (2005), o problema anterior foi reformulado e, após linearizado declarado como PNLIM, como forma de não se obter a convergência para ótimos locais, porém, aumentou-se a complexidade matemática ao serem introduzidos maior número de restrições.

Em termos práticos, em muitas situações, é interessante dispor de soluções factíveis como alternativa de implementação, mesmo quando estas soluções não sejam a

garantia do ótimo global, pois uma solução, mesmo quando não a ótima, porém próxima a este valor, pode oferecer boas condições e ser favorável para a obtenção adequada da coordenação do sistema de proteção em geral.

A resolução do problema de coordenação através de resolvidores de PL é limitado a problemas no formato linear. Porém, conforme a necessidade de se obter melhores respostas e com o intuito de se reduzir ainda mais o tempo de atuação dos relés, pesquisadores propunham a solução do problema através da formulação não-linear, como forma de contornar a ressalva de se otimizar somente o ajuste do múltiplo tempo em PL. Dessa forma, é possível ampliar o número de variáveis a serem otimizadas, considerando no problema novas variáveis de busca, como os valores do múltiplo de corrente e até mesmo os tipos de curvas e, dessa forma, tornar o processo de coordenação mais robusto e a atuação dos relés ainda mais rápida.

A partir dos anos 2000, diversos estudos apresentaram propostas para solução através de PNL, com base em metodologias de heurísticas matemáticas, meta-heurísticas e algoritmos híbridos, onde parte do problema era solucionado através de uma metodologia e parte em outra.

Os estudos de Birla, Maheshwari e Gupta (2006) e Birla, Maheshwari e Gupta (2006) propõem a utilização de um resolvidor exato, baseado na técnica de Programação Quadrática Sequencial (PQS) para solução do problema PNL, porém, resultando novamente na dificuldade de se obter a coordenação relacionada ao arredondamento dos valores encontrados para as variáveis de ajuste dos relés.

Como a coordenação dos relés de sobrecorrente é um problema de otimização dito não convexo (NOGHABI; SADEH; MASHHADI, 2009), metodologias baseadas em metaheurísticas surgem como ferramentas matemáticas promissoras para resolução deste tipo de problema, pois associam processos de melhoramento local e métodos de alto nível para evitar ótimos locais, proporcionando uma investigação mais intensiva no espaço solução (GLOVER; KOCHENBERGER, 2006).

Uma das abordagens pioneiras na utilização de metaheurísticas, foi apresentada em So et al. (1997), onde utilizando Algoritmo Genético - *Genetic Algorithm* (GA) aliado a codificação binária para determinar, de forma discreta o valor de ajuste ótimo dos múltiplos de tempo e de corrente de cada relé.

Em Kavehnia et al. (2006), foi realizada a coordenação de relés de sobrecorrente através do GA, porém, considerando como variáveis de decisão, não só os ajustes de *TMS* e *MC*, mas, também, a escolha do tipo de curva do relé.

Em Razavi et al. (2008) o GA foi utilizado para determinar somente o *TMS* de cada relé, adicionando à função objetivo uma rotina de verificação, visando descartar respostas de arredondamentos que possam causar a perda de seletividade, tornando possível a solução com ajustes contínuos ou discretos.

Uma função objetivo modificada foi apresentada por Zeinaddini-Maymand et al.

(2011), onde, utilizando GA para encontrar os ajustes otimizados do múltiplo de tempo dos relés, os autores propõem ponderar a importância de cada uma das restrições do problema através da atribuição de pesos específicos, incluindo-as na função objetivo.

A coordenação entre relés de sobrecorrente associados a relés de distância através de GA é apresentada por Chabanloo et al. (2011), onde buscou-se determinar o ajuste do múltiplo de tempo para diferentes características de operação relacionadas às curvas de tempo versus corrente. A utilização de relés de diferentes características possibilita significativa diminuição no tempo total de operação dos mesmos.

Um estudo comparativo entre as soluções através do método DS e o GA para o problema da coordenação dos relés de sobrecorrente, foi realizado em Madhumitha et al. (2015), onde os autores constataram a eficácia da aplicação do GA devido ao maior, porém, mais complexo espaço de busca, do que a resolução por meio do tradicional Dual Simplex.

O trabalho de Noghabi, Sadeh e Mashhadi (2009) apresentou uma metodologia híbrida GA-PL, envolvendo um resolvidor exato de PL aliado ao GA, onde o primeiro encontraria os valores de TMS para ajustes contínuos e em seguida, os ajustes discretos para o MC . Já em Bedekar e Bhide (2011), foi abordada uma metodologia híbrida envolvendo a PNL, o GA-PNL, utilizando como resolvidor para a técnica não-linear a PQS, tendo como foco obter a convergência para o ponto ótimo global. Nesse trabalho, os autores constataram que tanto o GA como a PQS, quando utilizados de forma individual, não retornam boas soluções, quando comparados a técnica implementada utilizando a combinação de ambos.

A otimização através da técnica *Modified Particle Swarm Optimization* (MPSO) foi abordada nos trabalhos de Zeienldin, El-Saadany e Salama (2006) e Mansour, Mekhamer e El-Kharbawe (2007), onde, no primeiro, o PSO foi aplicado no problema de coordenação em PNLIM, considerando o múltiplo de tempo contínuo e o múltiplo de corrente um valor discreto, encontrando melhores soluções do que através do software GAMS. No segundo estudo, com o problema linearizado, objetivou-se a busca apenas dos ajustes do TMS dos relés, encontrando a mesma qualidade na resposta do que as soluções via resolvidores de PL.

Em sua forma tradicional, o PSO é adequado aos problemas de otimização ir-restrita. Porém, como a formulação do problema de coordenação de relés é uma função objetivo sujeita à restrições limitadas por intervalos de busca, é necessário a aplicação de algoritmos restritivos e penalizações à função objetivo, de forma a impedir a não factibilidade da solução (NEGRÃO, 2015).

Bansal e Deep (2008) utilizaram dois sistemas elétricos de simples complexidade (de três e quatro barras) para realizar um estudo de análise comparativa entre a aplicação de nove metodologias, estando entre elas as diferentes modificações do PSO: *Global Particle Swarm Optimization* (GPSO), *Constricted Global Particle Swarm Optimization*

(CGPSO), *Local Particle Swarm Optimization* (LPSO), *Constricted Local Particle Swarm Optimization* (CLPSO) e *Chaotic Particle Swarm Optimization* (CPSO). Em tal estudo, o CPSO mostrou-se superior aos demais algoritmos testados, sendo eles: *Random Search Techniques* (RST), o GA, o *Self Organizing Migrating Algorithm* (SOMA) e o *Self Organizing Migrating Genetic Algorithm* (SOMGA).

Além de modificações no algoritmo PSO, muitos autores também optaram pela utilização em conjunto com outras técnicas, como em Liu e Yang (2012), onde se considerou contínuo o ajuste do múltiplo de tempo e discreto o ajuste do múltiplo de corrente, sendo a coordenação solucionada com o PSO aliado ao método de busca *Nelder-Mead Simplex*. Outros exemplos são as abordagens híbridas, como em Deep e Bansal (2009), onde foi proposto o *Laplace Crossover Particle Swarm Optimization* (LXPSO), que utiliza o cruzamento laplaciano para compartilhar informações entre as partículas. Também, cita-se a proposta PSO-PL de Papaspiliotopoulos, Kurashvili e Korres (2014), utilizando PSO e programação linear.

Constantes de curvas não padronizadas foram definidas como as variáveis de busca no trabalho Salazar, Enríquez e Schaeffer (2015) através da utilização dos GAs.

Em Santos (2013), foi proposta outra variante do PSO clássico, baseada em conceitos evolutivos, o EPSO, o qual proporciona evolução do conjunto de busca atuando através de ponderações e dos parâmetros comportamentais de cada partícula, realizando um refinamento da resposta e permitindo sua auto reparametrização. O autor ainda realiza a comparação dos resultados entre o PSO clássico, MPSO e algumas variações do EPSO, concluindo que o PSO tem resistência em encontrar boas soluções em sistemas malhados, enquanto o EPSO demonstra desempenhos mais consistentes e melhores resultados.

Em Moro (2014), o PSO na sua formulação clássica foi utilizado para encontrar os ajustes de relés direcionais coordenando-os entre si e também com relés de distância, fornecendo os tempos da segunda zona dos relés. Neste estudo, embora contando com o uso do PSO clássico, os resultados obtidos foram factíveis e os tempos de atuação dos relés bastante satisfatórios.

A metaheurística de busca Otimização por Colônia de Abelhas - *Bee Colony Optimization* (BCO) foi a metodologia utilizada por Rashtchi, Gholinezhad e Farhang (2010) para realizar a coordenação de relés de sobrecorrente com ajustes do múltiplo de tempo discretizados.

Em Amraee (2012), foi realizada a comparação entre a aplicação da metaheurística de otimização por Algoritmo Seeker - *Seeker Algorithm Optimization* (SAO) e o *Standard Branch-and-Bound* (SBB) para solucionar o problema da coordenação, onde o SAO apresentou melhores resultados do que o SBB.

A técnica de Evolução Diferencial - *Differential Evolution* (DE) foi utilizada por Krstivojević, Šošić e Savić (2016) para obtenção de valores de ajustes reais para para-

metrização dos múltiplos de corrente e de tempo de relés. Em Thangaraj, Pant e Deep (2010), os autores realizam a comparação envolvendo cinco variações modificadas do algoritmo evolutivo, onde os *Modified Differential Evolution* (MDE) foram aplicados em três sistemas teste diferentes, sendo que as versões modificadas obtiveram menores tempos de atuação dos relés, resultando em melhores respostas quando comparados com a versão convencional.

Sueiro et al. (2012) apresentaram um algoritmo híbrido unindo DE com um resolvedor de PL. A metodologia proposta pelos autores é capaz de constatar situações de não factibilidade e eliminar algumas restrições e, assim, obter a coordenação mesmo que parcial sem comprometer a seletividade.

Na proposta de Moirangthem et al. (2013), o algoritmo de evolução diferencial passou para uma versão adaptativa, o *Adaptive Differential Evolution* (ADE). Os autores abordaram a etapa da mutação como adaptável, com o operador de mutação sofrendo alterações conforme a FO do elemento. Esta versão do ADE obteve respostas ainda melhores do que as versões MDE (THANGARAJ; PANT; DEEP, 2010).

Shih, Enríquez e Trevino (2014) apresentaram a Otimização por Colônia de Formigas - *Ant Colony Optimization* (ACO) para realizar a coordenação de um sistema com esquema de proteção *on-line*, realizando a parametrização dos relés em tempo real. Apesar do ACO demandar menos esforço e tempo computacional, a melhor resposta foi encontrada por GA.

Duas versões modificadas do DE baseadas no conceito de aprendizado por oposição foram utilizadas por Chelliah et al. (2014) para solucionar a coordenação de relés direcionais. A técnica *Chaotic Differential Evolution* (CDE) utiliza um fator de escala caótico para evitar uma possível convergência prematura do algoritmo, enquanto que o aprendizado por oposição proporciona que, simultaneamente, duas posições de aproximação sejam analisadas para busca da resposta, sendo uma estimativa normal e outra em posição oposta.

Albasri, Alroomi e Talaq (2015) apresentaram duas propostas de minimização dos tempos de operação e coordenação dos relés de sobrecorrente. Utilizando conceitos evolutivos foi proposta a nova técnica de Otimização Baseada em Biogeografia (OBB). Neste estudo, os autores também realizaram a implementação híbrida do método com programação linear (OBB-PL) e, deste modo, apresentaram resultados de melhor qualidade do que em comparação com outros algoritmos híbridos como PSO-PL, GA-PL e GA-PNL.

Uma análise comparativa do desempenho de meta-heurísticas baseadas em diferentes conceitos foi realizada no estudo de Alam, Das e Pant (2015), onde o DE apresentou melhores soluções para a FO do que AG, OEP, ADE, Busca Harmônica (BH) e OAS.

A primeira proposta de coordenação de relés de sobrecorrente via algoritmo dos vagalumes foi apresentada em Gokhale e Kale (2014), onde, conhecida a corrente de ajuste

dos relés, o algoritmo foi utilizado para otimizar o ajuste do múltiplo de tempo em um problema declarado como linear.

Em Hussain et al. (2014) e Tharakan e Swathika (2017), os autores também realizaram a coordenação ótima de problemas linearizados via FFA, porém, no primeiro estudo, uma proposta modificada foi apresentada: *Modification of the Classic Firefly Algorithm* (MFFA), a qual considera o efeito da dimensão da população na resolução do problema.

Em Gokhale e Kale (2015), o algoritmo dos cucos foi utilizado para resolver o problema de coordenação de forma linearizada ao se definir previamente o ajuste do *MC*. Os resultados obtidos foram considerados satisfatórios e foram verificados comparando-os com um resolvidor de PL para dois sistemas, sendo um radial e outro realimentado.

Considerando *TMS* e *MC* variáveis a serem otimizadas, Darji et al. (2015) realizaram diversas simulações utilizando o CSA para coordenação de sistemas elétricos malhados. No estudo, os autores obtiveram a melhora no desempenho do algoritmo conforme a variação dos parâmetros iniciais do mesmo, onde a obtenção de uma solução ótima global ficava condicionada ao refinamento do ajuste do número de ninhos (n) e da taxa de descoberta (pa). Os autores afirmam que o CSA possui um alto grau de precisão e robustez, alcançando inclusive respostas de melhor qualidade do que metodologias híbridas.

O FFA muitas vezes pode apresentar um espaço busca muito extenso, desvio-padrão relativamente grande para uma amostra de várias execuções, mesmo com uma boa média para a resposta final do problema. Em Rajput, Pandya e Joshi (2015), foi apresentada uma metodologia híbrida CSA-FFA para resolver o problema de coordenação de relés direcionais, para minimizar o problema relacionado ao tamanho do espaço de busca, visto que, em muitas situações, o FFA não converge ao ótimo global. O algoritmo proposto no referido trabalho obtém através do CSA os ajustes de *TMS* e *MC* do relé em uma primeira etapa. Estes resultados são então definidos como limites superiores de uma nova etapa de busca em FFA. Como efeito, reduzem o espaço de busca e encontram uma solução ótima global com um desvio mínimo das respostas. O método proposto é comparado com a metodologia híbrida de GA-PNL, bem como com os métodos convencionais CSA e FFA, demonstrando que o CSA-FFA pode obter melhor solução, apresentando menor desvio padrão nas respostas e melhor eficiência computacional para a complexidade do problema para o qual foi testado.

Em Rawat, Kale e Gokhale (2016), os autores realizaram estudos comparativos entre o desempenho das metaheurísticas bio-inspiradas FFA, CSA, GA e o híbrido GA-PNL na coordenação de relés de sobrecorrentes direcionais em sistemas malhados. Neste estudo a integração da utilização de métodos matemáticos clássicos aliados às meta-heurísticas em GA-PNL forneceu melhores resultados. Porém, dentre as abordagens convencionais, o CSA apresentou superioridade em relação ao FFA e ao GA. Os

autores indicam ser impossível definir a existência de um algoritmo universal de inteligência artificial que resolva todos os tipos de problemas de otimização. Também, mencionam que, para aplicação em um sistema de proteção, é necessário avaliar a escolha do método de acordo com o aumento da complexidade da coordenação.

Recentemente, em Dehghanpour et al. (2018), foi proposta a utilização da metodologia híbrida CSA-PL para resolver o problema de coordenação de relés de sobrecorrente resultantes de microgrids e inserção de Geração Distribuída (GD) no sistema elétrico.

Em Wibowo et al. (2018), foi feita a coordenação adaptativa de um sistema malhado de 9 barras com 3 fontes de alimentação através do FFA em conjunto com redes neurais artificiais. É importante ressaltar que, neste estudo, foi considerado o impacto da inserção de GDs na rede de distribuição e a necessidade do sistema ser novamente coordenado conforme se altera a topologia da rede.

Além disso, é importante ressaltar que o FFA tem sido amplamente explorado para realizar a coordenação de sistemas elétricos com GD e *microgrids*. Em trabalhos recentes, como Orazgaliyev et al. (2019) o FFA foi utilizado para parametrizar o *TMS* e o *MC* dos relés que formam a proteção de um sistema teste de 19 barras, testando a coordenação do mesmo sistema com e sem a inserção de GD. Por fim, no trabalho de Tiwari, Singh e Choudhary (2019), o FFA foi utilizado em um sistema radial de 9 barras com 5 fontes de geração, sendo que, dentre elas, 4 eram GDs.

1.6 Estruturação do Trabalho

O restante desse Trabalho está organizado da seguinte forma: O Capítulo 2 apresenta os conceitos gerais da proteção dos sistemas elétricos de potência, bem como as definições de coordenação e seletividade. Também, conta com uma abordagem mais aprofundada sobre os relés de sobrecorrente, aspectos construtivos, operação, normas, tipos de curva, além dos demais dispositivos de proteção empregados nos esquemas de proteção.

No Capítulo 3, é realizada uma rápida revisão da literatura acerca dos métodos de otimização aplicados para solucionar o problema de coordenação. Também, são apresentadas as três heurísticas testadas e adaptadas para busca de melhores soluções para o problema de coordenação de relés de sobrecorrente, sendo estas: FFA, PSO e CSA.

O Capítulo 4 exhibe a formulação matemática do problema de coordenação dos relés de sobrecorrente.

No Capítulo 5, são exibidos os resultados para os sistemas testados, as grandezas envolvidas, a aplicação dos algoritmos, a calibração dos mesmos e os parâmetros utilizados para resolução. As soluções obtidas em cada um dos casos são comparadas com os resultados reportados na literatura.

Por fim, no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões, sugestões para trabalhos futuros e os trabalhos publicados.

2 FUNDAMENTOS DA PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE

Tendo em vista a complexidade do sistema elétrico de potência, desde a geração até às redes distribuição de energia elétrica, evidencia-se a importância da proteção desses sistemas, uma vez que o serviço deve ser disponibilizado continuamente a seus usuários. Sendo assim, em condições de falta, é necessário eliminá-las de forma rápida, desligando-se o menor trecho possível do sistema, assegurando a continuidade do serviço para o maior número possível de usuários. Para tal, os diversos elementos de proteção ao longo da rede devem atuar de forma seletiva, o que é assegurado quando os mesmos são elencados para atuação segundo uma ordem em relação ao tempo, ou seja, sob uma coordenação.

O ato de coordenar dispositivos de proteção consiste em determinar a ordem de atuação dos mesmos na escala de tempo tendo em vista a sua curva característica de atuação, garantindo operação rápida e assegurando a seletividade, isto é, para um determinado ponto de falta da rede, garantindo atuação da proteção local (principal), e no caso de falha desta, a atuação da proteção de retaguarda.

Neste Capítulo, são apresentadas as principais características dos relés de sobrecorrente, bem como suas características de operação, tipos de curva e os aspectos referentes a cada uma de suas unidades de operação, além dos conceitos de seletividade e coordenação, dentre outros termos relevantes para este estudo.

2.1 O Relé de Sobrecorrente

Relés de sobrecorrente são dispositivos que atuam para um valor de corrente maior do que a do seu ajuste. Ocorrendo uma anomalia no sistema, na qual a magnitude da corrente ultrapasse o valor ajustado para este relé, o mesmo deve atuar de forma instantânea ou após dado intervalo de tempo, conforme a necessidade.

O relé de sobrecorrente é um dispositivo empregado nos esquemas de proteção do sistema elétrico, atuando como sensor, monitorando frequentemente os níveis de corrente elétrica e comandando a atuação de abertura do disjuntor, quando sujeito às condições anormais de curtos-circuitos ou sobrecargas. A atuação do RS é caracterizada pela emissão de um sinal que resulta na ação de alerta, bloqueio ou atuação de chaves ou disjuntores, de forma a isolar a parte defeituosa do sistema. Os RSs são geralmente conectados ao sistema de proteção de forma indireta, acoplados aos terminais do Transformador de Corrente (TC) (ALMEIDA, 2000).

De maneira geral, a classificação dos relés de sobrecorrente pode ser descrita da seguinte forma (KINDERMANN, 2018):

- Aspectos construtivos:
 - Relés Eletromecânicos;
 - Relés Eletrônicos ou estáticos;

- Relés Digitais;
- Atuação na abertura do disjuntor do trecho protegido:
 - Atuação direta;
 - Atuação Indireta;
- Instalação quanto ao trecho protegido:
 - Relé de proteção primária;
 - Relé de proteção de retaguarda;
- Tempo de atuação;
 - Relé de atuação instantânea;
 - Relé de atuação temporizada;

2.2 Tecnologias de Relés

2.2.1 Relés Eletromecânicos

É o tipo de relé mais tradicional existente, são os pioneiros a serem utilizados nos sistemas de proteção e, ainda hoje, são encontrados em grande número (PAPA, 2016). Possuem um princípio de funcionamento muito simples baseado em movimentos mecânicos oriundos dos acoplamentos elétricos e magnéticos.

As medições e comparações, bem como os mecanismos de disparo são analógicos, onde o funcionamento se dá pelo emprego de uma força mecânica operando em um contato, como resposta a determinado estímulo. Estes relés, ainda podem atuar por atração ou indução eletromagnética.

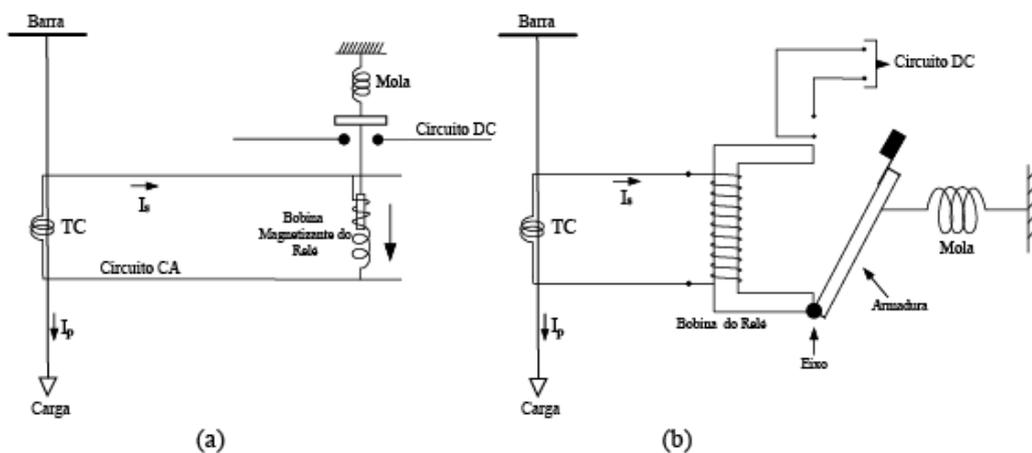
O relé de atração eletromagnética é simples, com funcionamento igual ao de um eletroímã, onde uma bobina recebe corrente elétrica e produz um campo magnético, que atrai uma haste metálica conectada a um contato móvel, realizando a comutação, abrindo ou fechando um circuito. Em alguns dispositivos, o relé ainda possui uma mola de rearme, fazendo com que o contato móvel retorne para a posição original, quando não existir mais corrente passando pela bobina ou quando a corrente atingir determinado valor (KINDERMANN, 2012).

Estes relés têm como característica operar imediatamente para valores de corrente recebidos através do secundário do TC que forem maiores do que o valor ajustado. Ou seja, no momento em que flui no secundário do TC uma corrente de valor maior do que o ajustado, esta corrente produzirá na bobina de magnetização do relé um campo magnético de força suficiente para acionar o mecanismo responsável pelo fechamento do contato, e, assim, o relé irá operar (SANTOS, 2017). Portanto, a operação do relé se dá através do fluxo do campo magnético suficiente para acionar e deslocar as partes móveis do relé.

Idealmente, o menor campo magnético que colocaria o relé no início da sua operação, ou seja, a força magnética idêntica a força mecânica de retenção, é denominado de limiar de operação do relé. Assim, esse limiar é a condição da qual a força resultante atuante na parte móvel do relé é nula. Neste estado, os mecanismos dos relés estão soltos, ou seja, como se estivessem flutuando, porém, sem movimento algum (KINDERMANN, 2012).

A Figura 1 exibe dois tipos de relé de atração eletromagnética.

Figura 1 – Relé de atração eletromagnética. (a) Relé de êmbolo. (b) Relé de alavanca.



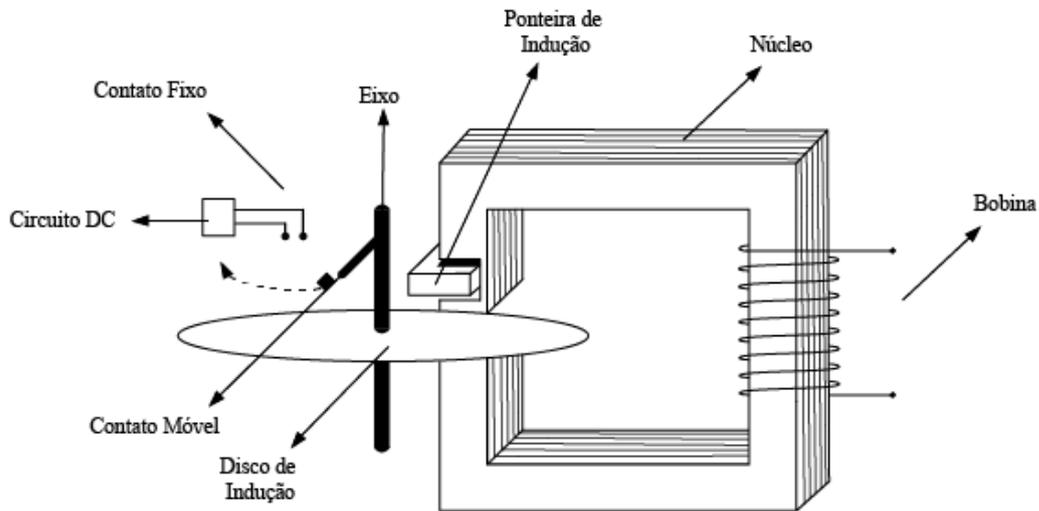
Fonte: Adaptado de Santos (2017) - Elaborado pelo autor.

Logo, se a corrente de operação do circuito do qual o relé está conectado for levemente superior ao valor da corrente de ajuste, em um dispositivo ideal, a alavanca deveria se mover. Porém, este movimento não ocorre na prática, devido a algumas influências relacionadas aos elementos intrínsecos da própria natureza e que compõem a construção e instalação do relé (KINDERMANN, 2018).

Os relés eletromecânicos de indução magnética operam similarmente ao princípio de funcionamento dos motores elétricos. Onde um disco ou rotor gira, deslocando-se angularmente para determinada direção (ALMEIDA, 2008). Este giro, ocasiona o fechamento do contato normalmente aberto do relé, ativando o mecanismo que resulta na abertura do disjuntor.

Vários são os tipos de relés baseados na interação de indução eletromagnética, porém, apesar da variação de sua composição construtiva, o princípio interno de funcionamento é muito semelhante. Dentre os principais relés de indução existentes, destacam-se o relé tipo medição de kWh, o relé de disco de indução, o relé de laço de indução e, ainda, o relé de cilindro de indução. Como mencionado, a forma de atuação é similar entre os modelos. A Figura 2 representa o diagrama construtivo básico de um relé de indução.

Figura 2 – Composição física do relé de disco de indução.



Fonte: Adaptado de Santos (2017) - Elaborado pelo autor.

A corrente de indução deste relé percorre a bobina de magnetização, gerando uma força magnetomotriz que, por sua vez, gera um fluxo dentro do circuito existente no núcleo do relé. A variação do fluxo magnético ocasiona no anel uma corrente induzida, gerando um novo fluxo magnético oposto a variação do fluxo original. Da relação mútua entre estes dois fluxos que percorrem o braço magnético que contém a bobina, resulta o torque necessário para realizar a rotação do disco. Esta rotação faz com que o contato móvel encontre o contato fixo, dando, assim, o sinal do relé para a abertura do disjuntor.

2.2.2 Relés Estáticos

Relés estáticos ou eletrônicos surgiram em meados dos anos 1960, sendo também denominados relés de estado sólido. São compostos por circuitos transistorizados que desempenham o gerenciamento do relé, operando suas funções lógicas e de temporização.

Suas principais vantagens de utilização quando comparados com os relés eletromecânicos, incluem sua velocidade de operação, menor necessidade de manutenção decorrente da ausência de partes móveis, possui múltiplas entradas e carga consideravelmente mais baixa aos transformadores de instrumentação (COVRE, 2011).

Neste tipo de tecnologia de relés, o termo estático implica que o relé não possui partes móveis para sua operação, sendo que, para esta função, são compostos por dispositivos eletrônicos analógicos, onde todos os comandos e operações são realizados eletronicamente (CORRÊA, 2012). Porém, na grande maioria de suas aplicações, os relés estáticos são responsáveis pelo acionamento mecânico de um relé auxiliar. Logo, este relé auxiliar é o responsável pela abertura do disjuntor.

Cabe ressaltar que, no início da utilização desses dispositivos, foram constatadas muitas operações indevidas, ocasionadas pela dificuldade de operar quando na ocorrência de transitórios no sistema elétrico, uma vez que estes relés são exclusivamente eletrônicos, sendo estes mais sensíveis aos pequenos distúrbios corriqueiros no SEP (ALMEIDA, 2008). Por esses motivos, relés estáticos tiveram baixa aceitação no mercado, sendo preteridos e substituídos por relés de tecnologia mecânica.

Em suas versões mais antigas, utilizavam diodos, resistores, transistores, capacitores e indutores, mas, ao longo de sua evolução, tornou-se possível a implementação de funções lógicas e processamento de sinais (CORRÊA, 2012). Porém, as incertezas quanto a confiabilidade aliadas ao rápido avanço tecnológico, bem como o advento dos relés microprocessados, encerraram precocemente o emprego dos relés estáticos em larga escala.

2.2.3 Relés Digitais

Os relés digitais surgiram no final da década de 60, porém, somente em 1972 foi realizada a primeira instalação piloto desta tecnologia em linhas de transmissão, executada pela Westinghouse e Pacific Gas & Electric (RUFATO, 2006).

A dificuldade inicial desta tecnologia era se igualar aos relés eletromecânicos quanto a confiabilidade de operação e durabilidade.

Nestes dispositivos, os responsáveis pela tarefa de implementação, processamento e execução das funções dos relés são microprocessadores e microcontroladores, em substituição aos circuitos eletrônicos analógicos da tecnologia anterior (COVRE, 2011). A principal característica destes relés é relacionada a não necessidade de variação física de parâmetros, visto que todos os comandos agora são realizados por programas de computadores.

Tais relés podem ocupar as seguintes funções no SEP (KINDERMANN, 2018):

- Supervisionamento de redes;
- Proteção de linhas de transmissão e sistemas de distribuição;
- Transmissão de sinais;
- Religamento de disjuntores;
- Identificação de tipos de defeitos e falhas;
- Sincronização de tempo via GPS; e
- Oscilografia.

Além disso, os relés digitais utilizam uma conversão analógica digital de todos os sinais de entrada das grandezas e parâmetros, sejam eles os valores previamente informados, bem como os dados de medições durante o monitoramento do sistema de proteção (COVRE, 2011). Assim, os microprocessadores são utilizados para implementação dos algoritmos correspondentes as funções de proteção e ao processamento de dados.

Em comparação aos relés convencionais, os digitais oferecem, principalmente, uma grande disponibilidade de ajustes, maior precisão e canais para comunicação com um computador remoto. Dentre as principais vantagens da utilização desta tecnologia, destacam-se:

- Tamanho compacto;
- Necessidade de TCs com menor classe de exatidão;
- Maior precisão e sensibilidade nos ajustes;
- Monitoramento remoto e automonitoramento;
- Detecção de falhas e diagnósticos;
- Informações em tempo real;
- Implementação e desenvolvimento de novas funções e métodos de proteção;
- Maior velocidade de operação e detecção de falhas do sistema; e
- Flexibilidade e versatilidade de aplicação.

Embora relés digitais apresentem as vantagens mencionadas, algumas desvantagens também podem ser apontadas:

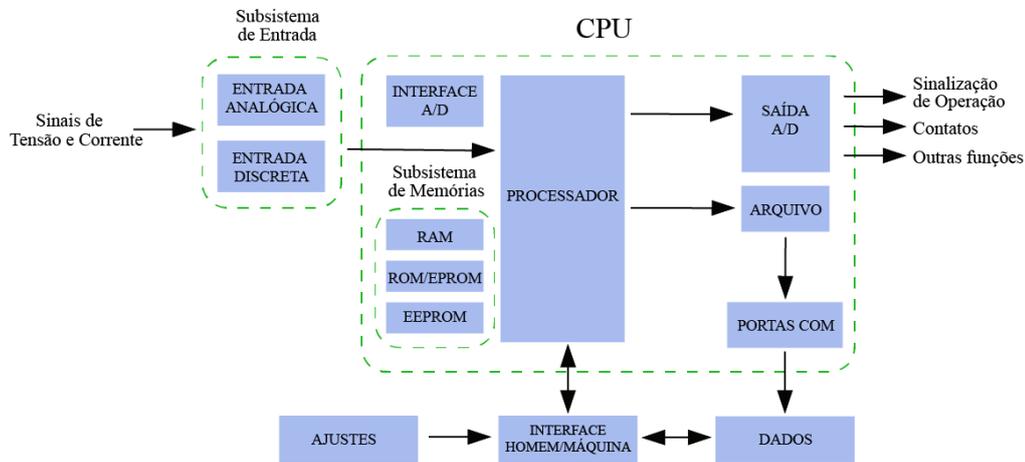
- Possuem vida útil reduzida;
- Necessitam de alimentação por fonte de energia externa; e
- São suscetíveis às interferências eletromagnéticas.

Porém, ainda hoje o grande desafio dos relés digitais tem sido tentar se igualar aos relés eletromecânicos em termos de obsolescência, resultante principalmente pelo rápido aprimoramento das tecnologias de hardware, que resultam em obsolescência precoce. Estima-se também que a vida útil média destes relés seja de 10 anos, enquanto que os relés eletromecânicos tem uma vida útil consolidada na casa dos 30 anos (RUFATO, 2006).

No caso dos relés de sobrecorrente, são inseridos sinais analógicos de tensão e corrente, bem como sinais discretos que exibem o estado dos disjuntores, chaves e outros relés acoplados a ele. Na sequência, estes dados são processados em subsistemas, antes de serem destinados ao processador principal do relé.

O diagrama de blocos de funcionamento de um relé digital é mostrado na Figura 3, onde podem ser vistos os subsistemas que compõe sua arquitetura.

Figura 3 – Diagrama de blocos do funcionamento dos relés digitais de sobrecorrente.



Fonte: Adaptado de Almeida (2008) - Elaborado pelo autor.

A seguir, são descritos cada um dos blocos funcionais de um relé digital:

- Bloco de entrada analógica: responsável por isolar eletricamente os circuitos eletrônicos do relé, bem como proteger o relé contra elevações transitórias de tensão e adaptar os sinais recebidos através do Transformador de Potencial (TP) e do TC em sinais adequados para a conversão Analógico-Digital (A/D). Neste bloco, ainda é realizada a filtragem de sinais indesejáveis de acordo com a função requerida.
- Bloco de entrada discreta: responsável por preparar os sinais para envio ao processador, podendo admitir uma fonte de alimentação auxiliar para validação da situação dos contatos. Ainda, realiza a isolação elétrica entre os circuitos e as entradas de sinal e, também, protege contra sobretensões transitórias.
- Bloco de interface Analógico/Digital: é o portador da interface que realiza a amostragem e conversão dos sinais analógicos em sinais digitais. Nesta etapa, são gerados pulsos de curta duração em determinada frequência apontando instantes de amostragem. Em cada instante, é convertido o valor instantâneo do sinal analógico em um correspondente digital que é repassado ao processador. A frequência de amostragem varia da ordem de 240 Hz a 2 kHz, embora atualmente existam relés operando na faixa de 64, 96 ou até 128 amostras por ciclo.
- Bloco de processamento digital: neste bloco, são executadas as lógicas dos algoritmos de operação do relé de acordo com a função de proteção desejada, para a qual o relé foi programado. Ou seja, é o processador que controla as funções do relé, aplica

a temporização e, ainda, realiza o autodiagnóstico e a comunicação com os periféricos instalados. Para a execução destas tarefas, o processador recebe o auxílio das memórias de somente leitura, memórias programáveis e de armazenamento volátil.

- Blocos de saídas A/D: dizem respeito às portas onde serão enviados os sinais com os comandos para a realização das funções do relé. Nestas saídas, podem ser conectados alarmes complementares de disparo visual ou sonoro, controles de tarefas auxiliares, sinalização para outros relés e, principalmente, os comandos para abertura de chaves e disjuntores.
- Bloco de registros e arquivamento de dados: responsável pelo armazenamento do histórico de ações e dados úteis para realização da análise de desempenho do dispositivo. Estes dados podem ser deletados ou transferidos para uma memória externa ou enviados via portas de comunicação para computadores e servidores.
- Saídas de comunicação: são portas de comunicação, geralmente do tipo serial e paralela, as quais são responsáveis pela troca de informações, bem como por emitir dados requeridos pelo programador.
- Interface Homem-Máquina: realiza, por meio de um computador, todas as tarefas responsáveis por tornar possível a interação do programador com o equipamento para a análise, obtenção de dados, informações referentes ao funcionamento e históricos de intervenção e operação, bem como os diagramas do relé.

Com os comandos realizados unicamente via software, a partir da adoção da utilização dos relés microprocessados, uma gama de informações e facilidades se tornaram disponíveis para o fomento da qualidade e segurança da proteção do SEP, aumentando a confiabilidade, diminuindo o número e o tempo das interrupções, tornando, assim, o SEP mais robusto.

2.2.4 Relés Numéricos

Relés numéricos nada mais são do que a evolução e o aprimoramento dos relés digitais acompanhando o avanço tecnológico. A principal distinção relacionada a arquitetura deste relé se dá pelo refinamento da tecnologia, incorporando ao microprocessador um ou mais processadores digitais de sinais, específicos para a função a desempenhar (SANTOS, 2017). Ou seja, o sinal convertido é microprocessado de maneira otimizada.

Assim, tornou-se possível com essa tecnologia a implementação de diferentes funções de proteção, simulando um relé ou todos os relés existentes em um só equipamento, onde, anteriormente, cada função era realizada em hardwares separados.

2.3 Ajustes dos Relés de Sobrecorrente para Proteção de Linhas

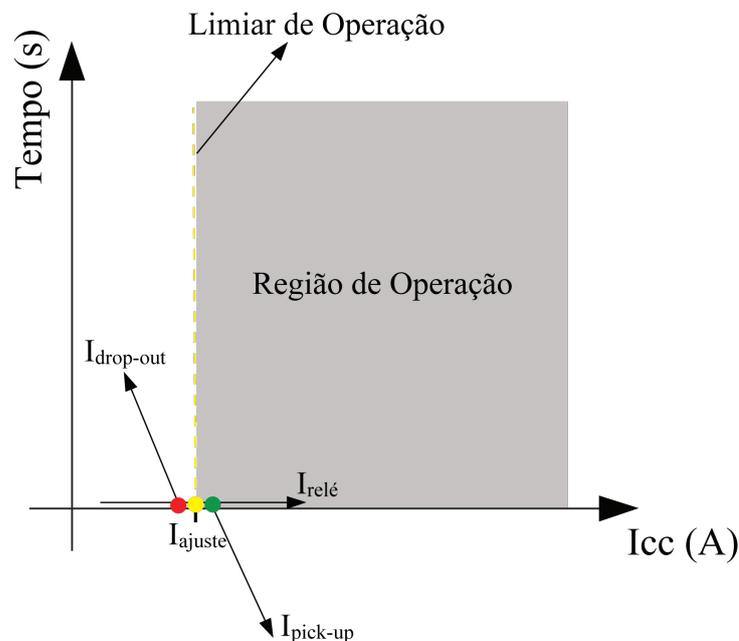
O ajuste da corrente de operação do relé de sobrecorrente depende da forma construtiva do relé a ser utilizado. Em dispositivos eletromecânicos, a corrente é ajustada por meio do tracionamento da mola de operação, variação do entreferro e, de maneira mais tradicional, através dos ajustes do TAP do relé (KINDERMANN, 1999).

Já para relés estáticos, o ajuste pode ser escolhido por meio de alterações nos elementos que compõe seu circuito, enquanto que, em relés digitais e numéricos, o ajuste de parâmetros é realizado através de configurações via software, onde existe a possibilidade da implementação de curvas de atuação nos relés com a função temporizada.

É importante lembrar que, de acordo com a filosofia de proteção dos relés de sobrecorrente, a atuação deste relé irá ocorrer quando a corrente monitorada por ele ($I_{relé}$) atingir um valor superior ao seu ajuste (I_{ajuste} ou I_{set}) previamente estabelecido. Em relés eletromecânicos, quando a corrente atingir o limiar de operação nada deve ocorrer, pois a força resultante é nula nesta situação (KINDERMANN, 2012).

A Figura 4 exibe o comportamento ideal de um relé de sobrecorrente quanto ao momento de sua atuação. $I_{pick-up}$ é o termo utilizado para o menor valor de corrente que realiza a operação do relé. $I_{drop-out}$ faz referência à desativação do relé, ou seja, é a maior corrente que produz a reabertura dos contatos após eles terem sido fechados.

Figura 4 – Atuação do relé de sobrecorrente.



Fonte: Adaptado de Santos (2017) - Elaborado pelo autor.

Sendo assim, quando:

- $I_{relé} < I_{pick-up}$: o relé não opera;
- $I_{relé} > I_{pick-up}$: o relé deve operar;
- $I_{relé} = I_{ajuste}$: o relé encontra-se em seu limiar de operação;
- $I_{relé} > I_{drop-out}$: o relé não deve abrir seus contatos;
- $I_{relé} < I_{drop-out}$: é realizada a abertura dos contatos fechados do relé;

De acordo com o que foi mencionado em tópicos anteriores, os relés de sobrecorrente eletromecânicos possuem uma menor precisão na operação, justificada pela dificuldade do ajuste da corrente, em decorrência do comportamento dos elementos físicos e analógicos que constituem o equipamento. O atrito existente nos mancais do eixos, o desgaste e a elasticidade da mola de retenção, o efeito que a temperatura pode ocasionar na dilatação de peças que compõem os mecanismos de acionamento do relé, bem como a corrosão de alguns elementos, colaboram para a diferença entre o que seria esperado na operação ideal e o que acontece em seu comportamento real.

Devido a estes fatores, são adotadas algumas margens na definição da corrente mínima de ajuste, de forma a garantir a adequada e segura operação. Assim, o ajuste da corrente de operação do relé deve obedecer ao critério exposto em Equação (2.1).

$$ff \cdot I_{carga} < I_{ajuste} < \frac{I_{ccmin}}{a} \quad (2.1)$$

Em 2.1, ff é o fator de folga, podendo variar entre 1,4 a 1,5. A adição deste fator evita operações indevidas do relé para variações de carga rotineiras no sistema elétrico, como flutuações ou transferências de cargas originadas por manobras na rede. O fator que divide o valor da corrente mínima de curto-circuito para o trecho protegido (I_{ccmin}) e que delimita o intervalo superior de ajuste garante maior confiabilidade na atuação do relé, visto que este garante que a corrente mínima de curto-circuito no final do trecho seja muitas vezes superior ao limiar de operação do relé. Assim, os valores utilizados para o parâmetro a dependem do tipo de relé, conforme Santos (2017):

- $a = 1,5$ para relés eletromecânicos;
- $a = 1,1$ para relés digitais;

Em relés eletromecânicos, a forma mais convencional de realizar o ajuste da corrente de operação é através da alteração do valor do TAP do relé.

O ajuste da corrente de atração feito pela mudança de TAP da bobina magnetizante de um relé eletromecânico, resulta na manutenção de mesma força exigida para deixar o relé no limiar de operação para a variação dos valores de corrente. Ou seja, a

força magnetomotriz (fmm) sempre gerará o mesmo fluxo magnético (Φ) que produzirá a mesma força de atração dos contatos abertos do relé. Sendo assim, é possível obter a mesma força variando o TAP e as espiras da bobina magnetizante do relé (KINDERMANN, 2018).

Admitindo que para um determinado relé a força magnetomotriz necessária para o limiar de operação seja 150 *A.e.*, tem-se:

- TAP 1 (A) x 150 espiras = 150 *A.e.* = Φ ;
- TAP 2 (A) x 75 espiras = 150 *A.e.* = Φ ;
- TAP 3 (A) x 50 espiras = 150 *A.e.* = Φ ;

Embora, ocorra a alteração dos estágios do TAP para qualquer valor disponível de ajuste, considerando sua corrente correspondente e o número de espiras do qual cada um está associado, a força produzida sempre será a exigida pelo relé. Sendo assim, o valor da I_{ajuste} é igual ao valor do TAP.

Para mensurar o limiar de operação do relé, utiliza-se o termo conhecido como múltiplo do relé (M), conforme (2.2). Este múltiplo relaciona a corrente monitorada pelo relé com o seu ajuste e indica quantas vezes a corrente de defeito é maior que seu limiar de operação (KINDERMANN, 2018).

$$M = \frac{I_{relé}}{I_{ajuste}} = \frac{I_s}{TAP} = \frac{I_p}{TAP \cdot RTC} \quad (2.2)$$

Em (2.2), $I_{relé}$ é calculado por $\frac{I_p}{RTC}$, ou seja, é a corrente vista pelo relé que chega através do enrolamento secundário do TC. Sendo I_p a corrente primária e I_s corrente secundária dos terminais do TC.

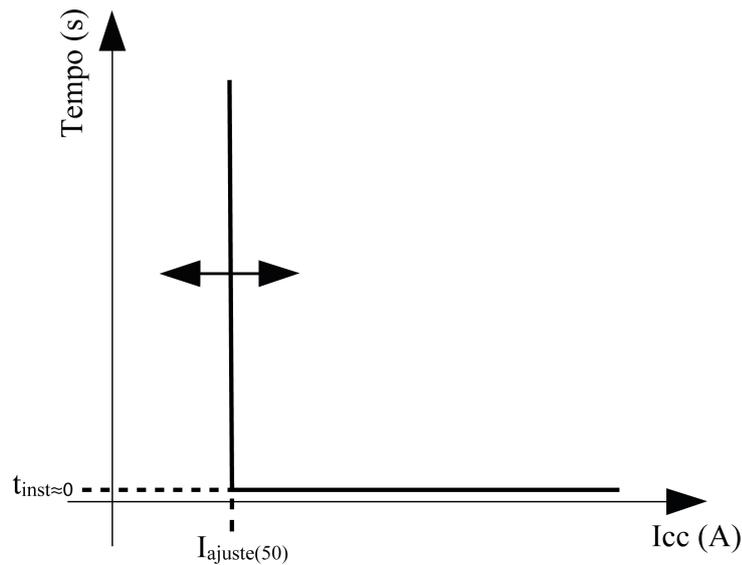
2.4 Relés de Sobrecorrente Instantâneos

Convencionalmente, os relés de sobrecorrente são compostos por um ou dois elementos que caracterizam sua atuação, os quais são conhecidos como unidades de sobrecorrente, podendo estas serem instantâneas ou temporizadas. Essas unidades comumente são representadas nos sistemas de proteção pela numeração 50 e 51, respectivamente, conforme a *American National Standards Institute* (ANSI).

A unidade 50 atua instantaneamente quando a corrente vista pelo relé atinge um valor predeterminado (ALZUHAIRI, 2010). As unidades instantâneas de relés mais modernos, como relés de tempo definido, trabalham com dois parâmetros ajustáveis: corrente mínima de atuação e tempo de atuação (tempo definido previamente). Já relés dotados da função 51, podem atuar de acordo com curvas de tempo, sejam elas de tempo definido ou de tempo inverso.

No passado, em relés eletromecânicos, estas unidades instantâneas não permitiam o controle do atraso de tempo, ou seja, o relé atuava em um intervalo de tempo muito pequeno, na ordem de milissegundos, sem nenhuma possibilidade de ajuste como pode ser visto na Figura 5. Porém, atualmente, os relés digitais possibilitam ajustes de tempo de atuação destas unidades (ALZUHAIRI, 2010).

Figura 5 – Curva de atuação do relé de sobrecorrente instantâneo.



Fonte: Adaptado de Alzuhairi (2010) - Elaborado pelo autor.

2.4.1 Ajuste da Corrente para Relés Instantâneos

Como a unidade instantânea não possui a função 51, de modo a evitar a atuação indevida de outros relés, o ajuste da corrente de operação deve ser de tal modo que não ocorra a sobreposição da zona de atuação dos relés localizados a jusante do mesmo. Sendo assim, usualmente, a corrente de atuação da unidade instantânea para proteção de linhas de transmissão, dada uma falta trifásica pode ser calculada por (2.3) (CORRÊA, 2012).

$$I_{ajuste(50)} = I_{cc_{3\phi}85\%LT} \quad (2.3)$$

Em (2.3), $I_{cc_{3\phi}85\%LT}$ é o valor da corrente de curto-circuito trifásico para 85% da linha de transmissão do trecho protegido.

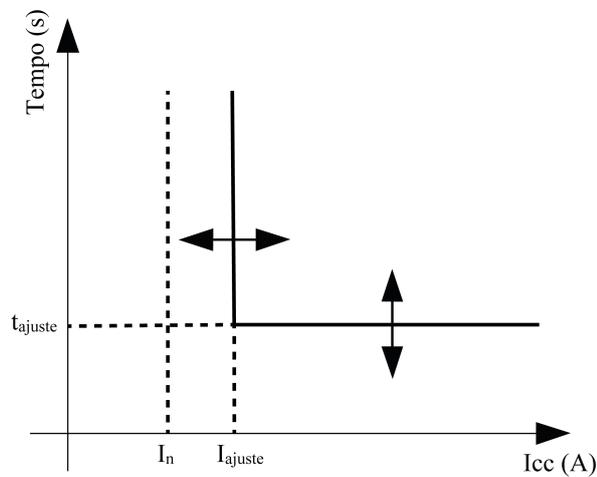
2.5 Relés de Sobrecorrente de Tempo Definido

Os Relés de Sobrecorrente de Tempo Definido (RSTDs) similarmente chamados como relés de atuação independente da corrente, são compostos pela unidade 50 e se caracterizam pela atuação em um determinado tempo pré-estabelecido. Sendo assim, a

operação destes relés independe do nível da corrente de falta que ultrapasse a corrente de *pick-up*. A unidade de tempo definido é comumente utilizada para a proteção primária de transformadores e linhas de transmissão, associado com os relés de sobrecorrente que possuam a unidade 51, aumentando a rapidez do esquema de proteção (CORRÊA, 2012).

Em um RSTD, duas condições devem ser satisfeitas para a operação: a corrente deve exceder o valor de configuração e o defeito deve ser contínuo por, pelo menos, um tempo igual à configuração de tempo do relé. A característica da curva de atuação destes relés é mostrada na Figura 6.

Figura 6 – Curva de atuação do relé de sobrecorrente de tempo definido.



Fonte: Adaptado de Alzuhairi (2010) - Elaborado pelo autor.

Nota-se que, após a corrente de falta atingir o valor de ajuste, o relé obedece a um determinado tempo de retardo e só então ocorre a atuação do relé, enviando, por exemplo, o comando de abertura do disjuntor. Ressalta-se que, para qualquer valor da corrente vista pelo relé ($I_{relé}$) acima da I_{ajuste} , o tempo para a atuação do relé não irá variar.

O múltiplo de corrente da unidade de tempo definido se relaciona com a corrente de atuação do relé no primário do TC de acordo com (2.4).

$$I_{ajuste(51)} = RTC \cdot MC \quad (2.4)$$

Relés mais modernos possuem a capacidade de parametrização do múltiplo de ajuste da corrente de atuação do relé, para mais de um estágio de proteção, sendo que para cada estágio deve ser incluída a configuração da corrente de *pick-up* e do tempo de retardo. Porém, em alguns relés, ainda não é possível ajustar este atraso no tempo de operação. Logo, a atuação deste tipo de relé se torna instantânea, para qualquer que seja o valor de corrente superior ao valor ajustado (KIDA, 2016).

Os RSTDs são muito utilizados como proteção de retaguarda do relé de distância em linhas de transmissão, retaguarda do relé diferencial em transformadores de potência e, ainda, como proteção primária para os alimentadores de saída e acopladores de barramento.

Por fim, cabe destacar que, uma desvantagem desse tipo de proteção, é a dificuldade em realizar a coordenação, pois necessita de alterações na parametrização do relé conforme a adição de cargas no sistema e, em algumas situações, a eliminação de faltas próximas à geração pode levar um tempo relativamente longo, apesar do alto valor da corrente de curto-circuito.

2.6 Relés de Sobrecorrente de Tempo Inverso

RSs de tempo inverso, também conhecidos por RSs com Tempo Mínimo Definido Inverso - *Inverse Definite Minimum Time* (IDMT), possuem seu tempo de atuação relacionado com o valor da corrente, geralmente, com característica inversa, isto é, o tempo de atuação é inversamente proporcional à magnitude da corrente de curto-circuito que sensibiliza o relé. Assim, quando submetido à altas correntes, o relé opera mais rápido do que para níveis de corrente inferiores.

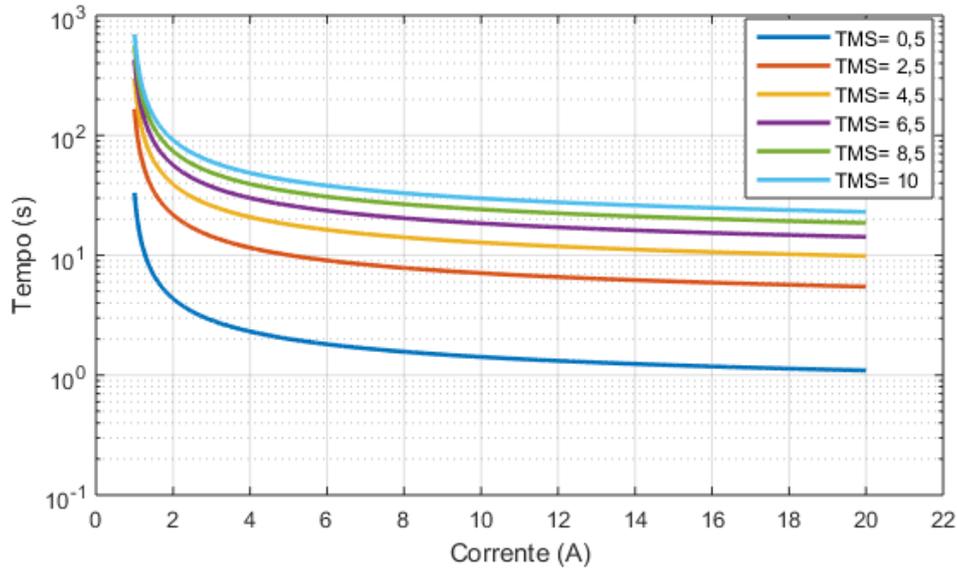
A unidade temporizada do relé de tempo inverso, também é conhecida como unidade 51 (código ANSI), e, por essa razão, estes dispositivos são usualmente nomeados como Relé 51 (CAMINHA, 1977).

O relé de sobrecorrente de tempo inverso possui três configurações a serem parametrizadas, sendo estas o ajuste de tempo ou múltiplo de tempo, ajuste de corrente da unidade temporizada e a escolha do tipo de curva que irá determinar o comportamento de atuação do relé. Em relés eletromecânicos, a curva de atuação era deslocada por meio de comandos físicos, onde um mostrador em forma de disco poderia ser movimentado para um lado e para o outro, como em um discador circular de telefone. Assim, a configuração do *TMS* ficou conhecida como configuração do “discador de tempo” (do termo em inglês *Dial Setting*).

A variação dos múltiplos *TMS* e *MC* são responsáveis por mover horizontalmente e verticalmente a curva tempo *versus* corrente do relé, respectivamente, onde, ao ser deslocada para cima, o relé irá operar de forma mais lenta, ajustando a configuração de *TMS* para um valor alto (próximo a 10). Para uma configuração de *TMS* de valor baixo (geralmente próximo a 0,5), a operação do relé será mais rápida, isto é, em um menor intervalo de tempo.

Essa variação do *TMS* e, conseqüentemente, a alteração do comportamento da curva pode ser vista na Figura 7, onde a sensibilização do mesmo relé com curva normalmente inversa da norma IEC é submetida a diferentes ajustes do múltiplo de tempo mantendo fixo o ajuste da corrente de atuação.

Figura 7 – Curvas NI de um relé de sobrecorrente da norma IEC de variando o ajuste do TMS e mantendo fixo o valor do MC .



Fonte: Elaborado pelo autor.

A configuração do múltiplo de corrente é utilizada para definir a corrente de ajuste de disparo do relé, ou seja, o valor da corrente de falta que excede o limiar de operação e sensibiliza o relé, o qual pode ser determinada por (2.5):

$$MC = \frac{f_{carga} \cdot I_n}{RTC} \quad (2.5)$$

Sendo que, MC – valor do múltiplo de corrente ajustável; f_{carga} – fator de sobrecarga considerado; I_n – valor da corrente; RTC – relação de transformação do TC.

A Figura 8 ilustra a variação do comportamento da curva de operação de um mesmo relé para diferentes ajustes de corrente.

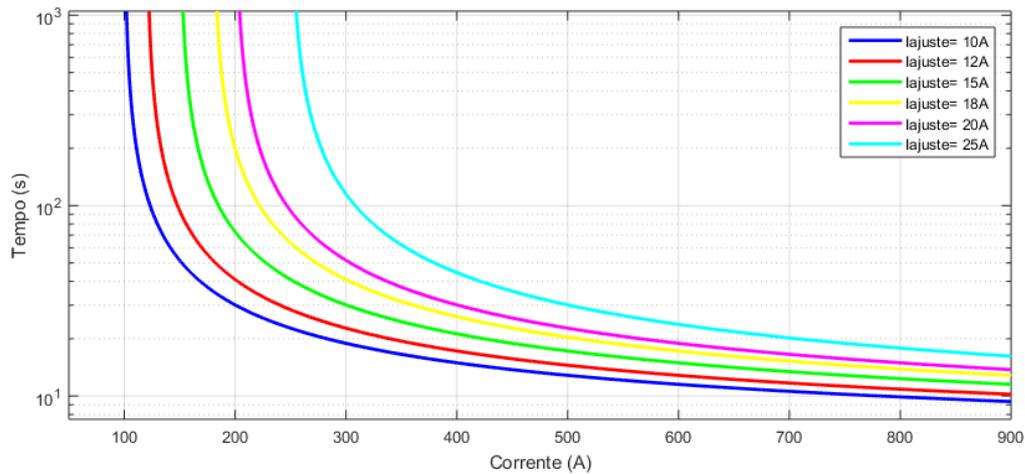
Logo, a corrente de atuação – ligeiramente superior ao limiar de operação – da unidade temporizada do relé, pode ser descrita por (2.6):

$$I_{pick-up(51)} \geq RTC \cdot MC \quad (2.6)$$

Da característica de operação inversa surgem então as variações dos tipos de curvas de operação dos relés, as quais são padronizadas por normas internacionais, sendo as principais a IEC, a IAC, a US e a IEEE.

Cada relé é dotado de uma família de curvas, sendo que alguns deles podem ser programados para mais de uma dessas normas e, desta forma, proporcionam uma maior possibilidade de variação para seu esquema de proteção.

Figura 8 – Curvas NI de um relé de sobrecorrente da norma IEC, variando a corrente de ajuste e mantendo fixo o TMS .



Fonte: Elaborado pelo autor.

A seguir, é apresentada a família das curvas padronizadas características da norma IEC Std. 60255 e NBR 7099, a qual é utilizada neste Trabalho, sendo que estas podem ser:

- Curva Normal ou Normal Inversa (NI);
- Curva Inversa Moderada ou Inversa de Tempo Curto (IM);
- Curva Muito Inversa (MI);
- Curva Extremamente Inversa (EI); e
- Curva Longamente Inversa ou Inversa de Tempo Longo (LI).

O tipo de curva está relacionado com o formato da curva tempo *versus* corrente, ou seja, cada curva possui características distintas de atuação e aplicação. A seguir, são citadas as principais características das curvas inversas mais utilizadas para parametrização do Relé 51 segundo a IEC.

1. RS de curva NI: A precisão do tempo de operação pode variar de 5% a 7,5% do tempo operacional nominal, conforme especificado nas normas. A incerteza quanto ao tempo de operação nominal e o tempo de operação necessário podem exigir uma margem de 0,4 a 0,5 segundo. É usado quando a corrente de falta é dependente da geração da falha e não da localização da falha.

2. RS de curva MI: A margem de operação pode ser reduzida para um valor na faixa de 0,3 a 0,4 segundo. São amplamente utilizados em casos onde existe uma redução substancial da corrente de falta à medida que a distância do ponto de falta e da fonte de alimentação aumenta, sendo eficazes para faltas à terra devido às suas características íngremes da curva. Podem ser usados quando a corrente de falta é dependente da localização da falta e quando a corrente de falta independe das mudanças normais na capacidade de geração.
3. RS de curva EI: O tempo de operação é aproximadamente inversamente proporcional ao quadrado da corrente, tornando este tipo curva ainda mais inversa do que as outras. O uso de relés de sobrecorrente extremamente inversos torna possível a atuação da proteção em um curto período de tempo, apesar das altas correntes de comutação. Indicados para a proteção de máquinas contra superaquecimento, também são empregados na proteção de alimentadores de distribuição com correntes de pico na conexão e para proteção de cabos com custo elevado.

Os relés digitais operam segundo uma função que reproduz sua curva normalizada, que representa a relação entre o tempo de atuação e a corrente do relé. De acordo com a norma IEC a curva é representada matematicamente pela função descrita na Equação (2.7).

$$T_{relé} = TMS \frac{k_1}{M^{k_3} - k_2} + k_4 \quad (2.7)$$

Sendo que, $T_{relé}$ – tempo de operação do relé; TMS – ajuste do múltiplo de tempo; M – múltiplo do relé; Além disso, $k_{(1,...,4)}$ são os coeficientes descritos na Tabela 1, específicos de cada tipo de curva e determinam o tipo de curva e seu grau de declividade.

A Tabela 1 fornece os valores dos coeficientes de cada tipo de curva de acordo com a norma IEC e a Figura 9 exhibe a característica de cada uma das curvas.

Tabela 1 – Coeficientes da família de curvas da norma IEC.

Tipo de Curva	k_1	k_2	k_3	k_4
NI	0,14	1	0,02	0
IM	0,05	1	0,04	0
MI	13,5	1	1	0
EI	80	1	5	0
LI	120	1	1	0

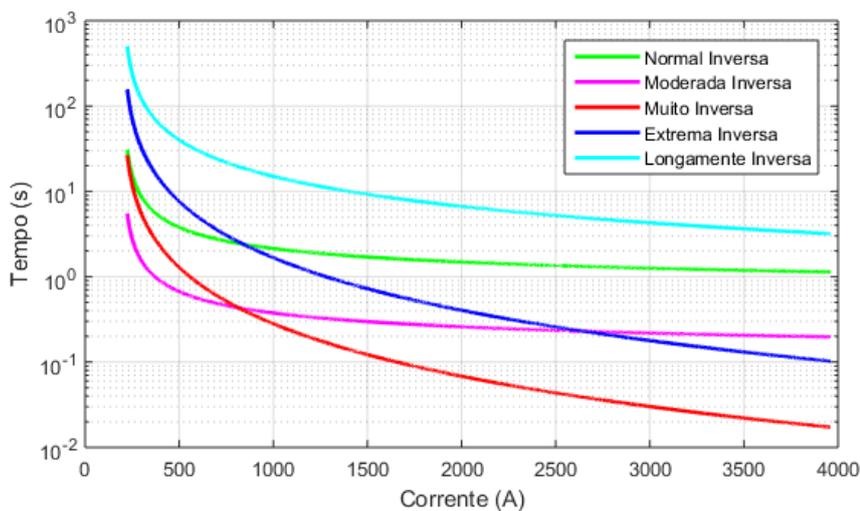
Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode ser visto na Figura 9, a curva MI tem uma inclinação muito mais acentuada e, portanto, de resposta muito mais rápida na ocorrência de níveis de corrente mais baixos, em comparação com a curva inversa. Relés com a curva MI são particularmente adequados em situações em que existe a redução substancial da corrente de

curto-circuito, à medida com que aumenta a distância em relação à fonte de alimentação do sistema.

A curva EI, por sua vez, tem como característica o tempo de operação ser inversamente proporcional ao quadrado da magnitude da corrente aplicada, tornando esta curva adequada para utilização de relés destinados à proteção de circuitos da barra de alimentação em redes de distribuição, onde o alimentador está sujeito a picos de corrente na partida.

Figura 9 – Família de curvas de um Relé 51 da norma IEC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.7 Ajustes da Unidade Temporizada

Para a unidade temporizada, o valor do múltiplo de corrente deve assumir um valor suficiente para garantir a não atuação do relé quando o sistema elétrico se encontrar em condições normais de operação, inclusive, o ajuste escolhido deve considerar possíveis aumentos de carga. De maneira complementar, o valor ajustado deve assumir um valor menor do que o da corrente mínima de curto-circuito bifásico para o trecho protegido. Sendo assim, o ajuste do MC da unidade 51 do relé de fase deve satisfazer as condições expostas em (2.8):

$$\frac{f_c \cdot I_{carga}^{max}}{RTC} \leq MC_{(51)} \leq \frac{I_{2\phi}^{min}}{RTC} \quad (2.8)$$

Onde:

$$f_c = \left(1 + \frac{tx_{cresc}}{100}\right)^p \quad (2.9)$$

Em (2.8) e (2.9), fc é o fator de crescimento de carga, I_{carga}^{max} é a corrente de carga máxima considerada, $I_{2\phi}^{min}$ é a corrente de curto-circuito bifásica mínima do trecho protegido, tx_{cresc} é a taxa percentual de crescimento de carga do sistema para o período e p é o período de n anos definido no planejamento do sistema.

2.8 Seletividade e Coordenação

Os subsistemas que compreendem um sistema de proteção, bem como os dispositivos que o compõem, não devem operar de maneira independente, ou seja, necessitam obedecer uma lógica de funcionamento desencadeando de maneira ordenada as operações existentes entre os mesmos, de modo a garantir o funcionamento adequado do sistema de proteção.

A seletividade é caracterizada pela capacidade do sistema de proteção em reconhecer os distúrbios no SEP e apontar em quais situações a rápida atuação se faz necessária, quando um atraso de tempo é exigido, ou ainda, quando não existir a necessidade de operação como por exemplo, na ocorrência de um transitório. Além disso, a proteção deve ter a capacidade de isolar completamente o trecho ou elemento defeituoso, conforme a condição de desconectar a menor parcela possível do SEP (HEWITSON; BROWN; BALAKRISHNAN, 2004).

Um sistema de proteção está coordenado quando os relés atuam o mais rápido possível para os defeitos ocorridos dentro de suas zonas de proteção primária. Entretanto, quando a proteção primária falhar, os relés de retaguarda devem operar com um atraso de tempo intencional (NEGRÃO, 2015).

A atuação de um relé de proteção de retaguarda antes do relé principal é indevida e indesejável, não devendo se sobrepor a atuação primária, sem que esta falhe para eliminação de uma falta na sua zona de proteção. Logo, a coordenação dos relés de sobrecorrente pode ser compreendida como uma estratégia de segurança, de forma que, para qualquer corrente de curto-circuito, existe uma sequência crescente de tempos de operação no sentido do relé primário para os relés de retaguarda, de modo a assegurar e permitir a seletividade nas possíveis interrupções em determinados trechos do sistema elétrico.

De maneira complementar, a sensibilidade é o termo utilizado para designar a capacidade da proteção do SEP em responder adequadamente às condições adversas de operação como curtos-circuitos, falhas e outros defeitos, para o qual foi projetado.

2.9 Zonas de Proteção

Zona de proteção ou região protegida é uma faixa que está associada a determinados dispositivos de um subsistema de proteção, sendo estes responsáveis por eliminar todas as ocorrências de distúrbios que aconteçam em seu domínio.

Uma zona de proteção define a região de atuação de cada dispositivo quanto a sua prioridade em operar. Estas regiões determinam, por exemplo, o limite para a atuação primária de um relé, o qual deve atuar para falhas que tenham ocorrido dentro de sua zona de atuação (PHADKE; THORP, 2009).

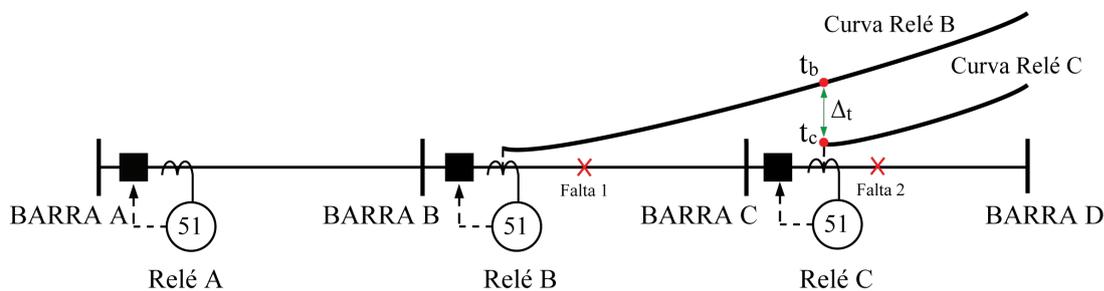
Como o sistema de proteção também é suscetível à falhas, é necessária a existência de mecanismos complementares de proteção. Assim, para o caso da não operação do relé principal, a atuação de um segundo relé é imprescindível.

Para isto, as zonas de proteção entre relés são sobrepostas de maneira intencional. Esta redundância é importante, tanto para suprir um relé inoperante, quanto para evitar a existência de pontos do SEP que não sejam monitorados pelo sistema de proteção. Isto garante que não existam pontos desprotegidos, chamados também como “pontos cegos” (BLACKBURN; DOMIN, 2015).

Comumente, os relés que compreendem um sistema de proteção operam de acordo com duas condições básicas, sendo estas a proteção principal ou primária e a proteção de retaguarda, também conhecida pelo termo back-up.

A Figura 10 ilustra a coordenação entre a proteção primária e de retaguarda.

Figura 10 – Curvas de ajuste dos relés proteção e a coordenação entre as zonas de atuação.



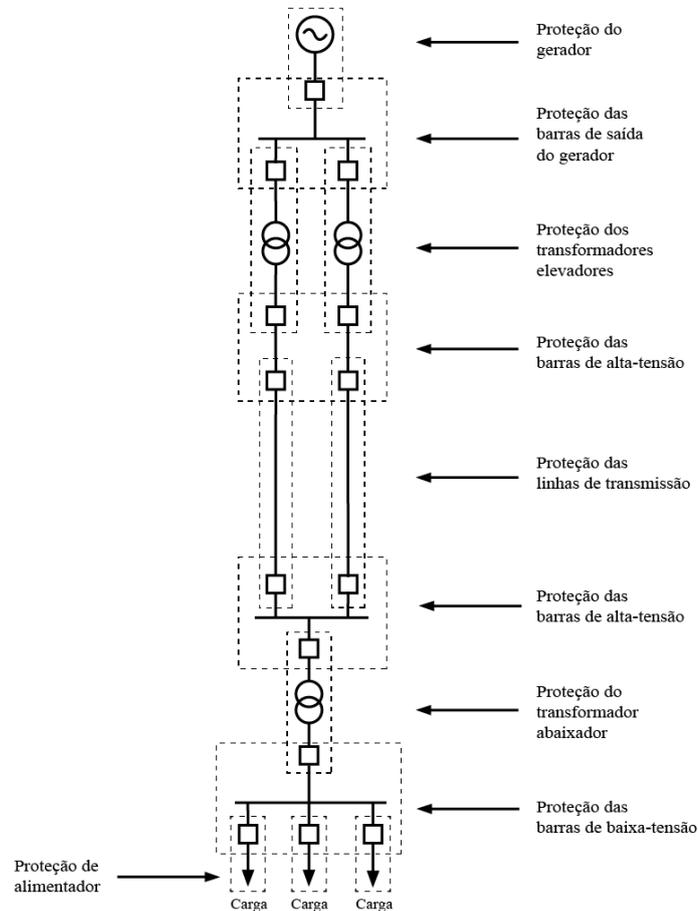
Fonte: Adaptado de Perez e Urdaneta (1999) - Elaborado pelo autor.

Como já foi mencionado, o relé principal deve atuar na ocorrência de faltas dentro de sua respectiva zona de proteção, ou seja, deve operar o mais rápido possível de forma a eliminar o defeito. Em contrapartida, a proteção de retaguarda opera somente quando, por algum motivo não intencional, a proteção primária não funcionar (HEWITSON; BROWN; BALAKRISHNAN, 2004)

A Figura 11 mostra diferentes zonas de proteção, onde também é possível visualizar a sobreposição entre as zonas.

Adicionalmente, é adequado para delimitação das zonas de proteção que as mesmas possuam a menor área possível, a fim de que, na ocorrência de um defeito, a abertura de um disjuntor sempre isole a menor área possível do SEP.

Figura 11 – Diferentes zonas de um sistema de proteção.



Fonte: Adaptado de Almeida (2008) - Elaborado pelo autor.

2.10 Tempo de Coordenação entre Atuação de dois Relés

A seletividade do sistema de proteção fica garantida quando a diferença entre os tempos de atuação entre o relé primário e um ou mais relés de proteção de retaguarda, para uma determinada falta dentro de suas respectivas zonas de atuação, são superiores a diferença de tempo entre $T_{retaguarda} - T_{primário}$ (KIDA, 2016). Este intervalo de tempo é conhecido por Intervalo de Tempo de Coordenação - *Coordination Time Interval* (CTI).

A imposição desta diferença de tempo está relacionada com o tempo de resposta da proteção principal, bem como com o tempo necessário para que ocorra a abertura do disjuntor, a tolerância imposta pelo fabricante do equipamento e por uma determinada margem de tempo adotado no projeto para segurança de operação (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2012).

De posse desses conhecimentos, torna-se possível a obtenção da seletividade cronométrica, onde são incorporados atrasos intencionais entre os tempos de atuação de

um relé de proteção primária em relação ao responsável pela proteção de retaguarda. Comumente, em relés de sobrecorrente eletromecânicos e microprocessados esse valor varia de 0,3 a 0,4 segundo e 0,1 a 0,2 segundo, respectivamente (MANSOUR; MEKHAMER; EL-KHARBAWE, 2007).

2.11 Relé de Sobrecorrente Direcional

Relés de sobrecorrente 50/51 não são inerentes a direcionalidade, isto é, as medições oriundas dos TCs não indicam à direção do fluxo de potência das correntes de falta. Por isso, são frequentemente aplicados em sistemas de distribuição, pois estes possuem características radiais, onde as direções dos fluxos de corrente são conhecidas. Porém, quando o sistema elétrico não é radial, é de fundamental importância que os relés atuem em uma sequência de operação específica somente para faltas em um determinado sentido.

Para sistemas em anel, malhados ou de realimentação em paralelo, é praticamente impossível alcançar a coordenação de forma seletiva com a aplicação somente de RSs 50/51 sem direcionalidade (HOROWITZ; PHADKE, 2008). Para obter a seletividade nesses casos, são utilizados os relés de sobrecorrente com a função direcional. Os Relés de Sobrecorrente Direcionais (RSDs) são enumerados pela função ANSI de código 67.

A unidade direcional também possui as funções 50 e 51, mas a proteção é realizada com dispositivos capazes de considerar as correntes de falta somente em um determinado sentido previamente estipulado. Isto significa que, se um curto-circuito provocar uma corrente no sentido contrário (corrente reversa), estes relés não devem “enxergar” essa corrente, bloqueando essas medições de corrente e, desta forma, não sendo sensibilizados, evitando a atuação indevida do sistema de proteção.

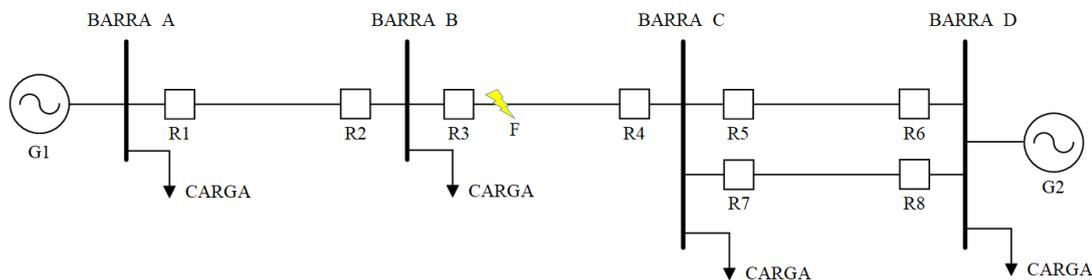
Em um sistema radial com apenas uma fonte de alimentação, para uma falta entre dois pontos, basta abrir o disjuntor entre a geração e falta por meio de um relé direcional ou através de um relé de distância.

Porém, em sistemas malhados, ou retroalimentados como o mostrado na Figura 12, a aplicação anterior não seria a mais apropriada, visto que as direções de corrente sofrem influência de diversas combinações, que por sua vez dependem da localização da falta.

Pode-se verificar na Figura 12 que, para faltas internas à linha de transmissão entre as barras B e C, para uma proteção eficaz, é desejável apenas que os disjuntores de R_3 e R_4 sejam abertos.

Caso o sistema de proteção seja composto por relés de sobrecorrente sem a unidade direcional (67), os disjuntores de R_2 , R_5 e R_7 podem abrir para o mesmo ponto de falta (operação indevida), pois os relés de sobrecorrente tem capacidade apenas de monitorar o módulo das correntes de curto-circuito, e não seu sentido.

Figura 12 – Exemplo de sistema em malha com falta na linha entre as barras B e C.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Três condições devem ser satisfeitas para a operação de um Relé 67:

- Magnitude da corrente de curto-circuito maior do que seu ajuste;
- Atraso de tempo; e
- Direcionalidade no sentido desejado.

O sentido do fluxo de potência pode ser identificado usando a tensão como referência de direção. O elemento da unidade 67 obtém a distinção do sentido do fluxo de corrente por meio da análise dos ângulos entre fasores. Para isso, é utilizado o ângulo de fase entre a corrente de falta e um valor referencial, podendo ser uma tensão. O relé então é capaz de obter qual é a defasagem entre a tensão e a corrente, indicando qual é o sentido positivo da corrente de acordo com tensão adotada como referência (PHADKE; THORP, 2009).

2.12 Considerações do Capítulo

Neste Capítulo, foram abordados os principais conceitos referentes aos relés de proteção contra sobrecorrente em sistemas elétricos de potência, sendo introduzidos os conceitos fundamentais dos relés eletromecânicos, estáticos e os modernos equipamentos microprocessados. Também, foram discutidas suas propriedades quanto as funções de atuação instantânea, temporizada e com direcionalidade. Ainda, foram apresentadas as curvas de tempo impostas aos relés de sobrecorrente de tempo inverso. Complementarmente, foram apresentados os conceitos sobre os critérios de coordenação e seletividade entre os dispositivos de proteção primário e de retaguarda. Os conceitos apresentados neste Capítulo são imprescindíveis para o entendimento do modelo matemático de coordenação que é apresentado no decorrer do Trabalho.

3 MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO

Este Capítulo contextualiza a forma de funcionamento dos métodos de otimização utilizados na resolução do problema de coordenação dos relés de sobrecorrente direcionais, sendo abordados, de maneira mais detalhada, os conceitos das metaheurísticas bio-inspiradas utilizadas.

3.1 Heurísticas

A otimização, também conhecida por programação matemática, é a abordagem de problemas de planejamento e projeto usando ferramentas de cálculo, sendo possível formular matematicamente a maioria dos problemas de otimização no formato genérico descrito por Yang (2010b) em (3.1).

$$\begin{aligned} \min_{x \in \mathcal{R}} \quad & f_i(x), \quad (i = 1, 2, \dots, M), \\ \text{sujeito a} \quad & h_j(x) = 0, \quad (j = 1, 2, \dots, J), \\ & g_k(x) \leq 0, \quad (k = 1, 2, \dots, K), \end{aligned} \tag{3.1}$$

Onde $f_i(x), h_j(x), g_k(x)$ são funções do vetor $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$.

Atualmente, estão disponíveis diversos métodos de busca para resolução destes problemas de otimização, onde deve ser adotado um conjunto de parâmetros de forma a permitir a obtenção de uma solução para atender às imposições e premissas do problema a ser solucionado (FRANÇA, 2005).

Existem várias técnicas para realizar a otimização do valor de uma função, como, por exemplo, a programação matemática e as metodologias heurísticas. Diferentes métodos de programação matemática, como a programação linear, a programação inteira binária e a programação dinâmica surgem como alternativas usuais para solução dos problemas de otimização. Esses métodos geralmente utilizam o gradiente de informações para varrer o espaço solução, partindo de um determinado ponto inicial (FORTES, 2018).

De maneira geral, as técnicas baseadas em gradientes possuem uma capacidade mais veloz de convergência, podendo atingir soluções mais precisas quando comparadas com algumas abordagens estocásticas para resultados de busca local (KAVEH; TALATAHARI, 2010). Porém, a implementação destes métodos só é adequada quando a função objetivo e as variáveis do problema forem contínuas e, em muitas aplicações, devido a não convexidade do problema, espaços e zonas restritas ou outras restrições inerentes à formulação de cada problema, fato este que impossibilita sua aplicação.

Segundo Fortes (2018), de maneira simples, os algoritmos de otimização podem ser divididos em duas classes: determinísticos e estocásticos, onde os algoritmos determinísticos podem ser definidos como metodologias as quais o comportamento pode ser completamente previsto, visto que são sempre apresentados com o mesmo conjunto de en-

tradas e passos. Ainda, realizam as mesmas rotinas e cálculos continuamente, assegurando a solução ótima em um finito intervalo de tempo.

Já os algoritmos estocásticos atingem boas soluções em um período de execução razoável, porém, não se pode garantir que as soluções obtidas sejam ótimas. Também, não se tem a garantia da eficiência e do correto funcionamento da implementação dos mesmos, visto que, em muitas situações, a complexidade matemática e a imposição das restrições do problema podem tornar irrealizável a busca de todas as combinações existentes ou todas as soluções possíveis. Ademais, um algoritmo estocástico pode ser declarado como uma ferramenta inteligente e eficaz, adequado e aplicável a maior parte dos problemas de otimização, obtendo soluções de boa qualidade e, ainda, embora não exista a garantia de otimalidade, espera-se que ao menos uma parcela das soluções sejam ótimas ou próximas ao valor ótimo (YANG; DEB, 2009).

Os algoritmos estocásticos são divididos em heurísticos e metaheurísticos. Segundo Yang (2010b), a principal diferença entre as abordagens acontece pelo fato que, ao contrário dos algoritmos heurísticos, as metaheurísticos utilizam a aleatoriedade. Essa aleatorização proporciona uma boa alternativa para a realização da busca global de maneira mais efetiva, uma vez que, ajuda a evitar apenas a busca local. Sendo assim, pode-se dizer que as metaheurísticas mostram-se mais eficientes e adequadas para encontrar resultados ótimos globais. Vale ressaltar que, na literatura, não há definições explícitas e bem definidas quanto à classificação de heurísticas ou metaheurísticas. Os dois termos, muitas vezes, podem ser confundidos e são utilizados até mesmo como sinônimos por vários autores.

Dois fatores são relevantes em qualquer abordagem utilizando metaheurísticas: a intensificação e a diversificação. Nesse contexto, diversificação significa gerar soluções diversas para explorar o espaço de busca na escala global, enquanto que intensificação significa focar a busca em uma região local, explorando a informação de que existe uma boa solução atual naquela região (GANDOMI; YANG; ALAVI, 2013).

A intensificação busca dar garantia para que as soluções convirjam ao ponto ótimo ou muito próximo a este, enquanto que a diversificação, proporcionada pela aleatoriedade, impede que sejam encontradas soluções restritas a um ótimo local. A possibilidade da combinação entre estes dois componentes e as melhorias resultantes deste processo, tornam realizável para as rotinas de busca a obtenção da otimização global.

Diversos algoritmos metaheurísticos foram desenvolvidos e propostos para a resolução de problemas de otimização matemática. Alguns destes métodos se baseiam em trajetórias de um único agente, como o *Simulated Annealing* (SA). Outros tantos são fundamentados em um conjunto de agentes ou população, sendo os mais conhecidos e tradicionais: Algoritmos Genéticos e Otimização por Enxames de Partículas.

Metaheurísticas contemporâneas foram desenvolvidas com base na natureza e na inteligência de enxames e grupos de indivíduos, como o Algoritmo dos Vagalumes, o Al-

goritmo de Otimização por Colônia de Formigas, o já citado PSO baseado na capacidade intelectual de peixes e aves, o CSA, que é uma metodologia de busca baseada no comportamento de reprodução dos passáros cucos. E, mais recentemente, o Algoritmo de Busca dos Morcegos - *Bat Algorithm Inspired Algorithm* (BAA) e o Algoritmo de Otimização dos Lobos Cinzentos - *Grey Wolf Optimizer* (GWO).

A Figura 13 exhibe a linha do tempo com as principais propostas de metodologias de busca através de heurísticas e que ainda são muito utilizados em problemas de otimização.

Figura 13 – Linha do tempo das principais propostas de metodologias heurísticas de otimização desde os anos 70.



As Subseções seguintes descrevem as metaheurísticas utilizadas neste Trabalho.

3.1.1 Otimização por Enxame de Partículas

Desde a conclusão de Darwin sobre a evolução dos seres vivos de um determinado estágio até o estágio atual em que conhecemos a vida, pesquisadores debatem as formas de evolução das espécies e suas teorias, bem como a velocidade, as condições e ainda como o ambiente transforma as fases da evolução. Os primeiros estudos sobre a evolução sempre dominaram a área de computação, preocupada em reproduzir a forma de pensamento humano na resolução de problemas complexos usando máquinas. Com os avanços do conhecimento biológico sobre os seres vivos, os algoritmos passaram a utilizar formas de resolução de problemas baseadas na evolução da vida.

Assim, o método de otimização PSO foi proposto por Kennedy e Eberhart (1995), a partir da modelagem matemática do comportamento do bando de pássaros em revoada. Ao levantar voo, o bando comportava-se de forma aleatória, porém, em pouco tempo, os pássaros já se encontravam voando em bando de forma ordenada e, ainda, ao encontrar um local com alimento, todas as aves do bando se dirigiam para a mesma região. Baseado nisso, os autores propuseram em seu estudo um algoritmo de busca, simples e robusto, onde cada ave é considerada um ponto, ou partícula, e a posição onde está localizada o alimento, ou seja, o local do pouso do bando, seria o ponto ótimo da busca.

O principal elemento que produz a evolução dos indivíduos é a velocidade do deslocamento (voo, no caso dos pássaros), representada por um vetor dentro do intervalo de busca, e que, a cada intervalo de tempo, muda a posição da partícula, a qual é calculada em função da posição e velocidade no instante anterior, atualizando a evolução.

A posição futura de cada indivíduo é calculada por meio da soma entre a posição e velocidade atual do mesmo. A velocidade do indivíduo é dada pela soma de três fatores: velocidade anterior, distância e posição do indivíduo em relação ao melhor ponto já visitado pelo bando e à distância e posição do indivíduo em relação ao melhor ponto já visitado por ele mesmo (Dos SANTOS, 2016). O PSO alcançou notoriedade e grande sucesso em pouco tempo, devido a sua simplicidade de entendimento e a baixa complexidade de implementação, sendo basicamente descrito por (3.2) e (3.3).

$$vel_i(k+1) = vel_i(k) + rnd_1() \cdot \varphi_1 \cdot (Gbest - x_i(k)) + rnd_2() \cdot \varphi_2 \cdot (Pbest - x_i(k)) \quad (3.2)$$

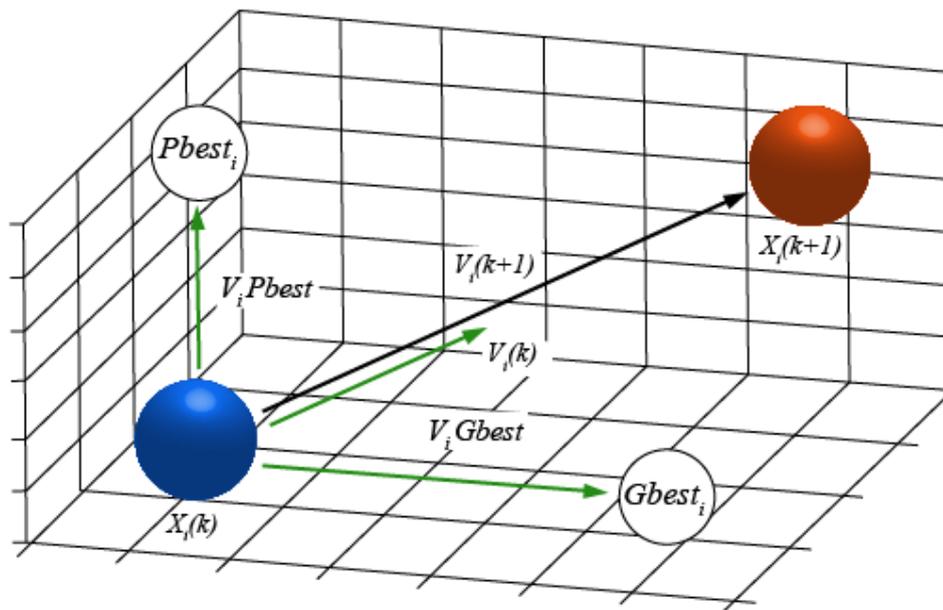
$$x_i(k+1) = x_i(k) + vel_1(k+1) \quad (3.3)$$

Onde: x é a posição da partícula, k é o índice atual, vel é a velocidade, rnd é a parcela de aleatoriedade que possui distribuição homogênea (entre 0 e 1), $Gbest$ é melhor ponto já visitado pelo bando e $Pbest$ o melhor ponto já visitado individualmente por cada partícula e i o instante atual. As constantes φ_1 e φ_2 representam os aspectos cognitivos

e sociais, respectivamente. As parcelas da equação $(Gbest - x_i)$ e $(Pbest - x_i)$ são os termos referentes a aceleração por distância, que controlam a variação por velocidade.

A Figura 14 ilustra a atualização da posição de uma partícula no PSO.

Figura 14 – Atualização do vetor posição no algoritmo PSO clássico.



Fonte: Adaptado de Bernardes (2013) - Elaborado pelo autor.

O algoritmo básico de funcionamento do PSO pode ser visto em Algoritmo (1).

Algoritmo 1: Pseudocódigo PSO

- 1: Definir as dimensões d do problema;
 - 2: Definir a função objetivo $f(x)$, $x = (x_1, \dots, x_d)^T$;
 - 3: Definir o número de partículas e o número máximo de gerações;
 - 4: Gerar população inicial de n partículas com posição x_i e velocidade $vel_{(i)}$ ($i = 1, 2, \dots, n$);
 - 5: Atribuir o peso do fator de inércia e definir os coeficientes cognitivo e social;
 - 6: Avaliar as partículas da população inicial por meio da função objetivo;
 - 7: Calcular $Pbest$ e $Gbest$;
 - 8: **while** critério de parada ou número máximo de iterações não satisfeito **do**
 Atualize a velocidade;
 Mova todas as partículas em direção a melhor posição encontrada até o momento;
 Atualize $Pbest$ e $Gbest$;
 Avalie a função objetivo;
 - end**
 - 9: Mostrar resultados;
 - 10: Fim do Algoritmo.
-

Em termos práticos, cada partícula (solução candidata a ótima) da população se movimenta no espaço de busca, sempre com o objetivo da procura por regiões promissoras no ambiente (Dos SANTOS, 2016) que possuam valores maiores, para maximização do valor, ou menores, para um problema que envolva minimização da função objetivo, repetindo a rotina até que se atinja a convergência. Logo, a posição de cada partícula é modificada, usando o dado dividido pelos componentes do bando (enxame), alterando sua posição para um novo local, sendo este mais próximo de onde ela e o enxame conseguiram um melhor valor da função objetivo na iteração anterior

Outro coeficiente muito importante e que influencia a busca realizada pelo PSO, chama-se fator de inércia (ω). Um valor alto para este fator direciona o algoritmo a realizar uma varredura de pontos mais ampla ao espaço de busca. Já o oposto, isto é, um valor pequeno de ω , permite uma busca mais local. Logo, uma adequada escolha do fator de inércia proporciona uma razoável ponderação entre a capacidade de busca local e global do PSO, tendo influência direta sobre o número de iterações até a convergência (SANTOS, 2013).

Reescrevendo (3.2), tem-se (3.4):

$$vel_i(k+1) = \omega \cdot vel_i(k) + rnd_1() \cdot \varphi_1 \cdot (Gbest - x_i(k)) + rnd_2() \cdot \varphi_2 \cdot (Pbest - x_i(k)) \quad (3.4)$$

O modelo de tratamento do valor do fator de inércia utilizado neste Trabalho é atualizado a cada iteração k e, conforme o número de iterações vai aumentando, o valor de ω decresce, de acordo com a Equação (3.5) (LEE; EL-SHARKAWI, 2008).

$$w(k) = w_{máx.} - \frac{w_{máx.} + w_{mín.}}{k_{máx.}} \cdot k \quad (3.5)$$

Em (3.5), $w_{máx.}$ e $w_{mín.}$ são os valores máximos e mínimos permitidos para o fator de inércia, respectivamente. Já $k_{máx.}$ representa o número máximo de iterações do algoritmo a cada execução.

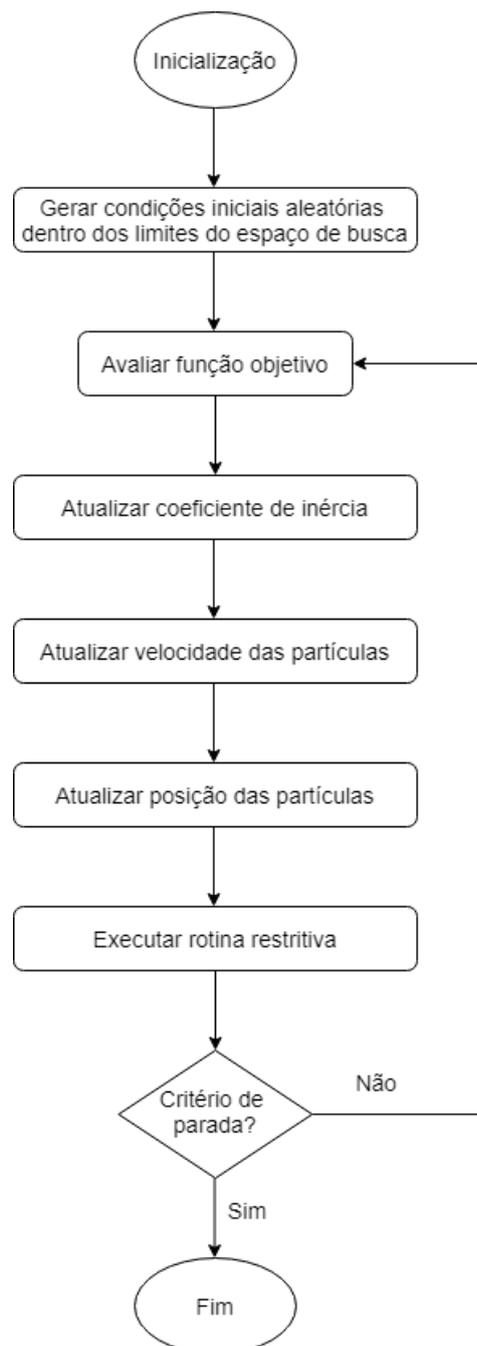
Sabe-se que o PSO clássico é aplicado para tarefas de otimização irrestrita e, sendo assim, pode ser incapaz de trabalhar com as restrições impostas pelo problema de otimização de relés de sobrecorrente. Logo, é comum implementar rotinas junto ao PSO que resolvam esta incapacidade, como a inicialização das partículas em regiões factíveis do espaço de busca e a implementação de algoritmos restritivos para tratar com as restrições do problema.

Além disso, podem ser impostas condições para a velocidade das partículas, para que, dessa forma, o espaço de busca não seja violado e, assim, condições que limitam o módulo do vetor velocidade são adicionadas, conforme (3.6):

$$vel(i) = \frac{vel_i(k+1)}{vel_{máx.}} \quad (3.6)$$

As rotinas de restrição aplicadas ao PSO impedem que as partículas se direcionem para regiões não factíveis, as quais prejudicam a qualidade da resposta da função objetivo (solução). Essa rotina do algoritmo restritivo é incorporada logo após a atualização das velocidades e posições de cada partícula. Isso pode ser visto na Figura 15, que mostra um fluxograma detalhado do algoritmo PSO implementado neste Trabalho, com a adição do algoritmo restritivo.

Figura 15 – Fluxograma do PSO clássico com a adição de rotinas restritivas.



3.2 Algoritmo dos Vagalumes

O *Firefly Algorithm* (FFA), também conhecido por Algoritmo dos Vagalumes, trata-se de uma metaheurística estocástica, inspirada nos hábitos dos vagalumes. Na natureza, os vagalumes utilizam sua capacidade natural de emissão de luz para atrair eventuais parceiros, tendo essa atração mais expressividade quanto maior for a intensidade do brilho por ele produzido.

O propósito do FFA é determinar o valor da função objetivo em diferentes pontos do domínio, definidos inicialmente de forma aleatória, onde cada um desses pontos é considerado um vagalume. No algoritmo, cada vagalume representa um vetor contendo um valor para cada uma das variáveis livres e possui um valor de função custo.

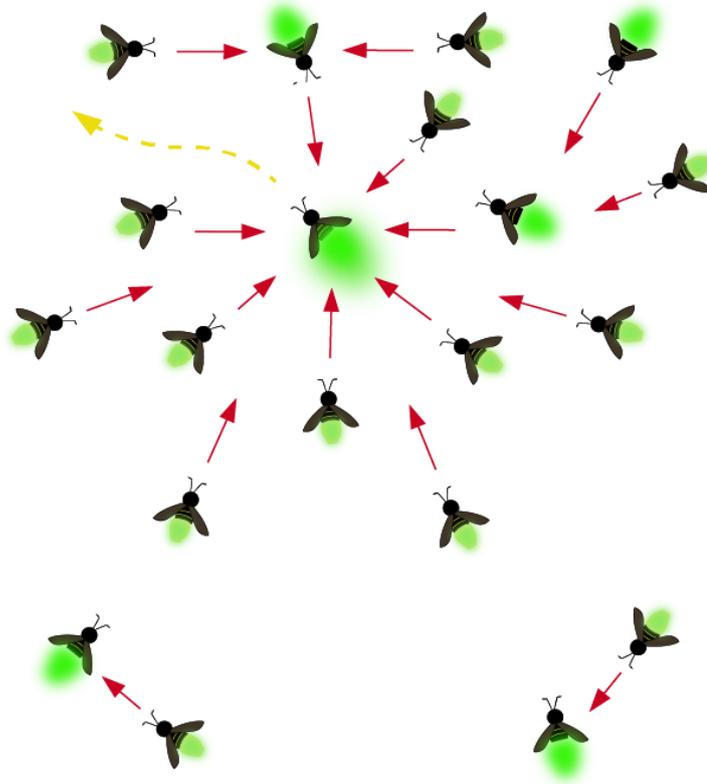
A intensidade de luz dos vagalumes é relacionada com o valor da função objetivo calculada para os valores do vetor individual de cada inseto correspondente ao ponto no domínio. Posteriormente, considerando certas premissas, são realizadas iterações com o intuito de conduzir a convergência destes valores até a posição que gere o maior brilho, obtida no ponto que exprime o valor ótimo (ou o melhor conhecido) para a função (FORTES, 2018).

O poder de atratividade de cada vagalume está relacionado à intensidade da luz (I) que ele emite, sendo proporcional à qualidade daquela solução. A intensidade da luz diminui com o aumento da distância (YANG, 2010a), então, com base nestas premissas, algumas condições são estabelecidas para a rotina de execução do algoritmo:

1. Os vagalumes não possuem distinção de gênero, portanto, um vagalume pode ser atraído por outro qualquer;
2. A atratividade é proporcional ao brilho, logo, o vagalume de brilho menos intenso sempre irá se mover em direção a outro vagalume vizinho de maior brilho;
3. A atratividade é proporcional à intensidade do brilho emitido, sendo inversamente proporcional à distância;
4. Quando não houver nenhum outro com brilho maior que o seu, o vagalume se moverá de forma aleatória;
5. A intensidade do brilho de um vagalume é determinada pelo valor da função custo para a posição em que está localizado.

De forma sucinta, a Figura 16 exhibe o funcionamento do algoritmo conforme os conceitos relacionados ao poder de atratividade que os vagalumes possuem entre si, onde o indivíduo mais brilhante (melhor solução) atrai os demais. Porém, é possível que alguns dos indivíduos mais distantes possam ser atraídos por algum outro vagalume menos brilhante do que o de melhor solução (maior brilho), visto que a distância entre eles pode reduzir a capacidade de atração do melhor vagalume.

Figura 16 – Representação da forma como ocorre a atratividade entre os vagalumes.



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Zhou et al. (2015).

3.2.1 A Atratividade

No algoritmo dos vagalumes, dois fatores são os mais significativos: a intensidade da emissão de luz pelo indivíduo (brilho), sendo ela uma característica individual de cada vagalume, a capacidade de atração (atratividade), dependente da distância na qual o vagalume está sendo observado. Estes fatores, ainda que parecidos e as vezes possam ser confundidos, são conceitos distintos.

A atratividade de um vagalume pode ser considerada como proporcional ao seu brilho, sendo este, relativo à função a ser analisada. A potência com que a luz de um vagalume é observada e que pode ser escrita como $I(r)$, decresce quanto mais distante o observador estiver da fonte geradora. Logo, o poder de atração entre estes dois indivíduos será menor se a distância entre eles aumentar. Do contrário, a atratividade entre dois vagalumes irá aumentar se a distância entre eles diminuir (FORTES, 2018).

A atenuação desta intensidade obedece à lei do quadrado do inverso. Isto é, a potência da luz I diminui à medida que a distância r aumenta em termos de $I = 1/r^2$. Além disso, o meio absorve a luz, que se torna mais fraca à medida que a distância

aumenta. Considerando as reduções causadas pela distância e pela absorção do meio, tem-se (3.7) para a intensidade do brilho observada por um vagalume.

$$I(r) = I_0 e^{-\gamma r^2} \quad (3.7)$$

Em (3.7), r é a distância entre os vagalumes, γ é a constante de absorção de luz, que estabelece o quanto a intensidade decresce com a distância, e I_0 é a intensidade natural da luz, em $r = 0$.

Como a atratividade de um determinado vagalume é relacionada à luz percebida pelos vagalumes adjacentes, a atratividade (β) pode ser descrita como (3.8):

$$\beta(r) = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (3.8)$$

Onde β_0 é a atratividade em $r = 0$.

3.2.2 Distância e Movimento

A distância entre dois vagalumes (i e j) é dada por (3.9):

$$r_{ij} = \|x_i - x_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^N (x_{i,k} - x_{j,k})^2} \quad (3.9)$$

Em (3.9), N é o número de dimensões.

O movimento de um vagalume i , atraído por um vagalume j é descrita por (3.10):

$$x(t+1) = x(t) + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (x_j(t) - x_i(t)) + \alpha(\text{rand} - 1/2) \quad (3.10)$$

Na Equação (3.10), $x_i(t)$ é a posição atual do vagalume i , $\beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (x_j(t) - x_i(t))$ é a fração do movimento correspondente à atratividade provocada pelo vagalume j e $\alpha(\text{rand} - 1/2)$ é a parcela aleatória do movimento, na qual rand é um valor aleatório podendo variar entre 0 e 1. Além disso, a variável α representa o peso deste movimento.

O fator γ é de fundamental importância para estabelecer a velocidade na qual o algoritmo converge. Na teoria, γ pode admitir qualquer valor maior que zero. Na prática, ele é definido baseado na distância original do sistema a ser otimizado. Seu valor, usualmente, pode variar entre 0,01 e 100 (YANG, 2010a).

Existem duas situações particulares muito importantes: a primeira delas ocorre quando $\gamma \rightarrow \infty$ e a segunda, quando $\gamma \rightarrow 0$. A atratividade sempre será constante para $\gamma \rightarrow 0$, o que seria similar a ser possível visualizar todos os vagalumes espalhados num ambiente ideal, seja qualquer a distância entre eles, e, portanto, sempre seriam atraídos os vagalumes de menor brilho em direção ao que apresenta o maior brilho.

Já com $\gamma \rightarrow \infty$, tem-se uma situação completamente inversa: nenhum vagalume consegue ser observado por outro, mesmo nas proximidades, ocasionando em uma movimentação completamente aleatória da população de vagalumes, sendo esta situação

correspondente as metodologias de busca aleatória (RIBEIRO et al., 2014). Este parâmetro pode ser adaptado para os dois pontos opostos. Sendo assim, o FFA pode buscar ótimos globais e locais de maneira muito satisfatória.

O Algoritmo (2) exhibe o pseudocódigo do FFA proposto em Yang (2010a).

Algoritmo 2: Pseudocódigo FFA

- 1: Definir as dimensões d do problema;
 - 2: Definir a função objetivo $f(x)$, $x = (x_1, \dots, x_d)^T$;
 - 3: Definir o número de indivíduos e o número máximo de gerações;
 - 4: Gerar população inicial de n vagalumes $x_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$;
 - 5: Definir o coeficiente de absorção de luz γ ;
 - 6: Determinar a intensidade de luz l_i em x_i com base em $f(x_i)$;
 - 7: Avaliar os vagalumes da população inicial por meio da função objetivo;
 - 8: **while** *critério de parada ou número máximo de iterações não satisfeito* **do**
 - for** $i=1: n$ *all n vagalumes* **do**
 - for** $j=1: n$ *all n vagalumes* **do**
 - if** $I_j > I_i$ **then**
 - Mover o vagalume i para j na dimensão d ;
 - end**
 - A atratividade varia com a distância r ;
 - Avaliar a nova solução e atualizar a intensidade de luz;
 - end**
 - end**
 - Classificar e ordenar os vagalumes com base em $f(x)$ e escolher o melhor;
 - end**
 - 9: Mostrar resultados;
 - 10: Fim do Algoritmo.
-

3.2.3 Algoritmo de Busca dos Cucos

O algoritmo de pesquisa e busca dos cucos (CSA) ou *Cuckoo Search Algorithm* é uma metodologia metaheurística evolucionária, inspirada na conduta parasita de algumas espécies do pássaro cuco e, neste Trabalho, é apresentado combinado ao comportamento dos voos de Lévy de algumas aves e moscas (FORTES, 2018). Esse algoritmo foi proposto por Yang e Deb (2009) onde, em seus estudos divulgados até então, afirmaram ser uma promissora e poderosa ferramenta de busca, capaz de superar algoritmos tradicionais e muito utilizados em problemas de otimização como o GA e o PSO (GANDOMI; YANG; ALAVI, 2013).

Os cucos são aves que chamam a atenção por sua forma agressiva de reprodução. Famílias de certas espécies depositam seus ovos em ninhos de outras aves ou de outras espécies de cucos onde ainda é comum que estas mesmas aves possam remover os ovos

dos verdadeiros donos do ninho a fim de aumentar a probabilidade de incubação de seus próprios ovos (PAYNE; SORENSEN, 2005). Todavia, se o pássaro hospedeiro percebe que os ovos não são os seus, ele elimina esses ovos intrusos para fora do ninho, ou pode abandonar seu ninho e construir outro em um novo local.

Porém, neste processo fêmeas de algumas espécies de cucos evoluíram de tal modo que são capazes de reproduzir em seus ovos o tamanho e as cores padrões dos ovos da espécie hospedeira, reduzindo a probabilidade de os ovos serem abandonados, aumentando, assim, o seu potencial de reprodução, onde estes filhotes têm a oportunidade de crescer e se tornar cucos adultos.

Outra curiosidade quanto a capacidade de percepção de uma fêmea cuco é quanto a escolha do momento mais adequado para a invasão do ninho hospedeiro, pois, como a germinação dos cucos ocorre mais precoce que os ovos destes passaros é necessário a escolha correta do período para a colocação de seus ovos (GANDOMI; YANG; ALAVI, 2013).

O primeiro filhote de cuco chocado em um ninho hospedeiro, age instintivamente afastando ou jogando para fora os demais ovos contidos no ninho, tornado mais abundante a disponibilidade de alimento, de forma a obter mais oportunidades de alimentação. O estudo de Payne e Sorensen (2005) afirma que um filhote de cuco tem a capacidade de reproduzir o chamado dos filhotes da espécie que o acolheu.

3.2.3.1 Voos de Lévy

Um passeio aleatório é um processo estocástico em que partículas ou ondas viajam ao longo de trajetórias aleatórias (BARTHELEMY; BERTOLOTTI; WIERSMA, 2008). O movimento browniano é o mais conhecido de todos os passeios aleatórios, onde os comprimentos dos passos são definidos de acordo com uma distribuição de probabilidade gaussiana. A primeira abordagem de uma caminhada aleatória foi descrita através do movimento das partículas em um fluido ou movimento browniano.

Nos voos de Lévy, os tamanhos dos passos são definidos de acordo com uma lei de potência e descritos por uma distribuição de probabilidade de “cauda pesada”, pois os passos de grande comprimento se destacam mais do que em outras distribuições, como a gaussiana. Esta diferença estatística fornece aos voos de Lévy uma aparência muito distinta, em que o padrão apresenta aglomerados de pequenos passos separados por grandes saltos. Esse movimento confronta visualmente com sinais homogêneos do movimento browniano (Bartumeus et al., 2003).

Essa característica se opõe visualmente com os padrões mais homogêneos do movimento browniano (BARTUMEUS et al., 2003). Eles são formados por sequências aleatórias de parcelas de movimento (como andar, voar ou nadar), de comprimento l , extraídos de uma função de distribuição de probabilidade $p(l) = l^{-\mu}$ onde $1 < \mu < 3$ (Lei de Potência).

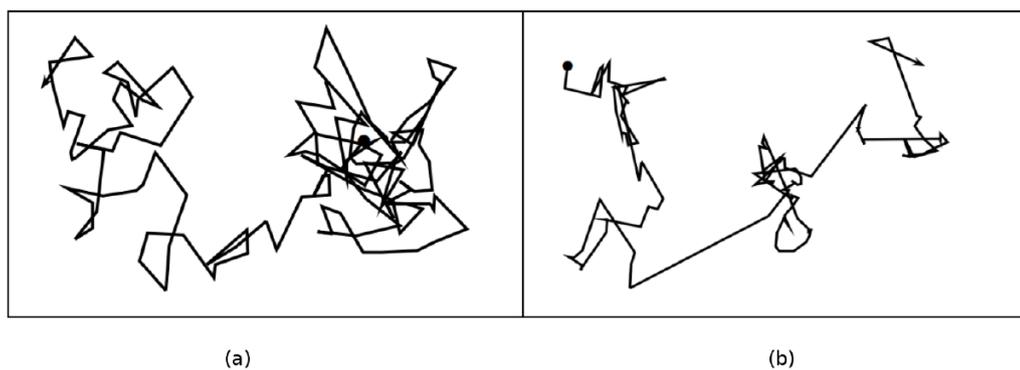
Diferentes pesquisas com estas aplicações constataram que o comportamento do deslocamento de diferentes animais e insetos exibiam o formato característico dos voos de Lévy (BROWN; LIEBOVITCH; GLENDON, 2007).

Em Pavlyukevich (2007) e Reynolds e Frye (2007), os autores demonstraram que os voos de Lévy possuem o modelo de busca ótimo para animais predadores ou humanos caçadores, que buscam por presas escassas ou dispostas aleatoriamente no meio. A procura pelo alvo ocorre buscando-se minuciosamente em locais próximos, porém, com “saltos” para outros locais mais distantes. A estratégia se torna ideal quando o explorador estiver focado exclusivamente na busca, não possui prévio conhecimento do local e se o distanciamento médio entre os alvos sucessivos exceder a zona de percepção do explorador. Bucas ótimas são realizadas especificamente quando os comprimentos dos passos são distribuídos de acordo com uma lei de potência com um expoente de -2 , ou seja, quando $p(l) = l^{-2}$ (LUZ et al., 2001).

Nos estudos da biologia, as trajetórias via voos de Lévy são analisadas como traços do comportamento de uma gama diversificada de animais, principalmente, em espécies de veados, zangões, macacos, albatrozes, entre outros (VISWANATHAN et al., 1996).

A Figura 17 mostra, no geral, como ocorre o movimento browniano padrão, comparado a um voo de Lévy, sendo que a Figura 17(a) exhibe em 2D o movimento browniano, reproduzindo um passeio aleatório onde uma distribuição Gaussiana rege o tamanho do passo e a trajetória é concluída com 50 passos a partir da origem (0,0) - ponto preto. Contrapondo, a Figura 17(b) demonstra um voo de Lévy com 50 passos consecutivos a partir da origem (0, 0) - marcado com um ponto preto (YANG, 2010b).

Figura 17 – Comparação do Movimento Browniano ao Voo de Lévy.



Fonte: Fortes (2018) adaptado (YANG, 2010b)

Localmente, é similar e se parece muito a um movimento browniano simples. Porém, após certo período, ocorre um grande deslocamento como um salto de um ponto a outro e a busca começa a explorar outra parte do plano. Segundo Reynolds e Frye (2007), em várias situações (iterações do algoritmo), o voo de Lévy será deslocado a uma distância muito mais longa em relação à sua posição inicial em comparação com o movimento de uma caminhada aleatória Gaussiana do mesmo comprimento.

Para fins de implementação, a geração randômica de números via voos de Lévy consiste em duas etapas: a escolha de uma direção aleatória e a geração de etapas. A partir de uma distribuição uniforme, é obtida a direção de uma geração, enquanto que a geração de etapas consiste em definir o tamanho dos saltos, podendo ser calculado para uma distribuição de Lévy estável, através do algoritmo proposto em Mantegna (1994).

3.2.3.2 Funcionamento do Algoritmo dos Cucos

Conforme descrito por Yang e Deb (2009), o funcionamento do algoritmo CSA ocorre respeitando três regras, são elas:

1. Cada cuco coloca um ovo por vez e deposita em um ninho de uma ave hospedeira escolhido aleatoriamente;
2. Os melhores ninhos com alta qualidade de ovos (soluções), serão transferidos para as próximas gerações;
3. O número de ninhos hospedeiros disponíveis é fixo e o ovo colocado por um cuco pode ser descoberto pelo pássaro hospedeiro com uma probabilidade $pa \in [0, 1]$.

Ressalta-se que manter as melhores soluções para as próximas iterações busca garantir a intensificação das buscas naquelas regiões mais promissoras. Além disso, cada ovo em um ninho representa uma solução e um ovo de cuco representa uma nova solução. O objetivo é usar as novas e potencialmente melhores soluções para substituir uma solução pior nos ninhos. Neste Trabalho, cada ovo de cuco representa um vetor contendo valores, um para cada variável livre (variáveis que se busca o valor ótimo). A avaliação de cada solução, ou ovo de cuco, é realizada através da comparação dos valores do vetor e a qualidade do ovo é dada de acordo com o valor da função custo calculada para estes valores.

Caso o pássaro hospedeiro descubra a existência de um ovo intruso, pode destruir o ovo ou abandonar o ninho e construir um ninho completamente novo em outro lugar. Por simplicidade, esta hipótese pode ser estimada através da parcela de pa . Os ninhos que são substituídos recebem novas soluções aleatórias. Esta estratégia procura garantir a diversidade das soluções, pois uma nova solução é gerada de forma aleatória, possivelmente, em um lugar diferente da solução descartada.

Ao gerar novas soluções $x(t + 1)$ para um cuco i , um voo de Lévy é realizado, conforme a Equação (3.11).

$$x_i(t + 1) = x_i(t) + \alpha \otimes Levy(\lambda) \quad (3.11)$$

Em (3.11), $\alpha > 0$ é a largura do passo relacionado às escalas do problema de interesse e λ representa o expoente da lei de potência que define o comprimento dos

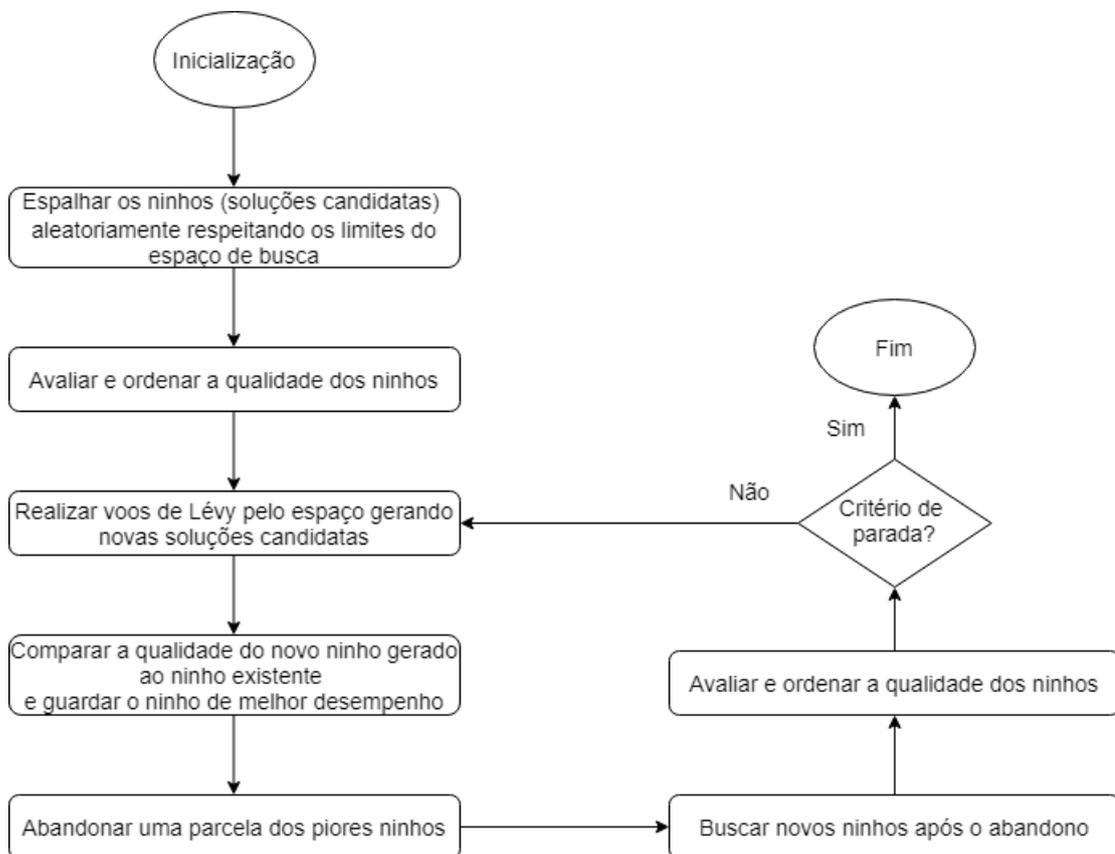
passos na trajetória feita pelo voo de Lévy. Segundo Yang (2010b), na maioria dos casos, pode-se usar $\alpha = 1$.

A expressão (3.11) é essencialmente a equação estocástica para caminhada aleatória. Em geral, uma caminhada aleatória depende apenas da posição atual (primeiro termo de (3.11)) e não do desenrolar de eventos que a antecedem, além de depender da probabilidade de transição (o segundo termo). O produto \otimes expressa a multiplicação gerada de forma independente entre os vetores, similar ao que ocorre no PSO, porém, a caminhada aleatória via voos de Lévy é mais eficiente na varredura do espaço de pesquisa, pois seu tamanho é consideravelmente maior a longo prazo (YANG; DEB, 2009).

Parte das novas respostas são obtidas em torno da melhor solução encontrada até o momento, acelerando a busca local. No entanto, uma parcela considerável das novas soluções deve ser gerada aleatoriamente de modo a levar a locais distantes da melhor solução atual. Desta maneira, garante-se que o sistema de busca não seja condicionado a um ótimo local.

A Figura 18 representa o fluxograma do algoritmo tradicional dos cucos associado a rotina de melhoramento da resposta através dos voos de Lévy.

Figura 18 – Fluxograma do CSA via voos de Lévy.



Em Yang e Deb (2009), os autores abordam a similaridade entre CSA e o algoritmo subida de encosta, este segundo combinado com alguma rotina de randomização em escala. Entretanto, existem também algumas divergências, principalmente no que diz respeito ao fato do CSA ser um algoritmo populacional, semelhante ao GA e PSO, utilizando, entretanto, uma rotina de aleatoriedade diferente à medida que o tamanho do passo é de “cauda-pesada”, o que permite os saltos de maior proporção.

Ainda, é importante ressaltar que, apesar da semelhança com outros algoritmos bio-inspirados, o CSA apresenta uma menor quantidade de parâmetros a serem ajustados, quando comparado, por exemplo, ao PSO, FFA e GA.

Considerando as três premissas elementares já descritas, os passos básicos do algoritmo CSA podem ser vistos em Algoritmo (3) conforme, Yang e Deb (2009).

Algoritmo 3: Pseudocódigo CSA via voos de Lévy

- 1: Definir o número de dimensões d do problema;
 - 2: Definir a função objetivo $f(x)$, $x = (x_1, \dots, x_d)^T$;
 - 3: Definir o número ninhos (n), a probabilidade de descoberta (pa) e o número máximo de gerações;
 - 4: Gerar a população inicial de n ninhos hospedeiros $x_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$;
 - 5: Avaliar os ninhos da população inicial por meio da função objetivo;
 - 6: **while** critério de parada ou número máximo de iterações não satisfeito **do**
 - Obter um novo cuco (nova solução) aleatoriamente via voos de Lévy;
 - Avaliar a qualidade da nova solução f_i ;
 - Escolher aleatoriamente um ninho entre os n ninhos existentes (digamos, certo ninho j);
 - if** $f_i > f_j$ **then**
 - | Substitua f_j pela nova solução f_i ;
 - end**
 - Eliminar uma fração (pa) de piores ninhos;
 - Manter as melhores soluções;
 - Classificar as soluções e encontrar a melhor solução atual;
 - end**
 - 7: Mostrar resultados;
 - 8: Fim do Algoritmo.
-

3.3 Considerações do Capítulo

Um grande desafio na manipulação matemática do problema de coordenação de relés de sobrecorrente se deve aos sucessivos testes necessários para manter a seletividade entre os pares de relés que formam o sistema de proteção primário e de retaguarda, ocasionando diferentes combinações e, portanto, quanto maior o número de relés mais complexa será a tarefa de coordenar de maneira seletiva o sistema de proteção. Visto que muitas vezes os sistemas são interligados ou malhados, a determinação da ordem correta da operação dos relés e sua coordenação de acordo com as técnicas convencionais, ou

utilizando cálculos manuais, torna-se uma tarefa complexa e trabalhosa, à medida que aumenta o número de dispositivos que compõe o sistema de proteção.

É comum em técnicas tradicionais solucionar o problema de coordenação através de aproximações, calculando os ajustes dos relés para um certo valor de *pick-up* e, a partir deste, recalculando o valor da corrente de ajuste, respeitando o intervalo entre a operação dos relés. Este processo é repetido até atingir o tempo requerido. Porém, na maioria das vezes o número de cálculos efetuados não garante a obtenção do ponto ótimo e, apesar de obter os ajustes necessários respeitando as condições de coordenação e seletividade, a coordenação ótima dos relés não é garantida.

Posto isto, as técnicas de otimização inteligentes como as metaheurísticas se mostram ferramentas promissoras, onde, ao contrário das técnicas convencionais e outros algoritmos de busca, estas podem alcançar os ajustes ótimos comparando diversas combinações e realizando inúmeras verificações durante sua rotina de execução. A adição de rotinas de penalizações aos algoritmos os torna confiáveis na pesquisa do espaço na procura por soluções factíveis, garantindo a varredura dentro dos limites dos intervalos de busca e descartando possíveis soluções que contenham violações das restrições do problema.

Assim, neste Capítulo, foram apresentados os algoritmos heurísticos PSO, FFA e CSA como metodologias de resolução de problemas de otimização e que foram utilizadas neste Trabalho para a solução do problema de coordenação entre relés de sobrecorrente.

4 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA DE COORDENAÇÃO DOS RELÉS DE SOBRECORRENTE

O objetivo deste Capítulo é abordar o problema de coordenação dos relés elen-
cando à formulação matemática do mesmo, sendo o problema proposto resolvido através
dos algoritmos apresentados anteriormente, os quais foram adotados neste Trabalho para
a coordenação ótima dos relés de sobrecorrente.

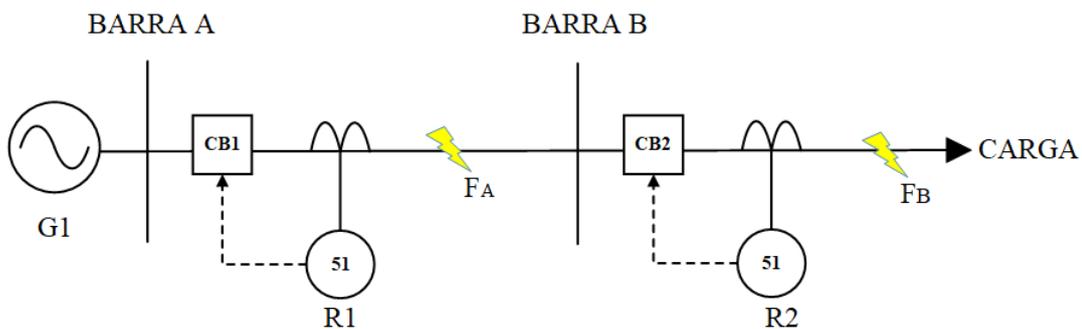
4.1 Apresentação do Problema e Considerações Iniciais

Os relés devem operar o mais rápido possível, sendo que aquele mais próximo
do defeito deve atuar primeiro. Assim, a coordenação é uma estratégia onde, para qual-
quer corrente de curto-circuito, há um intervalo de tempo no sentido do relé principal
(mais próximo do defeito) para os relés de retaguarda, garantindo assim seletividade no
desligamento do sistema (BLACKBURN; DOMIN, 1997).

Ressalta-se que o objetivo da proteção é eliminar o defeito o mais rápido possível,
reduzindo o número de consumidores sem fornecimento de energia. Assim, a coordena-
ção de relés se faz necessária, pois o sistema de proteção também é suscetível a falhas.
Quando a proteção principal falha, a atuação da proteção de retaguarda é imprescindível
(ELMORE, 2003).

De acordo com Rawat, Kale e Gokhale (2016), no sistema radial de duas barras
mostrado na Figura 19, para uma falha em F_B , o relé R_2 da barra B deve operar primeiro.
O relé R_1 (proteção principal da barra A, sem proteção de retaguarda) tem a função de
servir como *back-up* para R_2 nesta situação. Se o tempo de operação de R_2 é ajustado
para 0,1 s, o R_1 deve ser coordenado de modo que não opere antes deste mesmo intervalo
de tempo, adicionando os tempos de operação do disjuntor e o tempo de overshoot de R_1 ,
bem como o tempo de extinção do arco elétrico do disjuntor e, ainda, um determinado
tempo de segurança.

Figura 19 – Proteções primária e de retaguarda de um sistema radial simples.



Como já visto no Capítulo 2, os relés de proteção de sobrecorrente direcionais possuem três variáveis de operação a serem parametrizadas:

- Ajuste do múltiplo de corrente (MC);
- Ajuste do múltiplo de tempo (TMS); e
- E os parâmetros referentes ao tipo de curva adotada.

No problema de coordenação dos relés de sobrecorrente direcionais, o objetivo principal é determinar o ajuste ótimo dos parâmetros TMS e MC de cada relé, de modo que o somatório do tempo de operação destes relés, quando responsáveis pela proteção primária, seja minimizado. Isto sujeito a limites máximos e mínimos para os valores de ajuste e certas restrições que garantam a coordenação e seletividade.

Sendo assim, a formulação do problema de otimização destes relés se dá de maneira não-linear, não convexa e, geralmente, com um grande número de restrições (NOGHABI; SADEH; MASHHADI, 2009).

Um problema não-linear é aquele onde a sua função objetivo (também conhecida por função custo) e as suas restrições não possuem linearidade em relação às suas variáveis.

Na possibilidade de alguma variável ser considerada como discreta, a característica do problema passa a ser de programação inteira mista. Sendo assim, a resolução do problema da coordenação passa a exibir grande complexidade matemática, onde as soluções candidatas aumentam de forma exponencial, de acordo com o número de elementos a serem coordenados (KAMIKAZE, 2017).

4.2 Função Objetivo

Como mencionado anteriormente, a coordenação ideal dos relés de sobrecorrente direcionais visa calcular as configurações ótimas do relé para garantir que a proteção primária correspondente elimine falhas na zona protegida. Caso estes falhem, os relés de retaguarda devem agir após um tempo de coordenação, enquanto satisfazem outras restrições.

O objetivo de uma coordenação otimizada do tempo de atuação dos relés de sobrecorrente é a obtenção do valor mínimo do tempo de atuação dos referidos dispositivos de proteção primária. Esse tempo é expresso pela resposta de uma determinada função objetivo, para a qual se busca a minimização.

O principal modelo de FO utilizada na literatura, é a soma total do tempo individual de operação dos relés de proteção primária, conforme a Equação (4.1):

$$z = \min \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m W_p T_{i,z}^j \quad (4.1)$$

Em (4.1), m indica o número total de relés que protegem determinado trecho ou equipamento, n é o número de faltas consideradas dentro da zona de proteção primária, $T_{i,z}^j$ é o tempo de operação do relé primário R_i para uma falta na zona de proteção z , j é índice dado ao nível de falta considerada e W é o peso atribuído ao tempo de operação do relé.

Em sistemas de distribuição e linhas de transmissão não muito extensas, são atribuídos a todos os relés a mesma ponderação e W assume valor unitário (ZEIENLDIN; EL-SAADANY; SALAMA, 2006).

Quando $W = 1$, a expressão (4.1) pode ser reduzida a (4.2).

$$z = \min \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m T_{i,z}^j \quad (4.2)$$

O tempo de atuação individual de um relé, para determinada falta interna a uma zona de proteção primária, é dado por (4.3):

$$T = TMS.K_{curva} \quad (4.3)$$

Em (4.3), K_{curva} é o termo que rege o comportamento da curva característica do relé. Para certo relé R_i , o tempo de atuação do mesmo é calculado através de (4.4):

$$T_{i,z}^j = TMS_i.K_{i,z}^j \quad (4.4)$$

Por sua vez, o valor de K é obtido por (4.5):

$$K_{i,z}^j = \left(\frac{k_1}{M^{k_3} - k_2} + k_4 \right) \quad (4.5)$$

Como neste Trabalho foi utilizada a norma IEC, supondo um relé de curva normal inversa, a Equação (4.5) pode ser reescrita em função de seus coeficientes como (4.6):

$$K_{i,z}^j = \left(\frac{0,14}{M^{0,02} - 1} \right) \quad (4.6)$$

Em (4.5), k_1 , k_2 , k_3 e k_4 são constates particulares ao tipo de curva escolhida para o relé considerado. Além disso, o múltiplo do relé pode ser calculado pela Equação (4.7). E, deste modo, M relaciona os valores da corrente de falta vista por R_i , o ajuste do MC_i de R_i e a relação de transformação de corrente RTC_i de R_i .

$$M_{i,z}^j = \left(\frac{Icc_{i,z}^j}{RTC_i \cdot MC_i} \right) \quad (4.7)$$

4.3 Restrições

Definida a função objetivo, é preciso estabelecer as restrições que envolvem o problema de coordenação. A FO apresentada está sujeita a três tipos de restrições, sendo

elas: o critério de coordenação e seletividade, os limites nos intervalos de ajustes e os limites relacionados aos tempos mínimos de atuação dos relés de proteção primária.

4.3.1 Critério de Coordenação e de Seletividade

Para que exista a coordenação seletiva, os tempos de dois relés sucessivos, dispostos para a proteção do mesmo trecho, devem satisfazer a condição pré-determinada do intervalo mínimo de tempo de coordenação. Essa condição pode ser generalizada na forma mostrada na Equação (4.8), referindo-se à diferença mínima (ΔT) necessária entre os tempos de atuação do relé de proteção de retaguarda e do relé de proteção primária, para que estes estejam coordenados de forma seletiva.

Um retardo é incorporado de forma proposital entre os tempos de atuação dos relés de forma a garantir que o tempo da atuação da proteção primária seja suficiente para extinguir a falha existente no sistema. Assim, só é necessária a atuação da proteção de retaguarda em caso de não operação do dispositivo de proteção primária. Quando são considerados j diferentes níveis de curto-circuito em determinada zona protegida, para cada par formado pelos relés de proteção primária e sua retaguarda responsáveis por essa proteção, existiram N restrições de seletividade, sendo uma restrição para cada nível de falha considerado.

$$T_{retaguarda}^j - T_{primário}^j = \Delta T \quad (4.8)$$

Em (4.8), $T_{retaguarda}^j$ é o tempo de atuação do relé de proteção de retaguarda da zona protegida e $T_{primário}^j$ é o tempo de atuação do relé principal para o j –ésimo nível de curto-circuito considerado dentro desta zona de proteção.

Por fim, ΔT é o tempo de coordenação entre os relés, o qual deve satisfazer (4.9):

$$\Delta T \geq CTI \quad (4.9)$$

Sendo que, CTI – tempo de coordenação mínimo exigido.

4.3.2 Limites nos ajustes do Relé

Outro ajuste de suma importância é o dos parâmetros dos relés, de forma que estes valores ajustáveis assumam valores que respeitem os limites mínimos e máximos de um intervalo permitido.

Os relés devem ter a capacidade de permitir a operação padrão do circuito, não interferindo em seu funcionamento sem que exista extrema necessidade (KIDA, 2016).

O MC deve ser ajustado de forma que seu valor seja menor do que a magnitude da corrente de curto-circuito mínima dentro da zona de proteção do relé principal, ponderado pela RTC . Caso contrário, o relé não é sensibilizado pela falha, resultando em sua não operação.

O MC também deve ser maior do que a corrente máxima de carga esperada pelo relé, considerando a RTC . Porém, deve-se prever um provável crescimento dessa carga, ou ainda, pode-se considerar uma leve sobrecarga no sistema elétrico, ao invés do crescimento da mesma (BEDEKAR; Bhide, 2011).

Para a obtenção da corrente máxima de carregamento, podem ser consideradas diferentes contingências, onde é removido um elemento do circuito por vez, sendo executado o fluxo de potência a cada nova situação (SHIH; ENRÍQUEZ; TREVINO, 2014).

Essas condições que descrevem a restrição dos intervalos de ajuste permitidos ao MC do relé R_i , são exibidas em (4.10):

$$\frac{fc \cdot I_{carga,i}^{max}}{RTC_i} \leq MC_i \leq \frac{I_{cc_i}^{min}}{RTC_i} \quad (4.10)$$

O MC também pode ser ajustado conforme as limitações mínimas e máximas disponíveis no relé utilizado. Neste caso, o intervalo de ajuste dado por (4.11).

$$MC_i^{min} \leq MC_i \leq MC_i^{max} \quad (4.11)$$

Em um problema de otimização, o número dessas restrições é condicionado ao número de relés, ou seja, para m relés, teremos a mesma quantidade restrições.

O ajuste do TMS também é definido pelos limites mínimos e máximos disponíveis em conformidade com o relé utilizado. Esse valor deve ser escolhido respeitando o intervalo expresso em (4.12).

$$TMS_i^{min} \leq TMS_i \leq TMS_i^{max} \quad (4.12)$$

4.3.3 Limites nos Tempos de Operação

Embora o objetivo da otimização do tempo de operação dos relés seja buscar atuação mais rápida possível, a operação dos mesmos exige um tempo mínimo (*delay*) para posteriormente iniciar a sua atuação. Além disso, este *delay* não deve compreender um intervalo de tempo muito grande para não causar danos irreversíveis aos equipamentos conectados ao sistema elétrico (BEDEKAR; Bhide, 2011).

Os tempos de atuação dos relés estão diretamente relacionados aos ajustes dos parâmetros TMS e MC citados anteriormente. Entretanto, este tempo também está relacionado ao nível da corrente de curto-circuito, ou seja, mesmo que os ajustes de TMS e MC estejam dentro dos limites expostos anteriormente, isso não implica que os tempos de atuação dos relés estejam dentro dos intervalos de tempo desejáveis (ALAM; DAS; PANT, 2015).

Logo, é preciso considerar a condição dada por (4.13):

$$t_i^{min} \leq t_i^{pri.} \leq t_i^{max} \quad (4.13)$$

Sendo que, t_i^{min} – tempo mínimo para a atuação do relé R_i ; t_i^{max} – tempo máximo para a atuação de R_i ; t_i^{pri} – tempo máximo para a atuação de R_i quando este desempenha a função de proteção primária.

Em resumo, para o sistema exemplo mostrado na Figura 19, o problema de coordenação dos relés de sobrecorrente que tem por objetivo reduzir para o valor mínimo possível o tempo total de operação dos relés de proteção primária R_1 e R_2 , tem a formulação matemática apresentada na forma de PNL expressa por:

Minimize :

$$z = \left(\frac{0,14}{\left(\frac{I_{cc(1, Fa)}}{x_3 \cdot RTC_1} \right)^{0,02} - 1} \right) x_1 + \left(\frac{0,14}{\left(\frac{I_{cc(2, Fb)}}{x_4 \cdot RTC_2} \right)^{0,02} - 1} \right) x_2 \quad (4.14)$$

Sujeito a :

$$\left(\frac{0,14}{\left(\frac{I_{cc(1, Fa)}}{x_3 \cdot RTC_1} \right)^{0,02} - 1} \right) x_1 - \left(\frac{0,14}{\left(\frac{I_{cc(2, Fb)}}{x_4 \cdot RTC_2} \right)^{0,02} - 1} \right) x_2 \geq CTI \quad (4.15)$$

$$\left(\frac{0,14}{\left(\frac{I_{cc(1, Fa)}}{x_3 \cdot RTC_1} \right)^{0,02} - 1} \right) x_1 \geq t_{min} \quad (4.16)$$

$$\left(\frac{0,14}{\left(\frac{I_{cc(2, Fb)}}{x_4 \cdot RTC_2} \right)^{0,02} - 1} \right) x_2 \geq t_{min} \quad (4.17)$$

$$x_i^{min} \leq x_i \leq x_i^{max}, i = 1, 2, 3, 4. \quad (4.18)$$

Nas expressões (4.14) a (4.17), I_{cc} é a corrente de curto-circuito vista por cada um dos relés R_1 e R_2 para as faltas no ponto A (na linha entre as barras A e B) e no ponto B (na linha, após a barra B), nomeados como F_A e F_B , respectivamente. Por fim, x_i são os valores ótimos dos ajustes de TMS (x_1 e x_2) e MC (x_3 e x_4) a serem encontrados e que resultam na minimização do valor da função objetivo denotada por z .

4.4 Considerações do Capítulo

Neste Capítulo, foi apresentado o problema de coordenação dos relés de sobrecorrente de tempo inverso como um problema de otimização matemática a ser minimizado, sendo definida a FO, que tem como objetivo minimizar o somatório dos tempos de atuação do relés que compõem a proteção primária sujeito a limites e restrições. Foram demonstradas as variáveis de busca do problema de minimização: TMS e MC . O entendimento da formulação matemática do problema é fundamental para a compreensão da aplicação das metodologias de otimização utilizadas e a obtenção do resultados apresentados no Capítulo seguinte.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

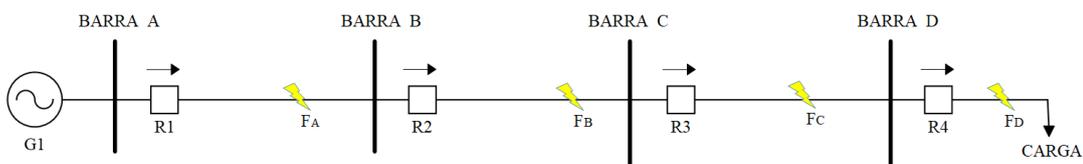
Neste Capítulo, são apresentados os sistemas elétricos adotados para avaliar as metodologias abordadas no Capítulo 3. São reproduzidos sistemas radiais, sistemas em cascata, realimentados e malhados com realimentação em paralelo. De acordo com cada situação, são apresentadas as considerações referentes aos níveis de corrente de curto-circuito, topologia da rede, limites dos ajustes do múltiplo de tempo e do múltiplo de corrente, relações de transformação dos transformadores de corrente, características dos relés, correntes de carga consideradas e os esquemas de ligação, bem como os resultados obtidos em cada caso.

5.1 Sistema Teste 1: Circuito Radial de 4 Barramentos

O primeiro cenário faz o estudo de um sistema fictício proposto por Madhumitha et al. (2015). Este sistema é de simples implementação e baixa complexidade de cálculos, pois a finalidade desta abordagem inicial é testar os algoritmos, calibrá-los e compará-los com resultados existentes na literatura. Após isso, é feito então a aplicação destes algoritmos em sistemas teste de maior complexidade, de forma a validar sua utilização para resolução do problema de otimização do tempo de operação do relé de sobrecorrente.

Sendo assim, neste caso, foi considerado um circuito radial que possui 4 barramentos, 4 relés direcionais de sobrecorrente e 1 gerador (fonte de alimentação do sistema). O sistema teste 1 é mostrado na Figura 20, onde também podem ser observados os trechos onde as faltas são consideradas e a localização dos relés de proteção.

Figura 20 – Diagrama unifilar simplificado do sistema teste 1.



Fonte: Adaptado de Madhumitha et al. (2015) - Elaborado pelo autor.

Foram utilizados relés digitais de sobrecorrente com curva de tempo normal inversa que seguem a norma IEC. Os intervalos de ajuste dos múltiplos de tempo e corrente do relés permitem ajustes contínuos entre 0,001 até 1 e de 0,5 até 2,5, respectivamente.

O tempo mínimo de operação para cada relé é de 0,2 s. Este intervalo é utilizado a fim de evitar que os relés operem indevidamente para surtos transitórios. O menor valor que o intervalo de coordenação assume é de 0,57 s, conforme as características de operação dos relés. São consideradas faltas trifásicas entre todos os barramentos e após a barra 4. Os TCs possuem a RTC de 200:5. A fonte do sistema é de 66 kV e 100 MVA.

Os pares de relés correspondentes à proteção de cada trecho e os valores das correntes de curto-circuito são exibidos na Tabela 2. Mais detalhes deste circuito podem ser encontrados em Madhumitha et al. (2015) e Chaitanya, Rohit e Swathika (2017).

Tabela 2 – Sistema teste 1: Níveis de curto-circuito e dispositivos de proteção.

Local da Falta	Proteção		$I_{cc}(A)$
	Primária	Retaguarda	
Ponto F _A	R ₁	-	596,96
Ponto F _B	R ₂	R ₁	482,08
Ponto F _C	R ₃	R ₂	291,04
Ponto F _D	R ₄	R ₃	269,6

Fonte: Autor.

5.1.1 Resolução do Problema: Modelo Linear

Conforme discutido no Capítulo 4, o problema de coordenação dos relés direcionais de sobrecorrente é não-linear devido à relação entre o tempo de atuação do relé e a corrente de magnetização do mesmo. Porém, quando os valores do ajuste do múltiplo de corrente são previamente estabelecidos, o problema pode ser linearizado. Sendo assim, neste caso, é considerando o MC fixo e igual a 1 para todos os relés, ou seja, apenas os valores de TMS são variáveis de decisão, onde x_1 , x_2 , x_3 e x_4 são os valores ótimos a serem encontrados para os relés R₁, R₂, R₃ e R₄, respectivamente, os quais minimizam o tempo total de atuação da proteção, dado por z .

O problema de otimização na forma linearizada possui 4 variáveis de decisão, 3 restrições de coordenação e 4 restrições referentes ao tempo mínimo de atuação dos relés, podendo ser declarado como:

Minimize :

$$z = K_{(1,Fa)} \cdot x_1 + K_{(2,Fb)} \cdot x_2 + K_{(3,Fc)} \cdot x_3 + K_{(4,Fd)} \cdot x_4 \quad (5.1)$$

Sujeito a :

$$K_{(1,Fb)} \cdot x_1 - K_{(2,Fb)} \cdot x_2 \geq CTI \quad (5.2)$$

$$K_{(2,Fc)} \cdot x_2 - K_{(3,Fc)} \cdot x_3 \geq CTI \quad (5.3)$$

$$K_{(3,Fd)} \cdot x_3 - K_{(4,Fd)} \cdot x_4 \geq CTI \quad (5.4)$$

$$K_{(1,Fa)} \cdot x_1 \geq t_{min} \quad (5.5)$$

$$K_{(2,Fb)} \cdot x_2 \geq t_{min} \quad (5.6)$$

$$K_{(3,Fc)} \cdot x_3 \geq t_{min} \quad (5.7)$$

$$K_{(4,Fd)} \cdot x_4 \geq t_{min} \quad (5.8)$$

Como são relés de curva inversa e sabendo que $K = \frac{0,14}{\frac{I_{cc}}{RTC \cdot MC}}$, conhecidos os valores e as condições de restrições impostas, as expressões em (5.1) a (5.8) são reescritas como (5.9) a (5.16):

Minimize :

$$z = 2,5204 \cdot x_1 + 2,7427 \cdot x_2 + 3,4577 \cdot x_3 + 3,5991 \cdot x_4 \quad (5.9)$$

Sujeito a :

$$2,8091 \cdot x_1 - 2,7427 \cdot x_2 \geq 0,57 \quad (5.10)$$

$$3,4915 \cdot x_2 - 3,4577 \cdot x_3 \geq 0,57 \quad (5.11)$$

$$3,6083 \cdot x_3 - 3,5991 \cdot x_4 \geq 0,57 \quad (5.12)$$

$$2,5204 \cdot x_1 \geq 0,2 \quad (5.13)$$

$$2,7427 \cdot x_2 \geq 0,2 \quad (5.14)$$

$$3,4577 \cdot x_3 \geq 0,2 \quad (5.15)$$

$$3,5991 \cdot x_4 \geq 0,2 \quad (5.16)$$

5.1.2 Resolução do Problema: Modelo Não-Linear

Para formulação do problema de otimização neste formato, tanto o ajuste do múltiplo de corrente quanto o ajuste do múltiplo de tempo são considerados incógnitas. Sendo assim, o problema tem características de não-linearidade, pois sua solução depende da busca por parâmetros de *TMS* e *MC*, sendo que estes se relacionam de forma não-linear nas equações, conforme pode ser visto em (5.17) a (5.24).

Minimize :

$$z = \frac{0,14 \cdot x_1}{\left(\frac{14,91}{x_5}\right)^{0,02} - 1} + \frac{0,14 \cdot x_2}{\left(\frac{12,05}{x_6}\right)^{0,02} - 1} + \frac{0,14 \cdot x_3}{\left(\frac{7,27}{x_7}\right)^{0,02} - 1} + \frac{0,14 \cdot x_4}{\left(\frac{6,74}{x_8}\right)^{0,02} - 1} \quad (5.17)$$

Sujeito a :

$$\frac{0,14 \cdot x_1}{\left(\frac{11,38}{x_5}\right)^{0,02} - 1} + \frac{0,14 \cdot x_2}{\left(\frac{12,05}{x_6}\right)^{0,02} - 1} \geq 0,57 \quad (5.18)$$

$$\frac{0,14 \cdot x_2}{\left(\frac{7,14}{x_6}\right)^{0,02} - 1} + \frac{0,14 \cdot x_3}{\left(\frac{7,27}{x_7}\right)^{0,02} - 1} \geq 0,57 \quad (5.19)$$

$$\frac{0,14 \cdot x_3}{\left(\frac{6,71}{x_7}\right)^{0,02} - 1} + \frac{0,14 \cdot x_4}{\left(\frac{6,74}{x_8}\right)^{0,02} - 1} \geq 0,57 \quad (5.20)$$

$$\frac{0,14 \cdot x_1}{\left(\frac{14,92}{x_5}\right)^{0,02} - 1} \geq 0,2 \quad (5.21)$$

$$\frac{0,14 \cdot x_2}{\left(\frac{12,05}{x_6}\right)^{0,02} - 1} \geq 0,2 \quad (5.22)$$

$$\frac{0,14 \cdot x_3}{\left(\frac{7,27}{x_7}\right)^{0,02} - 1} \geq 0,2 \quad (5.23)$$

$$\frac{0,14 \cdot x_4}{\left(\frac{6,74}{x_8}\right)^{0,02} - 1} \geq 0,2 \quad (5.24)$$

Assim, a função objetivo do problema conforme (5.17), em formato de PNL possui 8 variáveis de decisão, sendo x_1, x_2, x_3 e x_4 referentes ao *TMS* e x_5, x_6, x_7 e x_8 os valores referentes ao ajuste do *MC*.

5.1.3 Calibragem dos Algoritmos

O problema de otimização foi resolvido utilizando os algoritmos FFA, PSO e CSA implementados em MATLAB®.

Com o objetivo de adaptar as heurísticas de otimização ao problema proposto, foi necessário calibrar alguns parâmetros dos algoritmos. Sendo assim, inúmeros testes foram realizados. A cada mudança de parâmetro, o algoritmo foi executado 20 vezes.

Para o CSA, primeiramente, o número máximo de iterações foi fixado em 1000, então, variou-se o número de ninhos (n) entre 10 a 500 com passos de 10 e o parâmetro pa foi variado de 0,1 até 0,9 com passos de 0,1. O FFA, quando comparado ao CSA, possui um maior número de parâmetros a serem definidos. Novamente, foi fixado o número de iterações em 1000, variando-se o valor de α, β e γ em intervalos de uniformes.

Quanto ao PSO, foram variados inicialmente apenas os parâmetros referentes ao tamanho do enxame e velocidade máxima das partículas. Posteriormente, procurou-se investigar também a alteração dos aspectos sociais e cognitivos. Porém, estas variações não surtiram efeitos na qualidade das respostas encontradas, sendo que a velocidade máxima foi variada entre 5 e 10 com passos de 1. O tamanho do enxame de partículas no PSO, a quantidade de indivíduos (vagalumes) no FFA foram variados da mesma forma que o número de ninhos (n) do CSA, ou seja, de 10 a 500 em passos de 5.

O melhor conjunto de parâmetros foi definido a partir de 3 critérios, sendo estes:

- Valor da solução;
- Média; e
- Desvio-padrão.

Com base nos testes, a melhor configuração de parâmetros para a busca da solução ótima é mostrada nas Tabelas 3, 4 e 5, respectivamente para o FFA, o PSO e o CSA.

Tabela 3 – Parâmetros utilizados no FFA.

Parâmetro	População	α	β	γ
Valor	80	0,2	0,2	1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4 – Parâmetros utilizados no PSO.

Parâmetro	Partículas	Social	Cognitivo	vel_{max}
Valor	20	2	2	10

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5 – Parâmetros utilizados no CSA.

Parâmetro	Ninhos	pa
Valor	40	0,25

Fonte: Elaborado pelo autor.

O problema de otimização foi formulado de maneira que as heurísticas possam variar os valores de x_1, \dots, x_n dentro dos limites mínimos e máximos permitidos para cada variável. Em todos os casos, onde x_n são ajustes tratados como contínuos, optou-se por suas representações numéricas nas tabelas serem truncadas após a quarta casa decimal.

Um sistema de penalidades é utilizado, onde, a cada vez em que uma das restrições não é obedecida, um valor muito grande é adicionado ao resultado da função objetivo, levando o algoritmo ao descarte da solução que contenha uma ou mais variáveis que tenham infringido alguma das restrições.

5.1.4 Resultados: Sistema teste 1

Após adotada a configuração de parâmetros, os algoritmos foram executados por mais 100 vezes, utilizando um critério de parada. Este critério utiliza o conceito de janela móvel, onde o melhor valor de função objetivo em uma iteração atual it é comparado com o melhor valor da FO na iteração $it - j$, sendo j o tamanho da janela a ser considerada. Logo, se a diferença entre os valores for menor que um erro (e), a execução do algoritmo é interrompida, sendo o erro adotado de 2% e o tamanho da janela de 100 iterações.

Com o intuito de evitar simulações muito longas e que demandassem tempos computacionais elevados, caso alguma das execuções não atingisse uma resposta de boa qualidade, as execuções seriam encerradas imediatamente após a iteração número 1500, mesmo que o critério do erro não fosse atingido.

Entretanto, de forma a impedir que alguma possível solução ótima fosse perdida frente a limitação imposta pelo número máximo de iterações, alguns testes foram estendidos a casa de 10000 a 15000 iterações. Estes estudos foram realizados quando, para determinado conjunto de ajustes de um dos algoritmos, a simulação fosse encerrada sem atingir o critério de parada do erro mínimo, mas a resposta obtida apresentasse indícios da possibilidade de melhoria do valor da FO para um número maior de iterações. Todavia, apesar do maior esforço computacional e tempo de execução empregado frente ao elevado número de iterações realizadas, as respostas encontradas não obtiveram melhorias consideráveis para a FO.

O conjunto otimizado para as variáveis x_1, \dots, x_n que levam a minimização da função objetivo (denotada por z nas equações) são apresentados na Tabela 6, para a formulação do problema linear e na Tabela 7, para o problema não-linear.

Tabela 6 – Sistema teste 1: Resultados para FFA, PSO e CSA em PL.

Índice	FFA	PSO	CSA
x_1	0,5688	0,5694	0,5682
x_2	0,375	0,375	0,3747
x_3	0,2135	0,2135	0,2132
x_4	0,0557	0,0557	0,0577
z	3,399	3,402	3,396
Iteração	199	237	252

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 7 – Sistema teste 1: Resultados para FFA, PSO e CSA em PNL.

Índice	FFA	PSO	CSA
x_1	0,3308	0,3769	0,3327
x_2	0,2037	0,1990	0,2026
x_3	0,1732	0,1376	0,1301
x_4	0,0640	0,0543	0,0592
x_5	2,3532	2,0517	2,3265
x_6	2,4252	2,4827	2,4155
x_7	1,4286	1,9664	2,0936
x_8	0,7536	1,0779	0,8919
z	3,039	3,102	3,022
Iteração	375	672	330

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os ajustes otimizados encontrados através dos algoritmos FFA, PSO e CSA, resultam nos tempos de atuação dos relés de proteção apresentados nas Tabelas 8 a 10 para programação linear e nas Tabelas 11 a 13 para programação não-linear. Onde, $T_{pri.}$ e $T_{ret.}$ indicam o tempo de operação para os dispositivos de proteção primária e retaguarda, respectivamente. Além disso, $\Delta T(s)$ é a diferença entre tempo de atuação entre os dois relés ($T_{ret.} - T_{pri.}$).

As diferenças entre os tempos de atuação das proteções primária e de retaguarda descritos nas Tabelas 8 a 13, são maiores ou iguais ao CTI mínimo estabelecido inicialmente no problema (0,57 s), indicando que o sistema está coordenado de forma seletiva.

Tabela 8 – Sistema teste 1: Tempos de atuação dos relés obtidos via FFA em PL.

Relé	$T_{pri.}(s)$	$T_{ret.}(s)$	$\Delta T(s)$
R ₁	1,433	-	-
R ₂	1,028	1,598	0,57
R ₃	0,738	1,309	0,571
R ₄	0,2	0,771	0,571

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 9 – Sistema teste 1: Tempos de atuação dos relés obtidos via PSO em PL.

Relé	$T_{pri.}(s)$	$T_{ret.}(s)$	$\Delta T(s)$
R ₁	1,435	-	-
R ₂	1,028	1,599	0,571
R ₃	0,738	1,309	0,571
R ₄	0,2	0,771	0,571

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 10 – Sistema teste 1: Tempos de atuação dos relés obtidos via CSA em PL

Relé	$T_{pri.}(s)$	$T_{ret.}(s)$	$\Delta T(s)$
R ₁	1,432	-	-
R ₂	1,027	1,597	0,57
R ₃	0,737	1,308	0,571
R ₄	0,2	0,77	0,57

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 11 – Sistema teste 1: Tempos de atuação dos relés obtidos via FFA em PNL.

Relé	$T_{\text{pri.}}(\text{s})$	$T_{\text{ret.}}(\text{s})$	$\Delta T(\text{s})$
R ₁	1,231	-	-
R ₂	0,875	1,446	0,571
R ₃	0,733	1,307	0,574
R ₄	0,200	0,772	0,572

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 12 – Sistema teste 1: Tempos de atuação dos relés obtidos via PSO em PNL.

Relé	$T_{\text{pri.}}(\text{s})$	$T_{\text{ret.}}(\text{s})$	$\Delta T(\text{s})$
R ₁	1,304	-	-
R ₂	0,868	1,514	0,646
R ₃	0,727	1,305	0,578
R ₄	0,204	0,776	0,572

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 13 – Sistema teste 1: Tempos de atuação dos relés obtidos via CSA em PNL.

Relé	$T_{\text{pri.}}(\text{s})$	$T_{\text{ret.}}(\text{s})$	$\Delta T(\text{s})$
R ₁	1,229	-	-
R ₂	0,868	1,443	0,575
R ₃	0,722	1,294	0,572
R ₄	0,2	0,773	0,573

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os algoritmos foram executados 100 vezes. As Tabelas 14 e 15 apresentam os resultados para os valores mínimo, máximo, a média e o desvio padrão (σ) da FO para cada uma das técnicas de otimização aplicadas.

Tabela 14 – Resumo dos resultados das simulações para o problema em PL.

Técnica	FO mín.	FO máx.	Média	σ	Nº Execuções
FFA	3,396	3,822	3,488	0,131	100
PSO	3,402	3,642	3,486	0,096	100
CSA	3,396	3,396	3,396	0,0	100

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 15 – Resumo dos resultados das simulações para o problema em PNL.

Técnica	FO mín.	FO máx.	Média	σ	Nº Execuções
FFA	3,039	3,312	3,121	0,071	100
PSO	3,102	3,482	3,224	0,147	100
CSA	3,022	3,222	3,068	0,042	100

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados encontrados através do Algoritmo dos Cucos em programação linear, não apresentaram variações no valor otimizado da FO a cada nova execução.

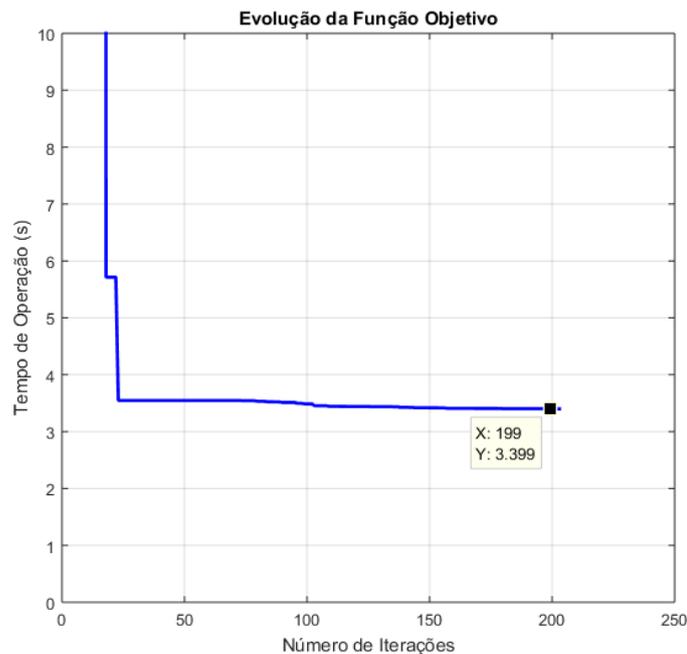
Os valores médios apresentados para FFA(PL) e PSO(PL) são muito próximos, assim como pode ser observada a pequena diferença apresentada para os desvios padrões.

Dentre os resultados para o problema quando formulado como programação não-linear, pode-se destacar a menor variação entre o valor da FO máx. e FO mín. para o CSA(PNL), enquanto que, o PSO(PNL) apresentou a maior diferença entre tempo máximo e tempo mínimo das FOs, bem como o maior valor para o desvio padrão.

Ademais, em todos os casos os desvios padrões podem ser considerados como baixos, indicando boa robustez aos algoritmos testados, seja em PL ou PNL.

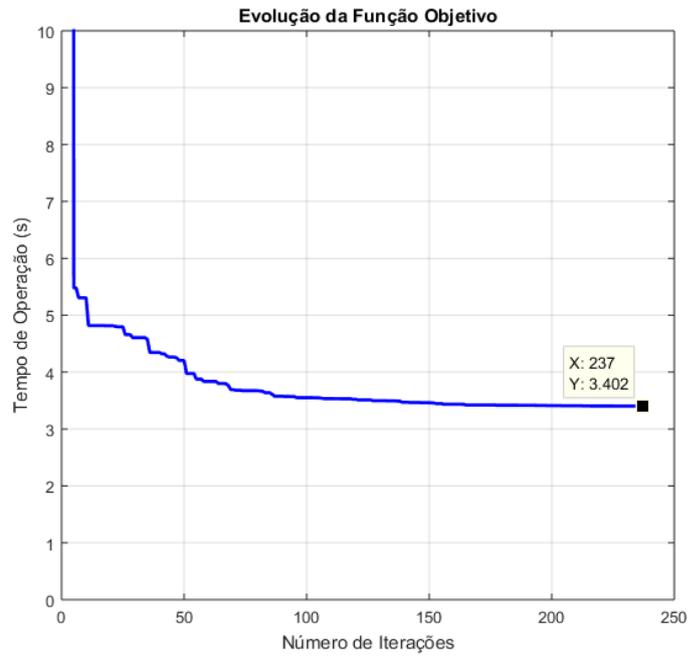
As características de convergência das FOs para aplicação dos métodos propostos neste Trabalho são mostradas nas Figuras 21 a 26.

Figura 21 – Sistema teste 1: Característica de convergência da FO via FFA em PL.



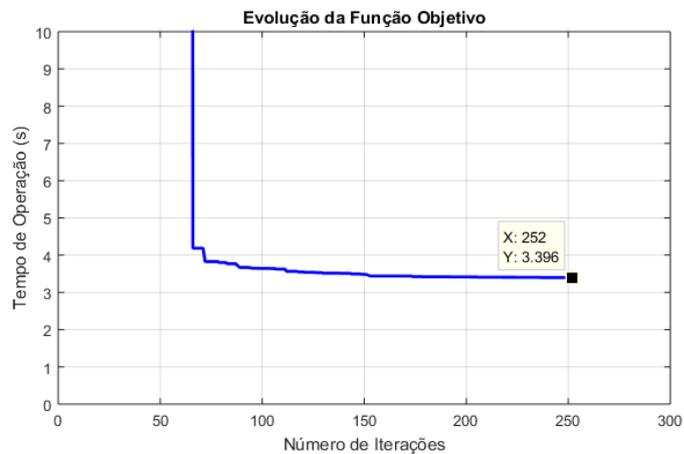
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22 – Sistema teste 1: Característica de convergência da FO via PSO em PL.



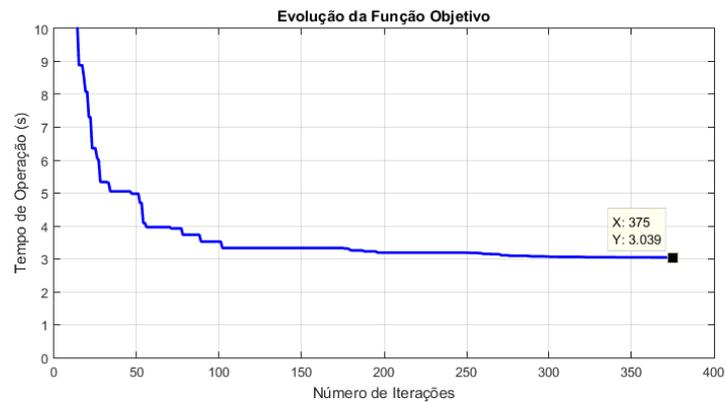
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23 – Sistema teste 1: Característica de convergência da FO via CSA em PL.



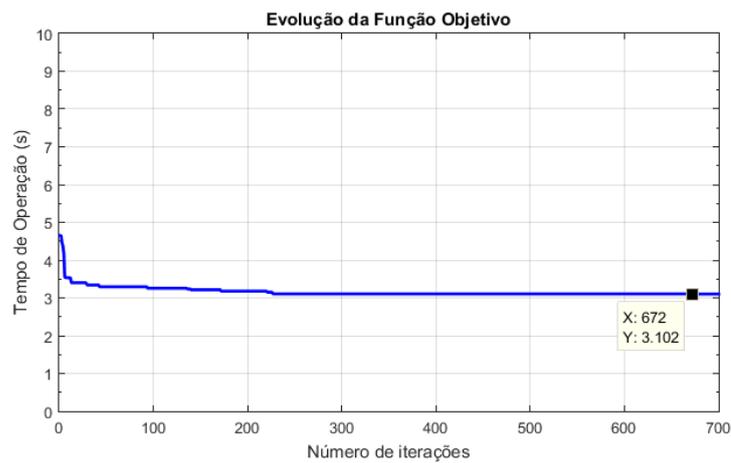
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 24 – Sistema teste 1: Característica de convergência da FO via FFA em PNL.



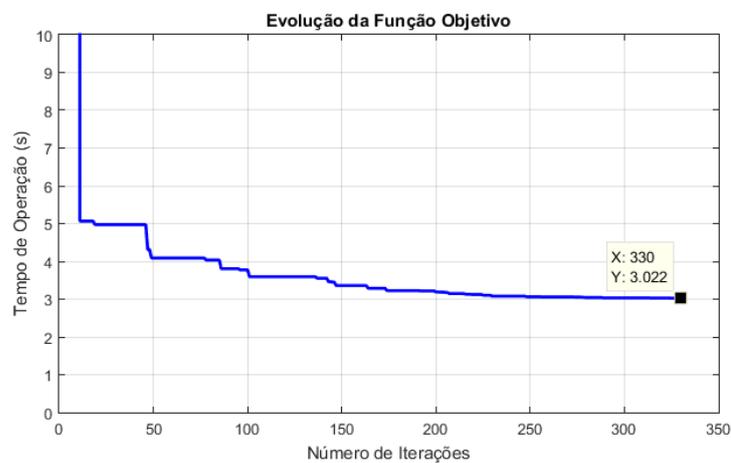
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 25 – Sistema teste 1: Característica de convergência da FO via PSO em PNL.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 26 – Sistema teste 1: Característica de convergência da FO via CSA em PNL.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 16 os valores das FOs são comparados com os resultados reportados na literatura por Madhumitha et al. (2015) e Chaitanya, Rohit e Swathika (2017), os quais aplicaram DE e GA para o mesmo sistema teste, respectivamente. Além disso, são comparados ao tempo ótimo encontrado através do método DS, utilizando o resolvidor *PHPSimplex* disponível gratuitamente em versão *on-line*, o qual garante o valor ótimo para a resolução do problema em programação linear.

Tabela 16 – Comparativo entre os resultados deste trabalho e os reportados na literatura para o sistema radial de 4 barras.

Metodologia	Autores	FO(s)
DE(PL)	Chaitanya, Rohit e Swathika (2017)	4,329
GA(PL)	Madhumitha et al. (2015)	3,431
Dual Simplex	O Autor (via resolvidor)	3,396
FFA(PL)	Implementado pelo autor	3,399
PSO(PL)	Implementado pelo autor	3,402
CSA(PL)	Implementado pelo autor	3,396
FFA(PNL)	Implementado pelo autor	3,039
PSO(PNL)	Implementado pelo autor	3,102
CSA(PNL)	Implementado pelo autor	3,022

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados acima indicam que os algoritmos DS, FFA(PL), PSO(PL) e CSA(PL) são muito próximos e têm o menor valor para a função objetivo. Destaca-se que o CSA(PL) atingiu o mesmo valor determinado a partir do método DS, o qual retorna a resposta ótima para o problema tratado como linear. Dessa forma, são métodos superiores na minimização do problema linear proposto quando comparados ao GA e DE.

Quando o problema é solucionado na forma de programação não-linear, os algoritmos FFA, PSO e CSA mostram resultados ainda melhores do que os apresentados em Madhumitha et al. (2015) e Chaitanya, Rohit e Swathika (2017).

É importante salientar que o método Dual Simplex, ao contrário das heurísticas, sempre garante o valor ótimo em um problema de otimização linear. Isto ocorre pois o DS percorre os vértices da região factível até alcançar uma resposta que não possua soluções vizinhas melhores, sendo esta a resposta ótima. No entanto, à medida que o problema a ser otimizado se torna não-linear, o Simplex não pode ser utilizado.

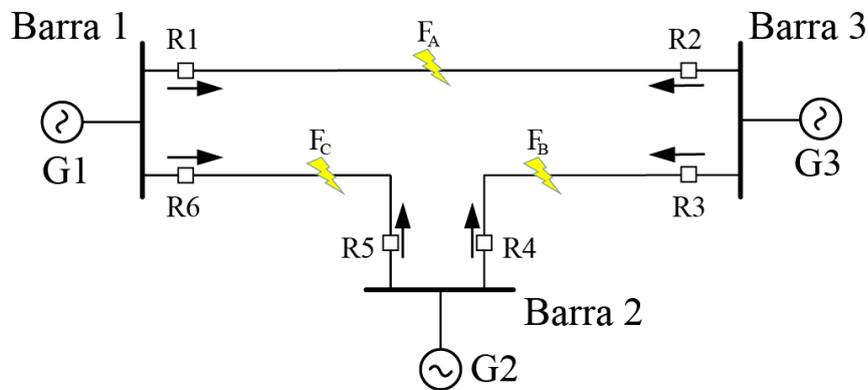
Além disso, mesmo em um problema linear com muitas variáveis, os métodos Simplex ou DS levam a um número elevado de cálculos, o que pode tornar a otimização bastante complexa (MAHDAVI; FESANGHARY; DAMANGIR, 2007). Já as heurísticas podem ser utilizadas para sistemas não-lineares, precisando informar apenas as restrições

e a função objetivo a ser minimizada. Embora algumas vezes possam não garantir a solução ótima, os resultados são consideravelmente satisfatórios na maioria das aplicações (CHAN; BRANDWAJN, 1986).

5.2 Sistema Teste 2: Sistema em Malha com 3 Barras

Já para o segundo caso, foi testado um sistema malhado, o qual se trata do sistema IEEE de 3 barramentos, conforme a Figura 27, sendo este o pioneiro dos sistemas utilizados para a coordenação ótima de relés de sobrecorrente direcionais (URDANETA; NADIRA; JIMENEZ, 1988).

Figura 27 – Diagrama unifilar simplificado do sistema teste 2.



Fonte: Adaptado de Urdaneta, Nadira e Jimenez (1988) - Elaborado pelo autor.

Neste exemplo, assumiu-se que as perturbações existentes são faltas trifásicas, as quais ocorreram no meio das linhas de transmissão. Cada zona de proteção corresponde a uma linha, sendo que tal rede possui 3 barramentos, 3 linhas, 3 geradores e 6 relés de sobrecorrente direcionais.

Para este estudo de caso, foram consideradas duas configurações, sendo uma a configuração normal e outra uma configuração transiente. A configuração transiente ocorre quando um dos relés atua dentro da sua zona de proteção primária, porém, manipulando a abertura do disjuntor que fica na extremidade da linha de transmissão (URDANETA; NADIRA; JIMENEZ, 1988) e (AMRAEE, 2012). Logo, a coordenação bem como a seletividade, deve ser garantida para ambas as condições.

Inicialmente, definiu-se a relação entre os relés primários e de retaguarda. A *RTC* dos relés é de 300:5 para os relés R_1 e R_4 . Já para os relés R_2 , R_3 e R_5 , essa relação é de 200:5 e de 400:5 para R_6 . O limite mínimo para a operação de cada relé é de 0,1 segundo. O intervalo de coordenação entre as proteções primária e de retaguarda foi adotado como 0,2 segundo.

Ao adotar fixo o valor de *MC*, o problema torna-se linear, porém, embora pré-definido, diferentemente do sistema teste 1, cada relé possui um ajuste de TAP individual.

A formulação matemática para o formato linear do problema pode ser visto em (5.25) a (5.43):

$$\text{Min. : } z = K_{(1, Fa)} \cdot x_1 + K_{(2, Fa)} \cdot x_2 + K_{(3, Fb)} \cdot x_3 + K_{(4, Fb)} \cdot x_4 + K_{(5, Fc)} \cdot x_5 + K_{(6, Fc)} \cdot x_6 \quad (5.25)$$

Sujeito a :

$$K_{(5, Fa)}^n \cdot x_5 - K_{(1, Fa)}^n \cdot x_1 \geq CTI \quad (5.26)$$

$$K_{(4, Fa)}^n \cdot x_4 - K_{(2, Fa)}^n \cdot x_2 \geq CTI \quad (5.27)$$

$$K_{(1, Fb)}^n \cdot x_1 - K_{(3, Fb)}^n \cdot x_3 \geq CTI \quad (5.28)$$

$$K_{(6, Fb)}^n \cdot x_6 - K_{(4, Fb)}^n \cdot x_4 \geq CTI \quad (5.29)$$

$$K_{(3, Fc)}^n \cdot x_3 - K_{(5, Fc)}^n \cdot x_5 \geq CTI \quad (5.30)$$

$$K_{(2, Fc)}^n \cdot x_2 - K_{(6, Fc)}^n \cdot x_6 \geq CTI \quad (5.31)$$

$$K_{(5, Fa)}^t \cdot x_5 - K_{(1, Fa)}^t \cdot x_1 \geq CTI \quad (5.32)$$

$$K_{(4, Fa)}^t \cdot x_4 - K_{(2, Fa)}^t \cdot x_2 \geq CTI \quad (5.33)$$

$$K_{(1, Fb)}^t \cdot x_1 - K_{(3, Fb)}^t \cdot x_3 \geq CTI \quad (5.34)$$

$$K_{(6, Fb)}^t \cdot x_6 - K_{(4, Fb)}^t \cdot x_4 \geq CTI \quad (5.35)$$

$$K_{(3, Fc)}^t \cdot x_3 - K_{(5, Fc)}^t \cdot x_5 \geq CTI \quad (5.36)$$

$$K_{(2, Fc)}^t \cdot x_2 - K_{(6, Fc)}^t \cdot x_6 \geq CTI \quad (5.37)$$

$$K_{(1, Fa)}^n \cdot x_1 \geq t_{\min} \quad (5.38)$$

$$K_{(2, Fa)}^n \cdot x_2 \geq t_{\min} \quad (5.39)$$

$$K_{(3, Fb)}^n \cdot x_3 \geq t_{\min} \quad (5.40)$$

$$K_{(4, Fb)}^n \cdot x_4 \geq t_{\min} \quad (5.41)$$

$$K_{(5, Fc)}^n \cdot x_5 \geq t_{\min} \quad (5.42)$$

$$K_{(6, Fc)}^n \cdot x_6 \geq t_{\min} \quad (5.43)$$

Como visto no problema anterior (sistema teste 1), as metodologias quando aplicadas ao formato de problema de programação não-linear retornaram melhores respostas para a função objetivo proposta. Por este motivo, novamente, o problema é solucionado também no formato não-linearizado, visto que o objetivo agora é verificar o desempenho dos mesmos algoritmos em um sistema elétrico não radial.

A função objetivo no formato não-linear é dada por (5.44) e possui 12 variáveis a serem ajustadas, contrapondo as 6 variáveis do modelo linear.

As 12 restrições quanto ao intervalo de tempo entre as proteções primária e de retaguarda são dadas pelas Equações (5.45) a (5.56). Enquanto que de (5.57) a (5.62) são expressas as restrições quanto ao tempo mínimo de operação do relé principal.

$$\begin{aligned} Min. : z = & \frac{0,14 \cdot x_1}{\left(\frac{32,98}{x_7}\right)^{0,02} - 1} + \frac{0,14 \cdot x_2}{\left(\frac{38,14}{x_8}\right)^{0,02} - 1} + \frac{0,14 \cdot x_3}{\left(\frac{42,09}{x_9}\right)^{0,02} - 1} \\ & + \frac{0,14 \cdot x_4}{\left(\frac{30,25}{x_{10}}\right)^{0,02} - 1} + \frac{0,14 \cdot x_5}{\left(\frac{37,494}{x_{11}}\right)^{0,02} - 1} + \frac{0,14 \cdot x_6}{\left(\frac{22,07}{x_{12}}\right)^{0,02} - 1} \end{aligned} \quad (5.44)$$

Sujeito a :

$$\frac{0,14 \cdot x_5}{\left(\frac{4,37}{x_{11}}\right)^{0,02} - 1} - \frac{0,14 \cdot x_1}{\left(\frac{32,98}{x_7}\right)^{0,02} - 1} \geq 0,2 \quad (5.45)$$

$$\frac{0,14 \cdot x_4}{\left(\frac{9,08}{x_{10}}\right)^{0,02} - 1} - \frac{0,14 \cdot x_2}{\left(\frac{38,14}{x_8}\right)^{0,02} - 1} \geq 0,2 \quad (5.46)$$

$$\frac{0,14 \cdot x_1}{\left(\frac{10,28}{x_7}\right)^{0,02} - 1} - \frac{0,14 \cdot x_3}{\left(\frac{42,09}{x_9}\right)^{0,02} - 1} \geq 0,2 \quad (5.47)$$

$$\frac{0,14 \cdot x_6}{\left(\frac{5,82}{x_{12}}\right)^{0,02} - 1} - \frac{0,14 \cdot x_4}{\left(\frac{30,25}{x_{10}}\right)^{0,02} - 1} \geq 0,2 \quad (5.48)$$

$$\frac{0,14 \cdot x_3}{\left(\frac{9,60}{x_9}\right)^{0,02} - 1} - \frac{0,14 \cdot x_5}{\left(\frac{37,49}{x_{11}}\right)^{0,02} - 1} \geq 0,2 \quad (5.49)$$

$$\frac{0,14 \cdot x_2}{\left(\frac{3,63}{x_8}\right)^{0,02} - 1} - \frac{0,14 \cdot x_6}{\left(\frac{22,07}{x_{12}}\right)^{0,02} - 1} \geq 0,2 \quad (5.50)$$

$$\frac{0,14 \cdot x_5}{\left(\frac{4,37}{x_{11}}\right)^{0,02} - 1} - \frac{0,14 \cdot x_1}{\left(\frac{34,58}{x_7}\right)^{0,02} - 1} \geq 0,2 \quad (5.51)$$

$$\frac{0,14 \cdot x_4}{\left(\frac{11,67}{x_{10}}\right)^{0,02} - 1} - \frac{0,14 \cdot x_2}{\left(\frac{40,54}{x_8}\right)^{0,02} - 1} \geq 0,2 \quad (5.52)$$

$$\frac{0,14 \cdot x_1}{\left(\frac{12,66}{x_7}\right)^{0,02} - 1} - \frac{0,14 \cdot x_3}{\left(\frac{44,49}{x_9}\right)^{0,02} - 1} \geq 0,2 \quad (5.53)$$

$$\frac{0,14 \cdot x_6}{\left(\frac{7,78}{x_{12}}\right)^{0,02} - 1} - \frac{0,14 \cdot x_4}{\left(\frac{31,85}{x_{10}}\right)^{0,02} - 1} \geq 0,2 \quad (5.54)$$

$$\frac{0,14 \cdot x_3}{\left(\frac{13,95}{x_9}\right)^{0,02} - 1} - \frac{0,14 \cdot x_5}{\left(\frac{39,71}{x_{11}}\right)^{0,02} - 1} \geq 0,2 \quad (5.55)$$

$$\frac{0,14 \cdot x_2}{\left(\frac{9,51}{x_8}\right)^{0,02} - 1} - \frac{0,14 \cdot x_6}{\left(\frac{23,19}{x_{12}}\right)^{0,02} - 1} \geq 0,2 \quad (5.56)$$

$$\frac{0,14 \cdot x_1}{\left(\frac{32,98}{x_7}\right)^{0,02} - 1} \geq 0,1 \quad (5.57)$$

$$\frac{0,14 \cdot x_2}{\left(\frac{38,14}{x_8}\right)^{0,02} - 1} \geq 0,1 \quad (5.58)$$

$$\frac{0,14 \cdot x_3}{\left(\frac{42,09}{x_9}\right)^{0,02} - 1} \geq 0,1 \quad (5.59)$$

$$\frac{0,14 \cdot x_4}{\left(\frac{30,25}{x_{10}}\right)^{0,02} - 1} \geq 0,1 \quad (5.60)$$

$$\frac{0,14 \cdot x_5}{\left(\frac{37,494}{x_{11}}\right)^{0,02} - 1} \geq 0,1 \quad (5.61)$$

$$\frac{0,14 \cdot x_6}{\left(\frac{22,07}{x_{12}}\right)^{0,02} - 1} \geq 0,1 \quad (5.62)$$

O problema de coordenação dos relés deste sistema teste possui 12 restrições de seletividade, sendo 6 para cada configuração (normal e transiente). Ainda, apresenta 6 restrições quanto ao tempo mínimo de operação dos relés de proteção primária para a configuração normal de operação.

Os ajustes disponíveis do *TMS* podem variar de forma contínua de 0,1 até 1,1. Já o *MC* pode assumir valores entre 1,5 a 5,0, desde que este seja um valor discreto, variando em passos uniformes de 0,5.

Os valores das correntes de falta considerados são apresentados nas Tabelas 17 e 18 para a configuração normal e para a configuração transiente, respectivamente.

A Tabela 19, apresenta os valores referentes a relação de transformação e os TAPs iniciais de cada relé. Os relés estudados seguem a norma IEC com curva inversa. Todas as considerações deste caso foram baseadas em Urdaneta, Nadira e Jimenez (1988).

Tabela 17 – Sistema teste 2: Pares de relés de proteção e níveis de curto-circuito para a configuração normal.

Local da Falta	Relé _{pri.}	I _{cc} (A)	Relé _{ret.}	I _{cc} (A)
Ponto F _A	R ₁	1978,9	R ₅	175
Ponto F _A	R ₂	1525,7	R ₄	545
Ponto F _B	R ₃	1683,9	R ₁	617,22
Ponto F _B	R ₄	1815,4	R ₆	466,17
Ponto F _C	R ₅	1499,66	R ₃	384
Ponto F _C	R ₆	1766,3	R ₂	145,34

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 18 – Sistema teste 2: Pares de relés de proteção e níveis de curto-circuito para a configuração transiente.

Local da Falta	Relé _{pri.}	$I_{cc}(A)$	Relé _{ret.}	$I_{cc}(A)$
Ponto F _A	R ₁	2075	R ₅	400,7
Ponto F _A	R ₂	1621,7	R ₄	700,64
Ponto F _B	R ₃	1779,6	R ₁	760,17
Ponto F _B	R ₄	1911,5	R ₆	622,65
Ponto F _C	R ₅	1588,5	R ₃	558,13
Ponto F _C	R ₆	1855,4	R ₂	380,7

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 19 – Sistema teste 2: Valores de RTC e TAPs ajustados.

Relé	RTC	TAP
R ₁	300:5	5,0
R ₂	200:5	1,5
R ₃	200:5	5,0
R ₄	300:5	4,0
R ₅	200:5	2,0
R ₆	400:5	2,5

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.1 Resultados: Sistema teste 2

Novamente, para cada uma das metodologias, foi adotado o número máximo de iterações igual a 1000.

Também, foi utilizado o critério de parada baseado na diferença entre a variação das respostas nas últimas 100 iterações.

Os parâmetros dos algoritmos são os mesmos utilizados após a calibragem dos algoritmos para o sistema teste 1.

Cada algoritmo no formato linear foi testado 25 vezes, enquanto que, para o formato não-linear, os testes foram estendidos a 50 execuções, optou-se por realizar o dobro de execuções para melhor investigação dos resultados, pois, neste caso o problema se torna mais complexo em decorrência da adição de novas variáveis de busca.

Os resultados dos ajustes de TMS que minimizam a FO de cada método, quando o MC é fixo podem ser vistos na Tabela 20.

A Tabela 21 exhibe os ajustes de TMS e MC que minimizam o tempo de atuação dos relés quando o problema é declarado como não-linear.

Tabela 20 – Sistema teste 2: Solução da coordenação via FFA, PSO e CSA em PL.

Índice	FFA	PSO	CSA
x ₁	0,1000	0,1000	0,1000
x ₂	0,1364	0,1364	0,1364
x ₃	0,1000	0,1000	0,1000
x ₄	0,1000	0,1000	0,1000
x ₅	0,1298	0,1298	0,1298
x ₆	0,1000	0,1000	0,1000
z	1,9258	1,9258	1,9258
Iteração	241	369	188

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 21 – Sistema teste 2: Solução da coordenação via FFA, PSO e CSA em PNL.

Índice	FFA	PSO	CSA
x ₁	0,1	0,1071	0,1067
x ₂	0,1	0,1001	0,1082
x ₃	0,1	0,1	0,1
x ₄	0,1	0,1	0,1
x ₅	0,1	0,1	0,1
x ₆	0,1	0,1	0,1120
x ₇	3	2,5	2,5
x ₈	2,5	2,5	2,0
x ₉	3	3	3,0
x ₁₀	2,5	2,5	2,5
x ₁₁	2,5	2,5	2,5
x ₁₂	2	2	1,5
z	1,602	1,601	1,598
Iteração	141	159	144

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os tempos de atuação dos relés principais, bem como suas respectivas proteções de retaguarda, para a configuração normal e transiente, obtidos através de cada uma das

metodologias analisadas, podem ser vistos nas Tabelas 22 até 24.

É importante que ressaltar que, de acordo com a Tabela 20, os ajustes de *TMS* que resultam no menor valor para a função objetivo das três metodologias FFA(PL), PSO(PL) e CSA(PL) são os mesmos, e como consequência, o mesmo tempo de atuação para o sistema de proteção, independentemente da metodologia a ser aplicada.

Tabela 22 – Tempos de atuação dos relés via FFA, PSO e CSA em PL.

Proteção		Configuração normal			Configuração transiente		
Relé _{pri.}	Relé _{ret.}	$T_{pri.}(s)$	$T_{ret.}(s)$	$\Delta T(s)$	$T_{pri.}(s)$	$T_{ret.}(s)$	$\Delta T(s)$
R ₁	R ₅	0,364	1,151	0,787	0,355	0,555	0,2
R ₂	R ₄	0,285	0,846	0,561	0,280	0,646	0,366
R ₃	R ₁	0,321	0,963	0,641	0,313	0,745	0,432
R ₄	R ₆	0,339	0,820	0,481	0,330	0,609	0,279
R ₅	R ₃	0,301	1,066	0,765	0,295	0,675	0,380
R ₆	R ₂	0,314	1,069	0,755	0,307	0,507	0,2

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 23 – Tempos de atuação dos relés para o sistema de 3 barras via FFA em PNL.

Proteção		Configuração normal			Configuração transiente		
Relé _{pri.}	Relé _{ret.}	$T_{pri.}(s)$	$T_{ret.}(s)$	$\Delta T(s)$	$T_{pri.}(s)$	$T_{ret.}(s)$	$\Delta T(s)$
R ₁	R ₅	0,285	1,244	0,959	0,279	0,497	0,218
R ₂	R ₄	0,250	0,536	0,286	0,244	0,447	0,203
R ₃	R ₁	0,258	0,561	0,303	0,253	0,479	0,226
R ₄	R ₆	0,274	0,648	0,374	0,268	0,508	0,240
R ₅	R ₃	0,252	0,595	0,343	0,246	0,448	0,202
R ₆	R ₂	0,285	1,865	1,581	0,279	0,517	0,238

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 24 – Tempos de atuação dos relés para o sistema de 3 barras via PSO em PNL.

Proteção		Configuração normal			Configuração transiente		
Relé _{pri.}	Relé _{ret.}	$T_{pri.}(s)$	$T_{ret.}(s)$	$\Delta T(s)$	$T_{pri.}(s)$	$T_{ret.}(s)$	$\Delta T(s)$
R ₁	R ₅	0,283	1,244	0,960	0,278	0,497	0,219
R ₂	R ₄	0,250	0,536	0,286	0,244	0,447	0,203
R ₃	R ₁	0,258	0,523	0,265	0,253	0,455	0,202
R ₄	R ₆	0,274	0,648	0,374	0,268	0,508	0,240
R ₅	R ₃	0,252	0,595	0,343	0,246	0,448	0,202
R ₆	R ₂	0,285	1,865	1,581	0,279	0,517	0,238

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 25 – Tempos de atuação dos relés para o sistema de 3 barras via CSA em PNL.

Proteção		Configuração normal			Configuração transiente		
Relé _{pri.}	Relé _{ret.}	$T_{pri.}(s)$	$T_{ret.}(s)$	$\Delta T(s)$	$T_{pri.}(s)$	$T_{ret.}(s)$	$\Delta T(s)$
R ₁	R ₅	0,282	1,243	0,961	0,276	0,497	0,220
R ₂	R ₄	0,249	0,535	0,286	0,244	0,447	0,202
R ₃	R ₁	0,258	0,520	0,262	0,252	0,452	0,2
R ₄	R ₆	0,273	0,569	0,295	0,268	0,468	0,2
R ₅	R ₃	0,251	0,594	0,343	0,246	0,448	0,202
R ₆	R ₂	0,283	1,262	0,978	0,278	0,478	0,2

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se que, independentemente, da metodologia de otimização utilizado e do formato de resolução do problema (PL ou PNL), todos os relés encontram-se coordenados de maneira seletiva, tanto para a configuração normal quanto para a configuração transiente, visto que, as diferenças de tempo entre a proteção principal e de retaguarda apresentadas, respeitam a condição de coordenação ($CTI \geq 0,2$ s).

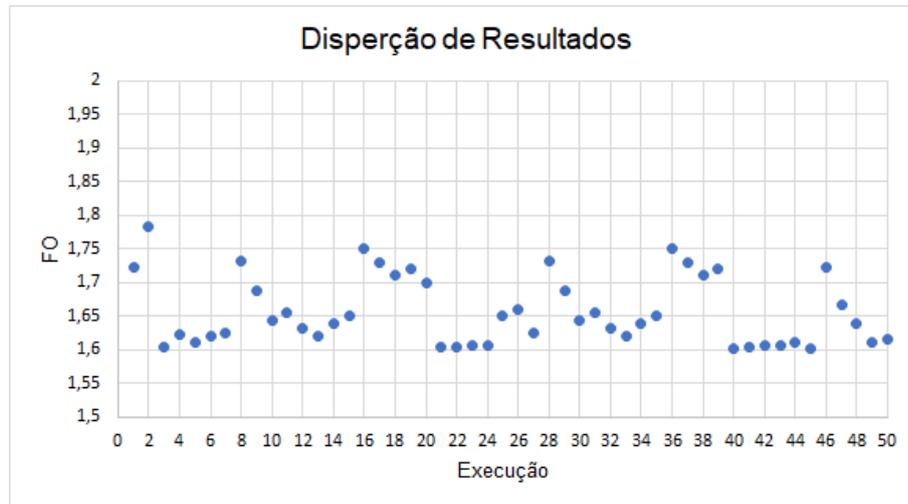
Comparando os gráficos das metodologias FFA (Figura 28) e PSO (Figura 29), nota-se que, apesar de o PSO exibir uma resposta ligeiramente melhor do que o FFA, os resultados deste variam bastante, tornando-se mais dispersos, permitindo assim que a média das respostas do FFA seja melhor, quando comparada com a média das respostas do PSO. Ainda, observa-se que o CSA novamente se destaca com melhores respostas, tanto para o menor valor entre para as respostas obtidas, quanto para as médias, o que pode ser observado no gráfico da Figura 30, onde a maioria das respostas acompanha uma tendência próxima a 1,6 s.

Figura 28 – Otimização da FO a cada execução do FFA(PNL) para o sistema teste 2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 29 – Otimização da FO a cada execução do PSO(PNL) para o sistema teste 2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 30 – Otimização da FO a cada execução do CSA(PNL) para o sistema teste 2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 26 exhibe resumidamente os testes realizados, bem como os valores mínimos, máximos, média das respostas e o desvio padrão das mesmas para cada uma das metodologias de otimização aplicadas ao problema. Os resultados, apesar de apresentarem certa variação entre o menor tempo de operação dos relés (FO mín.) e a operação mais lenta (FO máx.), em geral, as soluções exibem uma boa média para o conjunto de resultados simulados frente ao total de execuções para cada metodologia.

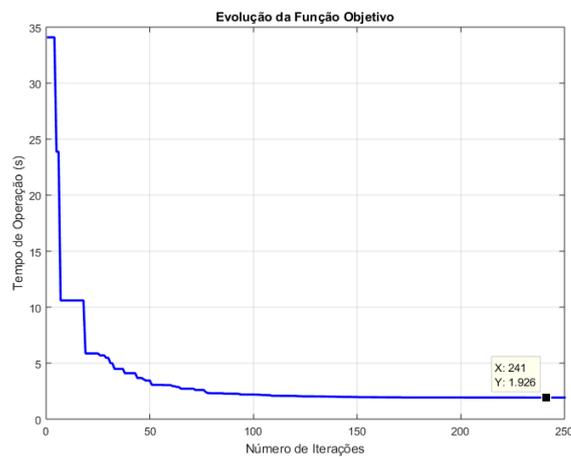
Nas Figuras 31 a 33, podem ser vistos os comportamentos da melhor função objetivo (menor tempo de operação) de cada método até o final da execução quando o problema é tratado como programação linear, enquanto que, para resolução via programação não-linear, a minimização do tempo total de operação dos relés até a convergência da FO é mostrada nas Figuras 34 até 36.

Tabela 26 – Resumo dos resultados das simulações para o sistema malhado de 3 barras.

Técnica	FO mín.	FO máx.	Média	σ	Nº Execuções
FFA(PL)	1,925	2,321	1,947	0,088	25
PSO(PL)	1,925	2,15	2,013	0,083	25
CSA(PL)	1,925	1,955	1,928	0,007	25
FFA(PNL)	1,603	1,855	1,638	0,049	50
PSO(PNL)	1,601	1,783	1,657	0,051	50
CSA(PNL)	1,598	1,655	1,611	0,017	50

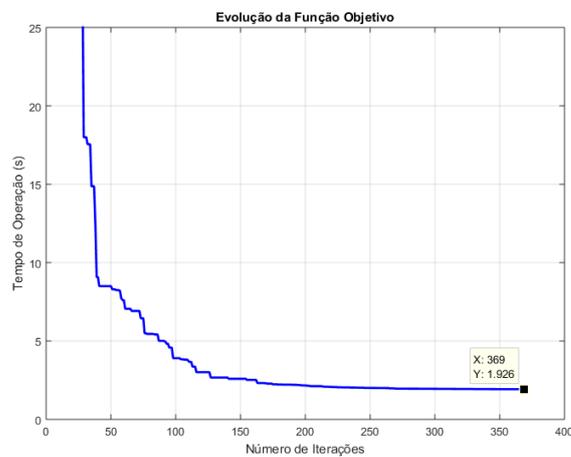
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 31 – Sistema teste 2: Característica de convergência da FO via FFA em PL.



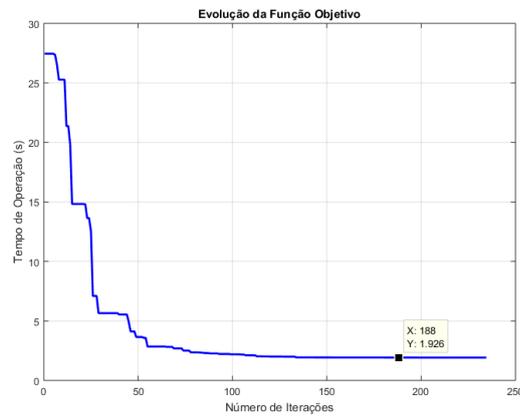
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 32 – Sistema teste 2: Característica de convergência da FO via PSO em PL.



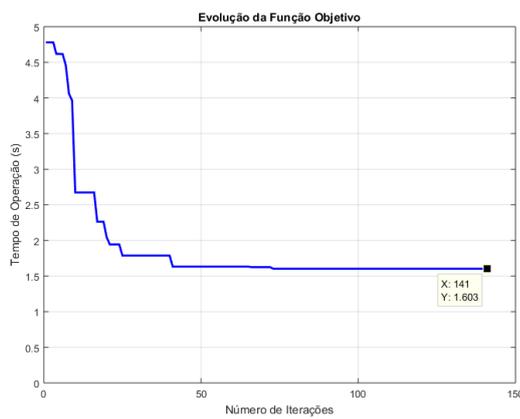
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 33 – Sistema teste 2: Característica de convergência da FO via CSA em PL.



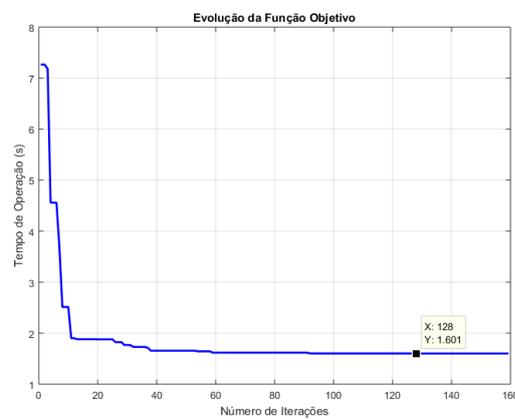
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 34 – Sistema teste 2: Característica de convergência da FO via FFA em PNL.



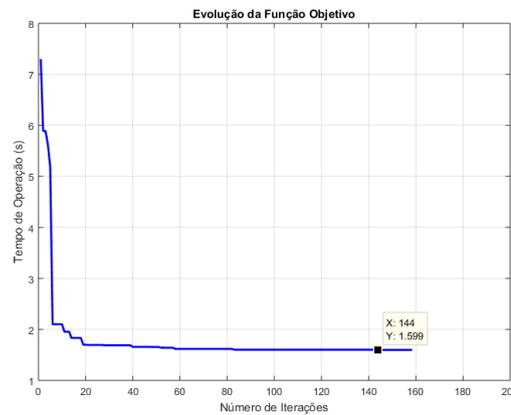
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 35 – Sistema teste 2: Característica de convergência da FO via PSO em PNL.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 36 – Sistema teste 2: Característica de convergência da FO via CSA em PNL.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 27 apresenta o comparativo com os resultados de estudos reportados na literatura. Ressalta-se que, quando o problema é solucionado em PL, os algoritmos propostos encontram os mesmos valores para os ajustes de TMS que as soluções encontradas via PSO, segundo o trabalho de Mansour, Mekhamer e El-Kharbawe (2007), bem como são iguais as respostas encontradas com a Otimização por Algoritmo Seeker (SAO), conforme Amraee (2012), e ao encontrado através do método Simplex, segundo Dai et al. (2010). Estes são os valores ótimos e que minimizam o tempo de atuação dos relés (FO=1,925 segundos), quando o problema é declarado como de programação linear.

Novamente, os resultados para o formato linear exibem respostas de qualidade inferior aos problemas solucionados no modelo não-linear. Isto se dá pelo fato da menor possibilidade de ajustes nos relés, pois, em um problema linear aplicado à coordenação do relé de sobrecorrente, apenas o múltiplo de tempo pode ser ajustado.

Ressalta-se que o CSA encontrou o mesmo resultado para a FO (1,598 segundos) que a metodologia híbrida de Otimização Baseada em Biogeografia – Programação Linear (BBO-PL), conforme visto em Albasri, Alroomi e Talaq (2015). Estas duas metodologias se mostraram superiores na otimização do problema frente aos estudos reportados na literatura para este mesmo caso.

Os outros dois métodos implementados FFA e PSO, apesar de não encontrarem o menor tempo para a atuação dos RSD, exibiram boa performance, visto que as FOs exibem valores muito próximos ao verificado segundo o CSA, BBO-PL e SAO, sendo estas soluções melhores do que as encontradas pelo BBO (ALBASRI; ALROOMI; TALAQ, 2015) e pelo *Standard Branch-and-Bound Algorithm* (SBB), implementado por Amraee (2012).

Tabela 27 – Comparativo entre os resultados deste trabalho e os reportados na literatura para o sistema malhado de 3 barras.

Metodologia	Autor	FO(s)
Simplex	(DAI et al., 2010)	1,925
PSO(PL)	(MANSOUR; MEKHAMER; EL-KHARBAWE, 2007)	1,925
SAO(PL)	(AMRAEE, 2012)	1,925
SBB(PNL)	(AMRAEE, 2012)	1,727
SAO(PNL)	(AMRAEE, 2012)	1,599
BBO-PL	(ALBASRI; ALROOMI; TALAQ, 2015)	1,598
BBO(PNL)	(ALBASRI; ALROOMI; TALAQ, 2015)	1,683
FFA(PL)	Implementado pelo autor	1,925
PSO(PL)	Implementado pelo autor	1,925
CSA(PL)	Implementado pelo autor	1,925
FFA(PNL)	Implementado pelo autor	1,602
PSO(PNL)	Implementado pelo autor	1,601
CSA(PNL)	Implementado pelo autor	1,598

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3 Sistema Teste 3: Situação realista adaptada da SE de Serum-Índia

O estudo aborda um sistema elétrico real, localizado em Pune na Índia. Onde uma subestação alimentada por 220 kV é dotada de um transformador rebaixador de tensão 220/22kV e 30 MVA, o sistema possui 4 linhas de subtransmissão de energia, sendo que cada uma destas linhas possui o comprimento aproximado de 4 km.

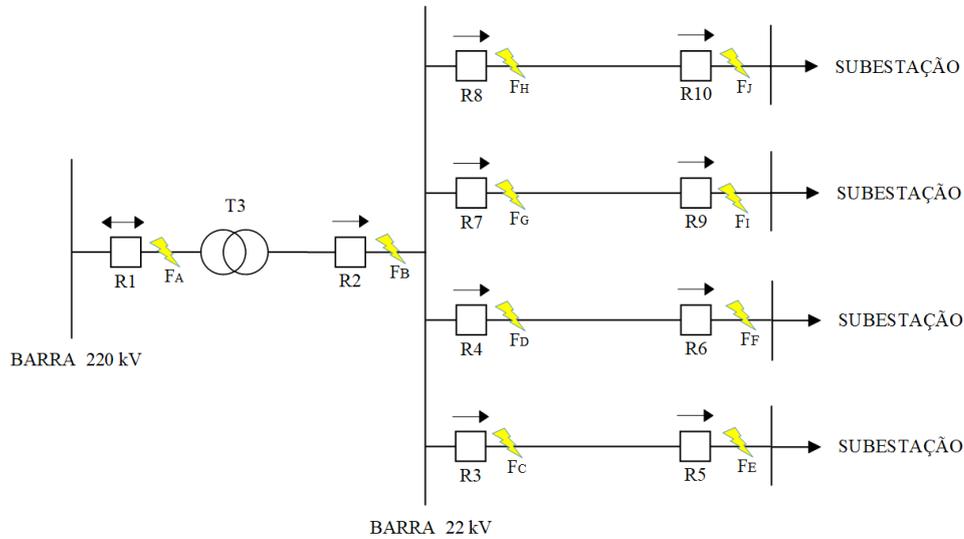
A topologia do sistema é mostrada na Figura 37. Mais informações podem ser encontradas em Ghogare e Bapat (2015a).

Como base para os cálculos de sequência positiva, negativa e sequência zero é adotado o valor de 500 MVA e, após, são obtidas as magnitudes das correntes de curto-circuito trifásico para os 10 pontos de falta considerados, bem como é elaborado o casamento entre os pares de relés responsáveis pela proteção primária e retaguarda correspondentes a cada trecho.

Os pares de proteção e a magnitude das correntes de de curto-circuito consideradas, são mostrados na Tabela 28, enquanto que a Tabela 29 exhibe as relações de transformação referentes aos TCs para cada relé.

Os valores das correntes que chegam até os relés através do secundário dos TCs foram calculadas por $\frac{I_{cc}}{RTC}$, e são exibidas conforme cada ponto de falta e seus dispositivos de proteção na Tabela 30.

Figura 37 – Sistema teste 3: Trecho da LT da SE Serum Institute of India.



Fonte: Adaptado de Ghogare e Bapat (2015a) - Elaborado pelo autor.

Tabela 28 – Sistema teste 3: Localização dos pontos de falta e magnitude das correntes de curto-circuito.

Local da Falta	Proteção		$I_{cc}(A)$
	Primária	Retaguarda	
Ponto F_A	R_1	-	9460
Ponto F_B	R_2	R_1	5287
Ponto F_C	R_3	R_2	5287
Ponto F_D	R_4	R_2	5287
Ponto F_E	R_5	R_3	4107
Ponto F_F	R_6	R_4	4107
Ponto F_G	R_7	R_2	5287
Ponto F_H	R_8	R_2	5287
Ponto F_I	R_9	R_7	4107
Ponto F_J	R_{10}	R_8	4107

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 29 – Sistema teste 3: Valores de RTC .

Relé	RTC
R_1	100:1
R_2	1000:1
R_3 e R_7	300:1
R_4 e R_8	500:1
R_5 , R_6 , R_9 e R_{10}	600:1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 30 – Sistema teste 3: Corrente dos pares de relés ponderada pela *RTC*.

Local da Falta	Relé _{pri.}	$I_{relé}(A)$	Relé _{ret.}	$I_{relé}(A)$
Ponto F _A	R ₁	94,6	-	-
Ponto F _B	R ₂	5,2870	R ₁	5,2870
Ponto F _C	R ₃	17,6233	R ₂	5,2870
Ponto F _D	R ₄	10,5740	R ₂	5,2870
Ponto F _E	R ₅	6,8450	R ₃	13,6900
Ponto F _F	R ₆	6,8450	R ₄	8,2140
Ponto F _G	R ₇	17,6233	R ₂	5,2870
Ponto F _H	R ₈	10,5740	R ₂	5,2870
Ponto F _I	R ₉	6,8450	R ₇	13,69
Ponto F _J	R ₁₀	6,8450	R ₈	8,2140

Fonte: Elaborado pelo autor.

O CTI entre as operações da proteção de primária e de retaguarda a ser considerado é de 0,3 s e o tempo mínimo de operação dos relés de proteção primária é de 0,1 s para este caso. O *TMS* permite ajustes entre 0,03 e 1,2, enquanto o *MC* pode ser ajustado entre 0,8 a 1,2, sendo que ambos os ajustes podem assumir valores contínuos.

O problema de coordenação é formulado apenas como PNL em Equação (5.63). Considerando como incógnitas a serem otimizadas os ajustes de *TMS* e *MC* dos relés. Sendo assim, tem-se 20 variáveis de busca, onde de x_1 a x_{10} representam os ajustes de TMS_1 a TMS_{10} e de x_{11} até x_{20} compreendem os valores para o ajuste do *MC* dos relés R₁ a R₁₀, respectivamente. As restrições de coordenação que garantem a seletividade do sistema são exibidas em (5.64) até (5.72). Em (5.73) até (5.82) estão representadas as equações referentes às restrições de tempo mínimo de operação dos relés de proteção primária de cada zona.

$$\begin{aligned}
 Min. : z = & \frac{0,14 \cdot x_1}{\left(\frac{94,6}{x_{11}}\right)^{0,02} - 1} + \frac{0,14 \cdot x_2}{\left(\frac{5,29}{x_{12}}\right)^{0,02} - 1} + \frac{0,14 \cdot x_3}{\left(\frac{17,6}{x_{13}}\right)^{0,02} - 1} + \frac{0,14 \cdot x_4}{\left(\frac{10,6}{x_{14}}\right)^{0,02} - 1} + \\
 & \frac{0,14 \cdot x_5}{\left(\frac{6,84}{x_{15}}\right)^{0,02} - 1} + \frac{0,14 \cdot x_6}{\left(\frac{6,84}{x_{16}}\right)^{0,02} - 1} + \frac{0,14 \cdot x_7}{\left(\frac{17,6}{x_{17}}\right)^{0,02} - 1} + \\
 & \frac{0,14 \cdot x_7}{\left(\frac{10,6}{x_{18}}\right)^{0,02} - 1} + \frac{0,14 \cdot x_9}{\left(\frac{6,84}{x_{19}}\right)^{0,02} - 1} + \frac{0,14 \cdot x_{10}}{\left(\frac{6,84}{x_{20}}\right)^{0,02} - 1}
 \end{aligned} \quad (5.63)$$

$$\frac{0,14 \cdot x_1}{\left(\frac{5,29}{x_{11}}\right)^{0,02} - 1} - \frac{0,14 \cdot x_2}{\left(\frac{5,29}{x_{12}}\right)^{0,02} - 1} \geq 0,3 \quad (5.64)$$

$$\frac{0,14 \cdot x_2}{\left(\frac{5,29}{x_{12}}\right)^{0,02} - 1} - \frac{0,14 \cdot x_3}{\left(\frac{17,6}{x_{13}}\right)^{0,02} - 1} \geq 0,3 \quad (5.65)$$

$$\frac{0,14 \cdot x_2}{\left(\frac{5,29}{x_{12}}\right)^{0,02} - 1} - \frac{0,14 \cdot x_4}{\left(\frac{10,6}{x_{14}}\right)^{0,02} - 1} \geq 0,3 \quad (5.66)$$

$$\frac{0,14 \cdot x_3}{\left(\frac{13,7}{x_{13}}\right)^{0,02} - 1} - \frac{0,14 \cdot x_5}{\left(\frac{6,84}{x_{15}}\right)^{0,02} - 1} \geq 0,3 \quad (5.67)$$

$$\frac{0,14 \cdot x_4}{\left(\frac{8,21}{x_{14}}\right)^{0,02} - 1} - \frac{0,14 \cdot x_6}{\left(\frac{6,84}{x_{16}}\right)^{0,02} - 1} \geq 0,3 \quad (5.68)$$

$$\frac{0,14 \cdot x_2}{\left(\frac{8,21}{x_{12}}\right)^{0,02} - 1} - \frac{0,14 \cdot x_7}{\left(\frac{17,6}{x_{17}}\right)^{0,02} - 1} \geq 0,3 \quad (5.69)$$

$$\frac{0,14 \cdot x_2}{\left(\frac{5,29}{x_{12}}\right)^{0,02} - 1} - \frac{0,14 \cdot x_7}{\left(\frac{10,6}{x_{18}}\right)^{0,02} - 1} \geq 0,3 \quad (5.70)$$

$$\frac{0,14 \cdot x_7}{\left(\frac{13,7}{x_{17}}\right)^{0,02} - 1} - \frac{0,14 \cdot x_9}{\left(\frac{6,84}{x_{19}}\right)^{0,02} - 1} \geq 0,3 \quad (5.71)$$

$$\frac{0,14 \cdot x_7}{\left(\frac{8,21}{x_{18}}\right)^{0,02} - 1} - \frac{0,14 \cdot x_{10}}{\left(\frac{6,84}{x_{20}}\right)^{0,02} - 1} \geq 0,3 \quad (5.72)$$

$$\frac{0,14 \cdot x_1}{\left(\frac{94,6}{x_{11}}\right)^{0,02} - 1} \geq 0,1 \quad (5.73)$$

$$\frac{0,14 \cdot x_2}{\left(\frac{5,29}{x_{12}}\right)^{0,02} - 1} \geq 0,1 \quad (5.74)$$

$$\frac{0,14 \cdot x_3}{\left(\frac{17,6}{x_{13}}\right)^{0,02} - 1} \geq 0,1 \quad (5.75)$$

$$\frac{0,14 \cdot x_4}{\left(\frac{10,6}{x_{14}}\right)^{0,02} - 1} \geq 0,1 \quad (5.76)$$

$$\frac{0,14 \cdot x_5}{\left(\frac{6,84}{x_{15}}\right)^{0,02} - 1} \geq 0,1 \quad (5.77)$$

$$\frac{0,14 \cdot x_6}{\left(\frac{6,84}{x_{16}}\right)^{0,02} - 1} \geq 0,1 \quad (5.78)$$

$$\frac{0,14 \cdot x_7}{\left(\frac{17,6}{x_{17}}\right)^{0,02} - 1} \geq 0,1 \quad (5.79)$$

$$\frac{0,14 \cdot x_8}{\left(\frac{10,6}{x_{18}}\right)^{0,02} - 1} \geq 0,1 \quad (5.80)$$

$$\frac{0,14 \cdot x_9}{\left(\frac{6,84}{x_{19}}\right)^{0,02} - 1} \geq 0,1 \quad (5.81)$$

$$\frac{0,14 \cdot x_{10}}{\left(\frac{6,84}{x_{20}}\right)^{0,02} - 1} \geq 0,1 \quad (5.82)$$

5.3.1 Resultados: Sistema teste 3

Os ajustes ótimos obtidos pelos algoritmos que parametrizam os relés do sistema teste 3, bem como o valor da função objetivo são apresentados na Tabela 31.

Tabela 31 – Sistema teste 3: Solução do problema de coordenação via FFA, PSO e CSA.

Índice	FFA	PSO	CSA
x ₁	0,2235	0,2137	0,2136
x ₂	0,1866	0,1852	0,1847
x ₃	0,1696	0,1489	0,1684
x ₄	0,1352	0,1387	0,1353
x ₅	0,0315	0,0302	0,0300
x ₆	0,0300	0,0300	0,0318
x ₇	0,1637	0,1644	0,1675
x ₈	0,1376	0,1378	0,1128
x ₉	0,0300	0,0322	0,0305
x ₁₀	0,0311	0,0300	0,0300
x ₁₁	1,1646	1,1962	1,2000
x ₁₂	0,8074	0,8132	0,8154
x ₁₃	0,8244	1,0987	0,8155
x ₁₄	0,8560	0,8010	0,8283
x ₁₅	0,8244	0,8955	0,8971
x ₁₆	0,9234	0,9215	0,8117
x ₁₇	0,8960	0,8555	0,8143
x ₁₈	0,8000	0,8224	1,2000
x ₁₉	0,9602	0,8000	0,8483
x ₂₀	0,8459	0,8755	0,9113
z	2,9132	2,8836	2,8707
Iteração	298	327	342

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os tempos de operação dos relés de proteção para a parametrização realizada através dos ajustes da Tabela 31 são reportados nas Tabelas 32, 33 e 34 para o FFA, o PSO e o CSA, respectivamente.

Tabela 32 – Sistema teste 3: Tempos de atuação dos relés obtidos via FFA.

Local da Falta	Relé _{pri.}	Relé _{ret.}	$T_{pri.}(s)$	$T_{ret.}(s)$	$\Delta T(s)$
Ponto F _A	R ₁	-	0,3404	-	-
Ponto F _B	R ₂	R ₁	0,6819	1,0186	0,3366
Ponto F _C	R ₃	R ₂	0,3759	0,6819	0,3061
Ponto F _D	R ₄	R ₂	0,3670	0,6819	0,3150
Ponto F _E	R ₅	R ₃	0,1018	0,4107	0,3089
Ponto F _F	R ₆	R ₄	0,1027	0,4090	0,3062
Ponto F _G	R ₇	R ₂	0,3734	0,6819	0,3086
Ponto F _H	R ₈	R ₂	0,3634	0,6819	0,3185
Ponto F _I	R ₉	R ₇	0,1048	0,4090	0,3041
Ponto F _J	R ₁₀	R ₈	0,1018	0,4039	0,3021

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 33 – Sistema teste 3: Tempos de atuação dos relés obtidos via PSO.

Local da Falta	Relé _{pri.}	Relé _{ret.}	$T_{pri.}(s)$	$T_{ret.}(s)$	$\Delta T(s)$
Ponto F _A	R ₁	-	0,3275	-	-
Ponto F _B	R ₂	R ₁	0,6797	0,9917	0,3120
Ponto F _C	R ₃	R ₂	0,3653	0,6797	0,3144
Ponto F _D	R ₄	R ₂	0,3667	0,6797	0,3130
Ponto F _E	R ₅	R ₃	0,1018	0,4029	0,3011
Ponto F _F	R ₆	R ₄	0,1026	0,4075	0,3049
Ponto F _G	R ₇	R ₂	0,3691	0,6797	0,3107
Ponto F _H	R ₈	R ₂	0,3680	0,6797	0,3117
Ponto F _I	R ₉	R ₇	0,1028	0,4037	0,3009
Ponto F _J	R ₁₀	R ₈	0,1001	0,4094	0,3093

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 34 – Sistema teste 3: Tempos de atuação dos relés obtidos via CSA.

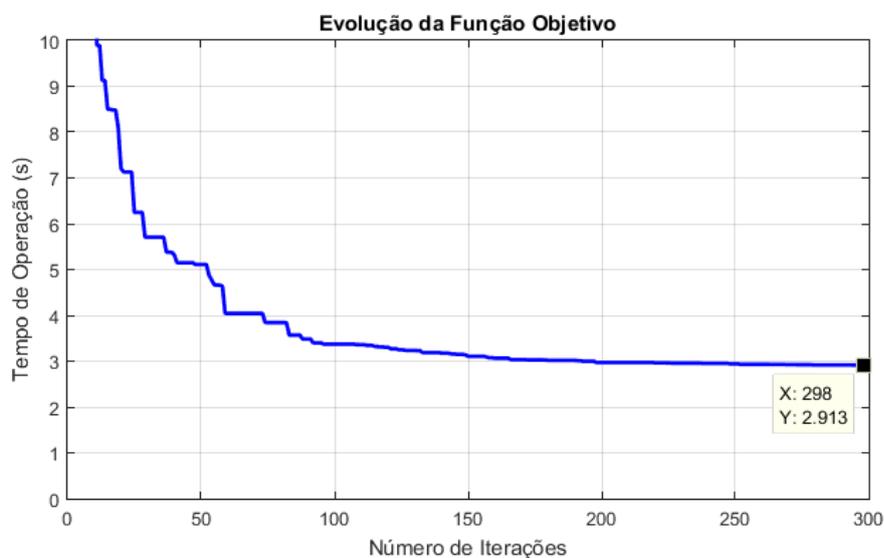
Local da Falta	Relé _{pri.}	Relé _{ret.}	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	ΔT (s)
Ponto F _A	R ₁	-	0,3277	-	-
Ponto F _B	R ₂	R ₁	0,6786	0,9935	0,3149
Ponto F _C	R ₃	R ₂	0,3719	0,6786	0,3067
Ponto F _D	R ₄	R ₂	0,3624	0,6786	0,3162
Ponto F _E	R ₅	R ₃	0,1013	0,4063	0,3050
Ponto F _F	R ₆	R ₄	0,1021	0,4033	0,3013
Ponto F _G	R ₇	R ₂	0,3696	0,6786	0,3090
Ponto F _H	R ₈	R ₂	0,3549	0,6786	0,3237
Ponto F _I	R ₉	R ₇	0,1001	0,4038	0,3036
Ponto F _J	R ₁₀	R ₈	0,1021	0,4025	0,3005

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os tempos de operação dos relés satisfazem as restrições de tempo mínimo impostas por Equação (5.73) até Equação (5.82), todos os pares de proteção primária e retaguarda encontram-se coordenados adequadamente, visto que o intervalo de tempo para a atuação dos relés de retaguarda em relação a uma possível falha dos relés primários ($T_{ret.} - T_{pri.}$) são superiores a 0,3 s.

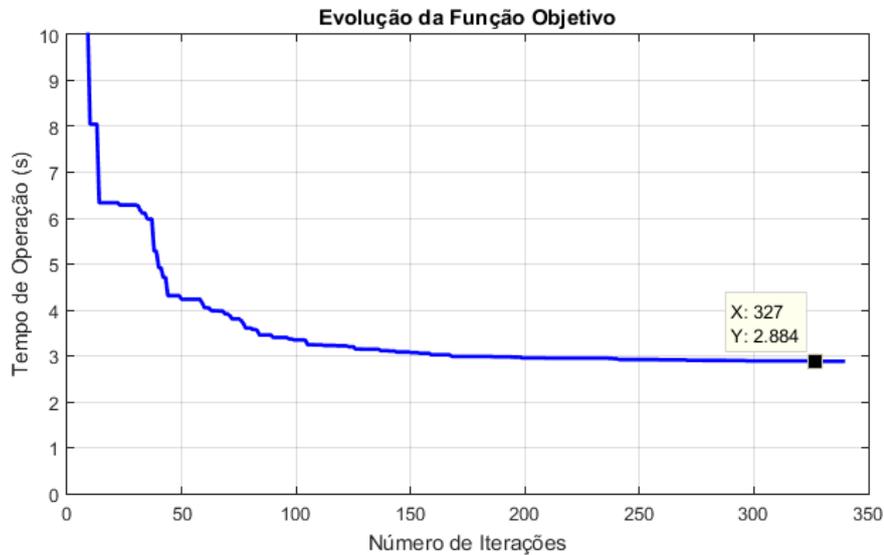
A característica de convergência da FO é exibida nas Figuras 38, 39 e 40, respectivamente para o FFA, PSO e CSA.

Figura 38 – Sistema teste 3: Característica de convergência da FO via FFA.



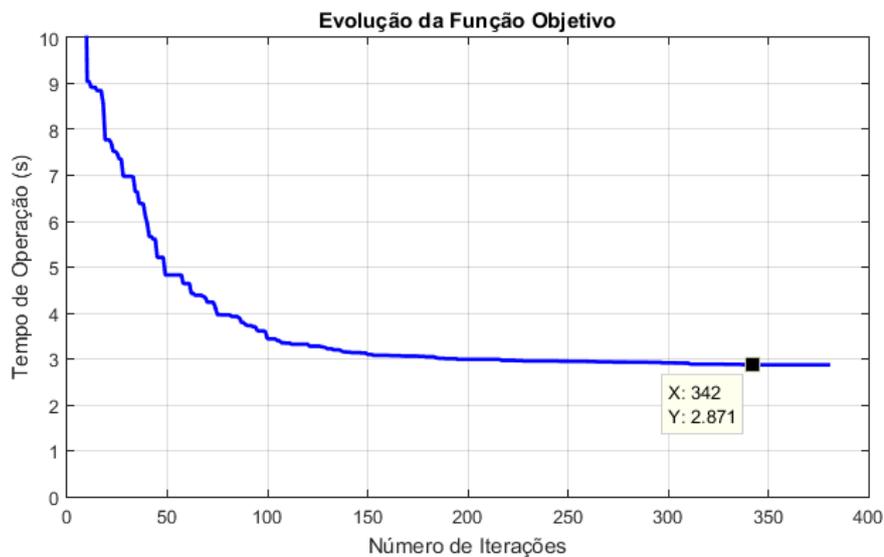
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 39 – Sistema teste 3: Característica de convergência da FO via PSO.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 40 – Sistema teste 3: Característica de convergência da FO via CSA.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Fica evidente que o FFA converge em um número menor de iterações do que os demais métodos testados neste Trabalho. Entretanto, a função objetivo encontrada (2,9132 segundos) é a solução de pior qualidade.

O PSO e o CSA encontraram valores muito próximos, sendo estes iguais a 2,8836 segundos para o PSO e 2,8707 segundos para o CSA. Porém, o CSA necessita de um maior número de iterações para a convergência embora apresente o menor tempo para a operação dos relés.

O comparativo com os resultados encontrados em Ghogare e Bapat (2015b) através do GA é exibido na Tabela 35.

Observa-se que as três metodologias propostas obtiveram melhores soluções para o problema do que o obtido no estudo original, em comparação com a pior das respostas deste Trabalho, via FFA, o tempo total de operação dos relés é 10% mais veloz.

Tabela 35 – Sistema teste 3: Comparativo dos resultados das simulações.

Metodologia	Autor	FO(s)
GA	Ghogare e Bapat (2015b)	3,2272
FFA	Implementado pelo autor	2,9132
PSO	Implementado pelo autor	2,8836
CSA	Implementado pelo autor	2,8707

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4 Sistema Teste 4: Sistema em Malha com 9 Barras

O sistema teste 4 aborda um circuito de distribuição em anel, interconectado através de 12 linhas, porém, com uma única fonte de geração na barra 1 (Bus1) que serve de alimentação às outras 8 barras.

O diagrama unifilar é mostrado na Figura 41, desenhado por Al-Roomi (2015) e extraído do repositório do mesmo. Trata-se de um sistema elétrico bastante conhecido na literatura.

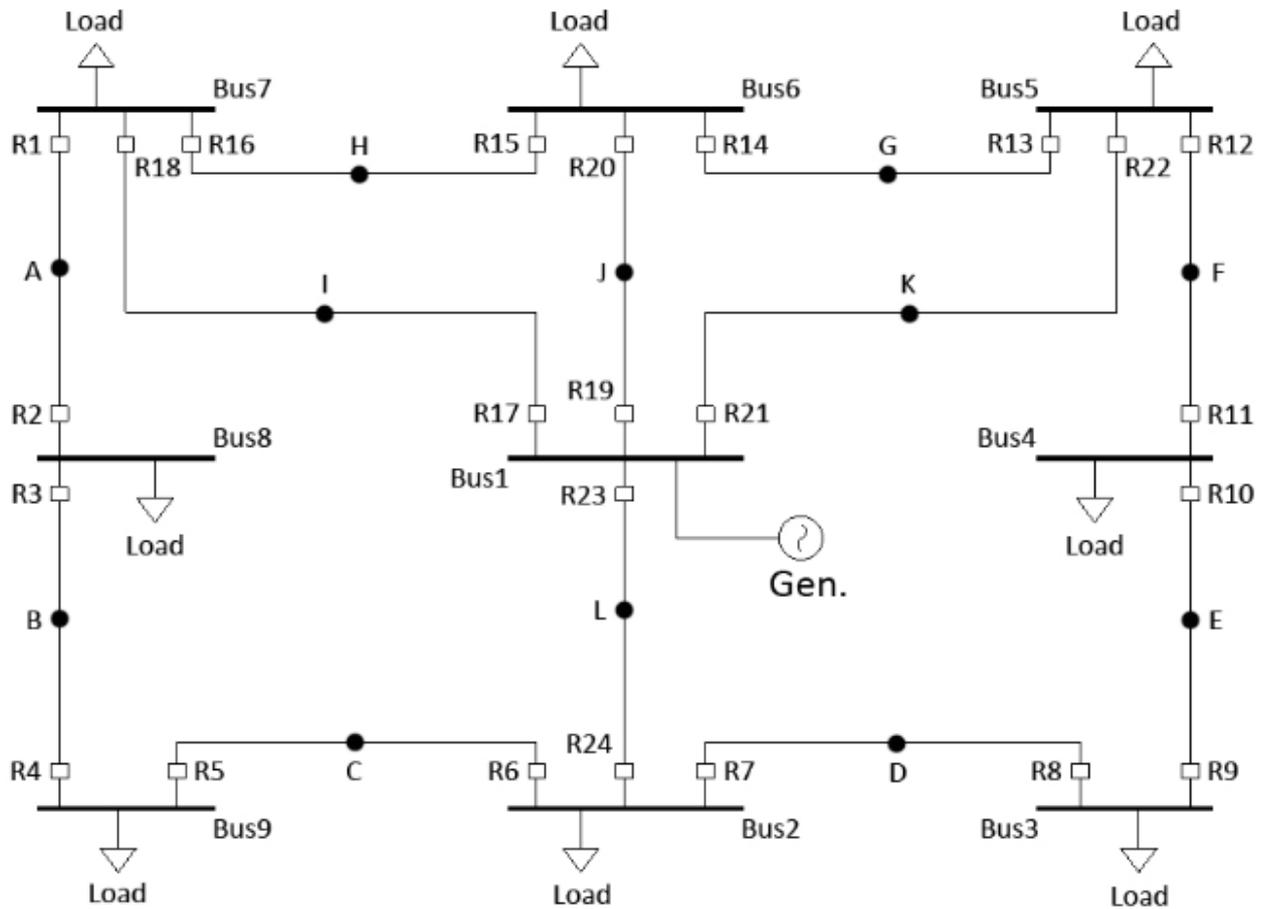
Como mencionado o sistema é do tipo malhado, o alimentador é um fonte de 100 MVA, 33 kV, com impedância de $0+j0,1$ p.u., enquanto que as impedâncias são as mesmas para todas as linhas e têm valor igual a $0+j0,02$ p.u..

A proteção do sistema é composta por 24 relés digitais direcionais de sobrecorrente, alocados nas extremidades das linhas.

Os relés seguem a norma IEC com curva inversa. As relações de transformação dos TCs são todas de 500:1. As correntes de carga consideradas são mostradas na Tabela 36.

Foram considerados para estudo doze pontos de falta no sistema, sendo estas curtos-circuitos trifásicos, um em cada linha, marcados como pontos A até L. Os valores da corrente de falta foram obtidos através da análise de curto-circuito para cada ponto defeituoso. Estas e as demais considerações foram retiradas de Bedekar e Bhide (2011).

Figura 41 – Diagrama unifilar simplificado do sistema teste 4



Fonte: Adaptado de Al-Roomi (2015) - Elaborado pelo autor.

Tabela 36 – Correntes de carga do sistema teste de 9 barras.

Barra de referência	$I_{carga}(A)$
Bus 1	-
Bus 2, Bus 5, Bus 6 e Bus 7	350
Bus 3, Bus 4, Bus 8 e Bus 9	100

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os pares dos relés de proteção primária e retaguarda, bem como os valores da corrente de curto-circuito e da corrente de carga máxima para cada zona de proteção são exibidos na Tabela 37, aonde pode ser visto que, os relés R_{17} , R_{19} , R_{21} e R_{23} não possuem proteção de retaguarda.

Tabela 37 – Sistema teste 4: Pares de relés de proteção primária e de retaguarda e níveis da corrente de curto-circuito para cada linha defeituosa.

Linha	Local da Falta	Relé_{pri.}	Relé_{ret.}	$I_{pri.}$ (A)	$I_{ret.}$ (A)	I_{carga} (A)
B7-B8	Ponto A	R1	R15	4863,6	1168,3	121,74
B7-B8	Ponto A	R1	R17	4863,6	1293,9	121,74
B7-B8	Ponto A	R2	R4	1634,4	1044,2	-
B8-B9	Ponto B	R3	R1	2811,4	1361,6	21,74
B8-B9	Ponto B	R4	R6	2610,5	1226	-
B9-B2	Ponto C	R5	R3	1778	1124,4	-
B9-B2	Ponto C	R6	R8	4378,5	711,2	78,26
B9-B2	Ponto C	R6	R23	4378,5	1345,5	78,26
B2-B3	Ponto D	R7	R5	4378,5	711,2	78,26
B2-B3	Ponto D	R7	R23	4378,5	1345,5	78,26
B2-B3	Ponto D	R8	R10	1778	1124,4	-
B3-B4	Ponto E	R9	R7	2610,5	1226	-
B3-B4	Ponto E	R10	R12	2811,4	787,2	21,74
B4-B5	Ponto F	R11	R9	1634,4	1044,2	-
B4-B5	Ponto F	R12	R14	2811,4	1168,3	121,74
B4-B5	Ponto F	R12	R21	2811,4	1293,9	121,74
B5-B6	Ponto G	R13	R11	3684,5	653,6	-
B5-B6	Ponto G	R13	R21	3684,5	1293,9	-
B5-B6	Ponto G	R14	R16	4172,5	1031,7	30,44
B5-B6	Ponto G	R14	R19	4172,5	1264,1	30,44
B6-B7	Ponto H	R15	R13	4172,5	1031,7	30,44
B6-B7	Ponto H	R15	R19	4172,5	1264,1	30,44
B6-B7	Ponto H	R16	R2	3684,5	653,6	-
B6-B7	Ponto H	R16	R17	3684,5	1293,9	-
B7-B1	Ponto I	R18	R2	2271,7	653,6	-
B7-B1	Ponto I	R18	R15	2271,7	1168,3	-
B6-B1	Ponto J	R20	R13	2624,2	1031,7	-
B6-B1	Ponto J	R20	R16	2624,2	1031,7	-
B5-B1	Ponto K	R22	R11	2271,7	653,6	-
B5-B1	Ponto K	R22	R14	2271,7	1168,3	-
B1-B2	Ponto L	R24	R5	1665,5	711,2	-
B1-B2	Ponto L	R24	R8	1665,5	711,2	-
B7-B1	Ponto I	R17	-	7611,2	-	441,3
B6-B1	Ponto J	R19	-	7435,8	-	410,87
B5-B1	Ponto K	R21	-	7611,2	-	441,3
B1-B2	Ponto L	R23	-	7914,7	-	506,52

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os ajustes dos múltiplos de tempo e de corrente podem assumir valores contínuos, onde o TMS pode variar entre 0,025 e 1,2. Os intervalos inferior e superior do MC são limitados pela restrição (5.83) e podem ser ajustados continuamente em passos de 0,01.

$$\frac{1,25 \cdot I_{carga,i}}{RTC} \leq MC_i \leq \frac{2 \cdot I_{cc_{min},i}}{3 \cdot RTC} \quad (5.83)$$

Em (5.84), x_1 a x_{24} representam os ajustes do múltiplo de tempo e x_{25} a x_{48} os ajustes do múltiplo de corrente; $I_{relé}$ é a corrente vista por um relé de proteção primária R_i através do enrolamento secundário do TC, dentro de sua zona de proteção.

A Tabela 38 exibe os limites $MC_{mín}$ e $MC_{máx}$ calculados e disponíveis à parametrização dos relés.

Tabela 38 – Sistema teste 4: Limites calculados para o ajuste do múltiplo de corrente.

Relé	$MC_{mín}$	$MC_{máx}$	Relé	$MC_{mín}$	$MC_{máx}$
R1	0,30	1,82	R13	0,05	1,38
R2	0,05	1,30	R14	0,08	1,56
R3	0,05	1,50	R15	0,08	1,56
R4	0,05	1,39	R16	0,05	1,38
R5	0,05	0,95	R17	1,10	1,73
R6	0,20	1,64	R18	0,05	2,60
R7	0,20	1,64	R19	1,03	1,69
R8	0,05	0,95	R20	0,05	3,01
R9	0,05	1,39	R21	1,10	1,73
R10	0,05	1,50	R22	0,05	2,60
R11	0,05	1,14	R23	1,27	1,79
R12	0,30	1,82	R24	0,05	1,91

Fonte: Elaborado pelo autor.

O intervalo de coordenação entre a atuação principal e de retaguarda é de no mínimo 0,2 s, sendo este mesmo valor utilizado como restrição relacionada aos tempos mínimos de operação dos relés.

O problema de coordenação é formulado então como PNL, possui 48 variáveis de decisão condicionadas a 44 restrições de coordenação e seletividade e 24 restrições de tempo mínimo de operação para os relés de proteção primária.

A função objetivo é dada por (5.84).

$$Min. : z = \sum_{i=1}^{24} \frac{0,14 \cdot x_i}{\left(\frac{I_{relé_i}}{x_{(i+24)}}\right)^{0,02} - 1} \quad (5.84)$$

5.4.1 Resultados: Sistema teste 4

Após processamento dos dados do problema, os resultados ótimos dos ajustes de *TMS* e *MC* para os 24 relés fornecidos pelos algoritmos propostos, são exibidos na Tabela 39. Todos os valores de parametrização encontram-se dentro dos intervalos de ajustáveis permitidos pelos relés.

Tabela 39 – Sistema teste 4: Ajustes obtidos através das simulações para parametrização dos relés.

FFA			PSO			CSA		
Relé	Ajustes		Relé	Ajustes		Relé	Ajustes	
	<i>TMS</i>	<i>MC</i>		<i>TMS</i>	<i>MC</i>		<i>TMS</i>	<i>MC</i>
R1	0,0794	1,25	R1	0,0494	1,81	R1	0,0490	1,81
R2	0,0347	1,03	R2	0,0462	0,69	R2	0,0451	0,7
R3	0,1366	0,85	R3	0,0390	1,48	R3	0,0385	1,49
R4	0,2615	0,05	R4	0,0392	1,38	R4	0,0383	1,39
R5	0,3166	0,05	R5	0,0390	0,94	R5	0,0390	0,94
R6	0,0516	1,58	R6	0,0492	1,62	R6	0,0500	1,63
R7	0,2196	0,20	R7	0,0492	1,63	R7	0,0490	1,63
R8	0,0403	0,91	R8	0,0385	0,95	R8	0,0390	0,94
R9	0,2644	0,06	R9	0,0387	1,39	R9	0,0390	1,39
R10	0,1848	0,11	R10	0,0537	0,90	R10	0,0540	0,9
R11	0,0355	0,97	R11	0,0387	0,87	R11	0,0390	0,87
R12	0,0495	1,26	R12	0,0583	0,80	R12	0,0565	0,81
R13	0,2465	0,05	R13	0,0508	1,38	R13	0,0490	1,37
R14	0,1165	0,59	R14	0,0533	1,38	R14	0,0530	1,39
R15	0,0564	1,46	R15	0,0509	1,55	R15	0,0490	1,55
R16	0,1441	0,29	R16	0,0587	0,99	R16	0,0585	1
R17	0,0696	1,51	R17	0,0716	1,37	R17	0,0710	1,36
R18	0,1594	0,06	R18	0,0320	1,54	R18	0,0311	1,55
R19	0,0900	1,21	R19	0,0763	1,12	R19	0,0760	1,12
R20	0,1144	0,14	R20	0,0576	0,74	R20	0,0563	0,76
R21	0,0986	1,11	R21	0,0685	1,60	R21	0,0659	1,6
R22	0,0864	0,56	R22	0,0916	0,20	R22	0,0906	0,21
R23	0,0802	1,27	R23	0,0725	1,44	R23	0,0704	1,43
R24	0,0980	0,22	R24	0,0261	1,37	R24	0,0254	1,38
FO(s)	6,8770		FO(s)	4,8810		FO(s)	4,8313	
Iteração	1475*		Iteração	909		Iteração	411	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os tempos de atuação dos relés, bem como o intervalo de tempo entre a atuação da proteção primária e de retaguarda, são apresentados na Tabela 40 para o FFA, Tabela 41 para o PSO e Tabela 42 para o CSA. O sistema se encontra coordenado de maneira seletiva, visto que todos os valores para diferença de tempo entre $T_{ret.} - T_{pri.}$ são superiores a restrição imposta de $CTI > 0,2$ s.

Tabela 40 – Sistema teste 4: Tempos de atuação dos relés para ajustes via FFA.

Relé_{pri.}	Relé_{ret.}	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	ΔT (s)
R1	R15	0,2659	0,8406	0,5747
R1	R17	0,2659	0,9038	0,6379
R2	R4	0,2081	0,4845	0,2764
R3	R1	0,4963	0,7119	0,2156
R4	R6	0,3835	0,8234	0,4399
R5	R3	0,5083	0,9724	0,4641
R6	R 8	0,2076	0,6249	0,4173
R6	R23	0,2076	0,7388	0,5312
R7	R5	0,3893	0,6571	0,2678
R7	R23	0,3893	0,7388	0,3495
R8	R10	0,2036	0,4097	0,2061
R9	R7	0,3899	0,5928	0,2029
R10	R12	0,3124	1,5668	1,2544
R11	R9	0,2021	0,4932	0,2911
R12	R14	0,2286	0,5847	0,3561
R12	R21	0,2286	0,8045	0,5759
R13	R11	0,3345	0,8278	0,4933
R13	R21	0,3345	0,8045	0,4700
R14	R16	0,2999	0,5018	0,2019
R14	R19	0,2999	0,8513	0,5514
R15	R13	0,2228	0,4575	0,2347
R15	R19	0,2228	0,8513	0,6285
R16	R2	0,301	1,0272	0,7262
R16	R17	0,301	0,9038	0,6028
R18	R2	0,2456	1,0272	0,7816
R18	R15	0,2456	0,8406	0,5950
R20	R13	0,2146	0,4575	0,2429
R20	R16	0,2146	0,5018	0,2872
R22	R11	0,2834	0,8278	0,5444
R22	R14	0,2834	0,5847	0,3013
R24	R5	0,2458	0,6571	0,4113
R24	R8	0,2458	0,6249	0,3791
R17	-	0,2062	-	-
R19	-	0,2451	-	-
R21	-	0,2563	-	-
R23	-	0,2166	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 41 – Sistema teste 4: Tempos de atuação dos relés para ajustes via PSO.

Relé_{pri.}	Relé_{ret.}	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	ΔT (s)
R1	R15	0,2027	0,8681	0,6654
R1	R17	0,2027	0,7828	0,5801
R2	R4	0,2045	0,6598	0,4553
R3	R1	0,2018	0,8495	0,6477
R4	R6	0,2036	0,8318	0,6282
R5	R3	0,2022	0,6506	0,4484
R6	R 8	0,2010	0,6619	0,4609
R6	R23	0,2010	0,8061	0,6051
R7	R5	0,2014	0,6545	0,4531
R7	R23	0,2014	0,8061	0,6047
R8	R10	0,2012	0,4051	0,2039
R9	R7	0,2017	0,8421	0,6404
R10	R12	0,2010	0,5996	0,3986
R11	R9	0,2013	0,6601	0,4588
R12	R14	0,2054	0,708	0,5026
R12	R21	0,2054	0,9926	0,7872
R13	R11	0,2087	0,6561	0,4474
R13	R21	0,2087	0,9926	0,7839
R14	R16	0,2039	0,5555	0,3516
R14	R19	0,2039	0,6477	0,4438
R15	R13	0,2083	0,8789	0,6706
R15	R19	0,2083	0,6477	0,4394
R16	R2	0,2007	0,5017	0,3010
R16	R17	0,2007	0,7828	0,5821
R18	R2	0,2056	0,5017	0,2961
R18	R15	0,2056	0,8681	0,6625
R20	R13	0,2024	0,8789	0,6765
R20	R16	0,2024	0,5555	0,3531
R22	R11	0,2006	0,6561	0,4555
R22	R14	0,2006	0,708	0,5074
R24	R5	0,2036	0,6545	0,4509
R24	R8	0,2036	0,6619	0,4583
R17	-	0,2031	-	-
R19	-	0,2009	-	-
R21	-	0,2081	-	-
R23	-	0,2065	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 42 – Sistema teste 4: Tempos de atuação dos relés para ajustes via CSA.

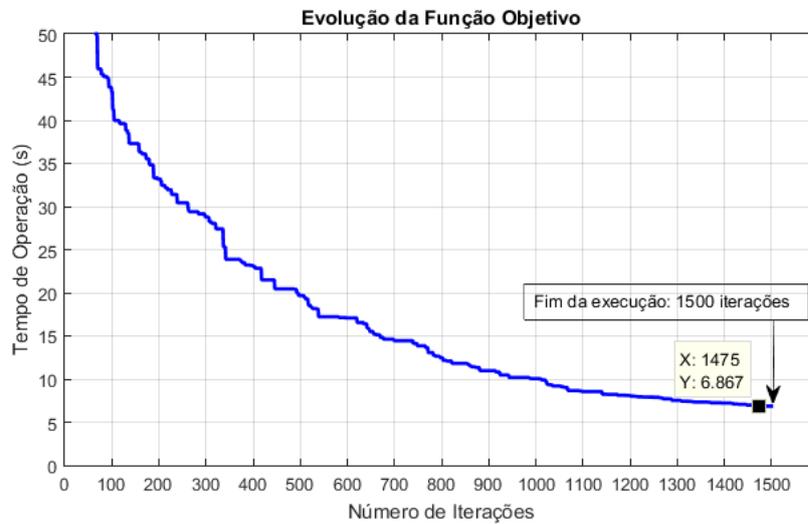
Relé_{pri.}	Relé_{ret.}	$T_{pri.}(s)$	$T_{ret.}(s)$	$\Delta T(s)$
R1	R15	0,2006	0,8323	0,6317
R1	R17	0,2006	0,7676	0,5670
R2	R4	0,2017	0,6665	0,4648
R3	R1	0,2012	0,8363	0,6351
R4	R6	0,2009	0,8537	0,6528
R5	R3	0,2025	0,6618	0,4593
R6	R 8	0,2047	0,6563	0,4516
R6	R23	0,2047	0,7745	0,5698
R7	R5	0,2006	0,6563	0,4557
R7	R23	0,2006	0,7745	0,5739
R8	R10	0,2025	0,4090	0,2065
R9	R7	0,2036	0,8366	0,6330
R10	R12	0,2026	0,5912	0,3886
R11	R9	0,2035	0,6679	0,4644
R12	R14	0,2002	0,7106	0,5104
R12	R21	0,2002	0,9548	0,7546
R13	R11	0,2005	0,6678	0,4673
R13	R21	0,2005	0,9548	0,7543
R14	R16	0,2033	0,5612	0,3579
R14	R19	0,2033	0,6481	0,4448
R15	R13	0,2003	0,8341	0,6338
R15	R19	0,2003	0,6481	0,4478
R16	R2	0,2010	0,5023	0,3013
R16	R17	0,2010	0,7676	0,5666
R18	R2	0,2003	0,5023	0,3020
R18	R15	0,2003	0,8323	0,6320
R20	R13	0,2000	0,8341	0,6341
R20	R16	0,2000	0,5612	0,3612
R22	R11	0,2000	0,6678	0,4678
R22	R14	0,2000	0,7106	0,5106
R24	R5	0,2000	0,6563	0,4563
R24	R8	0,2000	0,6563	0,4563
R17	-	0,2008	-	-
R19	-	0,2004	-	-
R21	-	0,2002	-	-
R23	-	0,2001	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

Todos os algoritmos encontraram boas soluções para o problema, visto que o menor valor possível para a atuação dos 24 relés seria de 4,8 s. De acordo com a restrição de tempo mínimo de operação de cada relé, qualquer resultado para a FO abaixo deste tempo implicaria na perda da seletividade do sistema.

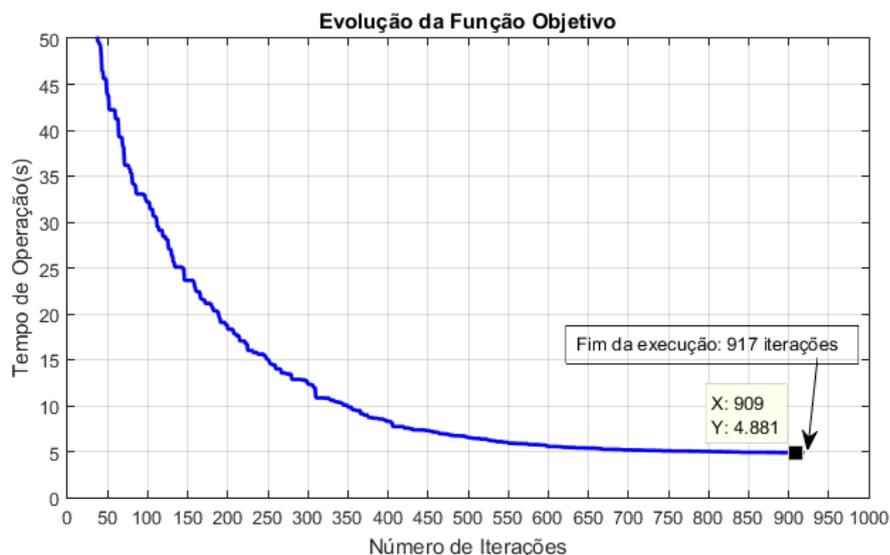
Nas Figuras 42, 43 e 44, são exibidos os gráficos de convergência e, conseqüentemente, melhoramento da resposta da FO ao longo da execução dos algoritmos FFA, PSO e CSA respectivamente.

Figura 42 – Sistema teste 4: Característica de convergência da FO em relação ao número de iterações via FFA.



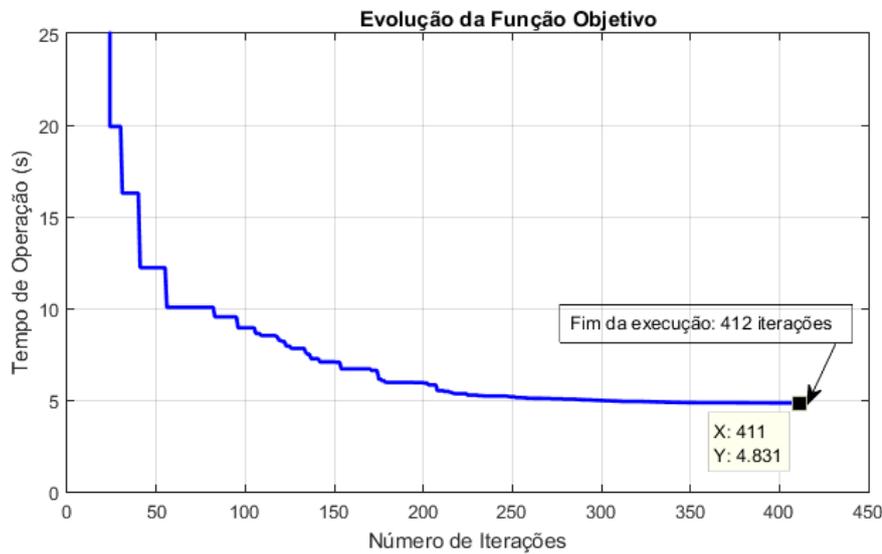
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 43 – Sistema teste 4: Característica de convergência da FO em relação ao número de iterações via PSO.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 44 – Sistema teste 4: Característica de convergência da FO em relação ao número de iterações via CSA.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Apesar de os algoritmos PSO e CSA encontrarem o tempo mínimo dos relés muito próximos, o CSA exige menos da metade do número de iterações, encontrando o melhor valor para a FO na iteração 411 e sendo finalizada a execução já na próxima iteração (412). O PSO, por sua vez, necessitou de 917 iterações até atingir o critério de parada, encontrando a melhor resposta 8 iterações antes de finalizar a execução.

Já o FFA não obteve, para este caso, o mesmo desempenho dos demais algoritmos quanto ao valor de FO em relação ao número de iterações. É importante ressaltar o elevado número de iterações necessárias até atingir sua melhor resposta onde, mesmo assim, acabou por não satisfazer o critério de parada do erro, sendo finalizada a execução ao atingir o número máximo de 1500 iterações.

A Tabela 43 evidencia a qualidade das FOs encontradas através dos três algoritmos propostos (FFA, PSO e CSA), realizando um comparativo com os principais estudos disponíveis na literatura, os quais utilizam aplicações de diferentes metodologias de busca na solução do problema de coordenação do Sistema IEEE de 9 barras.

Entre os algoritmos propostos, o CSA obteve a melhor solução ($FO = 4,8313$), quando comparado aos resultados reportados por outros autores. A resposta encontrada pelo algoritmo é ligeiramente mais lenta do que BBO-PL (ALBASRI; ALROOMI; TALAQ, 2015), Algoritmo Genético de Chu-Beasley - Programação Linear (AGCB-PL) e Algoritmo de Busca Local - Programação Linear (BL-PL) (KIDA, 2016), soluções estas que apresentam o tempo mínimo possível para este caso ($FO = 4,8$ s).

Porém, as soluções obtidas via FFA, PSO e CSA neste Trabalho são de melhor qualidade do que as encontradas através de GA, PSO, DE, SAO e o *Harmony Search* (HS) em Alam, Das e Pant (2015), OBB (ALBASRI; ALROOMI; TALAQ, 2015) e Programa-

ção Quadrática Sequencial (PQS) e AG-PNL (BEDEKAR; Bhide, 2011), este último com excessão do FFA, que obteve uma resposta para a FO de 0,6884 s mais lenta para a operação total dos relés.

É importante ressaltar que as metodologias existentes na literatura com solução de melhor qualidade do que as encontradas neste Trabalho (via FFA, PSO e CSA), são metodologias híbridas, isto é, combinam um ou mais métodos de otimização, onde muitas vezes o problema é solucionado parcialmente por um método e, posteriormente, os resultados são aplicados à novas rotinas dedicadas a melhoria da FO, como, por exemplo, a execução em resolvedores de PL.

Tabela 43 – Sistema teste 4: Comparativo com resultados da literatura.

Metodologia	Autor	FO(s)
GA	(ALAM; DAS; PANT, 2015)	14,5426
PSO	(ALAM; DAS; PANT, 2015)	13,6084
DE	(ALAM; DAS; PANT, 2015)	8,6822
HS	(ALAM; DAS; PANT, 2015)	9,2098
SAO	(ALAM; DAS; PANT, 2015)	14,2338
BBO	(ALBASRI; ALROOMI; TALAQ, 2015)	28,8348
BBO-PL	(ALBASRI; ALROOMI; TALAQ, 2015)	4,8000
PQS	(BEDEKAR; Bhide, 2011)	19,4041
AG-PNL	(BEDEKAR; Bhide, 2011)	6,1786
AGCB-PL	(KIDA, 2016)	4,8000
BL-PL	(KIDA, 2016)	4,8000
FFA	Implementado pelo autor	6,8670
PSO	Implementado pelo autor	4,8810
CSA	Implementado pelo autor	4,8313

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.5 Considerações do Capítulo

Neste Capítulo, ficou evidente que, um grande desafio na manipulação matemática do problema de coordenação de relés de sobrecorrente se deve aos sucessivos testes necessários para manter a seletividade entre os pares de relés que formam o sistema de proteção primário e retaguarda, ocasionando diferentes combinações e, portanto, quanto maior o número de relés mais trabalhosa será a tarefa de coordenar de maneira seletiva o sistema de proteção.

Sendo assim, apesar de obterem a solução ótima global, resolvidores de PL como o Método Simplex estão restritos à aplicações em problemas linearizados. Porém, ao linearizar um problema e, desta forma, otimizar apenas um dos ajustes disponíveis ao relé, a velocidade de operação do mesmo acaba comprometida e, para melhorar seu desempenho, faz-se necessária a parametrização tanto do *TMS* quanto do *MC*. À medida que são adicionadas mais variáveis na declaração do problema, o espaço de busca aumenta de maneira considerável, podendo ocasionar em uma demora maior no algoritmo convergir devido aos maiores esforços computacionais para obtenção da minimização da FO. Todavia, a velocidade da atuação dos relés que compõem o sistema de proteção é reduzido.

As metodologias FFA, PSO e, principalmente, o CSA se mostraram técnicas eficazes e capazes realizar a coordenação de maneira seletiva frente aos sistemas a qual foram testadas e são compatíveis com os estudos reportados na literatura.

Também, foi visto que o número de parâmetros de um algoritmo não afeta seu desempenho, visto que o FFA possui maior número de variáveis a serem ajustadas, e, mesmo assim, não foi capaz de superar o desempenho do CSA, sendo este calibrado através de apenas 2 parâmetros, indicando sua robustez e facilidade de adaptação, onde, combinado aos voos de Lévy, o algoritmo conseguiu boas soluções.

Por fim, destaca-se que o Capítulo seguinte apresenta as conclusões do Trabalho.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Conclusão

A partir da revisão da literatura, constatou-se a fundamental importância da utilização de técnicas de otimização para a coordenação dos relés de sobrecorrente empregados na proteção do sistema elétrico de potência. Da mesma forma, evidenciou-se a grande preocupação em encontrar uma coordenação eficiente entre estes dispositivos.

Conforme mencionado pelos trabalhos científicos estudados, o problema de coordenação é comumente realizado em duas rotinas, reduzindo-o a um problema linearizado sujeito às suas restrições e, a partir de então, é solucionado com o emprego de técnicas convencionais ou resolvidores de PL. Porém, observa-se que ao incluir no mesmo processo de otimização todas as suas variáveis de busca, apesar da complexidade matemática, soluções de melhor qualidade são obtidas. Logo, o problema de coordenação também pode ser declarado e solucionado como programação não linear, encontrando os valores dos ajustes dos múltiplos de tempo e corrente.

Um grande desafio na manipulação matemática do problema de coordenação de relés de sobrecorrente se deve aos sucessivos testes necessários para manter a seletividade entre os pares de relés. Estes formam o sistema de proteção primário e de retaguarda, ocasionando diferentes combinações e, portanto, quanto maior o número de relés mais complexa será a tarefa de coordenar de maneira seletiva o sistema de proteção.

Como muitas vezes os sistemas são em anel ou possuem múltiplas alimentações, a seleção adequada da sequência de operação dos pares de relés e sua coordenação (de acordo com as técnicas de otimização convencionais ou através de cálculos manuais) se torna uma tarefa muito difícil e trabalhosa, podendo ser impossível avaliar todas as possíveis soluções para o grande número de dispositivos que compõem o sistema de proteção. Assim, as técnicas de otimização inteligentes, como as metaheurísticas, mostram-se ferramentas promissoras, uma vez que, ao contrário das técnicas convencionais e outros algoritmos de busca, podem alcançar os ajustes ótimos ou muito próximos ao ótimo, comparando diversas combinações e realizando inúmeras verificações durante sua rotina de execução.

Soma-se a isso a combinação destes algoritmos à rotinas de penalizações, tornando-as metodologias ainda mais robustas e confiáveis na busca por soluções factíveis, garantindo a varredura dentro dos limites dos intervalos de busca e descartando possíveis soluções que contenham violações das restrições do problema, as quais possam ocasionar perda da seletividade.

Nesse contexto, foi abordada a utilização de metaheurísticas inspiradas no comportamento de elementos da natureza para a coordenação de relés, sendo o problema de coordenação elaborado e solucionado como um problema de otimização matemática. Tais métodos foram estudados e implementados computacionalmente, visando obter a solução ótima para o problema da coordenação de relés de sobrecorrente de tempo inverso,

direcionais e não direcionais da Norma IEC de curva normal inversa. O problema de coordenação dos relés de sobrecorrente é fundamentado basicamente em se ajustar os parâmetros de Tempo e Corrente pertencentes aos relés, visando minimizar seus tempos de atuação, tornando o sistema de proteção mais veloz, sem comprometer as condições de seletividade, confiabilidade e sensibilidade. Com essa premissa em mente, foram considerados 4 sistemas elétricos, sendo 2 sistemas radiais e 2 em anel, na análise do desempenho das metaheurísticas.

Para o primeiro caso, foi utilizado um sistema teste radial composto de uma única fonte de alimentação e quatro relés sem a unidade direcional. Assim, o problema foi declarado como PL, de simples implementação e baixo esforço matemático para resolução, visto que o objetivo inicial era apenas validar o emprego dos algoritmos escolhidos e, posteriormente, calibrá-los. Porém, caso uma das técnicas não fosse eficaz para a solução do Sistema Teste 1 em PL, este algoritmo já seria descartado e, em hipótese alguma seria utilizado para resolução como PNL.

Visando a melhora do desempenho dos algoritmos e a obtenção de FOs de melhor qualidade, a coordenação do sistema teste foi simulada várias vezes, onde, de tempos em tempos, os parâmetros de ajuste (próprios a cada algoritmo) eram alterados. A escolha inicial destes ajustes foi baseada na literatura e a variação, apesar de empírica por tentativa e erro, obteve uma boa média de resposta e mostrou-se satisfatória. No problema declarado como PL, o CSA obteve a resposta mínima possível, sendo esta equivalente àquela obtida através do método exato Simplex via *PHPSimplex*. Para PNL, ambos os algoritmos propostos obtiveram boas soluções, sendo estas de melhor qualidade em comparação com os resultados da literatura.

Já no segundo Sistema Teste 2, visando testar a adaptabilidade dos algoritmos, os testes foram realizados frente a um sistema em anel, realimentado através de 3 fontes de geração. Quando o problema foi declarado como PL, os algoritmos FFA, PSO e CSA encontraram o valor de 1,925 s para a FO, assim como Mansour, Mekhamer e El-Kharbawe (2007) e Amraee (2012), sendo 1,925 s valor o mínimo possível, conforme a resposta obtida via Simplex (DAI et al., 2010). Quando declarado e solucionado como PNL, novamente, as metodologias testadas mostraram eficácia quando comparadas com o desempenho dos demais métodos reportados na literatura, tais como SBB e SAO em Amraee (2012), BBO e o híbrido BBO-PL em Albasri, Alroomi e Talaq (2015). É importante ressaltar que, neste caso, o múltiplo de tempo somente poderia assumir valores discretos.

Visto que nos dois primeiros casos estudados, apesar de representarem composições distintas da rede elétrica (radial e em anel), a superioridade na qualidade das respostas foi obtida através do problema declarado em formato não linearizado. Assim, para o sistema teste 3, apenas a abordagem segundo PNL foi explorada. Este sistema retratou o trecho de uma LT realista e, apesar da quantidade de variáveis e restrições deste caso, as técnicas de otimização implementadas se mostraram superiores ao GA (Ghogare;

Bapat, 2015b) utilizado pelos autores no trabalho de referência.

Ainda, um quarto sistema teste foi utilizado no estudo, tratando-se de um sistema malhado de 9 Barras. Para este, novamente o problema foi solucionado somente em PNL. Dentre as metodologias implementadas, mais uma vez, o CSA apresentou o melhor desempenho, sendo superior na minimização do tempo da FO, também, quando comparado à outras técnicas implementadas para este fim e divulgadas na literatura especializada como GA, PSO, DE, HS, SAO em Alam, Das e Pant (2015), BBO Albasri, Alroomi e Talaq (2015), PQS e AG-PNL em Bedekar e Bhide (2011). Porém, apesar de muito próximo, não conseguiu encontrar o valor mínimo, tendo a FO via CSA apresentado um tempo ligeiramente superior aos métodos híbridos: BBO-PL (ALBASRI; ALROOMI; TALAQ, 2015) e AGCB-PL e BL-PL (KIDA, 2016), e, portanto, uma resposta inferior.

Sendo ainda válido mencionar que, apesar de boas soluções, o valor da FO em alguns casos pode ainda ser reduzido através da melhor calibração dos algoritmos ou utilização de rotinas complementares que obtenham os ajustes ótimos para cada sistema em análise.

Por fim, destaca-se que esta pesquisa evidenciou a boa performance do CSA e sua capacidade em obter a rápida atuação dos relés de sobrecorrente de forma coordenada e seletiva em um sistema de proteção. A melhora do desempenho do referido algoritmo ocorre de acordo com a escolha adequada dos parâmetros iniciais do mesmo. Sendo assim, a obtenção do ponto ótimo global fica condicionado ao refinamento do ajuste do número de ninhos e da taxa de descoberta que, quando calibrado de maneira adequada, conforme a aplicação do CSA, torna este método em uma poderosa ferramenta de otimização, possuindo um elevado grau de precisão e robustez, podendo alcançar, inclusive, respostas de melhor qualidade do que metodologias híbridas.

6.2 **Trabalhos Futuros**

A presente pesquisa poderá ser estendida e, conseqüentemente, melhorada. Assim, abaixo, seguem algumas sugestões para a sequência desta dissertação:

- Coordenar relés de distância juntamente com a proteção de sobrecorrente;
- Inserir no processo iterativo do algoritmo a escolha do tipo de curva do relé de sobrecorrente e realizar a otimização considerando as diferentes famílias de curvas;
- Utilizar faixas de ajuste de parametrização para modelos de relés reais e comercialmente disponíveis ;
- Propor a utilização de outras metodologias e rotinas para efetuar a discretização dos valores das variáveis de ajuste dos relés (quando necessário) evitando arredondamentos que possam prejudicar a seletividade; e

- Considerar a unidade instantânea e de tempo definido na formulação do problema de coordenação.

6.3 Trabalhos Desenvolvidos

- **Avaliação do desempenho da utilização dos algoritmos CSA e FFA aplicados à coordenação ótima de relés de sobrecorrente.** XXII Congresso Brasileiro de Automática (CBA), João Pessoa-PB, Brasil. 2018.

Situação: Apresentado e Publicado.

- **Avaliação do desempenho do Algoritmo de Pesquisa Cuco na otimização do tempo de operação de relés de sobrecorrente.** XIII Congresso Latino-Americano de Geração e Transmissão de Eletricidade (CLAGTEE), Santiago do Chile. 2019.

Situação: Apresentado e Publicado.

- **Otimização do tempo de operação dos relés de sobrecorrente através do Algoritmo dos Lobos Cinzentos.** VIII Simpósio Brasileiro de Sistema Elétricos (SBSE), Sandro André-SP, Brasil. Agosto de 2020 - Apresentação Virtual.

Situação: Apresentado e Publicado.

- **Bat and Grey Wolf techniques applied to the optimization of the inverse time overcurrent relays coordination problem.** IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition – Latin America (T&D LA 2020), Montevideo, Uruguai. Setembro de 2020.

Situação: Aceito.

REFERÊNCIAS

- AL-ROOMI, A. R. **Optimal Relay Coordination Test Systems Repository**. Halifax, Nova Scotia, Canada: [s.n.], 2015. Disponível em: <<https://www.al-roomi.org/coordination>>. Citado 2 vezes nas páginas 121 e 122.
- ALAM, M. N.; DAS, B.; PANT, V. A comparative study of metaheuristic optimization approaches for directional overcurrent relays coordination. **Electric Power Systems Research**, Elsevier, v. 128, p. 39–52, 2015. Citado 5 vezes nas páginas 38, 87, 130, 131 e 135.
- ALBASRI, F. A.; ALROOMI, A. R.; TALAQ, J. H. Optimal coordination of directional overcurrent relays using biogeography-based optimization algorithms. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 30, n. 4, p. 1810–1820, 2015. Citado 7 vezes nas páginas 38, 112, 113, 130, 131, 134 e 135.
- ALBRECHT, R. et al. Digital computer protective device co-ordination program i-general program description. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, IEEE, v. 83, n. 4, p. 402–410, 1964. Citado na página 32.
- ALMEIDA, A. L. V. **Ajuste e coordenação de relés de sobrecorrente**. 98 p. Monografia (Graduação) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, Escola Politécnica, Rio de Janeiro-RJ, 2008. Citado 4 vezes nas páginas 43, 45, 47 e 61.
- ALMEIDA, M. A. **Apostila de proteção de sistemas elétricos**. Natal-RN, 2000. 133 p. Citado na página 41.
- ALZUHAIRI, M. T. L. **Power System Protection**. Jordan, 2010. 122 p. Citado 3 vezes nas páginas 51, 52 e 53.
- AMRAEE, T. Coordination of directional overcurrent relays using seeker algorithm. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 27, n. 3, p. 1415–1422, 2012. Citado 5 vezes nas páginas 37, 101, 112, 113 e 134.
- BANSAL, J. C.; DEEP, K. Optimization of directional overcurrent relay times by particle swarm optimization. In: IEEE. **2008 IEEE Swarm Intelligence Symposium**. [S.l.], 2008. p. 1–7. Citado na página 36.
- BARTHELEMY, P.; BERTOLOTTI, J.; WIERSMA, D. S. A lévy flight for light. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 453, n. 7194, p. 495–498, 2008. Citado na página 76.
- BARTUMEUS, F. et al. Helical lévy walks: adjusting searching statistics to resource availability in microzooplankton. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, National Acad Sciences, v. 100, n. 22, p. 12771–12775, 2003. Citado na página 76.
- BEDEKAR, P. P.; BHIDE, S. R. Optimum coordination of directional overcurrent relays using the hybrid ga-nlp approach. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 26, n. 1, p. 109–119, 2011. Citado 5 vezes nas páginas 36, 87, 121, 131 e 135.
- BERNARDES, W. M. S. **Algoritmo exame de partículas discreto para coordenação de relés direcionais de sobrecorrente em sistemas elétricos de potência**. 158 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos-SP, 2013. Citado na página 69.

- BIRLA, D.; MAHESHWARI, R. P.; GUPTA, H. A new nonlinear directional overcurrent relay coordination technique, and banes and boons of near-end faults based approach. **IEEE transactions on power delivery**, IEEE, v. 21, n. 3, p. 1176–1182, 2006. Citado na página 35.
- BLACKBURN, J. L.; DOMIN, T. J. **Protective relaying: principles and applications**. [S.l.]: CRC press, 2015. Citado na página 60.
- BLACKBURN, L. A.; DOMIN, T. J. **Relaying Protective: Principles and Applications**. 2. ed. [S.l.]: CRC Press, 1997. v. 5. Citado na página 83.
- BROWN, C. T.; LIEBOVITCH, L. S.; GLENDON, R. Lévy flights in dobe ju/'hoansi foraging patterns. **Human Ecology**, Springer, v. 35, n. 1, p. 129–138, 2007. Citado na página 77.
- CAMINHA, A. C. **Introdução à proteção de sistemas elétricos**. São Paulo - SP: Edgard Blucher, 1977. 211 p. Citado na página 54.
- CHABANLOO, R. M. et al. Optimal combined overcurrent and distance relays coordination incorporating intelligent overcurrent relays characteristic selection. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 26, n. 3, p. 1381–1391, 2011. Citado na página 36.
- CHAITANYA, A.; ROHIT, J.; SWATHIKA, O. G. Optimum coordination of overcurrent relays in distribution systems using differential evolution and dual simplex methods. In: IEEE. **2017 International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)**. [S.l.], 2017. p. 212–215. Citado 2 vezes nas páginas 90 e 100.
- CHAN, S. M.; BRANDWAJN, V. Partial matrix refactorization. **IEEE Transactions on Power Systems**, IEEE, v. 1, n. 1, p. 193–199, 1986. Citado na página 101.
- CHATTOPADHYAY, B.; SACHDEV, M.; SIDHU, T. An on-line relay coordination algorithm for adaptive protection using linear programming technique. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 11, n. 1, p. 165–173, 1996. Citado na página 33.
- CHELLIAH, T. R. et al. Coordination of directional overcurrent relays using opposition based chaotic differential evolution algorithm. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Elsevier, v. 55, p. 341–350, 2014. Citado na página 38.
- CORRÊA, R. **Otimização da programação de relés de sobrecorrente direcionais em sistemas elétricos de potência utilizando a programação inteira binária**. 91 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Santa Maria-RS, 2012. Citado 6 vezes nas páginas 32, 33, 44, 45, 52 e 53.
- COVRE, H. **Integração de dados dos sistemas de proteção de subestações distribuídas**. 111 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo-SP, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 44, 45 e 46.
- DAI, C. et al. Seeker optimization algorithm: a novel stochastic search algorithm for global numerical optimization. **Journal of Systems Engineering and Electronics**, BIAI, v. 21, n. 2, p. 300–311, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 112, 113 e 134.

DAMBORG, M. et al. Computer aided transmission protection system design part i: Algorithms. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, IEEE, n. 1, p. 51–59, 1984. Citado na página 32.

DARJI, G. et al. A tuned cuckoo search algorithm for optimal coordination of directional overcurrent relays. In: IEEE. **2015 International Conference on Power and Advanced Control Engineering (ICPACE)**. [S.l.], 2015. p. 162–167. Citado na página 39.

DEEP, K.; BANSAL, J. C. Optimization of directional overcurrent relay times using laplace crossover particle swarm optimization (lpxso). In: IEEE. **2009 World congress on nature & biologically inspired computing (NaBIC)**. [S.l.], 2009. p. 288–293. Citado na página 37.

DEHGHANPOUR, E. et al. Optimal coordination of directional overcurrent relays in microgrids by using cuckoo-linear optimization algorithm and fault current limiter. **IEEE Transactions on Smart Grid**, IEEE, v. 9, n. 2, p. 1365–1375, 2018. Citado na página 40.

Dos SANTOS, J. O. **Otimização por enxame de Partículas em Problemas de Despacho Econômico de Carga**. 98 p. Monografia (Graduação) — Universidade Federal do Pampa, Centro de Tecnologia de Alegrete, Alegrete-RS, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 68 e 70.

ELMORE, W. A. **Protective relaying: theory and applications**. [S.l.]: CRC press, 2003. v. 1. Citado na página 83.

ELRAFIE, H.; IRVING, M. Linear programming for directional overcurrent relay coordination in interconnected power systems with constraint relaxation. **Electric power systems research**, Elsevier, v. 27, n. 3, p. 209–216, 1993. Citado na página 33.

FORTES, A. **Projeto automático de circuitos integrados analógicos utilizando metaheurísticas bio-inspuradas**. 99 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Pampa, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Alegrete-RS, 2018. Citado 5 vezes nas páginas 65, 72, 73, 75 e 77.

FRANÇA, F. O. **Algoritmos bio-inspirados aplicados à otimização dinâmica**. 115 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de engenharia elétrica e de computação, Departamento de engenharia de computação e automação industrial, Campinas-SP, 2005. Citado na página 65.

GANDOMI, A. H.; YANG, X.-S.; ALAVI, A. H. Cuckoo search algorithm: a metaheuristic approach to solve structural optimization problems. **Engineering with computers**, Springer, v. 29, n. 1, p. 17–35, 2013. Citado 4 vezes nas páginas 66, 67, 75 e 76.

Ghogare, J. M.; Bapat, V. N. Field based case studies on optimal coordination of overcurrent relays using genetic algorithm. In: **2015 IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–7. Citado 2 vezes nas páginas 113 e 114.

Ghogare, J. M.; Bapat, V. N. Field based case studies on overcurrent relay coordination optimization using ga-nlp approach. In: **2015 IEEE International Conference on**

- Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT)**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 121 e 135.
- GLOVER, F. W.; KOCHENBERGER, G. A. **Handbook of metaheuristics**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2006. v. 57. Citado na página 35.
- GOKHALE, S.; KALE, V. Application of the firefly algorithm to optimal over-current relay coordination. In: IEEE. **2014 international conference on optimization of electrical and electronic equipment (OPTIM)**. [S.l.], 2014. p. 150–154. Citado na página 38.
- GOKHALE, S.; KALE, V. Time overcurrent relay coordination using the levy flight cuckoo search algorithm. In: IEEE. **TENCON 2015-2015 IEEE Region 10 Conference**. [S.l.], 2015. p. 1–6. Citado na página 39.
- HEWITSON, L.; BROWN, M.; BALAKRISHNAN, R. **Practical power system protection**. Newnes: Elsevier, 2004. Citado 3 vezes nas páginas 27, 59 e 60.
- HOROWITZ, S. H.; PHADKE, A. G. **Power system relaying**. 3. ed. West Sussex - England: John Wiley & Sons, 2008. 348 p. Citado na página 62.
- HUSSAIN, M. et al. Modified swarm firefly algorithm method for directional overcurrent relay coordination problem. **Journal of Theoretical & Applied Information Technology**, v. 66, n. 3, 2014. Citado na página 39.
- KAMIKAZE, A. **Algoritmos heurísticos combinados á programação Linear para a solução da coordenação de relés de sobrecorrente**. 130 p. Monografia (Graduação) — Universidade Estadual de Londrina, Londrina,PR, 2017. Citado na página 84.
- KAVEH, A.; TALATAHARI, S. A novel heuristic optimization method: charged system search. **Acta Mechanica**, Springer, v. 213, n. 3-4, p. 267–289, 2010. Citado na página 65.
- KAVEHNIA, F. et al. Optimal coordination of directional over current relays in power system using genetic algorithm. In: IEEE. **Proceedings of the 41st International Universities Power Engineering Conference**. [S.l.], 2006. v. 3, p. 824–827. Citado na página 35.
- Kennedy, J.; Eberhart, R. Particle swarm optimization. In: **Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks**. [S.l.: s.n.], 1995. v. 4, p. 1942–1948 vol.4. Citado na página 68.
- KIDA, A. A. **Metodologias para a coordenação de relés de sobrecorrente utilizando técnicas de otimização matemática**. 192 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Londrina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Londrina-PR, 2016. Citado 7 vezes nas páginas 32, 53, 61, 86, 130, 131 e 135.
- KINDERMANN, G. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. 1. ed. Florianópolis-SC: Editora do Autor, 1999. vol.1. Citado na página 49.
- KINDERMANN, G. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. 3. ed. Florianópolis-SC: Editora do Autor, 2012. vol.1. 288 p. Citado 3 vezes nas páginas 42, 43 e 49.

KINDERMANN, G. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. 4. ed. Florianópolis-SC: Editora do Autor, 2018. vol.1. 298 p. Citado 4 vezes nas páginas 41, 43, 45 e 51.

KRSTIVOJEVIĆ, J.; ŠOŠIĆ, D.; SAVIĆ, A. Coordination of directional overcurrent relays by using a heuristic optimization method. *IET*, 2016. Citado na página 37.

LANGHANS, J. D.; RONAT, A. E. Protective devices coordination via computer graphics. **IEEE Transactions on Industry Applications**, IEEE, n. 3, p. 404–412, 1980. Citado na página 32.

LEE, K. Y.; EL-SHARKAWI, M. A. **Modern heuristic optimization techniques: theory and applications to power systems**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2008. v. 39. Citado na página 70.

LIU, A.; YANG, M.-T. A new hybrid nelder-mead particle swarm optimization for coordination optimization of directional overcurrent relays. **Mathematical Problems in Engineering**, Hindawi, v. 2012, 2012. Citado na página 37.

LUZ, M. D. et al. Improvements in the statistical approach to random lévy flight searches. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, Elsevier, v. 295, n. 1-2, p. 89–92, 2001. Citado na página 77.

MADHUMITHA, R. et al. Optimum coordination of overcurrent relays using dual simplex and genetic algorithms. In: IEEE. **2015 International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN)**. [S.l.], 2015. p. 1544–1547. Citado 4 vezes nas páginas 36, 89, 90 e 100.

MAHDAVI, M.; FESANGHARY, M.; DAMANGIR, E. An improved harmony search algorithm for solving optimization problems. **Applied mathematics and computation**, Elsevier, v. 188, n. 2, p. 1567–1579, 2007. Citado na página 100.

MAMEDE FILHO, J.; MAMEDE, D. R. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. 2. ed. Rio de Janeiro - RJ: LTC, 2012. 620 p. Citado na página 61.

MANSOUR, M. M.; MEKHAMER, S. F.; EL-KHARBAWE, N. A modified particle swarm optimizer for the coordination of directional overcurrent relays. **IEEE transactions on power delivery**, IEEE, v. 22, n. 3, p. 1400–1410, 2007. Citado 5 vezes nas páginas 36, 62, 112, 113 e 134.

MANTEGNA, R. N. Fast, accurate algorithm for numerical simulation of levy stable stochastic processes. **Physical Review E**, APS, v. 49, n. 5, p. 4677, 1994. Citado na página 78.

MOIRANGTHEM, J. et al. Adaptive differential evolution algorithm for solving non-linear coordination problem of directional overcurrent relays. **IET Generation, Transmission & Distribution**, IET, v. 7, n. 4, p. 329–336, 2013. Citado na página 38.

MORO, V. d. C. **Metodologia para coordenação otimizada entre relés de distância e direcionais de sobrecorrente em sistemas de transmissão de energia elétrica**. 114 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Elétrica, São Carlos, SP, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 71.

NEGRÃO, D. L. A. **Metodologia para a coordenação e seletividade da proteção direcional de sobrecorrente em sistemas de transmissão de energia elétrica**. 147 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, São Carlos-SP, 2015. Citado 3 vezes nas páginas 27, 36 e 59.

NIYOMPANT, S. et al. Application of linear programming for optimal coordination of directional over-current relays. In: IEEE. **2012 9th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology**. [S.l.], 2012. p. 1–4. Citado na página 34.

NOGHABI, A. S.; SADEH, J.; MASHHADI, H. R. Considering different network topologies in optimal overcurrent relay coordination using a hybrid ga. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 24, n. 4, p. 1857–1863, 2009. Citado 3 vezes nas páginas 35, 36 e 84.

ORAZGALIYEV, D. et al. Adaptive coordination mechanism of overcurrent relays using evolutionary optimization algorithms for distribution systems with dgs. In: IEEE. **2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)**. [S.l.], 2019. p. 1–6. Citado na página 40.

PAPA, L. M. F. **Análise do impacto nas proteções de sobrecorrente de uma subestação de distribuição dada a inserção de sistema de armazenamento de energia**. 68 p. Monografia (Graduação) — Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Curitiba-PR, 2016. Citado na página 42.

PAPASPILIOTOPOULOS, V. A.; KURASHVILI, T.; KORRES, G. N. Optimal coordination of directional overcurrent relays in distribution systems with distributed generation based on a hybrid pso-lp algorithm. **IET**, 2014. Citado na página 37.

PAVLYUKEVICH, I. Lévy flights, non-local search and simulated annealing. **Journal of Computational Physics**, Elsevier, v. 226, n. 2, p. 1830–1844, 2007. Citado na página 77.

PAYNE, R. B.; SORENSEN, M. D. **The cuckoos**. 1. ed. UK: Oxford University Press, 2005. v. 15. Citado na página 76.

PEREZ, L. G.; URDANETA, A. J. Optimal coordination of directional overcurrent relays considering definite time backup relaying. **IEEE transactions on power delivery**, IEEE, v. 14, n. 4, p. 1276–1284, 1999. Citado na página 60.

PEREZ, 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**, IEEE, v. 16, n. 3, p. 385–388, 2001. Citado na página 33.

PHADKE, A. G.; THORP, J. S. **Computer relaying for power systems**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 60 e 63.

RAJPUT, V.; PANDYA, K.; JOSHI, K. Optimal coordination of directional overcurrent relays using hybrid csa-ffa method. In: IEEE. **2015 12th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)**. [S.l.], 2015. p. 1–6. Citado na página 39.

- RAMASWAMI, R. et al. Computer aided transmission protection system design part ii: Implementation and results. **IEEE Transactions on Power Apparatus and systems**, IEEE, n. 1, p. 60–65, 1984. Citado na página 32.
- RASHTCHI, V.; GHOLINEZHAD, J.; FARHANG, P. Optimal coordination of overcurrent relays using honey bee algorithm. In: IEEE. **International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems**. [S.l.], 2010. p. 401–405. Citado na página 37.
- RAWAT, R.; KALE, V. S.; GOKHALE, S. S. Application of nature inspired metaheuristic techniques to overcurrent relay coordination. In: IEEE. **2016 Future Technologies Conference (FTC)**. [S.l.], 2016. p. 130–136. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 83.
- RAZA, S. A. et al. Application of optimization techniques in overcurrent relay coordination-a review. **World applied sciences journal**, v. 28, n. 2, p. 259–265, 2013. Citado na página 32.
- RAZAVI, F. et al. A new comprehensive genetic algorithm method for optimal overcurrent relays coordination. **Electric Power Systems Research**, Elsevier, v. 78, n. 4, p. 713–720, 2008. Citado na página 35.
- REYNOLDS, A. M.; FRYE, M. A. Free-flight odor tracking in drosophila is consistent with an optimal intermittent scale-free search. **PloS one**, Public Library of Science, v. 2, p. 354, 2007. Citado na página 77.
- RIBEIRO, L. A. D. et al. Otimização estrutural de treliças utilizando o algoritmo firefly. Florianópolis-SC, 2014. Citado na página 75.
- RUFATO, E. **Viabilidade técnica e econômica da modernização do sistema de proteção da distribuição**. 202 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Sção Paulo-SP, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 46.
- SALAZAR, C. A. C.; ENRÍQUEZ, A. C.; SCHAEFFER, S. E. Directional overcurrent relay coordination considering non-standardized time curves. **Electric Power Systems Research**, Elsevier, v. 122, p. 42–49, 2015. Citado na página 37.
- SANTOS, E. M. **Apostila de proteção de sistemas elétricos de potência**. Alegrete-RS, 2017. 200 p. Citado 6 vezes nas páginas 42, 43, 44, 48, 49 e 50.
- SANTOS, F. M. d. P. **Algoritmo enxame de partículas evolutivo para o problema de coordenação de relés de sobrecorrente direcionais em sistemas elétricos de potência**. 108 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Elétrica, São Carlos-SP, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 70.
- SHIH, M. Y.; ENRÍQUEZ, A. C.; TREVINO, L. M. T. On-line coordination of directional overcurrent relays: Performance evaluation among optimization algorithms. **Electric power systems research**, Elsevier, v. 110, p. 122–132, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 87.
- SO, C. et al. Application of genetic algorithm for overcurrent relay coordination. IET, 1997. Citado na página 35.

SOARES, A. H. M. **Metodologia computacional para coordenação automática de dispositivos de proteção contra sobrecorrente em sistemas elétricos industriais**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Elétrica, São Carlos-SP, 2009. Citado na página 31.

SUEIRO, J. A. et al. Coordination of directional overcurrent relay using evolutionary algorithm and linear programming. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Elsevier, v. 42, n. 1, p. 299–305, 2012. Citado na página 38.

SWIEF, R. A.; ABDELAZIZ, A. Y.; NAGY, A. Optimail strategy for over current relay coordination using genetic algorithm. In: IEEE. **2014 International Conference on Engineering and Technology (ICET)**. [S.l.], 2014. p. 1–5. Citado na página 33.

THANGARAJ, R.; PANT, M.; DEEP, K. Optimal coordination of over-current relays using modified differential evolution algorithms. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, Elsevier, v. 23, n. 5, p. 820–829, 2010. Citado na página 38.

THARAKAN, K. I.; SWATHIKA, O. G. Optimum coordination of using overcurrent relay using firefly and ant colony optimization algorithm. In: IEEE. **2017 International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)**. [S.l.], 2017. p. 617–621. Citado na página 39.

TIWARI, R.; SINGH, R. K.; CHOUDHARY, N. K. Performance analysis of optimization technique for protection coordination in single and multi-loop distribution system. In: IEEE. **2019 International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON)**. [S.l.], 2019. p. 1–6. Citado na página 40.

URDANETA, A. J.; NADIRA, R.; JIMENEZ, L. P. Optimal coordination of directional overcurrent relays in interconnected power systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 3, n. 3, p. 903–911, 1988. Citado 5 vezes nas páginas 27, 32, 33, 101 e 104.

URDANETA, A. J. et al. Coordination of directional overcurrent relay timing using linear programming. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 11, n. 1, p. 122–129, 1996. Citado na página 33.

VISWANATHAN, G. M. et al. Lévy flight search patterns of wandering albatrosses. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 381, n. 6581, p. 413–415, 1996. Citado na página 77.

WIBOWO, N. A. et al. Optimization of overcurrent relay operation using artificial intelligent on radial topology with load constraint. In: IEEE. **2018 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)**. [S.l.], 2018. p. 205–208. Citado na página 40.

YANG, X.-S. Firefly algorithm, stochastic test functions and design optimisation. **International journal of bio-inspired computation**, Inderscience Publishers, v. 2, n. 2, p. 78–84, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 72, 74 e 75.

YANG, X.-S. **Nature-inspired metaheuristic algorithms**. [S.l.]: Luniver press, 2010. Citado 4 vezes nas páginas 65, 66, 77 e 79.

- YANG, X.-S.; DEB, S. Cuckoo search via lévy flights. In: IEEE. **2009 World congress on nature & biologically inspired computing (NaBIC)**. [S.l.], 2009. p. 210–214. Citado 5 vezes nas páginas 66, 75, 78, 79 e 80.
- ZAPATA, C. J.; MEJIA, G. E. Coordinación de relés de sobrecorriente en sistemas enmallados utilizando programación lineal. **Scientia et technica**, v. 2, n. 23, 2003. Citado na página 34.
- ZAPATA, C. J.; MEJIA, G. E. Coordinación de relés de sobrecorriente en sistemas radiales utilizando programación lineal. **Scientia et technica**, v. 2, n. 22, 2003. Citado na página 34.
- ZEIENLDIN, H.; EL-SAADANY, E.; SALAMA, M. A novel problem formulation for directional overcurrent relay coordination. In: IEEE. **Large Engineering Systems Conference on Power Engineering**. Halifax, NS, Canada, 2004. p. 48–52. Citado na página 34.
- ZEIENLDIN, H.; EL-SAADANY, E.; SALAMA, M. Optimal coordination of directional overcurrent relay coordination. **Power Engineering Society General Meeting.**, IEEE, San Francisco, CA, USA, v. 2, p. 1101–1106, 2005. Citado na página 34.
- ZEIENLDIN, H.; EL-SAADANY, E.; SALAMA, M. Optimal coordination of overcurrent relays using a modified particle swarm optimization. **Electric Power Systems Research**, Elsevier, v. 76, n. 11, p. 988–995, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 85.
- ZEINADDINI-MAYMAND, M. et al. An application of a modified constructive heuristic algorithm to transmission expansion planning. **Trondheim PowerTech**, IEEE, p. 1–5, 2011. Citado na página 36.
- ZHOU, G.-D. et al. Energy-aware wireless sensor placement in structural health monitoring using hybrid discrete firefly algorithm. **Structural Control and Health Monitoring**, Wiley Online Library, v. 22, n. 4, p. 648–666, 2015. Citado na página 73.

ÍNDICE

- A/D, 47, 48
 ACO, 38
 ADE, 38
 ANEEL, 27
 ANSI, 51, 54, 62

 BAA, 67
 BCO, 37
 BH, 38

 CDE, 38
 CGPSO, 37
 CLPSO, 37
 CPSO, 37
 CSA, 29, 39, 67, 75, 80, 92, 112, 117, 119,
 120, 129, 130
 CTI, 61, 95, 108, 115

 DE, 37, 38
 DS, 28, 33, 36, 100

 EI, 56, 57

 FFA, 29, 39, 72, 80, 92, 117, 119, 120, 129
 FO, 28, 88, 93, 97, 119

 GA, 35–39, 80, 121
 GAMS, 34, 36
 GD, 40
 Gesep, 11, 13, 30
 GPSO, 36
 GWO, 67

 IDMT, 54
 IEC, 30, 54, 56, 57, 85, 89
 IM, 56

 LI, 56
 LPSO, 37
 LXPSO, 37

 MC, 28, 36, 39, 40, 88, 92, 101, 115

 MDE, 38
 MFFA, 39
 MI, 56, 57
 MPSO, 36

 NI, 56

 OBB, 38

 PL, 33–36, 108
 PNL, 29, 34–36, 92, 108, 115
 PNLIM, 34, 36
 PPL, 28, 33
 PQS, 35, 36
 PSO, 29, 36, 37, 67, 70, 80, 92, 117, 119,
 120, 129, 130

 RS, 11, 28, 54, 56, 57
 RSD, 62, 112
 RST, 37
 RSTD, 52–54

 SAO, 37
 SBB, 37
 SEP, 11, 27, 28, 30, 59
 SOMA, 37
 SOMGA, 37

 TC, 41, 42, 46, 47, 51, 53, 55, 89, 113
 TMS, 28, 36, 39, 40, 88, 92, 115
 TP, 47

 Unipampa, 30