

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA
E DE COMPUTAÇÃO

**COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO
APLICADOS AOS AJUSTES DE RELÉS DIRECIONAIS
DE SOBRECORRENTE**

Luis Antonio Paulino de Souza

[UFG] & [EMC]
[Goiânia - Goiás - Brasil]
29 de maio de 2019

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES
NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: ☒ **Dissertação** ☐ **Tese**

2. Identificação da Tese ou Dissertação:

Nome completo do autor: LUIS ANTONIO PAULINO DE SOUZA

Título do trabalho: COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO APLICADOS AOS AJUSTES DE RELÉS DIRECIONAIS DE SOBRECORRENTE

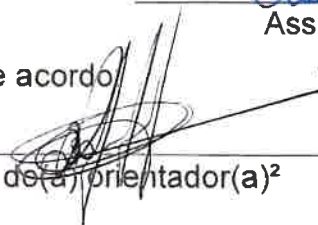
3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento ☒ **SIM** ☐ **NÃO**¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.


Assinatura do(a) autor(a)²

Ciente e de acordo


Assinatura do(a) orientador(a)²

Data: 29 / 05 / 19

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

² A assinatura deve ser escaneada.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA
E DE COMPUTAÇÃO

COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO
APLICADOS AOS AJUSTES DE RELÉS DIRECIONAIS
DE SOBRECORRENTE

Luis Antonio Paulino de Souza

Dissertação apresentada à Banca Examinadora como exigência parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Computação pela Universidade Federal de Goiás (UFG), Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), sob a orientação do Prof. Dr. Wesley Pacheco Calixto e coorientação do Prof. M.Sc. Carlos Leandro Borges da Silva

[UFG] & [EMC]
[Goiânia - Goiás - Brasil]
29 de maio de 2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistemas das Bibliotecas da UFG, GO - Brasil

C331s Souza, Luis Antonio Paulino, 08/02/84.

Comparação entre Métodos de Otimização Aplicados aos Ajustes de Relés Direcionais de Sobrecorrente/ Luis Antonio Paulino de Souza. – [Goiânia - Goiás - Brasil]: [UFG] & [EMC], 29 de maio de 2019.

132 f. : il.

Orientador: Wesley Pacheco Calixto - UFG, coorientador: Carlos Leandro Borges da Silva

Dissertação - Universidade Federal de Goiás - UFG, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação - EMC

Inclui bibliografia.

1.Coordenação 2.Otimização 3. Nelder-Mead 4.Quase-Newton 5.Algoritmo Genético 6.PS0 7.Algoritmo híbrido I. Calixto, Wesley Pacheco. Universidade Federal de Goiás. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título

CDU 000.0.000:000.0



Ata de Dissertação de Mestrado

Ata da sessão de julgamento da Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação, área de concentração Engenharia Elétrica, do candidato **Luís Antônio Paulino de Souza**, realizada em 15 de maio de 2019.

Aos quinze de maio de dois mil e dezenove, às 14:00 horas, na Sala *Caryocar Brasiliensis*, bloco "A" da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Universidade Federal de Goiás (UFG), reuniram-se os seguintes membros da Comissão Examinadora designada pela Coordenadoria do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação: os Doutores Wesley Pacheco Calixto – Orientador (EMC/UFG), Daywes Pinheiro Neto (IFG), Maria Leonor Silva de Almeida (EMC), Luiz Eduardo Bento Ribeiro (IFG) e Rodrigo Pinto Lemos (EMC), para julgar a Dissertação de Mestrado de **Luís Antônio Paulino de Souza**, intitulada "**Comparação entre métodos de otimização aplicados aos ajustes de relés direcionais de sobrecorrente**", apresentada pelo Candidato como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre, em conformidade com a regulamentação em vigor. O Professor Doutor Wesley Pacheco Calixto, Presidente da Comissão, abriu a sessão e apresentou os membros da Comissão e o candidato, que discorreu sobre seu trabalho, após o que, foi arguido pelos membros da Comissão na seguinte ordem: Maria Leonor Silva de Almeida, Daywes Pinheiro Neto, Luiz Eduardo Bento Ribeiro e Rodrigo Pinto Lemos. A parte pública da sessão foi então encerrada e a Comissão Examinadora reuniu-se em sessão reservada para deliberar. A Comissão julgou então que o candidato, tendo demonstrado conhecimento suficiente, capacidade de sistematização e argumentação sobre o tema de sua Dissertação, foi considerado **APROVADO** e deve satisfazer as exigências listadas na Folha de Modificação de Dissertação de Mestrado, em anexo a esta Ata, no prazo máximo de 60 dias, ficando o professor orientador responsável por atestar o cumprimento dessas exigências. Os membros da Comissão Examinadora descreveram as justificativas para tal avaliação em suas respectivas Folhas de Avaliação, anexas a esta Ata. Nada mais havendo a tratar, o presidente da Comissão declarou encerrada a sessão. Nos termos do Regulamento Geral dos Cursos de Pós-graduação desta Universidade, a presente Ata foi lavrada, lida e, julgada conforme, segue assinada pelos membros da Comissão supracitados e pelo candidato. Goiânia, 15 de maio de 2019.

Comissão Examinadora Designada:

Wesley Pacheco Calixto – Orientador (EMC/UFG)

(Avaliação: APROVADO)

Maria Leonor Silva de Almeida

Maria Leonor Silva de Almeida – (EMC/UFG)

(Avaliação: APROVADO)

Luiz Eduardo Bento Ribeiro

Luiz Eduardo Bento Ribeiro – (EE/IFG)

(Avaliação: APROVADO)

Daywes Pinheiro Neto

Daywes Pinheiro Neto – (ECA/IFG)

(Avaliação: APROVADO)

Rodrigo Pinto Lemos

Rodrigo Pinto Lemos – (EMC/UFG)

(Avaliação: APROVADO)

Candidato:

Luís Antônio Paulino de Souza

"The formulation of a problem is often more essential than its solution, which may be merely a matter of mathematical or experimental skill. To raise new questions, new possibilities, to regard old problems from a new angle requires creative imagination and marks real advances in science."

ALBERT EINSTEIN E LÉOPOLD INFELD
em "Evolution of Physics" (1938, 1966), p.92..

*A todas as pessoas que de alguma forma me ajudaram e me
apoiaram.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me dado força e sabedoria nos momentos em que mais precisei.

Ao amigo e Prof. Wesley Pacheco Calixto pela ajuda, paciência e principalmente por compartilhar do seu conhecimento.

Ao amigo Carlos Leandro Borges da Silva pela ajuda durante todo o trabalho.

A minha esposa Mariana Lemes Silva por sempre me apoiar e incentivar e as minhas filhas Gabriela Paulino e Rafaela de Souza pelo amor e carinho.

Aos meus pais Amilton Barbosa de Souza e Diomerzina Paulino de Almeida por sempre estarem ao meu lado me apoiando e incentivando em todos os momentos da minha vida.

E, finalmente, a todos aqueles que direta ou indiretamente tenham contribuído para o desenvolvimento desta dissertação de mestrado.

RESUMO

A proposta deste trabalho é desenvolver metodologia para comparação de métodos de otimização determinísticos com abordagem semi-empírica, heurísticos e híbridos aplicados na obtenção dos valores otimizados da corrente de *pick-up* e múltiplo de tempo em relés direcionais de sobrecorrente considerando a atuação da proteção de distância. O modelo tem como dado de entrada os limites da corrente de curto-circuito trifásico no início da linha de transmissão, os pares de relés a serem coordenados, os limites operativos do múltiplo de tempo, a corrente de *pick-up* e o tipo de curva a ser utilizada. Os resultados são obtidos em diferentes aplicações, atendendo às restrições e validando os resultados obtidos com resultados da literatura. A metodologia proposta apresenta-se como ferramenta eficiente para auxiliar no estudo de proteção e seletividade, contribuindo para o processo de coordenação de relés direcionais de sobrecorrente e comparando os métodos de otimização determinísticos, heurísticos e híbridos aplicados a dois sistemas de transmissão.

Palavras-chave: Nelder-Mead, Quase-Newton, Algoritmo genético, PSO.

COMPARISON BETWEEN OPTIMIZATION METHODS APPLIED TO DIRECTIONAL OVERCURRENT RELAY ADJUSTMENTS

ABSTRACT

The purpose of this work is to develop a methodology for the comparison of optimization deterministic methods with a semi-empirical, heuristic and hybrid approach applied to obtain optimized values of the pick-up current and time multiple in directional overcurrent relays considering the performance of the distance protection. The model has as input data the limits of the three-phase short-circuit current at the start of the transmission line, the relay pairs to be coordinated, the operative limits of the time multiple, the pick-up current, and the type of curve to be used. The results are obtained in different applications, taking into account the restrictions and validating the results obtained with results from the literature. The proposed methodology presents itself as an efficient tool to aid in the study of protection and selectivity, contributing to the coordination process of directional overcurrent relays and comparing the deterministic, heuristic and hybrid optimization methods applied to two transmission systems.

Keywords: Nelder-Mead, Quase-Newton, Genetic Algorithm, PSO.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	27
CAPÍTULO 2 SISTEMA DE PROTEÇÃO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO	33
2.1 Sistema de proteção	33
2.2 Proteção em linhas de transmissão	35
2.2.1 Relé direcional de sobrecorrente	37
2.3 Coordenação de relés direcionais de sobrecorrente	39
2.4 Modelagem do sistema de coordenação	42
2.5 Inspeção topológica	43
2.6 Considerações finais	45
CAPÍTULO 3 PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO APLICADA	47
3.1 Sistema, modelo e simulação	47
3.2 Processo de otimização	48
3.2.1 Métodos determinísticos	48
3.2.2 Métodos heurísticos	50
3.2.3 Métodos híbridos	54
3.3 Considerações finais	54
CAPÍTULO 4 METODOLOGIA	55
4.1 Construção do simulador	55
4.1.1 Limites de operação das variáveis do modelo	57
4.2 Processo de otimização	59
4.2.1 Definição da função de avaliação	61
4.3 Validação do simulador	61

4.4	Considerações finais	62
CAPÍTULO 5 RESULTADOS		63
5.1	Modelagem e validação	63
5.2	Determinação dos limites operativos	67
5.3	Otimização utilizando métodos determinísticos	68
5.3.1	Coordenação dos relés direcionais utilizando Nelder-Mead	71
5.3.2	Coordenação dos relés direcionais utilizando Quase-Newton	75
5.4	Otimização utilizando métodos heurísticos	80
5.4.1	Coordenação dos relés direcionais utilizando algoritmo genético	81
5.4.2	Coordenação dos relés direcionais utilizando nuvens de partículas	83
5.5	Otimização utilizando métodos híbridos	87
5.5.1	Coordenação dos relés direcionais utilizando otimização híbrida: algoritmo genético com Nelder-Mead	89
5.5.2	Coordenação dos relés direcionais utilizando otimização híbrida: algoritmo genético com Quase-Newton	93
5.5.3	Coordenação dos relés direcionais utilizando otimização híbrida: nuvens de partículas com Nelder-Mead	97
5.5.4	Coordenação dos relés direcionais utilizando otimização híbrida: nuvens de partículas com Quase-Newton	100
5.6	Comparação dos resultados de otimização	105
5.7	Comentários	111
CAPÍTULO 6 CONCLUSÃO		113
6.1	Contribuições do Trabalho	113
6.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	114
APÊNDICE A SIMULADOR		115
APÊNDICE B CURVAS DE COORDENAÇÃO DO ESTUDO DE CASO 1		117
APÊNDICE C CURVAS DE COORDENAÇÃO DO ESTUDO DE CASO 2		119
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		127

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Sistema de proteção.	33
2.2 Ilustração das zonas de proteção.	34
2.3 Representação unifilar simplificada do relé direcional de sobrecorrente. . .	37
2.4 Diagrama fasorial para estudo do relé direcional de sobrecorrente.	38
2.5 Ilustração do sistema radial.	39
2.6 Ilustração do sistema em malha.	40
2.7 Curvas de atuação do tipo normal inversa.	41
2.8 Curva de coordenação entre relés direcionais e relé de distância.	43
2.9 Sistema elétrico malhado de três barras.	44
3.1 Elementos básicos do processo de otimização.	48
3.2 Algoritmo Genético Clássico.	51
4.1 Fluxograma do simulador	55
4.2 Sistema elétrico considerando um par de relés.	56
4.3 Limites operativos sobre a curva normal inversa.	58
4.4 Construção do indivíduo da população do algoritmo genético.	60
4.5 Fluxograma da metodologia de otimização.	60
4.6 Fluxograma de validação do simulador.	62
5.1 Sistema elétrico de transmissão do Estudo de Caso 1.	64
5.2 Sistema elétrico de transmissão do Estudo de Caso 2.	65
5.3 Gráfico de dispersão de M_T para o Estudo de Caso 1: (a) método de Nelder-Mead e (b) método de Quase-Newton.	69
5.4 Gráfico de dispersão de I_p para o Estudo de Caso 1: (a) método de Nelder-Mead e (b) método de Quase-Newton.	70
5.5 Gráfico de dispersão de M_T para o Estudo de Caso 2: (a) método de Nelder-Mead e (b) método de Quase-Newton.	70
5.6 Gráfico de dispersão de I_p para o Estudo de Caso 2: (a) método de Nelder-Mead e (b) método de Quase-Newton.	70
5.7 Desempenho do processo de otimização com Nelder-Mead: Estudo de Caso 1.	72
5.8 Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 1 com Nelder-Mead: (a) R_4 e R_1 , (b) R_7 e R_6	73
5.9 Desempenho do processo de otimização com Nelder-Mead: Estudo de Caso 2.	74

5.10	Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com Nelder-Mead: (a) R_{15} e R_{17} , (b) R_3 e R_2	76
5.11	Desempenho do processo de otimização com Quase-Newton: Estudo de Caso 1.	76
5.12	Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 1 com Quase-Newton: (a) R_4 e R_1 , (b) R_7 e R_6	78
5.13	Desempenho do processo de otimização com Quase-Newton: Estudo de Caso 2.	78
5.14	Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com Quase-Newton: (a) R_{15} e R_{17} , (b) R_3 e R_2	80
5.15	Desempenho do processo de otimização com algoritmo genético: Estudo de Caso 1.	81
5.16	Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 1 com algoritmo genético: (a) R_4 e R_1 , (b) R_7 e R_6	82
5.17	Desempenho do processo de otimização com algoritmo genético: Estudo de Caso 2.	83
5.18	Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com algoritmo genético: (a) R_{15} e R_{17} , (b) R_3 e R_2	85
5.19	Desempenho do processo de otimização com nuvens de partículas: Estudo de Caso 1.	85
5.20	Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 1 com nuvens de partículas: (a) R_4 e R_1 , (b) R_7 e R_6	86
5.21	Desempenho do processo de otimização com nuvens de partículas: Estudo de Caso 2.	87
5.22	Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas: (a) R_{15} e R_{17} , (b) R_3 e R_2	89
5.23	Desempenho do processo de otimização com algoritmo genético & Nelder- Mead: Estudo de Caso 1.	90
5.24	Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 1 com algoritmo genético & Nelder-Mead: (a) R_4 e R_1 , (b) R_7 e R_6	91
5.25	Desempenho do processo de otimização com algoritmo genético & Nelder- Mead: Estudo de Caso 2.	91
5.26	Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com algoritmo genético & Nelder-Mead: (a) R_{15} e R_{17} , (b) R_3 e R_2	93
5.27	Desempenho do processo de otimização com algoritmo genético & Quase- Newton: Estudo de Caso 1.	94
5.28	Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 1 com algoritmo genético & Quase-Newton: (a) R_4 e R_1 , (b) R_7 e R_6	95

5.29	Desempenho do processo de otimização com algoritmo genético & Quase-Newton: Estudo de Caso 2.	96
5.30	Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com algoritmo genético & Quase-Newton: (a) R_{15} e R_{17} , (b) R_3 e R_2	98
5.31	Desempenho do processo de otimização com nuvens de partículas & Nelder-Mead: Estudo de Caso 1.	98
5.32	Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 1 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_4 e R_1 , (b) R_7 e R_6	99
5.33	Desempenho do processo de otimização com nuvens de partículas & Nelder-Mead: Estudo de Caso 2.	100
5.34	Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_{15} e R_{17} , (b) R_3 e R_2	102
5.35	Desempenho do processo de otimização com nuvens de partículas & Quase-Newton: Estudo de Caso 1.	102
5.36	Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 1 com nuvens de partículas & Quase-Newton: (a) R_4 e R_1 , (b) R_7 e R_6	104
5.37	Desempenho do processo de otimização com nuvens de partículas & Quase-Newton: Estudo de Caso 2.	104
5.38	Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Quase-Newton: (a) R_{15} e R_{17} , (b) R_3 e R_2	106
B.1	Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 1 com Nelder-Mead: (a) R_2 e R_5 , (b) R_2 e R_7	117
B.2	Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 1 com Nelder-Mead: (a) R_3 e R_7 , (b) R_3 e R_1	117
B.3	Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 1 com Nelder-Mead: (a) R_4 e R_5 , (b) R_4 e R_1	118
B.4	Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 1 com Nelder-Mead: (a) R_5 e R_8 , (b) R_6 e R_3	118
B.5	Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 1 com Nelder-Mead: (a) R_7 e R_6 , (b) R_8 e R_4	118
C.1	Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_1 e R_4 , (b) R_2 e R_6	119
C.2	Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_2 e R_{10} , (b) R_2 e R_{12}	119
C.3	Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_2 e R_{14} , (b) R_3 e R_2	120

C.4	Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_4 e R_6 , (b) R_4 e R_{10}	120
C.5	Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_4 e R_{12} , (b) R_4 e R_{14}	120
C.6	Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_5 e R_{10} , (b) R_5 e R_{12}	121
C.7	Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_5 e R_{14} , (b) R_6 e R_8	121
C.8	Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_7 e R_5 , (b) R_8 e R_9	121
C.9	Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_9 e R_6 , (b) R_9 e R_{12}	122
C.10	Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_9 e R_{14} , (b) R_{10} e R_7	122
C.11	Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_{11} e R_6 , (b) R_{11} e R_{10}	122
C.12	Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_{11} e R_{14} , (b) R_{12} e R_{13}	123
C.13	Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_{12} e R_{15} , (b) R_{12} e R_{19}	123
C.14	Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_{13} e R_6 , (b) R_{13} e R_{10}	123
C.15	Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_{13} e R_{12} , (b) R_{14} e R_{11}	124
C.16	Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_{14} e R_{15} , (b) R_{14} e R_{19}	124
C.17	Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_{15} e R_{17} , (b) R_{16} e R_{11}	124
C.18	Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_{16} e R_{13} , (b) R_{16} e R_{19}	125
C.19	Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_{17} e R_{22} , (b) R_{18} e R_{16}	125
C.20	Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_{19} e R_{21} , (b) R_{20} e R_{11}	125
C.21	Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_{20} e R_{13} , (b) R_{20} e R_{15}	126
C.22	Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_{21} e R_{18} , (b) R_{22} e R_{20}	126

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Desligamentos forçados no ano de 2012.	35
2.2 Constantes de tempo inverso definidas pelos padrões ANSI e IEC.	41
2.3 Conjunto de pares de relés definidos pela matriz M_I para o sistema da Figura 2.9.	45
5.1 Valores de correntes de curtos-circuitos trifásico a 1% da linha de trans- missão para o sistema elétrico do Estudo de Caso 1.	64
5.2 Valores comparativos de Moro (2014) $\times$ simulador proposto para o sis- tema elétrico do Estudo de Caso 1.	65
5.3 Valores de correntes de curtos-circuitos trifásico a 1% da linha de trans- missão para o sistema elétrico do Estudo de Caso 2.	66
5.4 Valores comparativos de Bottura (2014) $\times$ simulador proposto para o sistema elétrico do Estudo de Caso 2.	66
5.5 Limites inferiores e superiores de I_p para o sistema elétrico do Estudo de Caso 1.	67
5.6 Limites de M_T para o sistema elétrico do Estudo de Caso 1.	67
5.7 Valores de correntes de curtos-circuitos trifásico a 1% da linha de trans- missão para o sistema elétrico do Estudo de Caso 2.	68
5.8 Limites inferiores e superiores de I_p para o sistema elétrico do Estudo de Caso 2.	68
5.9 Limites de M_T para o sistema elétrico do Estudo de Caso 2.	69
5.10 Valores de x_0 do sistema elétrico do Estudo de Caso 1.	71
5.11 Valores de x_0 do sistema elétrico do Estudo de Caso 2.	71
5.12 Ajustes com Nelder-Mead: Estudo de Caso 1.	72
5.13 Valores de ITC e tempo de atuação mínimo com Nelder-Mead: Estudo de Caso 1.	73
5.14 Ajustes com Nelder-Mead: Estudo de Caso 2.	75
5.15 Valores de ITC e tempo de atuação mínimo com Nelder-Mead: Estudo de Caso 2.	75
5.16 Ajustes com Quase-Newton: Estudo de Caso 1.	77
5.17 Valores de ITC e tempo de atuação mínimo com Quase-Newton: Estudo de Caso 1.	77
5.18 Ajustes com Quase-Newton: Estudo de Caso 2.	79
5.19 Valores de ITC e tempo de atuação mínimo com Quase-Newton: Estudo de Caso 2.	79

5.20	Ajustes com algoritmo genético: Estudo de Caso 1.	82
5.21	Valores de <i>ITC</i> e tempo de atuação mínimo com algoritmo genético: Estudo de Caso 1.	82
5.22	Ajustes com algoritmo genético: Estudo de Caso 2.	84
5.23	Valores de <i>ITC</i> e tempo de atuação mínimo com algoritmo genético: Estudo de Caso 2.	84
5.24	Ajustes com nuvens de partículas: Estudo de Caso 1.	86
5.25	Valores de <i>ITC</i> e tempo de atuação mínimo com nuvens de partículas: Estudo de Caso 1.	86
5.26	Ajustes com nuvens de partículas: Estudo de Caso 2.	88
5.27	Valores de <i>ITC</i> e tempo de atuação mínimo com nuvens de partículas: Estudo de Caso 2.	88
5.28	Ajustes com algoritmo genético & Nelder-Mead: Estudo de Caso 1. . . .	90
5.29	Valores de <i>ITC</i> e tempo de atuação mínimo com algoritmo genético & Nelder-Mead: Estudo de Caso 1.	90
5.30	Ajustes com algoritmo genético & Nelder-Mead: Estudo de Caso 2. . . .	92
5.31	Valores de <i>ITC</i> e tempo de atuação mínimo com algoritmo genético & Nelder-Mead: Estudo de Caso 2.	93
5.32	Ajustes com algoritmo genético & Quase-Newton: Estudo de Caso 1. . . .	94
5.33	Valores de <i>ITC</i> e tempo de atuação mínimo com algoritmo genético & Quase-Newton: Estudo de Caso 1.	95
5.34	Ajustes com algoritmo genético & Quase-Newton: Estudo de Caso 2. . . .	96
5.35	Valores de <i>ITC</i> e tempo de atuação mínimo com algoritmo genético & Quase-Newton: Estudo de Caso 2.	97
5.36	Ajustes com nuvens de partículas & Nelder-Mead: Estudo de Caso 1. . . .	99
5.37	Valores de <i>ITC</i> e tempo de atuação mínimo com nuvens de partículas & Nelder-Mead: Estudo de Caso 1.	99
5.38	Ajustes com nuvens de partículas & Nelder-Mead: Estudo de Caso 2. . . .	101
5.39	Valores de <i>ITC</i> e tempo de atuação mínimo com nuvens de partículas & Nelder-Mead: Estudo de Caso 2.	101
5.40	Ajustes com nuvens de partículas & Quase-Newton: Estudo de Caso 1. . .	103
5.41	Valores de <i>ITC</i> e tempo de atuação mínimo com nuvens de partículas & Quase-Newton: Estudo de Caso 1.	103
5.42	Ajustes com nuvens de partículas & Quase-Newton: Estudo de Caso 2. . .	105
5.43	Valores de <i>ITC</i> e tempo de atuação mínimo com nuvens de partículas & Quase-Newton: Estudo de Caso 2.	105
5.44	Tempos de otimização e de processamento: Estudo de caso 1.	107
5.45	Tempos de otimização e de processamento: Estudo de caso 2.	107

5.46	Parcela do tempo de simulação no tempo de processamento: Estudo de Caso 1.	107
5.47	Parcela do tempo de simulação no tempo de processamento: Estudo de Caso 2.	107
5.48	Desempenho dos métodos determinísticos sem a abordagem semi-empírica.	108
5.49	Desempenho dos métodos determinísticos com a abordagem semi-empírica.	109
5.50	Número de iteração e tempo de processamento total para cada método de otimização: Estudo de Caso 1.	110
5.51	Número de iteração e tempo de processamento total para cada método de otimização: Estudo de Caso 2.	110
5.52	Comparação entre método proposto e literatura.	110

LISTA DE SÍMBOLOS

α	–	Ângulo entre corrente de polarização e corrente de operação
ΔT_{dist}	–	Tempo de espera da proteção de distância
γ	–	Ângulo de máximo conjugado
θ	–	Ângulo entre tensão de polarização e corrente de operação
τ	–	Tamanho do torneio
A	–	Constante do tipo de curva
B	–	Constante do tipo de curva
B_{adj}	–	Barra adjacente
B_1	–	Barramento elétrico 1
B_2	–	Barramento elétrico 2
B_3	–	Barramento elétrico 3
B_4	–	Barramento elétrico 4
C	–	Conjugado da proteção direcional de sobrecorrente
D_1	–	Disjuntor 1
D_2	–	Disjuntor 2
D_3	–	Disjuntor 3
D_4	–	Disjuntor 4
L_1	–	Linha de transmissão 1
L_2	–	Linha de transmissão 2
L_3	–	Linha de transmissão 3
L_4	–	Linha de transmissão 4
$I_{CC_{pr}}$	–	Corrente de curto-circuito trifásico a 1% do início da linha
I_{CC_l}	–	Corrente de curto-circuito percebida pela proteção local
I_{CC_r}	–	Corrente de curto-circuito percebida pela proteção remota
I_{M_M}	–	Mínima corrente de pick-up quando o M é máximo
I_{nom}	–	Corrente nominal do sistema
$I_{nom20\%}$	–	Corrente nominal do sistema com 20% de acréscimo
I_M	–	Corrente medida pelo relé
I_A	–	Corrente de operação
I_{pol}	–	Corrente de polarização
I_p	–	Corrente de <i>pick-up</i>
I_{pmim}	–	Corrente de <i>pick-up</i> mínima
I_{pmax}	–	Corrente de <i>pick-up</i> máxima
ITC	–	Intervalo de tempo de coordenação
K	–	Constante de proporcionalidade
LT	–	Linha de transmissão
M	–	Múltiplo da corrente de <i>pick-up</i>
M_I	–	Matriz de incidência
M_T	–	Múltiplo de tempo

$M_{T_{mim}}$	–	Múltiplo de tempo mínimo
$M_{T_{max}}$	–	Múltiplo de tempo máximo
RTC	–	Relação de transformação de corrente
P	–	Constante do tipo de curva
P_{RL}	–	Proteção de retaguarda local
P_{RR}	–	Proteção de retaguarda remota
P_n	–	Penalização da função de avaliação
V_{AN}	–	Tensão da fase A em relação ao neutro
V_{pol}	–	Tensão de polarização
t_1	–	Tempo de atuação da proteção 1
t_2	–	Tempo de atuação da proteção 2
t_3	–	Tempo de atuação da proteção 3
t_4	–	Tempo de atuação da proteção 4
T	–	Tempo de atuação do relé direcional de sobrecorrente
T_{PRL}	–	Tempo de atuação da proteção de retaguarda local
T_{PRR}	–	Tempo de atuação da proteção de retaguarda remota
T_{Z1}	–	Tempo de atuação de primeira zona
T_{Z2}	–	Tempo de atuação de segunda zona
T_a	–	Tempo de abertura do disjuntor
T_s	–	Tempo de segurança
x	–	Valores a serem otimizados
x_β	–	Vetor com as correntes de curto, M_T e I_p
x_0	–	Valor inicial para os algoritmos determinísticos
Z_1	–	Zona de proteção 1
Z_2	–	Zona de proteção 2
Z_3	–	Zona de proteção 3
Z_4	–	Zona de proteção 4

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AG	–	Algoritmo Genético
ANSI	–	Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista
BFGS	–	Algoritmo Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno
CTEEP	–	<i>American National Standards Institute</i>
DPSO	–	<i>Discrete Particle Swarm Optimization</i>
EPSO	–	<i>Evolutionary Particle Swarm Optimization</i>
GAMS	–	<i>General Algebraic Modeling System</i>
IEEE	–	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IEC	–	<i>International Eletrotechnical Commission</i>
ONS	–	Operador Nacional do Sistema
PIB	–	Programação linear binária
PSO	–	<i>Particle Swarm Optimization</i>
PL	–	Programação Linear
PNL	–	Programação Não Linear
PRL	–	Proteção de retaguarda local
PRR	–	Proteção de retaguarda remota
RDS	–	Relé Direcional de Sobrecorrente
SEP	–	Sistema Elétrico de Potência
SIN	–	Sistema Interligado Nacional
TC	–	Transformador de corrente
TP	–	Transformador de potencial

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O sistema elétrico de potência (SEP) por se tratar de ampla infraestrutura, necessita de proteção cada vez mais eficaz, levando em consideração a seletividade e a coordenação dos relés de proteção, sendo este um dos seus principais requisitos. O sistema de proteção deve prevenir possível defeito no sistema elétrico, pois a falha na atuação desta proteção pode acarretar danos irreparáveis aos equipamentos protegidos.

A falha ou ajustes incorretos nos elementos de proteção podem gerar consequências graves ao sistema e dentre algumas têm-se a interrupção no fornecimento de energia em determinado local ou a interrupção em larga escala. As principais causas de falhas no sistema elétrico de potência são: i) descargas atmosféricas, ii) queimadas ocasionando alteração na rigidez dielétrica do ar, iii) defeitos nos isoladores e iv) surtos de chaveamento (COURY et al., 2007).

Quando o sistema elétrico é de grande porte e não radial, um simples relé de sobrecorrente não é capaz de promover a proteção adequada. É necessário o uso da proteção direcional de sobrecorrente, no entanto, encontrar os ajustes necessários aos relés não é tarefa trivial. Para ajustar o relé direcional de sobrecorrente é necessário obter os ajustes de múltiplo de tempo¹, corrente de *pick-up*² e o tipo de curva do relé.

Sonnemann (1950) apresenta estudo de caso para proteção direcional de corrente de fase utilizando relés eletromecânicos. O problema de coordenação com este tipo de relés é que eles são ajustados de forma mecânica, perdendo em precisão no ajuste. O autor descreve método clássico de equacionamento onde o propósito é melhorar o elemento direcional, obtendo resultados satisfatórios para ângulos de torque.

Tsien (1964) descreve as dificuldades encontradas para determinar os ajustes dos relés de sobrecorrente direcionais em linhas de transmissão de sistema elétrico de potência. O ajuste do relé influencia em outros relés adjacentes. O tempo de operação de cada relé do sistema deve ser calculado e comparado sob várias condições. O autor desenvolve rotina computacional para calcular as configurações de relés de sobrecorrente direcional e modificá-los para a coordenação de tempo. A rotina computacional estabelece abordagem integrando a análise de falhas do sistema e

¹Multiplicador para definição do tempo de atuação do relé.

²Corrente de ajuste para relés de tempo inverso.

o processo de configuração do relé, obtendo resultados satisfatórios para sistemas elétricos de pequeno porte.

Com o crescimento dos sistemas de transmissão e distribuição ocorre o aumento do número de relés instalados nestes sistemas. Os estudos de coordenação e seletividade de sobreposição executados manualmente, torna-se inviável. [Pereira \(2007\)](#) descreve método que utiliza software para execução dos estudos de coordenação e seletividade, tendo como objetivo principal sistematizar e agilizar a rotineira tarefa de elaboração da proteção. O autor desenvolve software que estabelece os ajustes do sistema de proteção padronizando os critérios e reduzindo as horas de engenharia dedicadas à elaboração dos estudos de coordenação e seletividade.

[Soares \(2009\)](#) informa que os estudos de coordenação da proteção é processo trabalhoso e demanda tempo na medida em que aumenta a complexidade do sistema elétrico sob análise e que o tempo de estudo está atrelado à diversidade dos tipos de dispositivos de proteção. O autor desenvolve metodologia acompanhada de rotinas computacionais capaz de auxiliar na definição dos ajustes dos dispositivos de proteção contra sobrecorrente em sistemas industriais, de forma a garantir a coordenação e agilizar a tarefa. A metodologia é aplicada em dois sistemas elétricos radiais, onde o autor observa que em casos específicos, a proteção pode ser mais eficiente se houver a coordenação entre diferentes padrões de curvas de atuação do relé.

Na tentativa de solucionar problemas dos ajustes otimizados e minimizar o tempo de atuação dos relés direcionais de sobrecorrente em sistemas malhados de grande porte, utilizam-se métodos de otimização. [Urdaneta et al. \(1988\)](#) minimizam o tempo de atuação dos relés em sistema com mais de 30 barras. Os autores utilizam restrições como: i) intervalo de tempo entre as atuações dos relés principais e retaguardas, ii) limites de múltiplo de tempo, iii) corrente de *pick-up* e iv) características das curvas dos relés. Eles assumem que o múltiplo de tempo e a corrente de *pick-up* são valores no conjunto dos números reais e que ao final da otimização estes números são arredondados para valores inteiros mais próximos dos ajustes permitidos nos relés.

[Perez e Urdaneta \(1999\)](#) apresentam método de coordenação ótima de relés direcionais de sobrecorrente usando programação linear. A maioria dos sistemas utilizam a proteção de distância como principal e a proteção direcional de sobrecorrente como retaguarda. A atuação da proteção direcional de sobrecorrente como proteção de retaguarda não pode acontecer com tempo menor que o valor preestabelecido de 300 milissegundos, pois a proteção de distância é a proteção principal.

Zeienldin et al. (2004) abordam a otimização da coordenação de relés direcionais utilizando a corrente de *pick-up* com valores discretos, que são os valores reais configurados nos relés. Fazendo esta abordagem de forma discreta os autores conseguem precisão nos resultados. Em seu trabalho, Zeienldin et al. (2004) utilizam o programa *General Algebraic Modeling System* (GAMS) e posteriormente em Zeienldin et al. (2006), compararam os resultados obtidos utilizando o GAMS com os resultados obtidos utilizando o método de otimização por enxame de partículas (*Particle Swarm Optimization* – PSO), os resultados obtidos utilizando o PSO são mais promissores e com menor esforço computacional.

No trabalho de Mansour et al. (2007), o problema de coordenação da proteção direcional de sobrecorrente é tratado como caso de programação não linear, em que os ajustes da corrente de *pick-up* são predeterminados e os valores do múltiplo de tempo se obtém utilizando método de enxame de partículas. Os autores ao invés de penalizar a função objetivo, o que é comum, eles alteram a velocidade das partículas, este método é testado e comparado com método disponível no *toolbox* de software proprietário. Os resultados obtidos pelo método disponível no software proprietário teve tempo de convergência melhor que o método de enxame de partículas.

Leite et al. (2010) produzem algoritmo de otimização baseado no PSO, denominado otimização por enxame de partículas evolutivas (*Evolutionary Particle Swarm Optimization* EPSO). O intuito do desenvolvimento da metodologia é resolver o problema não linear do tempo de atuação de relés direcionais em sistemas de transmissão, onde o algoritmo encontra os valores de corrente de *pick-up* e múltiplo de tempo. Os autores fixam as correntes de *pick-up* e com isto o problema de coordenação dos relés reduz a não linearidade, podendo assim comparar os resultados do EPSO com métodos de otimização linear. O EPSO obtém valores menores para o tempo de atuação dos relés, indicando assim, a ferramenta metaheurística como apropriada para solucionar o problema de coordenação.

Bashir et al. (2010) desenvolvem algoritmo onde, primeiramente de forma aleatória inicializa os valores de *pick-up* dentro do espaço de busca predefinido, em seguida os valores de múltiplo de tempo são calculados utilizando programação linear. Posterior a esta fase da programação linear, os valores de *pick-up* são atualizados pelo PSO. Este processo ocorre de forma iterativa até que seja alcançado o critério de parada, esta metodologia é testada em sistema malhado com quatorze relés. Os resultados desta metodologia são comparados com outros dois métodos, um utilizando algoritmo genético (AG) e o outro utilizando programação linear. Os resultados

encontrados pelo algoritmo proposto por [Bashir et al. \(2010\)](#) obteve melhor desempenho em comparação aos outros métodos, apresentando assim sua eficiência para problemas de coordenação.

[Razavi et al. \(2008\)](#) tratam a coordenação de relés direcionais como programação linear, onde os valores de corrente de *pick-up* são prefixados e os múltiplo de tempo são obtidos utilizando AG, ao final de cada iteração os valores no conjunto dos números reais obtidos são arredondados para valores inteiros mais próximos. É implementado neste caso penalizações na função objetivo, assim os resultados não factíveis não prevalecem para as próximas gerações.

[Bedekar e Bhide \(2011b\)](#) utilizam AG com codificação real para coordenar relés direcionais, o que diminui o esforço computacional. Vale ressaltar que neste caso os ajustes de corrente de *pick-up* são préfixados o que reduz a não linearidade do problema. [Bedekar e Bhide \(2011a\)](#) tratam o problema de coordenação como problema de programação não linear, ou seja, os ajustes de corrente de *pick-up* e múltiplo de tempo são otimizados simultaneamente utilizando AG.

[Correa \(2012\)](#) resolve o problema de coordenação de relés utilizando programação linear binária (PIB). O autor utiliza basicamente dois métodos, um para determinar somente o múltiplo de tempo e outro para determinar simultaneamente o múltiplo de tempo e múltiplo de corrente. Neste trabalho, utiliza-se temporização por tempo inverso e tempo definido. Este modelo matemático é similar ao utilizado por [Urda-neta et al. \(1988\)](#), onde são usadas como restrições: i) intervalo de tempo de atuação entre a proteção de retaguarda e a atuação do relé principal de distância, ii) tempo mínimo para que a proteção direcional, sendo a de retaguarda, não atue antes da proteção principal e iii) limites operativos.

O desafio no problema de coordenação de relés direcionais de sobrecorrente, são as inúmeras combinações testadas pelos pares de relés, gerando assim o espaço de busca de tamanho elevado. Com isto, técnicas metaheurísticas vem sendo utilizadas como solução viável para problema de coordenação de relés direcionais de sobrecorrente. [Bernardes \(2013\)](#) utiliza metaheurística nomeada otimização discreta por enxames de partículas (*Discrete Particle Swarm Optimization* - DPSO) onde o autor faz uso do comportamento de animais se deslocando em busca de alimento para penalizar a função objetivo, evitando que as partículas se desloquem para regiões com resultados infactíveis. Neste trabalho, a média do tempo de simulação é de aproximadamente 3,5 segundos por relé, o que é considerado razoável.

Santos (2013) utiliza o EPSO, pois o PSO clássico necessita de exaustiva análise empírica na busca dos parâmetros internos do algoritmo. Esta desvantagem do PSO é sanada com a autoparametrização do EPSO. Por se tratar de problema de otimização onde os valores a serem simulados devem ser inteiros, os resultados são arredondados para o inteiro mais próximo. Neste trabalho o autor compara os resultados do PSO clássico com os resultados obtidos com o EPSO, chegando à conclusão que o EPSO obtém resultados melhores para sistema malhado.

Moro (2014) utiliza PSO clássico para encontrar os ajustes de relés direcionais coordenados com a proteção de distância em sistemas malhados. O autor utiliza correntes de curto circuito em três pontos da linha de transmissão para coordenar os relés. O algoritmo faz uso de três formas de curva: i) IEC Normal Inversa, ii) IEC Muito Inversa e iii) IEC Extremamente Inversa. Neste trabalho o algoritmo decide o uso de uma das três curvas, como a escolha dos valores das curvas são realizadas de forma aleatória, o tempo de simulação é de 30 minutos para o sistema de 22 relés. A metodologia considera a restrição do uso da proteção de distância como proteção principal. O autor conclui que os resultados são satisfatórios.

Bottura (2014) usa metodologia baseada em algoritmo híbrido, combinando programação linear e AG. O autor testa o método em sistema malhado de 22 relés do sistema brasileiro de transmissão. Neste trabalho o autor faz uso de penalizações no AG, onde é considerado apenas faltas do tipo *close-in* para a realização do estudo de coordenação. O tempo de simulação é de aproximadamente 27 minutos e os resultados são satisfatórios para todos os relés.

Negrão (2015) utiliza duas metodologias, coordenação de relés direcionais pelo método do menor erro e método da integral logarítmica ponderada linearmente. O método consiste em determinar o ajuste do dispositivo de proteção para que ele produza a menor soma ponderada dos erros relativos do tempo de atuação com quatro pontos de referência. Os pontos de referências são pontos de curto circuito ao longo da linha. O método da integral logarítmica ponderada linearmente, visa reduzir a área abaixo da curva de atuação do relé, comparando a integral das diferentes curvas possíveis para o relé em análise. O autor desenvolve o trabalho na linguagem C++ e com isto obtém ganho em desempenho computacional.

Vários trabalhos foram realizados para encontrar os valores de múltiplo de tempo, desde relés eletromecânicos aos relés microprocessados. São utilizados métodos clássicos de equacionamento, rotinas computacionais, entre outros. Na literatura há trabalhos que tratam dos valores do múltiplo de tempo, outros dos ajustes de *pick-up*

e outros tratam dos sistemas elétricos de grande porte em anel.

A aplicação de métodos de otimização, comparando a eficiência de cada método e otimizando concomitantemente a obtenção dos valores do múltiplo de tempo, os ajustes de *pick-up* e em sistemas elétricos de grande porte em anel, justifica este estudo. Desta forma, pode-se construir a hipótese primária: se é possível otimizar a coordenação de relés direcionais em sistemas de grande porte e se cada método de otimização tem desempenho diferente dependendo do problema, então pode-se realizar a comparação entre os métodos de otimização e otimizar o múltiplo de tempo e ajuste de *pick-up* em sistemas elétricos de grande porte em anel.

O objetivo geral deste trabalho é comparar métodos de otimização determinístico, heurístico e híbrido para encontrar os valores de múltiplo de tempo e ajuste de *pick-up* da proteção direcional de sobrecorrente em sistemas radiais e malhados. Ainda como objetivos têm-se: i) diminuir o tempo de atuação da proteção direcional de sobrecorrente, ii) analisar a eficiência do algoritmo para sistemas elétricos com tensão em $138kV$ e iii) calcular e analisar os tempos de atuação da proteção de forma individual.

Este trabalho contém seis capítulos: no Capítulo 2 são descritos os conceitos e fundamentação teórica sobre a proteção direcional. O Capítulo 3 descreve brevemente os conceitos da teoria de otimização. No Capítulo 4 é exposta a metodologia proposta no trabalho e no Capítulo 5 são dispostos os resultados de quatro estudos de casos envolvendo vários tipos de sistemas. O Capítulo 6 discorre sobre as conclusões obtidas e as contribuições da realização deste trabalho.

CAPÍTULO 2

SISTEMA DE PROTEÇÃO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Neste capítulo são explorados a teoria sobre proteção em linhas de transmissão utilizando relé direcional de sobrecorrente com ênfase na proteção direcional de sobrecorrente. Ainda é descrito o funcionamento da coordenação dos relés direcionais de sobrecorrente em sistemas de transmissão.

2.1 Sistema de proteção

A energia elétrica é um dos recursos fundamentais da sociedade moderna, por isto este sistema deve ser projetado e executado de maneira eficiente. Para o cliente final, o sistema elétrico de potência parece funcionar de maneira constante, sem perturbações, no entanto, por se tratar de sistema abrangente e extenso (sistema que engloba e reuni outros sistemas e de elevada extensão), sofre com perturbações e variações ocasionadas por fenômenos naturais, falhas de equipamentos e humana (KINDERMANN, 2005). Para proteger e evitar que todo o sistema elétrico de potência fique sem fornecimento de energia elétrica, existem sistemas de proteção capazes de isolar partes ou pontos com defeito. Desta forma, todos os componentes podem ser protegidos contra curtos-circuitos, no qual a parte defeituosa do sistema deve ser isolada o mais rapidamente possível (COURY et al., 2007).

No sistema de proteção em linhas de transmissão, as medidas/valores analógicos são monitorados em tempo real através dos transformadores de corrente (TC) e transformadores de potencial (TP). Estes valores são enviados ao relé, que por sua vez monitora e toma as decisões através de algoritmos internos, comparando os valores. O relé atua quando os valores excedem o que está predeterminado nos algoritmos, solicitando abertura do disjuntor. A Figura 2.1 ilustra o sistema de proteção com os dispositivos/equipamentos que o compõe.

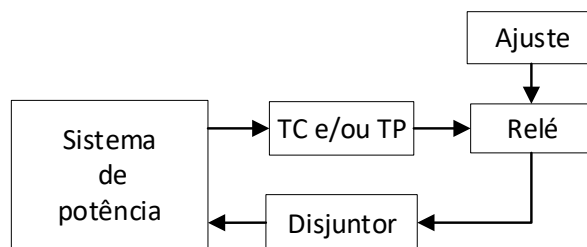


Figura 2.1 - Sistema de proteção.

Os TC e TP têm a função de reduzir os valores de corrente e tensão, respectivamente, para adequá-los a valores suportados pelos relés. Estes transformadores também tem a função de isolar eletricamente os relés da alta-tensão e padronizar os valores do secundário, tanto para tensão quanto para corrente. Estas medidas são filtradas a fim de se retirar as componentes harmônicas de alta frequência, evitando assim atuações indevidas. Posteriormente, os valores são discretizados e transformados em sinal digital para ser processado pelo relé (SATO; FREITAS, 2015).

O disjuntor é o equipamento fundamental no sistema de proteção em linhas de transmissão, pois é ele que interrompe as correntes de curto-circuito da ordem de $100kA$ em sistemas com tensões de até $800kV$. Ele possui mecanismos capazes de extinguir o arco elétrico, isolando a parte defeituosa do sistema sem causar danos materiais ou risco de morte (PHADKE; THORP, 1990). O relé é o dispositivo que compara os valores medidos pelos transformadores e os valores previamente parametrizados. É o instrumento de tomada de decisão e sua alimentação é realizada por fonte de corrente contínua, fornecida por baterias (SATO; FREITAS, 2015).

O sistema de proteção em linhas de transmissão é separado por zonas e cada relé tem sua zona de atuação de maneira a se obter correta seletividade e coordenação. Estabelecendo a zona de proteção para cada equipamento, todos os equipamentos estão protegidos por, pelo menos, uma zona e normalmente quem delimita as zonas é a instalação dos TC. Para equipamentos de elevada importância, pode-se atribuir duas ou mais zonas de proteção. A Figura 2.2, adaptada de Phadke e Thorp (1990), ilustra o sistema com cinco zonas de proteção.

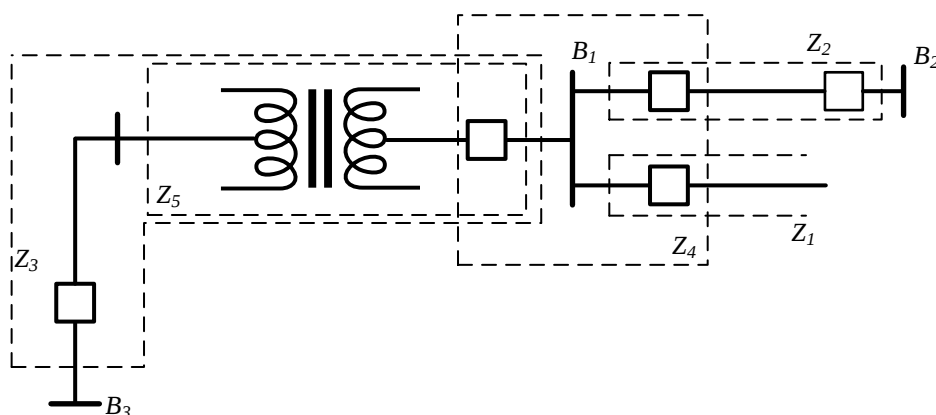


Figura 2.2 - Ilustração das zonas de proteção.

Na Figura 2.2, Z_1 até Z_5 são as zonas delimitadas pelas linhas tracejadas, B_1 , B_2 e B_3 são os barramentos. Observe que a região Z_3 engloba a região Z_5 e que as regiões se sobrepõem, esta característica é desejada para que não se tenha regiões desprotegidas. O sistema de proteção pode não atuar quando solicitado, caracterizando o que comumente se denomina de recusa de atuação. Esta recusa pode ser originada de várias causas, tais como: i) erro de projeto, ii) montagem equivocada no local de implantação, iii) defeito no disjuntor, iv) defeito no relé, entre outras. Estas recusas são da ordem de 1%, segundo dados do Sistema Interligado Nacional (SIN). Mesmo com índice baixo de ocorrência, é essencial prover a proteção principal e a proteção de retaguarda (SATO; FREITAS, 2015).

A proteção principal é aquela que em caso de falta dentro da zona protegida, ela deverá atuar primeiro. A proteção de retaguarda é aquela que só deverá atuar quando ocorrer a falha da proteção principal. Dentre as proteções de retaguarda, existem a proteção de retaguarda local e a proteção de retaguarda remota. Na proteção de retaguarda local, o relé, transformadores e baterias são instalados na mesma subestação ou usina do relé principal. Na proteção de retaguarda remota, o relé, transformadores e baterias são instalados em diferente subestação ou usina do relé principal.

2.2 Proteção em linhas de transmissão

Vários são os equipamentos a serem protegidos no sistema de proteção em linhas de transmissão. De acordo com Sato e Freitas (2015), as linhas de transmissão em corrente alternada possuem classificação típica, com elevadas extensões e por este motivo elas são vulneráveis nas situações de: i) descargas atmosféricas, ii) defeitos em isoladores, iii) falta de manutenção e iv) queimadas de vegetação próximas as linhas de transmissão. Segundo a ONS (2013), as linhas de transmissão são os equipamentos que mais apresentam desligamentos. A Tabela 2.1, retirada de ONS (2013), dispõe os desligamentos forçados no Sistema Interligado Nacional (SIN) para o ano de 2012.

Tabela 2.1 - Desligamentos forçados no ano de 2012.

Tipo de Equipamento	Desligamentos	[%]
Linhas de Transmissão	6490	69,3
Geradores	873	9,3
Barramentos	129	1,4
Reatores	108	1,2
Banco de capacitores	343	3,7
Compensadores síncronos	59	0,6
Compensadores estáticos	63	0,7
Total	9371	100,0

Em linhas de transmissão, as proteções mais utilizadas são: i) sobrecorrente, ii) direcional de sobrecorrente, iii) distância, iv) diferencial de linha, v) relé de sobretensão e vi) relé de falha de disjuntor.

O relé de proteção de sobrecorrente é empregado em praticamente todos os níveis de tensão em linhas de transmissão, porém é considerado proteção básica e sempre vem associado com outras funções de proteção, no qual se as correntes medidas pelo relé ultrapassarem o valor pré-ajustado, ele atuará. Esta proteção tem vantagem, pois o seu custo de instalação é baixo (SATO; FREITAS, 2015).

O relé de distância recebe este nome devido sua filosofia de funcionamento, no qual ele é capaz de medir a impedância da linha de transmissão, que é proporcional ao comprimento da linha. Este relé mede os valores de tensão e corrente e durante a anormalidade ele efetivamente divide a tensão pela corrente para obtenção da impedância entre o local da medição e o ponto de defeito utilizando os transformadores de medida (COURY et al., 2007) (MAMEDE; FILHO, 2011).

O relé diferencial de linha tem o princípio de funcionamento baseado na Lei de Kirchhoff das correntes, no qual o somatório das correntes em determinado nó é igual a *zero* (ALMEIDA, 2016). A zona de proteção do relé diferencial de linha é entre os dois transformadores de corrente instalados em cada terminal. E como estes dois terminais ficam distantes um do outro, a comparação das correntes da linha é realizada pelo relé de proteção, sendo que no instante do defeito um dos relés envia o sinal de abertura para outro terminal da linha, isolando assim o defeito.

As linhas de transmissão estão sujeitas a sobretensões elevadas, geralmente causadas por desbalanço entre a quantidade de energia que está sendo gerada e a quantidade de energia que está sendo consumida pelas cargas. Este desbalanço é ocasionado por chaveamentos oriundos por exemplo da abertura de disjuntores no sistema elétrico, isolando elevada quantidade de carga do sistema, proporcionando excesso de energia disponível e assim, causando o surgimento de sobretensões. Algumas vezes este fenômeno vem acompanhado de sobrefrequência. Estas tensões elevadas podem danificar os equipamentos que compõem a linha de transmissão tais como: TC, TP, chaves seccionadoras, entre outras. Por este motivo se faz necessário o uso da proteção contra as sobretensões utilizando o relé de sobretensão (MORO, 2014).

No instante que é identificado o defeito na linha de transmissão o relé de proteção envia o sinal de abertura ao disjuntor para que o mesmo abra e isole o defeito, cessando a falta. Para evitar que estas falhas de abertura do disjuntor danifiquem

o sistema elétrico, o relé de falha de disjuntor é utilizado em linhas de transmissão. O relé de falha de disjuntor envia o comando de abertura ao disjuntor e inicializa a contagem de tempo e o monitoramento do estado do disjuntor, caso o mesmo não abra em tempo pré-ajustado no relé (geralmente $200ms$), o comando de abertura é enviado a todos os disjuntores adjacentes.

2.2.1 Relé direcional de sobrecorrente

Esta proteção é a combinação do relé de sobrecorrente com a capacidade de identificar a direção do fluxo de corrente nas instalações elétricas, sendo a proteção ideal para sistemas não radiais, no qual o fluxo das correntes pode ser em duas direções dependendo da localização do curto-circuito. Existem os relés direcionais de sobrecorrente instantâneos, tempo definido e os temporizados com características de tempo inverso. Para configurar o relé direcional de sobrecorrente com características de tempo inverso é necessário determinar o ajuste de *pick-up*, o múltiplo de tempo, tipo de curva e a direção em que a proteção deve ou não atuar.

A Figura 2.3, adaptada de Kindermann (2005), ilustra a representação unifilar do relé direcional com duas bobinas em quadratura do sistema trifásico representado apenas pela fase A do sistema trifásico. A bobina de corrente é alimentada pela corrente de operação I_A e a bobina de tensão é alimentada pela tensão de polarização V_{pol} . A Figura 2.4, adaptada de Kindermann (2005), ilustra o diagrama fasorial para estudo da direcionalidade da proteção direcional de sobrecorrente, no qual são apresentadas todas as grandezas envolvidas na análise, sendo elas: corrente de operação I_A , tensão de polarização V_{pol} , tensão da fase A em relação ao neutro V_{AN} , corrente de polarização I_{pol} devido a aplicação da tensão de polarização V_{pol} .

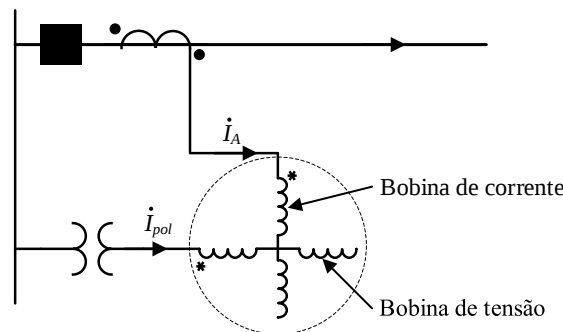


Figura 2.3 - Representação unifilar simplificada do relé direcional de sobrecorrente.

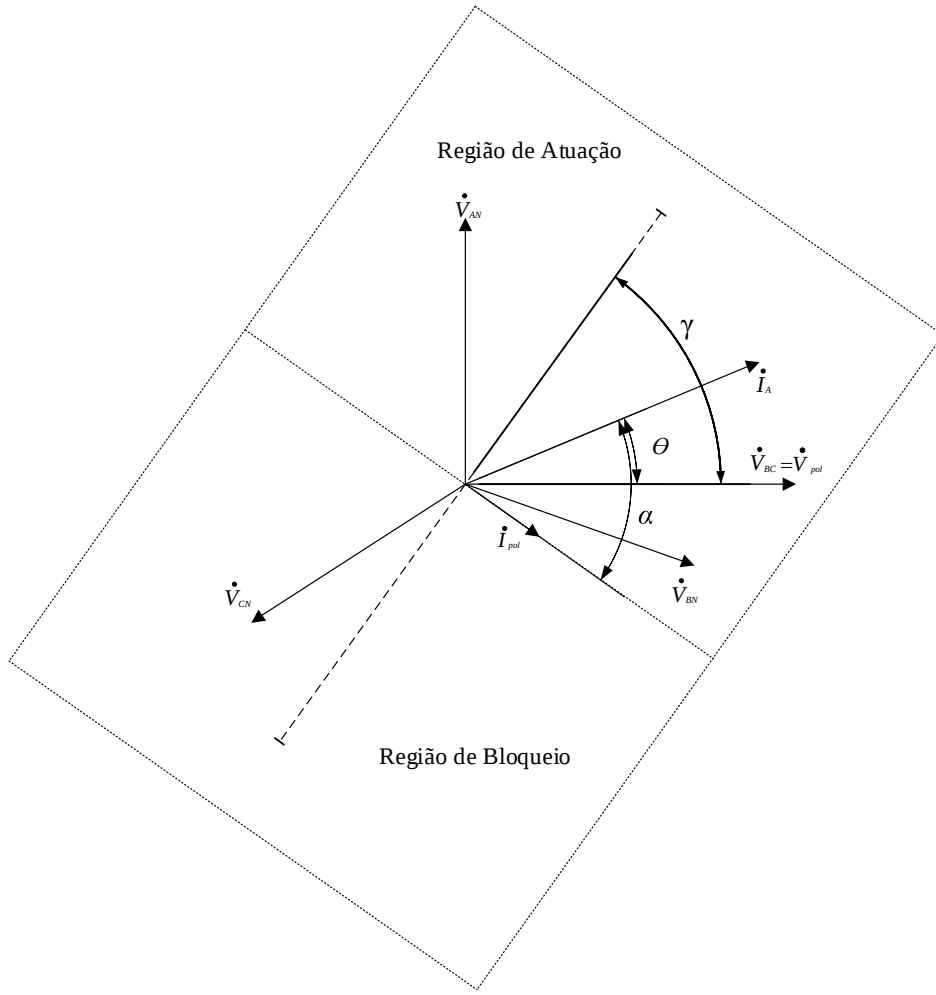


Figura 2.4 - Diagrama fasorial para estudo do relé direcional de sobrecorrente.

O conjugado da proteção direcional de sobrecorrente é definido por (2.1) (KINDERMANN, 2005), sabendo que α é o ângulo entre I_{pol} e I_A , K é a constante de proporcionalidade. Na Figura 2.4, tem-se que $\alpha = 90^\circ - (\gamma - \theta)$, sabendo que γ é o ângulo de máximo conjugado e θ é o ângulo entre a tensão de polarização V_{pol} e a corrente de polarização I_A .

$$C = K \cdot I_A \cdot V_{POL} \cdot \sin \alpha \quad (2.1)$$

Desta forma, (2.1) pode ser reescrita como:

$$C = K \cdot I_A \cdot V_{POL} \cdot \cos(\gamma - \theta) \quad (2.2)$$

De posse de (2.2), observa-se que o conjugado máximo se dá quando $\theta = \gamma$ e é nulo quando $\theta = \gamma \pm 90^\circ$, sendo esta a região de atuação do relé, no qual o seu conjugado é positivo. Fora da região do semiplano superior existe a região onde o conjugado é negativo, sendo esta a região de bloqueio do relé direcional. Estas duas regiões indicam onde o relé direcional de sobrecorrente atua ou bloqueia, dependendo da localização do defeito na linha de transmissão. Esta característica o torna capaz de ser utilizado em sistemas elétricos de potência malhados.

2.3 Coordenação de relés direcionais de sobrecorrente

Para o sistema radial ilustrado na Figura 2.5, ocorrendo defeito na linha de transmissão LT_1 , a proteção atua abrindo o disjuntor D_1 ocasionando apenas o desligamento de LT_1 . Caso o sistema de proteção D_1 falhe, a proteção desliga o disjuntor D_4 , retirando as linhas LT_1 , LT_2 , LT_3 e LT_4 de operação. No sistema radial apenas um relé de sobrecorrente seria o suficiente para atender os requisitos de seletividade e coordenação.

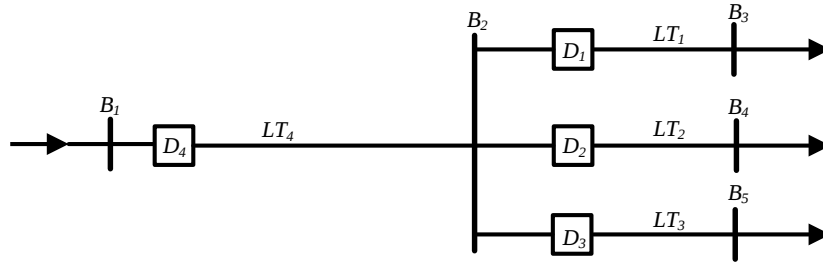


Figura 2.5 - Ilustração do sistema radial.

Para o sistema em malha ilustrado na Figura 2.6, ocorrendo defeito na linha de transmissão LT_1 , os tempos de atuações dos relés devem se comportar como (ANDERSON, 1999):

$$t_1 < t_3 \qquad t_2 < t_4 \qquad (2.3)$$

Do mesmo modo, caso ocorra o defeito na linha de transmissão LT_2 os tempos de atuações dos relés devem se comportar como:

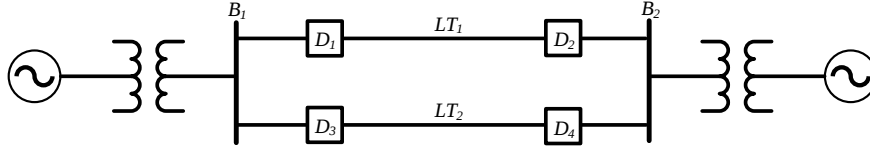


Figura 2.6 - Ilustração do sistema em malha.

$$t_3 < t_1 \qquad t_4 < t_2 \qquad (2.4)$$

Em (2.3) e (2.4), as informações são conflitantes, sendo assim não é possível coordenar com relés de sobrecorrente, pois estes não discriminam o sentido da corrente de curto circuito. Sendo necessário ao menos o uso do relé de sobrecorrente direcional, no qual a direcionalidade da corrente de falta soluciona o problema, pois para a falta em LT_1 se deve abrir apenas os disjuntores D_1 e D_2 . Para o defeito em LT_2 se deve abrir apenas os disjuntores D_3 e D_4 .

Os relés direcionais de sobrecorrente de tempo inverso obedecem a curva de atuação, sabendo que quanto maior o valor de corrente medida pelo relé I_M , menor é o tempo de atuação T do relé. As curvas de atuação genérica padronizadas que definem as curvas de tempo inverso seguem o padrão definido pela *American National Standards Institute* (ANSI) (IEEE, 1997), e pela *International Electrotechnical Commission* (IEC) (IEC, 1989), dada por:

$$T = M_T \cdot \left[\frac{A}{\left(\frac{I_M}{I_P} \right)^P - 1} + B \right] \qquad (2.5)$$

no qual A , B e P são constantes do tipo de curva, I_M é a corrente de curto circuito, M_T é o múltiplo de tempo e I_P é a corrente de *pick-up*. A partir de (2.5) e da Tabela 2.2, retirada de Bottura (2014), pode-se gerar as curvas de coordenação entre relés direcionais de sobrecorrente, como ilustrado na Figura 2.7, no qual as curvas são do tipo normal inversa. As curvas na Figura 2.7 têm múltiplo de tempo M_T de: 0,1s; 0,5s; 1s; 1,5s; 2s; 2,5s; 3s; 3,5s e 4s. Sendo que para M_T igual a 0,1s é a curva próxima ao eixo das abscissas e para M_T igual a 4s é a curva distante do eixo das abscissas.

Tabela 2.2 - Constantes de tempo inverso definidas pelos padrões ANSI e IEC.

Norma	Tipo de curva	A	P	B
IEC	Normal Inversa	0,140	0,020	0,000
	Muito Inversa	13,500	1,000	0,000
	Extremamente Inversa	80,000	2,000	0,000
ANSI	Moderadamente Inversa	0,051	0,002	0,114
	Muito Inversa	19,610	2,000	0,491
	Extremamente Inversa	28,200	2,000	0,122

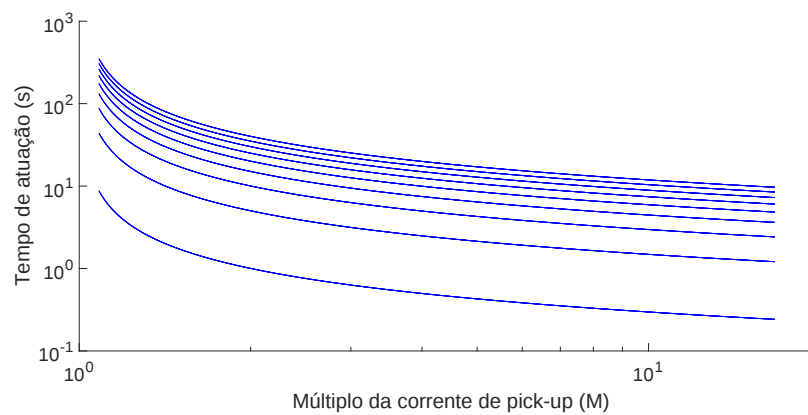


Figura 2.7 - Curvas de atuação do tipo normal inversa.

Nos sistemas de proteção, os relés não são parametrizados de forma independente, os ajustes são realizados de forma que um relé se coordene com outro. Este procedimento é realizado para que a proteção funcione de maneira rápida, segura e eficiente. Em linhas de transmissão que operam em configuração tipo anel não se tem seletividade utilizando apenas relés de sobrecorrente, por isto utiliza-se relés direcionais. A coordenação de relés é tarefa fundamental, pois, na ocorrência do curto-circuito, são relés coordenados que vão manter o desligamento da menor porção do sistema de energia elétrica possível.

Dois dispositivos em série estão coordenados quando o dispositivo mais próximo a falta falha na sua atuação e o segundo mais próximo da fonte atue (SATO; FREITAS, 2015). O tempo de atuação do segundo relé em relação ao primeiro é chamado de intervalo de tempo de coordenação (*ITC*). Para relés eletromecânicos usa-se *ITC* com valores da ordem de 0,3s a 0,4s, para relés microprocessados o *ITC* é da ordem de 0,1s a 0,2s (BOTTURA, 2014).

2.4 Modelagem do sistema de coordenação

O relé de distância é amplamente utilizado em linhas de transmissão como proteção principal. O relé direcional de sobrecorrente é tratado como proteção de retaguarda, no qual o tempo de atuação do relé direcional de sobrecorrente deve ser maior que a atuação da proteção de distância. O relé de distância de primeira zona Z_1 alcança 80% da linha de transmissão e o segunda zona Z_2 alcança de 150% a 160% (KINDERMANN, 2005). O tempo de atuação da proteção de distância de primeira zona T_{Z1} é instantâneo e o tempo da segunda zona T_{Z2} é definido entre 200ms e 300ms. Deve-se considerar o tempo de abertura do disjuntor T_a , sendo assim, o tempo de espera da proteção de distância é dado por:

$$\Delta T_{dist} = T_{Z2} + T_a \quad (2.6)$$

A proteção de retaguarda é realizada pelos relés direcionais de sobrecorrente e a coordenação destes relés é realizada aos pares, sendo a proteção de retaguarda local (P_{RL}) juntamente com a proteção de retaguarda remota (P_{RR}). O tempo de atuação da P_{RR} deve ser maior que o tempo de atuação da P_{RL} , obedecendo:

$$T_{PRR} - T_{PRL} \geq ITC \quad (2.7)$$

O tempo de atuação da proteção de retaguarda local T_{PRL} é maior que ΔT_{dist} , dado por:

$$T_{PRL} \geq \Delta T_{dist} \quad (2.8)$$

Os limites operativos do espaço de busca dos algoritmos são dados por:

$$M_{Tmin} \leq M_T \leq M_{Tmax} \quad (2.9)$$

$$Ip_{min} \leq Ip \leq Ip_{max} \quad (2.10)$$

sendo M_T o múltiplo de tempo e Ip a corrente de *pick-up*, definidas em (2.5).

A Figura 2.8, adaptada de Moro (2014), ilustra a coordenação entre os relés direcionais de sobrecorrente por meio do ITC e a coordenação da proteção de retaguarda local (P_{RL}) com o relé de distância por meio do ΔT_{dist} .

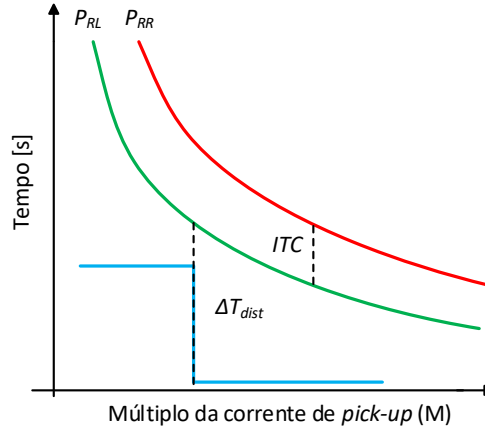


Figura 2.8 - Curva de coordenação entre relés direcionais e relé de distância.

Observa-se na Figura 2.8 a atuação do relé de distância denominado proteção principal e na sequência, com intervalo de tempo ΔT_{dist} a atuação da proteção de retaguarda local, por fim com intervalo de tempo ITC , a atuação da proteção de retaguarda remota.

2.5 Inspeção topológica

Inicialmente para se realizar o estudo de proteção com o uso de relés direcionais de sobrecorrente é realizada a análise de todo o sistema para definir os pares de relés, sendo eles a proteção local e proteção remota. A definição dos pares de relés é realizada utilizando a técnica descrita por Braga e Saraiva (1996), no qual é definida a matriz de incidência M_I . Esta matriz possui dimensão $m \times n$, no qual m é o número de relés presentes no estudo de coordenação e n é o número de barras do sistema malhado.

A Figura 2.9, retirada de Braga e Saraiva (1996), ilustra o sistema para criação da matriz de incidência $M_{I_{3 \times 6}}$ transposta. Todos os relés são identificados e os relés pertencentes a barra B que possuem seu ajuste de direcionalidade voltada para a

barra adjacente B_{adj} recebem o valor 1. Se a direcionalidade for da barra B_{adj} para a barra B recebem o valor -1 . Para os relés que não pertencem a barra B ou as barras adjacentes, recebem o valor *zero*, como dado por:

$$M_I = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix}^T \quad (2.11)$$

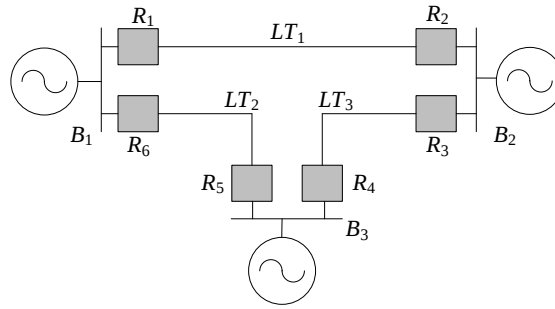


Figura 2.9 - Sistema elétrico malhado de três barras.

De posse da matriz M_I , utiliza-se o procedimento: i) para a n -ésima coluna de M_I percorre-se as m linhas até que se encontre o valor 1, ii) fixa-se a linha em que se verificou o valor 1 no passo i) e separa as colunas que possuem o valor -1 , iii) as colunas identificadas com o valor -1 em ii) são os relés de retaguarda remota do n -ésimo relé de retaguarda local, desde que não pertençam a mesma linha de transmissão (BRAGA; SARAIVA, 1996).

Considerando (2.11) e a Figura 2.9, para o curto-circuito em LT_1 , R_1 é o relé de retaguarda local pertencente a barra B e o relé R_5 é o relé de retaguarda remota, pois o fluxo da corrente de curto-circuito é R_5 e R_1 , uma vez que R_2 pertence a mesma linha de transmissão ou barra B_{adj} , o mesmo procedimento é realizado em toda a matriz, gerando a Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Conjunto de pares de relés definidos pela matriz M_I para o sistema da Figura 2.9.

P_{RL}	P_{RR}
R_1	R_5
R_2	R_4
R_3	R_1
R_4	R_6
R_5	R_3
R_6	R_2

2.6 Considerações finais

Apresentaram-se neste capítulo as proteções básicas utilizadas em linhas de transmissão dando destaque a proteção direcional de sobrecorrente e a teoria de coordenação, estes que são aspectos teóricos fundamentais para o entendimento da metodologia. No próximo capítulo será apresentada teoria sobre o processo de otimização.

CAPÍTULO 3

PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO APLICADA

Neste capítulo é apresentada a teoria relacionada à otimização. São abordadas as definições de sistema, modelo e simulação e os conceitos de processo de otimização. São discutidas as especificidades dos métodos de otimização determinísticos e heurísticos, com apresentação dos métodos de Quase-Newton, Nelder-Mead, algoritmo genético e particle swarm optimization.

3.1 Sistema, modelo e simulação

Sistema é o conjunto de elementos que interagem entre si, contribuindo para o comportamento comum, onde tal comportamento determina os resultados produzidos pelo sistema. Para [Churchman \(1971\)](#) sistema é o conjunto de partes coordenadas para realizar o conjunto de finalidades. Para [Rechtin e Maier \(1997\)](#) o sistema é a coleção de coisas ou elementos que, trabalhando juntos, produzem resultado impossível de ser obtido pelos elementos individualmente.

Modelo é a simplificação do sistema real, porém o modelo deve ser o mais representativo possível do sistema, para que se tenha resultados válidos permitindo assim a validação da simulação. Existem basicamente dois tipos de modelos, os modelos físicos, que são construídos através de protótipos e/ou plantas e os modelos matemáticos, que são notações simbólicas representadas por expressões matemáticas ([REIS, 2014](#)).

O simulador é a ferramenta computacional ou não (por exemplo túnel de vento¹), capaz de realizar os experimentos a partir do modelo matemático. A simulação é útil para prever os resultados do sistema real, alterando os parâmetros de entrada do modelo. [Gomes \(2017\)](#) afirma que a simulação é o processo de projetar o modelo do sistema real e conduzir experimentos com este modelo com o propósito de entender seu comportamento e/ou avaliar estratégias para sua operação.

O simulador é o dispositivo que serve para reproduzir o comportamento de determinados sistemas sob determinadas condições, imitando as circunstâncias reais do sistema. A aplicação do simulador no processo de otimização permite responder questões antes não observadas, levando em consideração a complexidade dos sistemas, tais como a variabilidade da ocorrência de eventos, complexidades associadas

¹Instalação que tem por objetivo simular o efeito do movimento de ar sobre ou ao redor de objetos sólidos.

a decisões e restrições próprias da dinâmica dos sistemas (PIDD, 1998).

3.2 Processo de otimização

O processo de otimização consiste basicamente em encontrar valores ótimos ou otimizados dos parâmetros do sistema ou do modelo. A Figura 3.1, retirada de Gomes (2017), ilustra três passos básicos no processo de otimização:

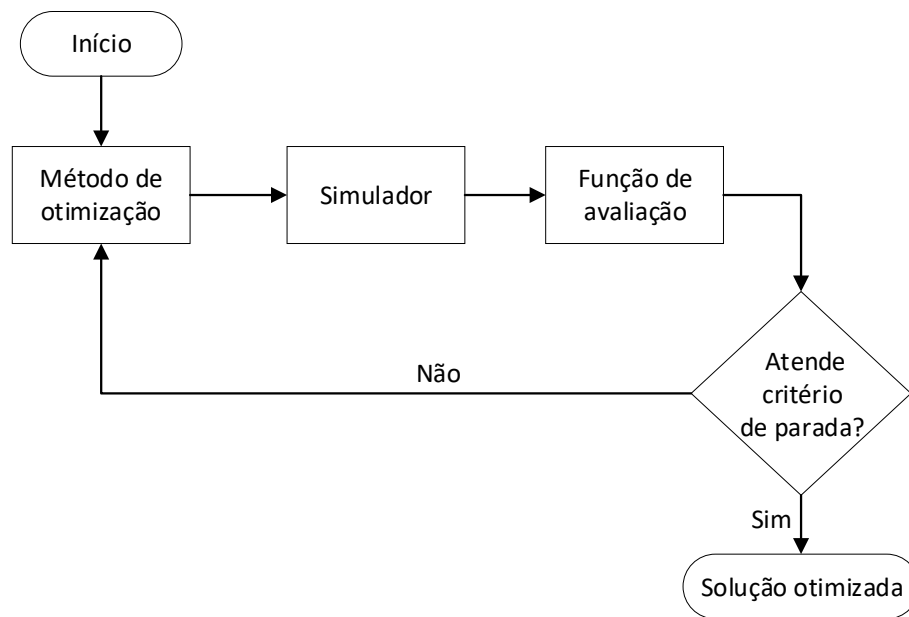


Figura 3.1 - Elementos básicos do processo de otimização.

Normalmente o simulador é composto pela modelagem matemática do sistema a ser otimizado. No processo de otimização, após a simulação é necessário avaliar cada solução encontrada. A função de avaliação é a métrica que mensura o quanto o conjunto de parâmetros simulados estão próximos da solução desejada. Basicamente, os métodos utilizados no processo de otimização podem ser determinísticos ou heurísticos (GOMES, 2017).

3.2.1 Métodos determinísticos

Os métodos de otimização determinísticos empregam técnicas analíticas para a minimização da função de avaliação. O método é determinístico se for possível prever os seus passos, conhecendo o ponto de partida. Estes métodos necessitam do valor

inicial dos parâmetros e se utilizado o mesmo valor inicial, o método sempre obtém à mesma resposta. Como este método precisa pelo menos da primeira derivada da função de avaliação, logo esta função tem que ser diferenciável no espaço de busca (GURDA et al., 1992).

Métodos que dependem de derivadas parciais de primeira ordem são baseados na matriz Jacobiana ou para os casos de derivadas parciais de segunda ordem na matriz Hessiana. Caso a função possua apenas uma variável x e se $f(x)$ é conhecida em qualquer ponto, pode-se determinar o valor de $f(x)$ na sua vizinhança por meio de $f(x + \Delta x)$ através da série de Taylor (ARENALES; DAREZZO, 2008).

$$f(x + \Delta x) = f(x) + \Delta x \cdot f'(x) + \frac{\Delta x^2}{2!} \cdot f''(x) + \frac{\Delta x^3}{3!} \cdot f'''(x) + \dots \quad (3.1)$$

Caso a função possua mais de uma variável é calculado o vetor gradiente de $f(x)$ utilizando derivadas parciais de primeira ordem dada por:

$$\nabla f = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x_1} \\ \frac{\partial f}{\partial x_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial f}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Ao medir as mudanças no gradiente de uma iteração para outra, o algoritmo tenta construir o modelo para a função de avaliação de forma a produzir convergência. Dentre os métodos determinísticos destaca-se o método de Quase-Newton, que é aplicado a otimização de problemas de sistemas não lineares e geram a aproximação da derivada segunda da função de avaliação nos casos sem restrições (ARENALES; DAREZZO, 2008). As técnicas de otimização de Quase-Newton normalmente geram matrizes definidas positivas. Um dos métodos de Quase-Newton utilizado na literatura é o BFGS, que obedece a condição da secante (RUGGIERO; LOPES, 1996).

O método de Quase-Newton é eficiente para funções contínuas. Algumas das vantagens do Quase-Newton são: i) pode ocorrer da resposta ser um ótimo local, ii) baixa eficiência para problemas discretos, iii) baixa eficiência para problemas com várias variáveis e iv) apresentam dificuldades em problemas de otimização multiobjetivo (RUGGIERO; LOPES, 1996).

Outro método determinístico que se destaca é o método de Nelder-Mead. Este método emprega técnicas analíticas para a minimização da função de avaliação. O algoritmo simplex de Nelder-Mead foi publicado em 1965 por John Ashworth Nelder e Roger Mead e se tornou um dos mais usados métodos determinísticos de busca direta para otimização não linear sem restrições (LAGARIAS et al., 1998).

O método de Nelder-Mead consiste de mecanismo de busca direta, que parte do simplex inicial $x_1, x_2, \dots, x_n, x_{n+1}$ em $\mathbb{R}^n$ com $n + 1$, o algoritmo tenta substituir o pior ponto, introduzindo novo vértice de maneira que resulta em novo simplex. Pontos de reposição candidatos são obtidas através de transformação do pior vértice através da série de operações de reflexão, expansão e contrações dentro e fora do poliedro sobre o centroide do simplex atual (GOMES, 2017).

O reposicionamento dos vértices leva em consideração quatro coeficientes: i) coeficiente de reflexão ρ , ii) coeficiente de expansão χ , iii) coeficiente de contração γ e iv) coeficiente de redução σ . Os quais devem satisfazer (NELDER; MEAD, 1965):

$$\rho > 0, \chi > 1, 0 < \gamma < 1, e 0 < \sigma < 1 \quad (3.3)$$

O algoritmo de Nelder-Mead faz operações de tal forma que o simplex busca através de suas formas alcançar a solução ótima. À medida que o tamanho do simplex vai diminuindo, o algoritmo torna-se local. Assim, é de se esperar encontrar, pelo menos, um ótimo local no final da sua busca.

Algumas das desvantagens do Nelder-Mead são: i) apresenta dificuldades de encontrar soluções ótimas globais, ii) apresenta dificuldades de análise do problema quando o mesmo envolve variáveis discretas, iii) quanto maior o número de variáveis do problema, torna-se difícil obter o ponto ótimo numericamente e iv) é pouco eficaz em tratar de problemas de otimização multiobjetivo.

3.2.2 Métodos heurísticos

Os métodos de otimização heurísticos são procedimentos que substituem tarefas difíceis por soluções direcionadas, a fim de encontrar soluções viáveis. As técnicas heurísticas são dependentes de fatores estocásticos. Este caráter probabilístico faz com que o algoritmo busque a solução ótima ou otimizada do problema (GOMES, 2017). A maneira de busca pela solução ótima nos métodos heurísticos se diferenciam dos métodos determinísticos. Enquanto o método determinístico produz a busca

baseada em cálculos numéricos, como gradiente e derivada da função de avaliação, os métodos heurísticos não necessitam de derivadas (LINDEN, 1992).

Dentre os métodos heurísticos destaca-se o algoritmo genético, este algoritmo inicia com população de indivíduos que representa o universo das possíveis soluções do problema. Cada ciclo de avaliação constitui-se uma geração e espera-se que o algoritmo ao final de determinado número de gerações alcance o indivíduo ótimo ou que o melhor indivíduo seja a solução otimizada. Os algoritmos genéticos necessitam que a população de indivíduos seja codificada em cromossomos de comprimento finito e a técnica clássica utiliza codificação binária para representar os cromossomos, porém em problemas onde se deseja maior precisão este tipo de codificação pode elevar o esforço computacional, ocasionando maior tempo de execução do algoritmo. A Figura 3.2, adaptada de Calixto (2012), ilustra a estrutura do algoritmo genético clássico.

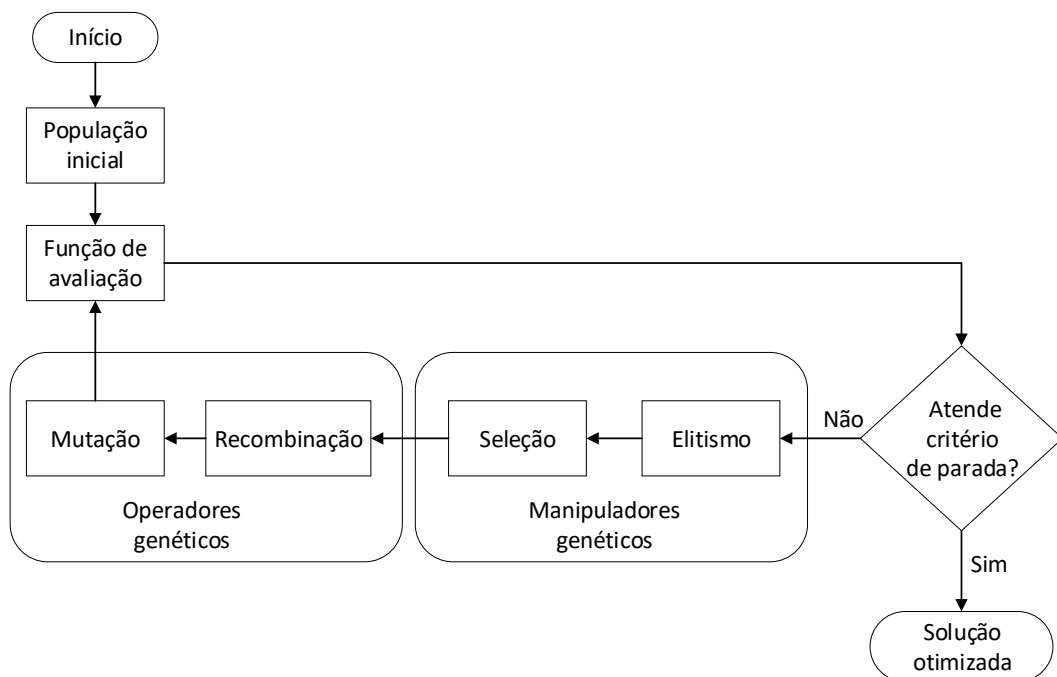


Figura 3.2 - Algoritmo Genético Clássico.

No algoritmo genético da Figura 3.2 é ilustrado: i) população inicial gerada aleatoriamente, ii) definição da função de avaliação, iii) aplicação do manipulador genético elitismo guardando uma cópia da melhor solução obtida até o momento, iv) aplicação

do manipulador genético de seleção para escolher os progenitores da próxima geração, v) aplicação do operador genético recombinação realizando o cruzamento entre os progenitores, vi) aplicação do operador genético mutação produzindo pequenas variações nos valores dos genes de cada solução.

A população do algoritmo genético é composta por indivíduos (cromossomos) que são as possíveis soluções do problema. Cada cromossomo é formado por genes, que é a sequência de parâmetros a serem otimizados (LINDEN, 1992). A função de avaliação é a nota dada para a qualidade de cada indivíduo na resolução do problema. Nela é incorporado todo o conhecimento do especialista sobre o problema a ser otimizado, incluindo as restrições (GOMES, 2017). Como critérios de parada para o algoritmo genético é possível encontrar na literatura: i) valor mínimo para a função de avaliação, ii) número de gerações, iii) estagnação do valor da função de avaliação, ii) baixa diversidade da população e iii) outros (LINDEN, 1992).

O manipulador genético elitismo consiste em manter os melhores indivíduos da população para que eles não desapareçam durante o processo de operação genética, nem corra o risco de não serem selecionados pelo método de seleção. Este processo de guardar o melhor indivíduo da população garante que a função de avaliação sempre dê pelo menos o resultado da avaliação igual ao da geração anterior, no pior caso. Este manipulador genético aumenta significativamente o desempenho do algoritmo genético (CALIXTO, 2012).

O manipulador genético seleção é a forma de escolher indivíduos da população para construir a próxima geração. Existem vários métodos de seleção, como: i) roleta, ii) *rank*, iii) torneio e iv) outros (LINDEN, 1992). A seleção por torneio consiste em escolher τ indivíduos no meio da população para o processo de cruzamento. O número de indivíduos selecionados dentre todos da população é o parâmetro denominado tamanho do torneio τ . Uma vez selecionados os indivíduos, os dois melhores dentre eles segundo a função de avaliação são escolhidos para serem pais no processo de cruzamento.

O processo de escolha dos τ indivíduos é aleatório, sem nenhum favorecimento para a escolha dentro da população. O valor mínimo para τ é igual a dois, pois do contrário não haverá competição e se τ for igual ao número de indivíduos da população, os vencedores são sempre os melhores, não havendo assim diversidade genética (LINDEN, 1992). O operador de recombinação é a troca de informações genéticas, a fim de aumentar a diversidade entre os indivíduos da população. Esta troca de informações genéticas é realizada a partir de pais escolhidos no processo de seleção (CALIXTO,

2012).

Dentre os operadores de recombinação, existe o cruzamento por dois pontos. Este operador sorteia dois pontos de corte nos dois cromossomos selecionados como pais. O primeiro filho é então formado pela parte do primeiro pai fora dos pontos de corte e pela parte do segundo pai entre os pontos de corte e o segundo filho é formado pelas partes restantes (LINDEN, 1992). O operador de mutação insere variabilidade dentro da população. Ele consiste basicamente em alterar os valores genéticos de forma aleatória em cada indivíduo, criando diversidade extra na população sem destruir o progresso já obtido com a busca. O operador de mutação garante que novas características genéticas sejam introduzidas na população, características que não aparecerá em nenhum outro indivíduo de gerações anteriores (LINDEN, 1992).

Dentre os operadores de mutação, existe o operador de mutação uniforme. Este operador seleciona aleatoriamente o componente $k \in \{1, 2, \dots, n\}$ do cromossomo $x = [x_1 \dots x_k \dots x_n]$ e gera o indivíduo $x' = [x_1 \dots x'_k \dots x_n]$ onde x'_k é o número aleatório com distribuição de probabilidade uniforme amostrado no intervalo L_B, U_B onde L_B e U_B são, respectivamente, os limites inferior e superior da variável x_k (MICHALEWICZ, 1996).

Outro método heurístico em destaque é a otimização por enxame de partículas (*particle swarm optimization* – PSO), este método é baseado no comportamento social de animais e é proposto por Kennedy e Eberhart (KENNEDY, 1995). Os autores propõem o método de otimização inspirado no comportamento social dos animais. Este comportamento pode ser local, específica de uma partícula ou globais onde se considera todas as partículas, determinando assim a trajetória deste conjunto na busca da solução ótima (MORO, 2014).

Cada partícula do enxame tem uma posição e a cada movimentação desta partícula no espaço de busca define-se a taxa de variação da posição (velocidade). Estas partículas tem memória individual e social, a memória individual é a melhor posição já alcançada por cada partícula e a memória social é a melhor posição alcançada pelo enxame até determinada iteração. Estas características são dadas por:

$$v_{k+1}^{N_p} = w_k \cdot v_k^{N_p} + C_1 \cdot r_1 \cdot (pbest_k^{N_p} - x_k^{N_p}) + C_2 \cdot r_2 \cdot (gbest_k - x_k^{N_p}) \quad (3.4)$$

$$x_{k+1}^{N_p} = x_k^{N_p} + v_{k+1}^{N_p} \quad (3.5)$$

onde i) k é o índice da iteração atual, ii) w_k é o coeficiente de inércia para cada iteração k , iii) C_1 e C_2 são os parâmetros cognitivo e social respectivamente, iv) r_1 e r_2 são valores aleatórios no intervalo $[0, 1]$, v) N_p é o índice da partícula que varia de 1 a N , sendo N o número total de partículas, vi) $pbest_k^{N_p}$ corresponde a melhor posição da partícula N_p , vii) $gbest_k$ é a melhor posição dentre todas as partículas do enxame, viii) $x_k^{N_p}$ e $x_{k+1}^{N_p}$ correspondem à posição da partícula N_p na iteração k e $k + 1$ respectivamente e ix) $v_k^{N_p}$ e $v_{k+1}^{N_p}$ são as velocidades da partícula N_p na iteração k e $k + 1$ respectivamente (MORO, 2014).

O coeficiente de inercia w_k é o passo de busca das partículas, onde o valor elevado deste coeficiente direciona as partículas para exploração ampla (busca global) no espaço de possível solução, enquanto o valor pequeno de w_k permite a busca local (LEE, 2008).

3.2.3 Métodos híbridos

Na tentativa de melhorar os processos de otimização, hibridizam os algoritmos determinísticos com os algoritmos heurísticos, buscando rápida convergência e precisão. O uso de algoritmos híbridos se faz com o intuito de combinar cada técnica a fim de superar as desvantagens que apresentam individualmente na resolução de problemas (GOMES, 2017).

Na hibridização, normalmente o processo inicia-se com o algoritmo heurístico e após determinada quantidade de geração/iteração, o algoritmo heurístico entrega a sua melhor solução para o algoritmo determinístico. A melhor solução do método heurístico é a estimativa inicial do método determinístico, que tenta encontrar nova solução dentro do espaço de busca e no pior caso, retorna a mesma solução, caso esta seja um ótimo local. A solução encontrada pelo algoritmo determinístico é inserida na população/conjunto de soluções do método heurístico, dando continuidade no processo de otimização. Este processo de troca de soluções continua até que algum dos critérios de parada seja satisfeito (REIS, 2014).

3.3 Considerações finais

A proposta deste capítulo é dar base para o entendimento do capítulo de metodologia. Apresentou-se neste capítulo os aspectos teóricos do processo de otimização usando algoritmo de Quase-Newton, Nelder-Mead, algoritmo genético, otimização por exame de partículas e híbrido. No próximo capítulo é apresentada a metodologia para aplicação da otimização na coordenação de relés direcionais de sobrecorrente.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia usada para otimização da coordenação de relés direcionais de sobrecorrente, construção do simulador e a definição das variáveis de entrada do modelo, função de avaliação e a descrição do processo de otimização utilizando métodos determinísticos, métodos heurísticos e híbridos.

4.1 Construção do simulador

As etapas de construção do simulador são: i) definição dos pares de relés, ii) cálculo dos níveis de curto-circuito, iii) definição do tipo de curva a ser utilizada bem como as constantes A , B e P estabelecidas na Tabela 2.2, iv) definição das correntes de *pick-up* e v) definição dos múltiplos de tempo. As variáveis de saída do simulador são: i) tempo de atuação da proteção de retaguarda local T_{PRL} , ii) tempo de atuação da proteção de retaguarda remota T_{PRR} e iii) intervalo de tempo de coordenação ITC . A Figura 4.1 ilustra o fluxograma do simulador.

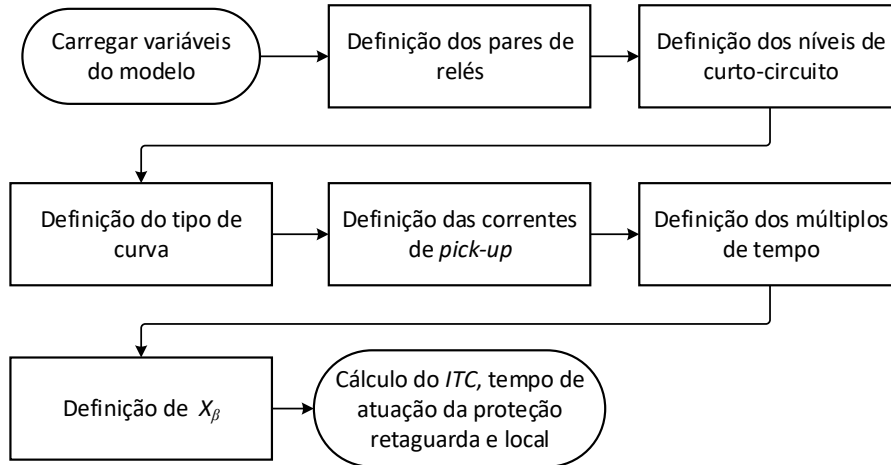


Figura 4.1 - Fluxograma do simulador

A definição dos pares de relés é realizada através de inspeção topológica do sistema elétrico, utilizando a matriz de incidência definida em (2.11). Para cada linha de transmissão, os níveis de curto-circuito trifásico a 1% do início da linha de transmissão $I_{CC_{pr}}$ é simulado no sistema computacional de Análise de Faltas Simultâneas (ANAFAS) da CEPEL (2016) e os valores encontrados são inseridos no simulador

proposto, usa-se o curto-circuito trifásico a 1% do início da linha de transmissão por ser o mais severo, podendo assim, obter os menores tempos de atuação. A definição do tipo de curva é realizada utilizando a Tabela 2.2, na qual são definidos os tempos inversos (IEC, 1989) (IEEE, 1997). A corrente de *pick-up* I_p é definida como 20% acima da corrente nominal do sistema (KINDERMANN, 2005).

O $I_{CC_{pr}}$ é o vetor com os valores de corrente de curto-circuito trifásico a 1% do início da linha de transmissão, medido em n relés, dado por:

$$I_{CC_{pr}} = [I_{CC_{l_1}}, I_{CC_{l_2}}, \dots, I_{CC_{l_n}}] \quad (4.1)$$

Com a definição dos pares de relés a partir da matriz de incidência em (2.11) e dos valores de curto-circuito em (4.1), cria-se o vetor de pares, dado por:

$$I_{CC_{pa}} = [P_{RL_1}, P_{RR_2}, I_{CC_{r_2}}, I_{CC_{l_1}}, \dots, P_{RL_n}, P_{RR_j}, I_{CC_{r_j}}, I_{CC_{l_n}}] \quad (4.2)$$

sendo P_{RL} é a proteção de retaguarda local, P_{RR} é a proteção de retaguarda remota, I_{CC_r} é a corrente de curto-circuito percebida pela proteção remota quando a falta for na linha da proteção de retaguarda local e I_{CC_l} é a corrente de curto-circuito trifásico na própria linha da proteção de retaguarda local a 1% do início da linha em sistemas radial ou em anel conforme ilustrado na Figura 4.2.

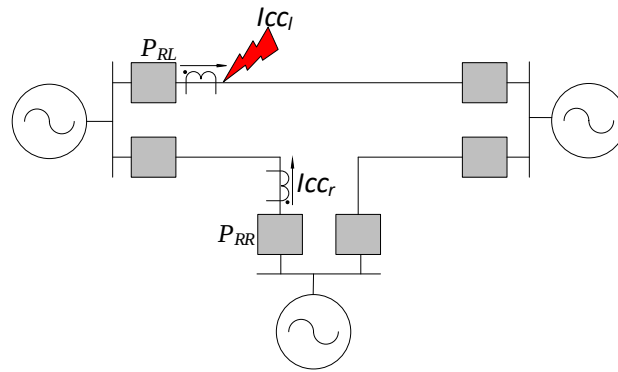


Figura 4.2 - Sistema elétrico considerando um par de relés.

Definida todas as variáveis de entrada, pode-se construir o vetor x_β , dado por:

$$x_\beta = [I_{CC_{pr}}, I_{CC_{pa}}, M_{T1}, I_{P1}, M_{T2}, I_{P2}, \dots, M_{Tn}, I_{Pn}] \quad (4.3)$$

Com a definição de x_β pode-se definir o tempo de atuação da proteção de retaguarda local, tempo de atuação da proteção de retaguarda remota e intervalo do tempo coordenação.

4.1.1 Limites de operação das variáveis do modelo

Os valores de corrente de *pick-up* devem ser encontrados de forma que o relé não atue quando o sistema elétrico de potência estiver sem defeitos. O ajuste de *pick-up* deve ser maior que o carregamento nominal do sistema e menor que o valor de curto-circuito ou de sobrecarga. A corrente nominal na linha de transmissão, leva em consideração a corrente nominal de cada equipamento instalado no trecho da linha de transmissão onde se efetuará o estudo de proteção.

No trabalho proposto adotou-se a margem de segurança de 20%. Caso o relé a ser parametrizado não possua o ajuste encontrado, a corrente de *pick-up* então deve ser ajustada para o próximo valor acima, respeitando a regra dada por:

$$I_{nom20\%} = 1,2 \cdot I_{nom} \quad (4.4)$$

Outro fator que limita a corrente mínima de *pick-up* I_M é o múltiplo da corrente de *pick-up* M , ilustrado na Figura 4.3, no qual há o M_{max} que em geral as curvas padronizadas utilizam $M_{max} = 20$. Para obter a corrente de *pick-up* mínima que não ultrapasse o valor pré-determinado, utiliza-se:

$$I_{M_M} = \frac{I_{CC_{pr}}}{M_{max}} \quad (4.5)$$

sendo que $I_{CC_{pr}}$ são valores de corrente de curto-circuito trifásico a 1% do início da linha de transmissão e I_{M_M} é a mínima corrente de *pick-up* quando o M é máximo. Logo o limite inferior adotado para a faixa de ajuste da corrente de *pick-up* é o maior valor entre $I_{nom20\%}$ e I_{M_M} , dado por:

$$I_{(p,min)} = \max(I_{nom20\%}, I_{M_M}) \quad (4.6)$$

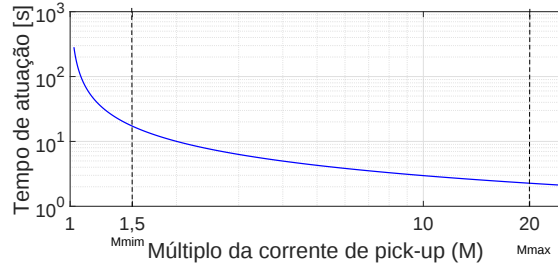


Figura 4.3 - Limites operativos sobre a curva normal inversa.

O limite superior da corrente de *pick-up* é o máximo da corrente configurável no relé $I_{p,max}$. Após a definição dos limites inferiores e superiores da corrente de *pick-up*, o intervalo de busca é dado por:

$$I_p = [I_{p,min}, I_{p,max}] \quad (4.7)$$

Após a determinação dos limites de ajustes da corrente de *pick-up*, deve-se determinar os limites de ajustes do múltiplo de tempo M_T . O tempo de atuação da proteção de retaguarda local deve ser maior que ΔT_{dist} , como definido em (2.8). A forma de atender (2.8) é inserindo os valores mínimos de M_T nas restrições a serem atendidas no simulador.

Para que o tempo de atuação da proteção de retaguarda local T_{PRL} seja maior que ΔT_{dist} , restringe-se o espaço de busca, utilizando: i) valor pré-determinado para ΔT_{dist} , ii) corrente de curto-circuito a 1% do início da linha de transmissão $I_{CC_{pr}}$, iii) a mínima corrente de *pick-up* em (4.7) e iv) as constantes A , B e P retiradas da Tabela 2.2. A partir de (2.5) pode-se determinar M_{Tmin} , dado por:

$$M_{Tmin} = \frac{\Delta T_{dist}}{\frac{A}{\left(\frac{I_{CC_{pr}}}{I_{p,min}}\right)^P - 1} + B} \quad (4.8)$$

De posse de (4.8) é possível restringir o espaço de busca para que não haja possibilidades de simular tempos de atuação do relé direcional de corrente menor que as atuações do relé de distância, que geralmente em linhas de grande porte, o relé de distância é o relé principal do sistema de proteção. Definindo o limite inferior do múltiplo de tempo, o limite superior é definido como o maior ajuste disponível de

cada relé, assim tem-se:

$$M_T = [M_{Tmin}, M_{Tmax}] \quad (4.9)$$

4.2 Processo de otimização

Para o processo de otimização são testados dois algoritmos determinísticos e dois algoritmos heurísticos, sendo eles posteriormente hibridizados. O processo de otimização inicia-se com a definição dos parâmetros a serem otimizados. Estes parâmetros no modelo proposto é parte do vetor x_β , que com n relés é dado por:

$$x = [M_{T1}, I_{p1}, M_{T2}, I_{p2}, \dots, M_{Tn}, I_{pn}] \quad (4.10)$$

Os testes de otimização são iniciados utilizando os métodos determinísticos Quase-Newton e Nelder-Mead. Por se tratar de métodos determinísticos, o algoritmo necessita do valor inicial x_0 . Para simulações dos métodos determinísticos o valor definido para x_0 é encontrado estocasticamente utilizando **abordagem semi-empírica**. Primeiramente são gerados ξ valores de x_0 utilizando distribuição uniforme nos limites inferiores e superiores dos parâmetros. Os ξ valores de x_0 são utilizados como chute inicial do processo de otimização, um a um. A semente que originar a melhor solução, é utilizada como média para geração de novos ξ valores de x_0 . Estes novos ξ valores de x_0 , agora originado através de novo cálculo da distribuição uniforme, são novamente otimizados e encontrado a melhor solução para os algoritmos determinísticos.

Após os testes com os métodos determinísticos, realiza-se novos testes com os métodos heurísticos nuvens de partículas (PSO) e algoritmo genético (AG). Para aplicação do PSO, inicialmente é definido o número de partículas, geradas aleatoriamente dentro dos limites operativos das variáveis do problema. Cada partícula é um vetor como dado por (4.10). Para o algoritmo genético, primeiramente define a população inicial gerada aleatoriamente. Cada indivíduo/cromossomo é dado por (4.10). Para formar cada indivíduo, utiliza-se de duas populações: i) de corrente de *pick-up* e ii) do múltiplo de tempo. Cada população possui dimensão diferente e devem coexistir no momento da aplicação da função de avaliação, formando único cromossomo, como ilustrado na Figura 4.4. Os valores de I_p e M_T devem obedecer as faixas de ajustes definida em (4.7) e (4.9) para todos os métodos de otimização.

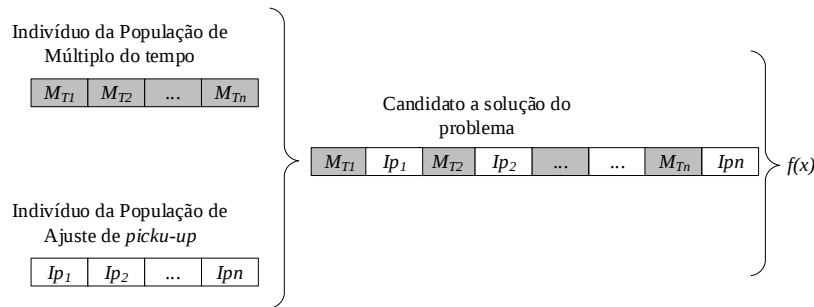


Figura 4.4 - Construção do indivíduo da população do algoritmo genético.

Ainda como teste de comparação entre os métodos de otimização, são hibridizados: i) algoritmo genético com Quase-Newton, ii) algoritmo genético com Nelder-Mead, iii) nuvens de partículas com Quase-Newton e iv) nuvens de partículas com Nelder-Mead. O critério de parada para os métodos determinísticos são o valor da função de avaliação e o número de iterações e para os métodos heurísticos e híbridos são o valor da função de avaliação e o número de gerações/iteraões. Para todos os métodos otimização propostos, a coordenação segue os seguintes passos: i) inspeção topológica, determinando os pares de relés e as correntes de curto-circuito, ii) determinação dos limites operativos, iii) aplicação do método de otimização, iv) obtenção da melhor resposta do ajuste de *pick-up* e múltiplo de tempo e v) análise dos resultados, caso atenda as restrições o sistema estará coordenado, conforme ilustra a Figura 4.5.

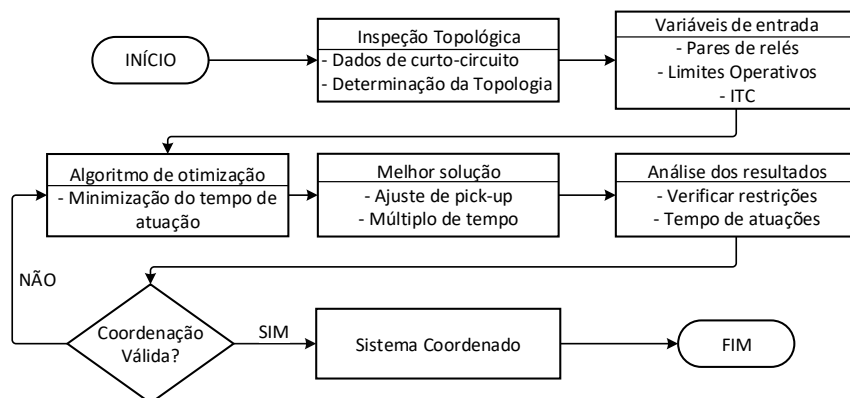


Figura 4.5 - Fluxograma da metodologia de otimização.

4.2.1 Definição da função de avaliação

No problema de coordenação proposto, é considerada a melhor resposta aquela que tiver menor somatório do tempo de atuação das proteções de retaguarda local T_{PRL} , para isto os algoritmos de otimização buscam valores de I_p e M_T para que o somatório dos tempos de atuação dos relés sejam o menor possível. Entretanto, para tal problema existem as penalizações caso as soluções não atendam as restrições.

As restrições que devem ser atendidas são: i) atuação da proteção de retaguarda remota deve ser atrasada em relação a proteção de retaguarda local (2.7), ii) o tempo de atuação da proteção de retaguarda local deve ser maior que a proteção de distância, quando houver (2.8), iii) os valores de M_T devem estar dentro dos limites operativos (2.9), iv) os valores de I_p devem estar dentro dos limites operativos (2.10). Caso algum dos valores de entrada resulte em não atendimento de alguma das restrições, a função de avaliação para este conjunto de entrada deve ser penalizada.

Para penalizar as soluções que não atendam as restrições, adota-se o valor predeterminado P_n e este valor é somado ao tempo de atuação dos relés, fazendo com que a solução possa ser descartada. Caso a restrição seja atendida P_n recebe o valor *zero*. Logo, a função de avaliação é dada por:

$$f(x) = \min \sum_{j=1}^n T_{PRL_j} + P_{n_j} \quad (4.11)$$

4.3 Validação do simulador

Para validar o simulador proposto, são comparados os resultados obtidos com resultados de estudos conhecidos da literatura, utilizando os mesmos parâmetros de entrada dos trabalhos publicados. São realizadas simulações utilizando o simulador proposto e analisando o valor da função de avaliação. O desempenho entre os métodos de otimização propostos é mensurado utilizando o valor da função de avaliação e do tempo gasto no processo de otimização. Para mensurar o desempenho entre a metodologia proposta e os resultados da literatura, obtêm-se o valor da função de avaliação dos resultados da literatura através de simulação e otimiza-se utilizando a metodologia proposta, comparando os resultados ao final do processo. A Figura 4.6 ilustra o processo de comparação e validação da metodologia proposta.

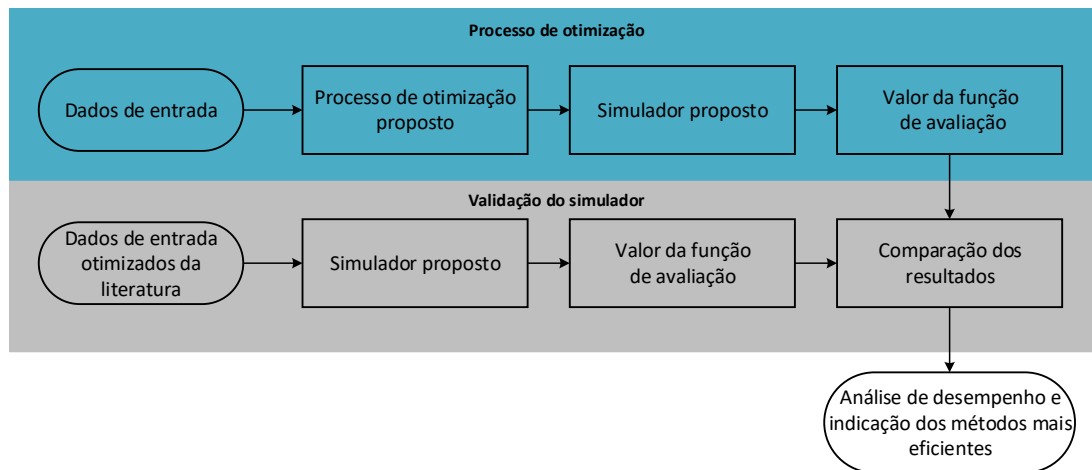


Figura 4.6 - Fluxograma de validação do simulador.

4.4 Considerações finais

Apresentou-se neste capítulo a metodologia proposta para a construção do simulador que será aplicado no processo de otimização em ajustes de relés direcionais de sobrecorrente. Apresentou ainda as variáveis manipuláveis dos métodos de otimização determinísticos Quase-Newton e Nelder-Mead, métodos heurísticos algoritmo genético, nuvens de partículas e métodos híbridos. No próximo capítulo serão apresentados os resultados obtidos utilizando a metodologia proposta.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados dois estudos de casos para validação da metodologia proposta. São apresentados os resultados de simulação e otimização, comparando com resultados obtidos na literatura. São utilizados métodos de otimização determinísticos, heurísticos e híbridos e os resultados são analisados com foco no valor da função de avaliação e no tempo consumido pelos processos de simulação e otimização.

5.1 Modelagem e validação

Foram utilizados dois sistemas elétricos que têm como intuito validar a metodologia proposta de otimização dos ajustes de relés direcionais de sobrecorrente. O primeiro sistema elétrico (Estudo de Caso 1) foi retirado de [Moro \(2014\)](#) e é sistema composto por quatro barramentos, quatro linhas, dois geradores e oito relés direcionais de sobrecorrente, todos possuindo a mesma faixa de ajuste, tanto para a corrente de *pick-up* quanto para o múltiplo de tempo.

O segundo sistema elétrico (Estudo de Caso 2) foi retirado de [Bottura \(2014\)](#) e é parte do sistema elétrico brasileiro com 43 barras, onze linhas de transmissão e 22 relés direcionais de sobrecorrente. Este sistema faz parte da rede elétrica básica em 138kV situada em São Paulo na concessão da Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista (CTEEP). Os valores de curto-circuito foram calculados a partir da base de dados versão BR1206B disponibilizado pelo ONS. Adotou-se a curva normal inversa (Figura 2.7 e Figura 4.3) para os dois estudos de casos.

A Figura 5.1, adaptada de [Moro \(2014\)](#), apresenta o sistema elétrico de transmissão do Estudo de Caso 1, utilizado para validação do simulador. A Tabela 5.1 dispõe os valores de correntes de curtos-circuitos trifásico a 1% do início da linha de transmissão, escolheu-se o curto-circuito trifásico por ter maior magnitude de corrente. Na Tabela 5.1 são dispostos: i) linha de transmissão LT na qual é simulada o curto-circuito trifásico, ii) proteção de retaguarda local P_{RL} onde é simulado o curto-circuito, iii) proteção de retaguarda remota P_{RR} , iv) magnitude da corrente de curto-circuito trifásico I_{CC_l} medida na P_{RL} e v) magnitude da corrente de curto-circuito trifásico I_{CC_r} medido na P_{RR} .

Para validar o simulador foi necessário obter os dados originais de entrada dos Estudo de Caso 1 em [Moro \(2014\)](#) e Estudo de Caso 2 em [Bottura \(2014\)](#). De posse dos dados

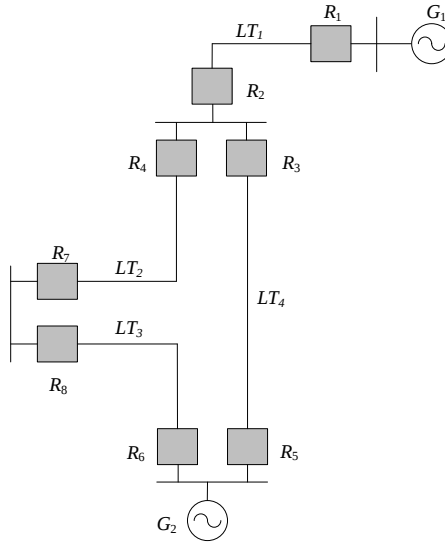


Figura 5.1 - Sistema elétrico de transmissão do Estudo de Caso 1.

Tabela 5.1 - Valores de correntes de curtos-circuitos trifásico a 1% da linha de transmissão para o sistema elétrico do Estudo de Caso 1.

LT	P_{RL}	P_{RR}	$I_{CC_l} [A]$	$I_{CC_r} [A]$
LT_1	R_1	—	6476,2	—
LT_1	R_2	R_5	2705,2	1200,2
LT_1	R_2	R_7	2705,2	1505,1
LT_4	R_3	R_7	4879,2	1505,1
LT_4	R_3	R_1	4879,2	3381,2
LT_4	R_4	R_5	4576,6	1200,2
LT_4	R_4	R_1	4576,6	3381,2
LT_4	R_5	R_8	9648,3	1008,4
LT_3	R_6	R_3	9451,2	804,1
LT_2	R_7	R_6	3502,9	3502,9
LT_3	R_8	R_4	1764,2	1764,2

de entrada originais dos estudos de casos, foi possível realizar análises utilizando o simulador proposto e comparar os valores de saída do simulador proposto com os valores de saída dos trabalhos publicados por Moro (2014) e Bottura (2014). Na Tabela 5.2 são dispostos os valores de entrada utilizados por Moro (2014) e os valores de saída obtidos por Moro (2014) e pelo simulador proposto. A Figura 5.2, adaptada de Bottura (2014), ilustra o sistema elétrico de transmissão do Estudo de Caso 2 que também foi utilizado para validação do simulador.

A Tabela 5.3 dispõe os valores de correntes de curtos-circuitos trifásico a 1% do início da transmissão, na qual: i) linha de transmissão LT que é simulada o curto-circuito trifásico, ii) proteção de retaguarda local P_{RL} onde é simulado o curto-circuito,

Tabela 5.2 - Valores comparativos de Moro (2014) $\times$ simulador proposto para o sistema elétrico do Estudo de Caso 1.

Valores utilizados por Moro (2014)			Valores de saída de Moro (2014)	Valores de saída do simulador proposto
Relé	M_T	I_p [A]	Tempo de atuação [s]	Tempo de atuação [s]
R_1	0,21092	630,06	0,6190	0,6190
R_2	0,07111	770,06	0,3912	0,3912
R_3	0,06725	600,88	0,2201	0,2201
R_4	0,14310	799,22	0,5641	0,5641
R_5	0,08984	601,97	0,2204	0,2204
R_6	0,19560	764,25	0,5308	0,5308
R_7	0,13933	647,92	0,5682	0,5682
R_8	0,10880	799,58	0,9548	0,9548
Função de avaliação			4,0686	4,0687

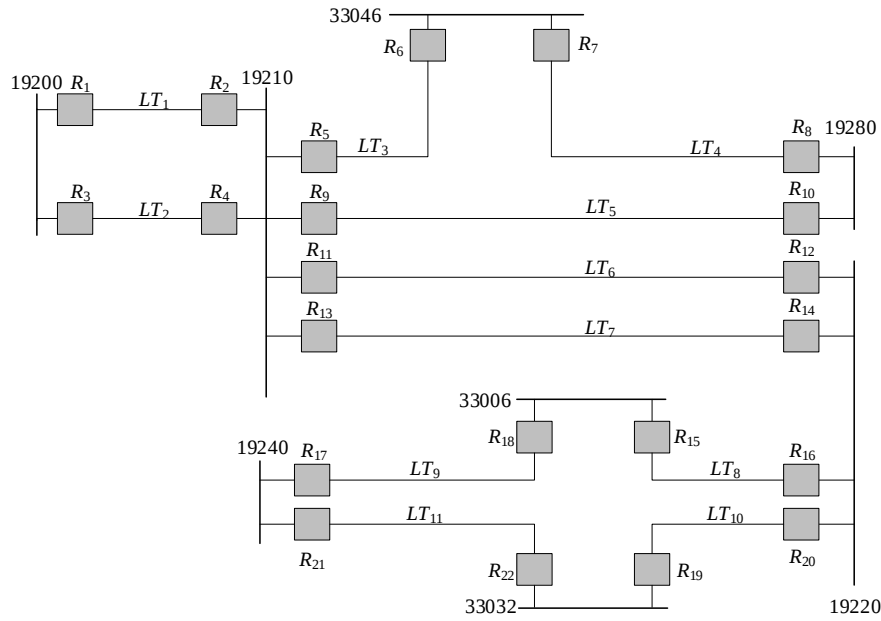


Figura 5.2 - Sistema elétrico de transmissão do Estudo de Caso 2.

iii) proteção de retaguarda remota P_{RR} , iv) magnitude da corrente de curto-circuito trifásico I_{CC_t} medida na P_{RL} e v) magnitude da corrente de curto-circuito trifásico I_{CC_r} medido na P_{RR} . Na Tabela 5.4 são dispostos os valores de entrada utilizados por Bottura (2014) e os valores de saída obtidos por Bottura (2014) e pelo simulador proposto.

A validação do simulador foi realizada comparando os valores de saída de dois sistemas elétricos com valores de saída do simulador proposto. Para estes dois estudos de caso é possível observar nas Tabela 5.2 e Tabela 5.4, que os valores de saída do simulador proposto e os valores de saída encontrados na literatura são semelhantes, validando o simulador proposto.

Tabela 5.3 - Valores de correntes de curtos-circuitos trifásico a 1% da linha de transmissão para o sistema elétrico do Estudo de Caso 2.

LT	P_{RL}	P_{RR}	$I_{CCI} [A]$	$I_{CCR} [A]$	LT	P_{RL}	P_{RR}	$I_{CCI} [A]$	$I_{CCR} [A]$
LT_1	R_1	R_4	3137,2	2120,2	LT_6	R_{11}	R_{14}	8152	1640,4
LT_1	R_2	R_6	9201,1	1742,8	LT_6	R_{12}	R_{13}	6461,2	2796,6
LT_1	R_2	R_{10}	9201,1	2080,5	LT_6	R_{12}	R_{15}	6461,2	1752,8
LT_1	R_2	R_{12}	9201,1	1654,5	LT_6	R_{12}	R_{19}	6461,2	1518,9
LT_1	R_2	R_{14}	9201,1	1654,5	LT_7	R_{13}	R_6	8152	1775,9
LT_2	R_3	R_2	3137,2	2120,2	LT_7	R_{13}	R_{10}	8152	2120
LT_2	R_4	R_6	9201,1	1742,8	LT_7	R_{13}	R_{12}	8152	1640,4
LT_2	R_4	R_{10}	9201,1	2080,5	LT_7	R_{14}	R_{11}	6461,2	2796,6
LT_2	R_4	R_{12}	9201,1	1654,5	LT_7	R_{14}	R_{15}	6461,2	1752,8
LT_2	R_4	R_{14}	9201,1	1654,5	LT_7	R_{14}	R_{19}	6461,2	1518,9
LT_3	R_5	R_{10}	7960,2	2074,4	LT_8	R_{15}	R_{17}	5878,5	5326,2
LT_3	R_5	R_{12}	7960,2	1655,3	LT_8	R_{16}	R_{11}	7416,4	2775,1
LT_3	R_5	R_{14}	7960,2	1655,3	LT_8	R_{16}	R_{13}	7416,4	2775,1
LT_3	R_6	R_8	4545,9	3775,6	LT_8	R_{16}	R_{19}	7416,4	1478,2
LT_4	R_7	R_5	3101,5	2321,1	LT_9	R_{17}	R_{22}	11993,4	1521
LT_4	R_8	R_9	15980,3	1515,5	LT_9	R_{18}	R_{16}	2508,8	1941,4
LT_5	R_9	R_6	7596,3	1726	LT_{10}	R_{19}	R_{21}	4489	3691,6
LT_5	R_9	R_{12}	7596,3	1647,1	LT_{10}	R_{20}	R_{11}	7627,6	2769,5
LT_5	R_9	R_{14}	7596,3	1647,1	LT_{10}	R_{20}	R_{13}	7627,6	2769,5
LT_5	R_{10}	R_7	15525,7	1426,6	LT_{10}	R_{20}	R_{15}	7627,6	1703,1
LT_6	R_{11}	R_6	8152	1775,9	LT_{11}	R_{21}	R_{18}	12072,8	1736,2
LT_6	R_{11}	R_{10}	8152	2120	LT_{11}	R_{22}	R_{20}	2706,4	1919,3

Tabela 5.4 - Valores comparativos de Bottura (2014) $\times$ simulador proposto para o sistema elétrico do Estudo de Caso 2.

Valores utilizados por Bottura (2014)			Valores de saída de Bottura (2014)	Valores de saída do simulador proposto
Relé	M_T	$I_p [A]$	Tempo de atuação [s]	Tempo de atuação [s]
R_1	0,15	402	0,5006	0,5006
R_2	0,23	468	0,5246	0,5246
R_3	0,15	408	0,5043	0,5043
R_4	0,23	462	0,5222	0,5222
R_5	0,23	412,8	0,5281	0,5281
R_6	0,19	362,4	0,5127	0,5127
R_7	0,16	387,6	0,5274	0,5274
R_8	0,23	799,2	0,5215	0,5215
R_9	0,22	418,8	0,5161	0,5161
R_{10}	0,23	784	0,5233	0,5233
R_{11}	0,23	408	0,5217	0,5217
R_{12}	0,22	347,2	0,5115	0,5115
R_{13}	0,23	408	0,5217	0,5217
R_{14}	0,22	348	0,5119	0,5119
R_{15}	0,20	400	0,5070	0,5070
R_{16}	0,22	400	0,5121	0,5121
R_{17}	0,23	788,4	0,5755	0,5755
R_{18}	0,15	492,8	0,6347	0,6347
R_{19}	0,18	400	0,5086	0,5086
R_{20}	0,22	401,6	0,5078	0,5078
R_{21}	0,23	604,2	0,5217	0,5217
R_{22}	0,15	468,8	0,5885	0,5885
Função de avaliação			11,6035	11,6036

O computador utilizado para a execução das simulações possui a configuração: i) sistema operacional Windows[®] 10 64bits, ii) processador Intel[®] Core i5-6200U 2,30GHz, iii) memória RAM de 8,00Gb e iv) disco rígido de 500Gb.

5.2 Determinação dos limites operativos

Para realizar o processo de otimização é necessário primeiramente determinar os limites operativos dos dois sistemas elétricos estudados, para que o algoritmo de busca tenha limitações nos valores de corrente de *pick-up* I_p (4.7) e valores do múltiplo de tempo M_T (4.9). Os valores de I_p obtidos por meio da análise do carregamento nominal do sistema, podem assumir 20% da corrente nominal e estão dispostos na Tabela 5.5. Utilizou no sistema elétrico do Estudo de Caso 1 $ITC = 0,2s$. Aplicando (4.8) obteve-se os limites de M_T dispostos na Tabela 5.6.

Tabela 5.5 - Limites inferiores e superiores de I_p para o sistema elétrico do Estudo de Caso 1.

Relé	$I_{p,min}$ [A]	$I_{p,max}$ [A]
R_1	600	1000
R_2	600	1000
R_3	600	1000
R_4	600	1000
R_5	600	1000
R_6	600	1000
R_7	600	1000
R_8	600	1000

Tabela 5.6 - Limites de M_T para o sistema elétrico do Estudo de Caso 1.

Relé	$M_{T,min}$	$M_{T,max}$
R_1	0,14	1
R_2	0,09	1
R_3	0,06	1
R_4	0,09	1
R_5	0,07	1
R_6	0,14	1
R_7	0,08	1
R_8	0,05	1

Para o Estudo de Caso 2, primeiramente realizou-se o cálculo das correntes de curto-circuito trifásico a 1% do início da linha de transmissão utilizando a base de dados do ONS, versão BR1603A com 43 barras, onze linhas de transmissão e 22 relés direcionais de corrente. Estes valores estão dispostos na Tabela 5.7.

Na Tabela 5.8 são dispostos os valores de I_{pmin} e I_{pmax} . Observa-se que I_{pmin} é definido entre os valores máximos de I_{MM} e $I_{non20\%}$. Na Tabela 5.9 estão dispostos os limites de M_T obtidos a partir de (4.8) para o Estudo de Caso 2. No Estudo de caso 2, a proteção de distância é a proteção principal e para o limite máximo de M_T , é utilizado o maior valor permitido para o relé digital utilizado.

Tabela 5.7 - Valores de correntes de curtos-circuitos trifásico a 1% da linha de transmissão para o sistema elétrico do Estudo de Caso 2.

LT	P_{RL}	P_{RR}	$I_{CCI} [A]$	$I_{CCR} [A]$	LT	P_{RL}	P_{RR}	$I_{CCI} [A]$	$I_{CCR} [A]$
LT_1	R_1	R_4	3258,1	2244,7	LT_6	R_{11}	R_{14}	9262,6	1692,4
LT_1	R_2	R_6	10327,1	1753,8	LT_6	R_{12}	R_{13}	6991,1	3181,2
LT_1	R_2	R_{10}	10327,1	2086,0	LT_6	R_{12}	R_{15}	6991,1	3181,2
LT_1	R_2	R_{12}	10327,1	1706,7	LT_6	R_{12}	R_{19}	6991,1	1565,3
LT_1	R_2	R_{14}	10327,1	1706,7	LT_7	R_{13}	R_6	9262,6	1791,2
LT_2	R_3	R_2	3258,1	2244,7	LT_7	R_{13}	R_{10}	9262,6	2130,5
LT_2	R_4	R_6	10327,1	1753,8	LT_7	R_{13}	R_{12}	9262,6	1692,4
LT_2	R_4	R_{10}	10327,1	2086,0	LT_7	R_{14}	R_{11}	6991,1	3181,2
LT_2	R_4	R_{12}	10327,1	1706,7	LT_7	R_{14}	R_{15}	6991,1	1850,2
LT_2	R_4	R_{14}	10327,1	1706,7	LT_7	R_{14}	R_{19}	6991,1	1565,3
LT_3	R_5	R_{10}	9061,6	2075,2	LT_8	R_{15}	R_{17}	6486,2	5337,6
LT_3	R_5	R_{12}	9061,6	1705,0	LT_8	R_{16}	R_{11}	8204,3	3148,4
LT_3	R_5	R_{14}	9061,6	1705,0	LT_8	R_{16}	R_{13}	8204,3	3148,4
LT_3	R_6	R_8	4991,3	4220,7	LT_8	R_{16}	R_{19}	8204,3	1520,0
LT_3	R_7	R_5	3106,8	2332,9	LT_9	R_{17}	R_{22}	12246,8	1582,0
LT_4	R_8	R_9	16240,6	1637,0	LT_9	R_{18}	R_{16}	3220,6	2037,4
LT_5	R_9	R_6	8710,7	1734,0	LT_{10}	R_{19}	R_{21}	4472,2	3681,9
LT_5	R_9	R_{12}	8710,7	1697,6	LT_{10}	R_{20}	R_{11}	8467,4	3143,2
LT_5	R_9	R_{14}	8710,7	1697,6	LT_{10}	R_{20}	R_{13}	8467,4	3143,2
LT_5	R_{10}	R_7	15759,8	1562,5	LT_{10}	R_{20}	R_{15}	8467,4	1795,7
LT_6	R_{11}	R_6	9262,6	1791,2	LT_{11}	R_{21}	R_{18}	12701	2159,9
LT_6	R_{11}	R_{10}	9262,6	2130,5	LT_{11}	R_{22}	R_{20}	2865,4	2061,3

Tabela 5.8 - Limites inferiores e superiores de I_p para o sistema elétrico do Estudo de Caso 2.

Relé	$I_{MM} [A]$	$I_{non20\%} [A]$	$I_{pmin} [A]$	$I_{pmax} [A]$
R_1	162,91	399,6	399,6	12000
R_2	516,36	399,6	516,36	12000
R_3	162,91	399,6	399,6	12000
R_4	516,36	399,6	516,36	12000
R_5	435,08	346,8	435,08	2400
R_6	249,57	346,8	346,8	2400
R_7	155,34	346,8	346,8	2400
R_8	812,03	346,8	812,03	4800
R_9	435,54	399,6	435,54	2400
R_{10}	787,99	399,6	787,99	3200
R_{11}	463,13	346,8	463,13	12000
R_{12}	349,56	346,8	349,56	1600
R_{13}	463,13	346,8	463,13	12000
R_{14}	349,56	346,8	349,56	1600
R_{15}	324,31	399,6	399,6	6400
R_{16}	410,21	399,6	410,21	1600
R_{17}	612,34	360	612,34	2400
R_{18}	161,03	360	360	640
R_{19}	223,61	399,6	399,6	1600
R_{20}	423,37	399,6	399,6	1600
R_{21}	635,10	360	635,10	2400
R_{22}	146,27	360	360	1600

5.3 Otimização utilizando métodos determinísticos

Para otimizar com os métodos determinísticos de Nelder-Mead e Quase-Newton é necessário definir o valor inicial de x_0 . São gerados de forma aleatória 50 valores iniciais de x_0 utilizando distribuição uniforme nos limites inferiores e superiores dos

Tabela 5.9 - Limites de M_T para o sistema elétrico do Estudo de Caso 2.

Relé	M_{Tmin}	M_{Tmax}
R_1	0,16	3,2
R_2	0,22	3,2
R_3	0,16	3,2
R_4	0,22	3,2
R_5	0,23	3,2
R_6	0,20	3,2
R_7	0,16	3,2
R_8	0,22	3,2
R_9	0,22	3,2
R_{10}	0,22	3,2
R_{11}	0,22	3,2
R_{12}	0,22	3,2
R_{13}	0,22	3,2
R_{14}	0,22	3,2
R_{15}	0,21	3,2
R_{16}	0,22	3,2
R_{17}	0,22	3,2
R_{18}	0,16	3,2
R_{19}	0,18	3,2
R_{20}	0,23	3,2
R_{21}	0,22	3,2
R_{22}	0,15	3,2

parâmetros. Os 50 vetores x_0 foram otimizados e o que originou a menor função de avaliação foi utilizado como média para geração de 50 novos valores x_0 através de novo cálculo utilizando distribuição uniforme. Este processo foi realizado seis vezes para o Estudo de Caso 1 e dez vezes para o Estudo de Caso 2, até encontrar chutes iniciais que produzissem valores de saída desejados.

As Figura 5.3 e Figura 5.4 apresentam a dispersão dos valores da função de avaliação $f(x)$ após o processo de otimização pelos valores iniciais de M_T e I_p , respectivamente, para cada simulação do Estudo de Caso 1, utilizando os métodos de Nelder-Mead e Quase-Newton. Observa-se nas Figura 5.3(a), Figura 5.3(b), Figura 5.4(a) e Figura 5.4(b) que quando os valores de M_T e I_p vão diminuindo, os valores de $f(x)$ também diminuem.

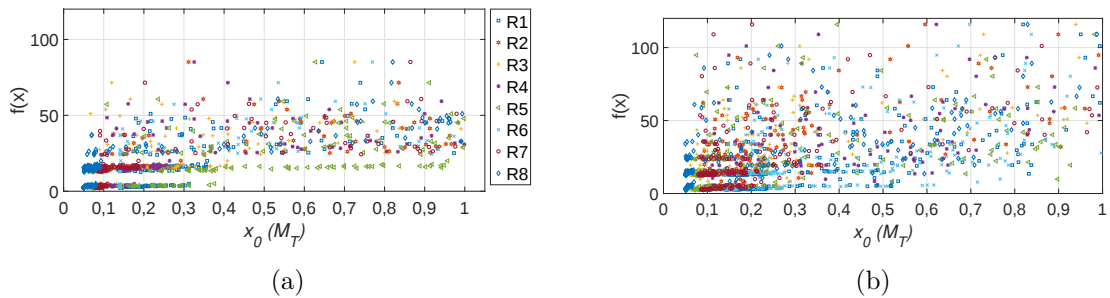


Figura 5.3 - Gráfico de dispersão de M_T para o Estudo de Caso 1: (a) método de Nelder-Mead e (b) método de Quase-Newton.

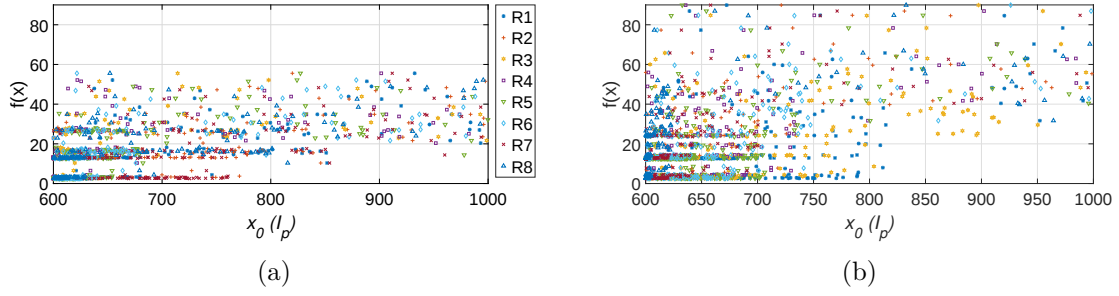


Figura 5.4 - Gráfico de dispersão de I_p para o Estudo de Caso 1: (a) método de Nelder-Mead e (b) método de Quase-Newton.

As Figura 5.5 e Figura 5.6 apresentam a dispersão dos valores da função de avaliação $f(x)$ após o processo de otimização pelos valores iniciais de M_T e I_p , respectivamente, para cada simulação do Estudo de Caso 2, utilizando os métodos de Nelder-Mead e Quase-Newton. Observa-se nas Figura 5.5(a), Figura 5.5(b), Figura 5.6(a) e Figura 5.6(b) que quando os valores de M_T e I_p vão diminuindo, os valores de $f(x)$ também diminuem.

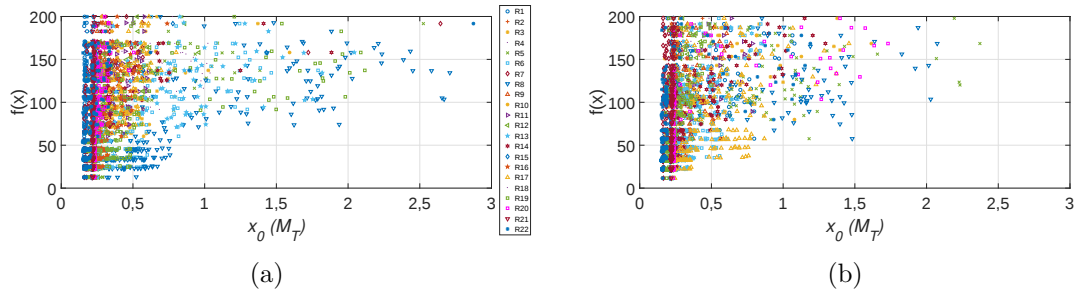


Figura 5.5 - Gráfico de dispersão de M_T para o Estudo de Caso 2: (a) método de Nelder-Mead e (b) método de Quase-Newton.

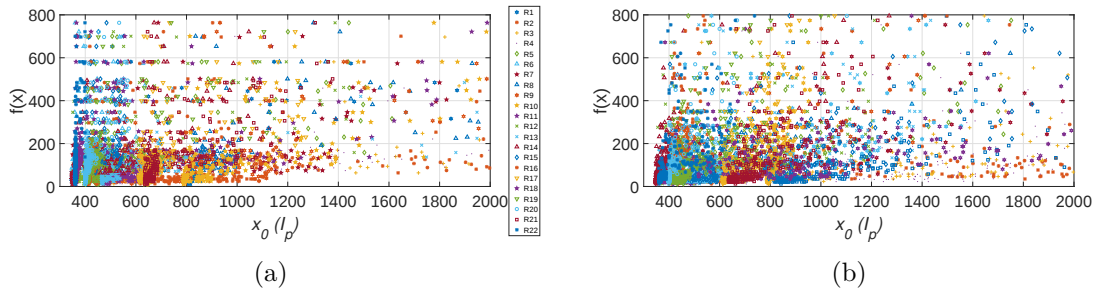


Figura 5.6 - Gráfico de dispersão de I_p para o Estudo de Caso 2: (a) método de Nelder-Mead e (b) método de Quase-Newton.

Foram utilizadas 300 simulações para encontrar os valores de x_0 para cada método, Nelder-Mead e Quase-Newton. As Tabela 5.10(a) e Tabela 5.10(b) dispõem os valores de x_0 encontrados pelos dois métodos para o Estudo de Caso 1.

Tabela 5.10 - Valores de x_0 do sistema elétrico do Estudo de Caso 1.

(a) Nelder-Mead			(b) Quase-Newton		
Relé	M_T	I_p	Relé	M_T	I_p
R_1	0,14	600,17	R_1	0,14	602,15
R_2	0,09	600,04	R_2	0,09	600,05
R_3	0,06	600,93	R_3	0,06	602,95
R_4	0,09	614,84	R_4	0,09	600,01
R_5	0,07	605,82	R_5	0,07	600,02
R_6	0,14	600,52	R_6	0,14	600,52
R_7	0,08	601,46	R_7	0,08	609,15
R_8	0,05	600,13	R_8	0,05	600,05

Para encontrar os valores iniciais de x_0 do Estudo de Caso 2, foram utilizadas 500 simulações para ambos os métodos determinísticos. As Tabela 5.11(a) e Tabela 5.11(b) dispõem os valores de x_0 encontrados pelos dois métodos para o Estudo de Caso 2.

Tabela 5.11 - Valores de x_0 do sistema elétrico do Estudo de Caso 2.

(a) Nelder-Mead			(b) Quase-Newton		
Relé	M_T	I_p	Relé	M_T	I_p
R_1	0,16	403,23	R_{12}	0,22	349,72
R_2	0,22	519,86	R_{13}	0,22	463,68
R_3	0,16	422,33	R_{14}	0,22	349,56
R_4	0,22	516,40	R_{15}	0,21	402,57
R_5	0,23	436,70	R_{16}	0,22	422,71
R_6	0,20	347,37	R_{17}	0,23	617,84
R_7	0,16	346,83	R_{18}	0,16	461,52
R_8	0,22	812,29	R_{19}	0,18	400,05
R_9	0,22	436,13	R_{20}	0,23	400,88
R_{10}	0,22	787,99	R_{21}	0,22	637,46
R_{11}	0,23	464,73	R_{22}	0,15	360,35

5.3.1 Coordenação dos relés direcionais utilizando Nelder-Mead

Após a determinação dos valores de x_0 encontrados de forma semi-empírica (Tabela 5.10(a) e Tabela 5.11(a)), estes são utilizados como valores iniciais no processo de otimização utilizando o método de Nelder-Mead. Para todos os dois estudos de caso utilizando o método de Nelder-Mead, adotou-se como critério de parada a estabilização da função de avaliação com estagnação de até doze iterações ou limite máximo de vinte iterações. O limite máximo de vinte iterações foi definido após várias simulações na qual observou-se que este valor era suficiente para parar o processo de ambos os métodos determinísticos. A Figura 5.7 apresenta o desempenho

do processo de otimização utilizando o método de Nelder-Mead para o Estudo de Caso 1, onde é observado que na segunda iteração o valor mínimo da função de avaliação é atingido, permanecendo estagnado até o final do processo de otimização.

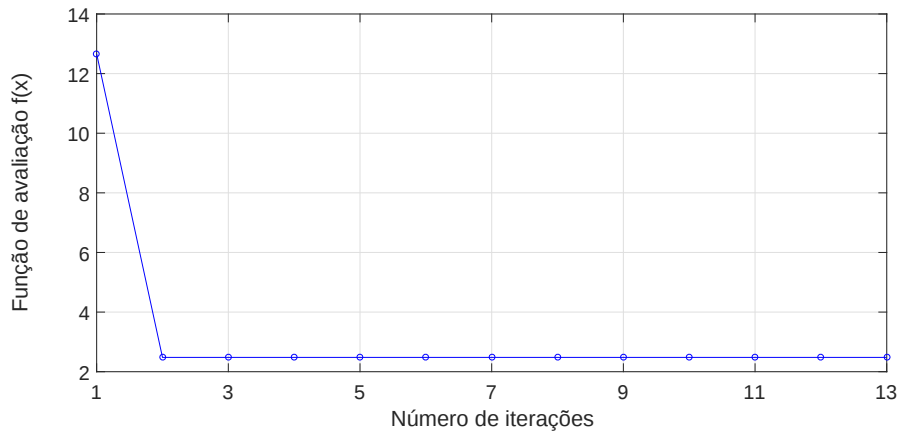


Figura 5.7 - Desempenho do processo de otimização com Nelder-Mead: Estudo de Caso 1.

Os resultados dos ajustes de múltiplo de tempo e corrente de *pick-up* e o tempo de atuação para cada relé utilizando Nelder-Mead estão dispostos na Tabela 5.12. Neste processo foi obtido valor da função de avaliação de 2,47s com duas iterações. Na Tabela 5.13 estão dispostos os valores de *ITC* e tempo de atuação mínimo dos pares de relés para o sistema elétrico do Estudo de Caso 1 utilizando Nelder-Mead. Observa-se que a restrição de 0,2s adotada para o *ITC* foi atendida para todos os relés.

Tabela 5.12 - Ajustes com Nelder-Mead: Estudo de Caso 1.

Relé	M_T	I_p [A]	T_{PRL} [s]
R_1	0,14	600,13	0,40
R_2	0,09	600,02	0,41
R_3	0,06	600,54	0,20
R_4	0,09	600,18	0,30
R_5	0,07	600,10	0,17
R_6	0,14	604,36	0,35
R_7	0,08	607,93	0,31
R_8	0,05	600,01	0,32
Função de avaliação	2,47s		
Número de iterações	2		

A Figura 5.8 apresenta dois coordenogramas, o da Figura 5.8(a) apresenta o par R_4 (relé direcional de retaguarda local) e R_1 (relé direcional de retaguarda remoto), além

Tabela 5.13 - Valores de ITC e tempo de atuação mínimo com Nelder-Mead: Estudo de Caso 1.

P_{RL}	P_{RR}	ITC [s]	T_{PRL} [s]	T_{PRR} [s]
R_2	R_5	0,29	0,41	0,70
R_2	R_7	0,20	0,41	0,61
R_3	R_7	0,42	0,20	0,61
R_3	R_1	0,36	0,20	0,56
R_4	R_5	0,40	0,30	0,70
R_4	R_1	0,25	0,30	0,56
R_5	R_8	0,50	0,17	0,67
R_6	R_3	1,09	0,35	1,43
R_7	R_6	0,23	0,31	0,55
R_8	R_4	0,26	0,32	0,58

da curva de proteção do relé de distância Z . Observa-se que a atuação preferencial é a do relé de distância seguida de R_4 e por fim R_1 , respeitando o ITC . Para o curto-circuito trifásico a 1% de R_4 , caso o relé de distância não atue, o relé R_4 atuaria com tempo de 0,30s e R_1 atuaria com tempo de 0,56s, obtendo 0,25s de ITC . De maneira semelhante, para o curto-circuito trifásico a 1% de R_7 , caso o relé de distância não atue, o relé R_7 atuaria com tempo de 0,31s e R_6 atuaria com tempo de 0,55s, obtendo 0,23s de ITC , como disposto na Tabela 5.13. Esta análise pode ser realizada para todos os outros relés e observa-se que todos eles estão coordenados e sem restrições violadas.

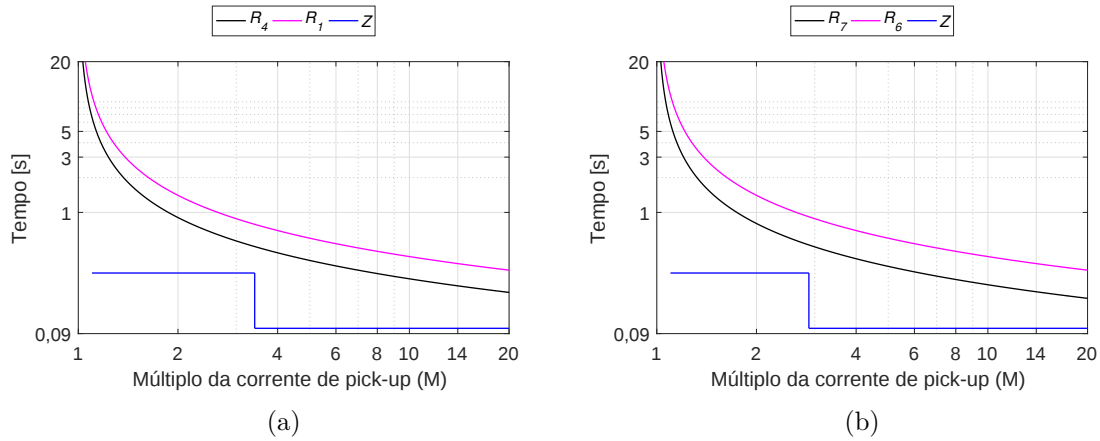


Figura 5.8 - Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 1 com Nelder-Mead: (a) R_4 e R_1 , (b) R_7 e R_6 .

A Figura 5.9 apresenta o desempenho do processo de otimização utilizando o método de Nelder-Mead para o Estudo de Caso 2, onde é observado que da quinta iteração até a décima quinta iteração ocorre estagnação. Na décima sexta iteração ocorre

redução no valor da função de avaliação com nova estagnação até o limite máximo de iteração.

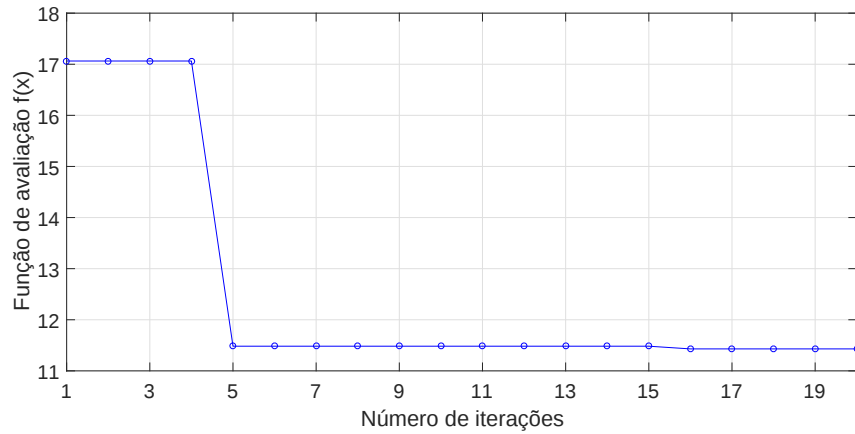


Figura 5.9 - Desempenho do processo de otimização com Nelder-Mead: Estudo de Caso 2.

Os resultados dos ajustes de múltiplo de tempo e corrente de *pick-up* e o tempo de atuação para cada relé utilizando Nelder-Mead estão dispostos na Tabela 5.14. Neste processo foi obtido valor da função de avaliação de 11,45s com vinte iterações. Na Tabela 5.15 estão dispostos os valores de *ITC* e tempo de atuação mínimo dos pares de relés para o sistema elétrico do Estudo de Caso 2 utilizando Nelder-Mead. Observa-se que a restrição de 0,2s adotada para o *ITC* foi atendida para todos os relés.

A Figura 5.10 apresenta dois coordenogramas, o da Figura 5.10(a) apresenta o par R_{15} (relé direcional de retaguarda local) e R_{17} (relé direcional de retaguarda remoto), além da curva de proteção do relé de distância Z . Observa-se que a atuação preferencial é a do relé de distância seguida de R_{15} e por fim R_{17} , respeitando o *ITC*. Para o curto-circuito trifásico a 1% de R_{15} , caso o relé de distância não atue, o relé R_{15} atuaria com tempo de 0,51s e R_{17} atuaria com tempo de 0,73s, obtendo 0,22s de *ITC*. De maneira semelhante, para o curto-circuito trifásico a 1% de R_3 , caso o relé de distância não atue, o relé R_3 atuaria com tempo de 0,54s e R_2 atuaria com tempo de 1,04s, obtendo 0,50s de *ITC*, como disposto na Tabela 5.15. Esta análise pode ser realizada para todos os outros relés e observa-se que todos eles estão coordenados e sem restrições violadas.

Tabela 5.14 - Ajustes com Nelder-Mead: Estudo de Caso 2.

Relé	M_T	I_p [A]	T_{PRL} [A]
R_1	0,16	403,17	0,52
R_2	0,22	519,82	0,50
R_3	0,16	422,30	0,54
R_4	0,23	516,40	0,52
R_5	0,23	436,64	0,51
R_6	0,20	347,35	0,51
R_7	0,16	346,80	0,50
R_8	0,23	812,28	0,52
R_9	0,22	436,11	0,50
R_{10}	0,22	788,00	0,50
R_{11}	0,23	464,60	0,52
R_{12}	0,22	349,72	0,50
R_{13}	0,22	463,67	0,50
R_{14}	0,24	349,56	0,54
R_{15}	0,21	402,39	0,51
R_{16}	0,22	422,68	0,50
R_{17}	0,23	617,84	0,52
R_{18}	0,16	461,46	0,57
R_{19}	0,20	399,99	0,57
R_{20}	0,26	400,85	0,58
R_{21}	0,22	637,43	0,50
R_{22}	0,15	378,21	0,51
Função de avaliação	11,45s		
Número de iterações	20		

Tabela 5.15 - Valores de ITC e tempo de atuação mínimo com Nelder-Mead: Estudo de Caso 2.

P_{RL}	P_{RR}	ITC [s]	T_{PRL} [s]	T_{PRR} [s]	P_{RL}	P_{RR}	ITC [s]	T_{PRL} [s]	T_{PRR} [s]
R_1	R_4	0,55	0,52	1,08	R_{11}	R_{14}	0,53	0,52	1,05
R_2	R_6	0,35	0,50	0,85	R_{12}	R_{13}	0,29	0,50	0,78
R_2	R_{10}	1,07	0,50	1,57	R_{12}	R_{15}	0,45	0,50	0,95
R_2	R_{12}	0,46	0,50	0,96	R_{12}	R_{19}	0,51	0,50	1,01
R_2	R_{14}	0,54	0,50	1,04	R_{13}	R_6	0,34	0,50	0,84
R_3	R_2	0,50	0,54	1,04	R_{13}	R_{10}	1,03	0,50	1,53
R_4	R_6	0,33	0,52	0,85	R_{13}	R_{12}	0,46	0,50	0,96
R_4	R_{10}	1,39	0,52	1,91	R_{14}	R_{11}	0,28	0,54	0,82
R_4	R_{12}	0,43	0,52	0,96	R_{14}	R_{15}	0,40	0,54	0,95
R_4	R_{14}	0,52	0,52	1,04	R_{14}	R_{19}	0,47	0,54	1,01
R_5	R_{10}	1,06	0,51	1,58	R_{15}	R_{17}	0,22	0,51	0,73
R_5	R_{12}	0,44	0,51	0,96	R_{16}	R_{11}	0,32	0,50	0,83
R_5	R_{14}	0,53	0,51	1,04	R_{16}	R_{13}	0,28	0,50	0,79
R_6	R_8	0,45	0,51	0,96	R_{16}	R_{19}	0,53	0,50	1,03
R_7	R_5	0,45	0,50	0,94	R_{17}	R_{22}	0,20	0,52	0,72
R_8	R_9	0,63	0,52	1,15	R_{18}	R_{16}	0,40	0,57	0,96
R_9	R_6	0,36	0,50	0,86	R_{19}	R_{21}	0,30	0,57	0,86
R_9	R_{12}	0,46	0,50	0,96	R_{20}	R_{11}	0,25	0,58	0,83
R_9	R_{14}	0,55	0,50	1,05	R_{20}	R_{13}	0,21	0,58	0,79
R_{10}	R_7	0,23	0,50	0,73	R_{20}	R_{15}	0,39	0,58	0,97
R_{11}	R_6	0,32	0,52	0,84	R_{21}	R_{18}	0,22	0,50	0,71
R_{11}	R_{10}	1,01	0,52	1,53	R_{22}	R_{20}	0,59	0,51	1,09

5.3.2 Coordenação dos relés direcionais utilizando Quase-Newton

Os valores de x_0 encontrados de forma semi-empírica (Tabela 5.10(b) e Tabela 5.11(b)) foram utilizados como valores iniciais no processo de otimização com

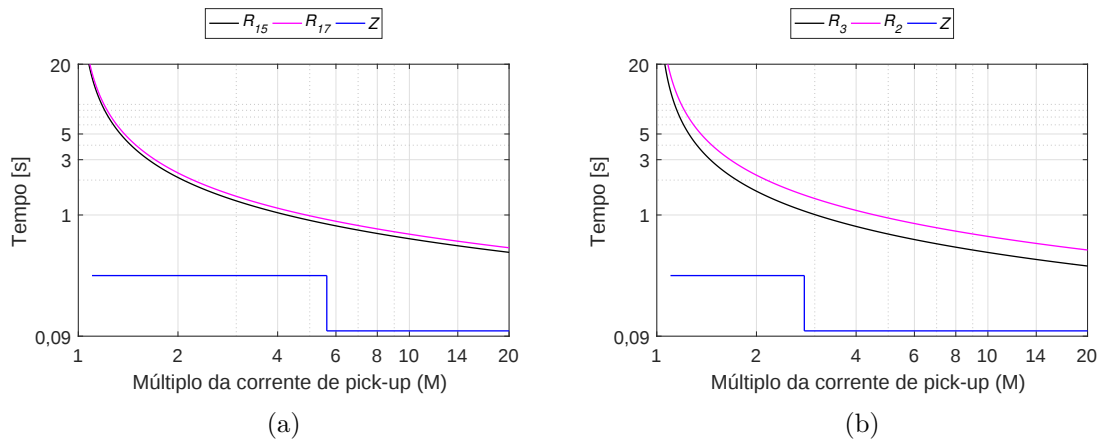


Figura 5.10 - Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com Nelder-Mead: (a) R_{15} e R_{17} , (b) R_3 e R_2 .

o método de Quase-Newton. Para todos os dois estudos de caso utilizando o método de Quase-Newton, adotou-se os mesmos critérios de parada utilizados no método de Nelder-Mead. A Figura 5.11 apresenta o desempenho do processo de otimização utilizando o método de Quase-Newton para o Estudo de Caso 1, onde é observado que na quinta iteração o valor mínimo da função de avaliação é atingido, permanecendo estagnado até o final do processo de otimização.

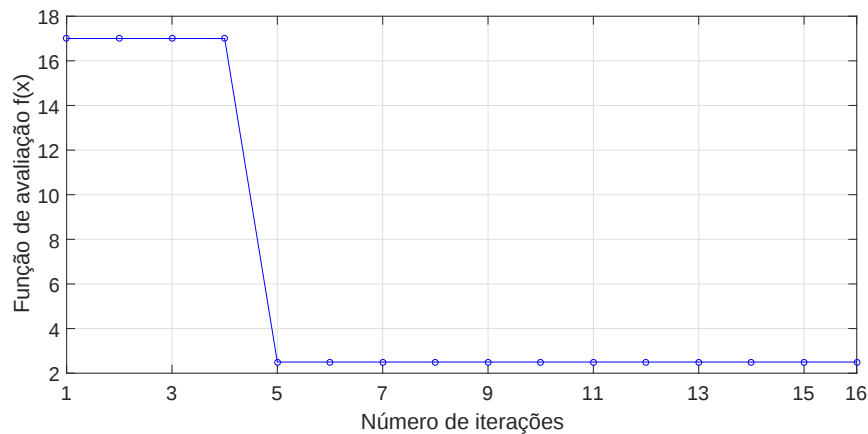


Figura 5.11 - Desempenho do processo de otimização com Quase-Newton: Estudo de Caso 1.

Os resultados dos ajustes de múltiplo de tempo e corrente de *pick-up* e o tempo de atuação para cada relé utilizando Quase-Newton estão dispostos na Tabela 5.16. Neste processo foi obtido valor da função de avaliação de 2,51s com dezesseis itera-

ções. Na Tabela 5.17 estão dispostos os valores de ITC e tempo de atuação mínimo dos pares de relés para o sistema elétrico do Estudo de Caso 1 utilizando Quase-Newton. Observa-se que a restrição de $0,2s$ adotada para o ITC foi atendida para todos os relés.

Tabela 5.16 - Ajustes com Quase-Newton: Estudo de Caso 1.

Relé	M_T	I_p [A]	T_{PRL} [s]
R_1	0,14	600,06	0,40
R_2	0,09	601,13	0,41
R_3	0,06	602,08	0,20
R_4	0,09	600,05	0,30
R_5	0,07	601,49	0,17
R_6	0,14	612,40	0,35
R_7	0,09	601,24	0,35
R_8	0,05	600,00	0,32
Função de avaliação	2,51s		
Número de iterações	16		

Tabela 5.17 - Valores de ITC e tempo de atuação mínimo com Quase-Newton: Estudo de Caso 1.

P_{RL}	P_{RR}	ITC [s]	T_{PRL} [s]	T_{PRR} [s]
R_2	R_5	0,29	0,41	0,70
R_2	R_7	0,27	0,41	0,68
R_3	R_7	0,48	0,20	0,68
R_3	R_1	0,36	0,20	0,56
R_4	R_5	0,40	0,30	0,70
R_4	R_1	0,26	0,30	0,56
R_5	R_8	0,50	0,17	0,67
R_6	R_3	1,10	0,35	1,45
R_7	R_6	0,20	0,35	0,55
R_8	R_4	0,26	0,32	0,58

A Figura 5.12(a) apresenta a curva do par R_4 (relé direcional de retaguarda local) e R_1 (relé direcional de retaguarda remoto), além da curva de proteção do relé de distância Z . A atuação preferencial é a do relé de distância seguida de R_4 e por fim R_1 , respeitando o ITC . Para o curto-circuito trifásico a 1% de R_4 , caso o relé de distância não atue, o relé R_4 atuaria com tempo de $0,30s$ e R_1 atuaria com tempo de $0,56s$, obtendo $0,26s$ de ITC . De maneira semelhante, para o curto-circuito trifásico a 1% de R_7 , caso o relé de distância não atue, o relé R_7 atuaria com tempo de $0,35s$ e R_6 atuaria com tempo de $0,55s$, obtendo $0,20s$ de ITC , como disposto na Tabela 5.17. Esta análise pode ser realizada para todos os outros relés e sem restrições violadas para nenhum relé.

A Figura 5.13 apresenta o desempenho do processo de otimização utilizando o mé-

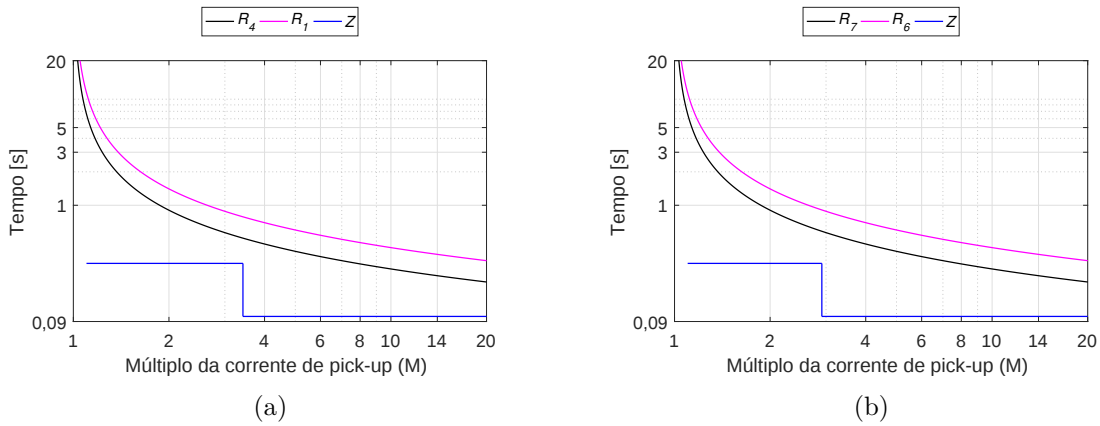


Figura 5.12 - Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 1 com Quase-Newton: (a) R_4 e R_1 , (b) R_7 e R_6 .

tudo de Quase-Newton para o Estudo de Caso 2, onde é observado que na sétima iteração a função de avaliação atinge o menor valor, permanecendo até o limite máximo de iterações definido nos critérios de parada.

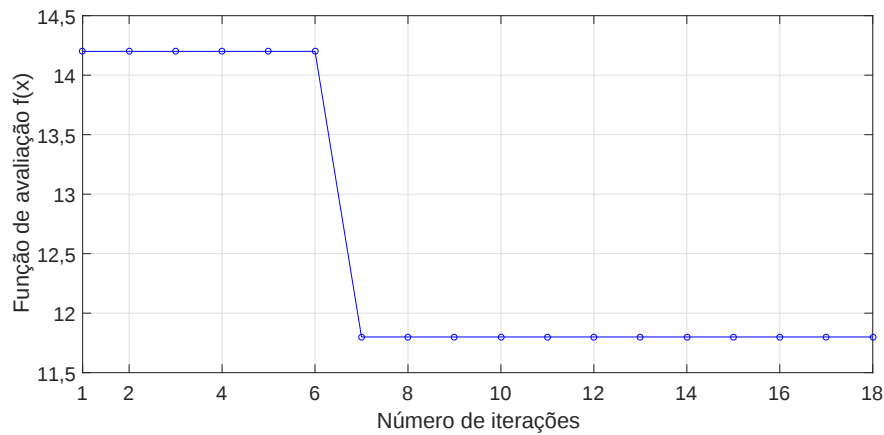


Figura 5.13 - Desempenho do processo de otimização com Quase-Newton: Estudo de Caso 2.

Os resultados dos ajustes de múltiplo de tempo e corrente de *pick-up* e o tempo de atuação para cada relé utilizando Quase-Newton estão dispostos na Tabela 5.18. Para este processo obtém-se valor da função de avaliação de 11,80s com dezoito iterações. Na Tabela 5.19 estão dispostos os valores de *ITC* e tempo de atuação mínimo dos pares de relés para o sistema elétrico do Estudo de Caso 2 utilizando o método de Quase-Newton. Observa-se que a restrição de 0,2s adotada para o *ITC*

foi atendida para todos os relés.

Tabela 5.18 - Ajustes com Quase-Newton: Estudo de Caso 2.

Relé	M_T	I_p [A]	T_{PRL} [A]
R_1	0,17	579,49	0,68
R_2	0,23	517,75	0,52
R_3	0,17	417,79	0,57
R_4	0,22	573,61	0,52
R_5	0,23	446,45	0,52
R_6	0,20	348,66	0,51
R_7	0,16	348,93	0,50
R_8	0,22	980,90	0,53
R_9	0,22	435,83	0,50
R_{10}	0,22	894,76	0,52
R_{11}	0,22	494,78	0,51
R_{12}	0,26	364,88	0,60
R_{13}	0,24	512,66	0,56
R_{14}	0,24	350,52	0,54
R_{15}	0,21	403,53	0,51
R_{16}	0,24	414,25	0,55
R_{17}	0,22	656,06	0,51
R_{18}	0,16	530,40	0,61
R_{19}	0,18	401,51	0,51
R_{20}	0,23	404,70	0,51
R_{21}	0,22	635,27	0,50
R_{22}	0,15	377,37	0,51
Função de avaliação	11, 80s		
Número de iterações	18		

Tabela 5.19 - Valores de ITC e tempo de atuação mínimo com Quase-Newton: Estudo de Caso 2.

P_{RL}	P_{RR}	ITC [s]	T_{PRL} [s]	T_{PRR} [s]	P_{RL}	P_{RR}	ITC [s]	T_{PRL} [s]	T_{PRR} [s]
R_1	R_4	0,44	0,68	1,11	R_{11}	R_{14}	0,54	0,51	1,05
R_2	R_6	0,33	0,52	0,85	R_{12}	R_{13}	0,31	0,60	0,90
R_2	R_{10}	1,28	0,52	1,80	R_{12}	R_{15}	0,35	0,60	0,95
R_2	R_{12}	0,64	0,52	1,16	R_{12}	R_{19}	0,32	0,60	0,91
R_2	R_{14}	0,52	0,52	1,04	R_{13}	R_6	0,28	0,56	0,84
R_3	R_2	0,51	0,57	1,08	R_{13}	R_{10}	1,20	0,56	1,76
R_4	R_6	0,34	0,52	0,85	R_{13}	R_{12}	0,60	0,56	1,17
R_4	R_{10}	1,76	0,52	2,27	R_{14}	R_{11}	0,27	0,54	0,81
R_4	R_{12}	0,64	0,52	1,16	R_{14}	R_{15}	0,41	0,54	0,95
R_4	R_{14}	0,53	0,52	1,04	R_{14}	R_{19}	0,37	0,54	0,91
R_5	R_{10}	1,30	0,52	1,82	R_{15}	R_{17}	0,21	0,51	0,72
R_5	R_{12}	0,64	0,52	1,16	R_{16}	R_{11}	0,27	0,55	0,82
R_5	R_{14}	0,53	0,52	1,05	R_{16}	R_{13}	0,36	0,55	0,91
R_6	R_8	0,53	0,51	1,04	R_{16}	R_{19}	0,39	0,55	0,93
R_7	R_5	0,46	0,50	0,96	R_{17}	R_{22}	0,21	0,51	0,72
R_8	R_9	0,61	0,53	1,15	R_{18}	R_{16}	0,43	0,61	1,04
R_9	R_6	0,36	0,50	0,86	R_{19}	R_{21}	0,35	0,51	0,86
R_9	R_{12}	0,67	0,50	1,17	R_{20}	R_{11}	0,30	0,51	0,82
R_9	R_{14}	0,55	0,50	1,05	R_{20}	R_{13}	0,40	0,51	0,91
R_{10}	R_7	0,21	0,52	0,74	R_{20}	R_{15}	0,46	0,51	0,97
R_{11}	R_6	0,33	0,51	0,84	R_{21}	R_{18}	0,29	0,50	0,79
R_{11}	R_{10}	1,25	0,51	1,76	R_{22}	R_{20}	0,47	0,51	0,97

A Figura 5.14 apresenta dois coordenogramas, o da Figura 5.14(a) apresenta o par

R_{15} (relé direcional de retaguarda local) e R_{17} (relé direcional de retaguarda remoto), além da curva de proteção do relé de distância Z . Nota-se que a atuação preferencial é a do relé de distância seguida de R_{15} e por fim R_{17} , respeitando o ITC . Para o curto-circuito trifásico a 1% de R_{15} , caso o relé de distância não atue, o relé R_{15} atuaria com tempo de 0,51s e R_{17} atuaria com tempo de 0,72s, obtendo 0,21s de ITC . De maneira semelhante, para o curto-circuito trifásico a 1% de de R_3 , Figura 5.14(b), caso o relé de distância não atue, o relé R_3 atuaria com tempo de 0,57s e R_2 atuaria com tempo de 1,08s, obtendo 0,51s de ITC , como disposto na Tabela 5.19. Esta análise pode ser realizada para todos os outros relés e observa-se que todos eles estão coordenados e sem restrições violadas.

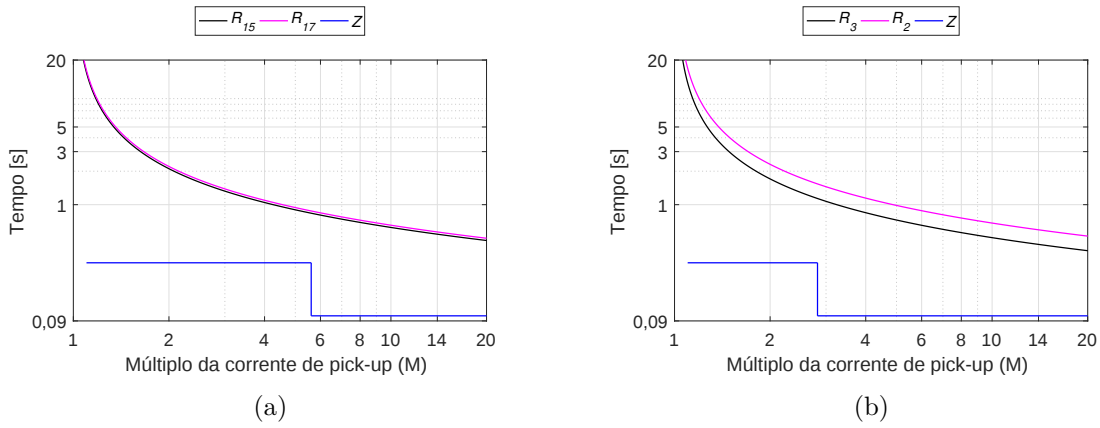


Figura 5.14 - Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com Quase-Newton: (a) R_{15} e R_{17} , (b) R_3 e R_2 .

5.4 Otimização utilizando métodos heurísticos

Nesta etapa foram utilizados dois métodos no processo de otimização, algoritmo genético e nuvens de partículas. Por se tratarem de métodos heurísticos, o processo de otimização não necessita do valor inicial, bastando apenas colocar os limites operativos e as configurações implícitas dos métodos.

Para otimização empregando algoritmo genético utilizou-se população de 50 indivíduos, seleção por torneio de 10 indivíduos, com 20% de taxa de mutação inicial, 80% de taxa de mutação final, 80% de taxa de cruzamento inicial e 20% de taxa de cruzamento final. Utilizou-se operador de mutação uniforme e operador de cruzamento de dois pontos. Para otimização aplicando nuvem de partículas utilizou-se população com tamanho de 100 partículas, parâmetro cognitivo C_1 e parâmetro social C_2 de

$C_1 = C_2 = 1,49$ e coeficiente de inércia W_k no intervalo de 0,1 a 1,1.

5.4.1 Coordenação dos relés direcionais utilizando algoritmo genético

Utilizando algoritmo genético para os dois estudos de caso, adotou-se como critério de parada o limite máximo de 400 gerações para o Estudo de Caso 1 e 1000 gerações para o Estudo de Caso 2, após várias simulações observou-se que estes limites eram suficientes para obter valores otimizados. A Figura 5.15 apresenta o desempenho do processo de otimização usando algoritmo genético para o Estudo de Caso 1, na qual pode-se observar que na 354ª geração o valor final da função de avaliação foi alcançado.

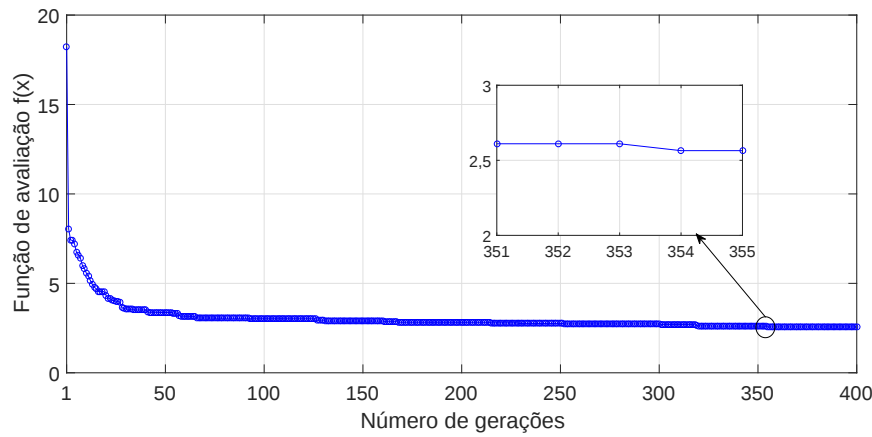


Figura 5.15 - Desempenho do processo de otimização com algoritmo genético: Estudo de Caso 1.

Os valores dos ajustes dos relés do Estudo de Caso 1 estão dispostos na Tabela 5.20. Para este processo de otimização encontrou-se função de avaliação de 2,54s com 354 gerações. Na Tabela 5.21 estão dispostos os pares de relés com valores de ITC e tempo mínimo de atuação de cada proteção. Observa-se que a restrição adotada para o ITC foi atendida em todos os casos.

A Figura 5.16(a) apresenta as curvas de coordenação dos relés R_4 , R_1 e proteção de distância Z , para o curto-circuito trifásico a 1% de R_4 , inicialmente a proteção de distância Z atua de forma instantânea, caso a proteção principal Z não atue, R_4 atuaria com tempo de 0,30s e R_1 com tempo de 0,60s, obtendo 0,30s de ITC . De forma semelhante para o curto-circuito trifásico a 1% de R_7 caso a proteção principal Z não atue, R_7 atuaria com tempo de 0,35s e R_6 com tempo de 0,55s, obtendo 0,20s de ITC , como disposto na Tabela 5.21. Esta análise pode ser realizada para todos

Tabela 5.20 - Ajustes com algoritmo genético: Estudo de Caso 1.

Relé	M_T	I_p [A]	T_{PRL} [s]
R_1	0,15	602,61	0,43
R_2	0,09	600,21	0,41
R_3	0,06	604,74	0,20
R_4	0,09	600,42	0,30
R_5	0,07	600,91	0,17
R_6	0,14	611,51	0,35
R_7	0,09	601,10	0,35
R_8	0,05	600,38	0,32
Função de avaliação	2,54s		
Número de gerações	354		

Tabela 5.21 - Valores de ITC e tempo de atuação mínimo com algoritmo genético: Estudo de Caso 1.

P_{RL}	P_{RR}	ITC [s]	T_{PRL} [s]	T_{PRR} [s]
R_2	R_5	0,29	0,41	0,70
R_2	R_7	0,27	0,41	0,68
R_3	R_7	0,48	0,20	0,68
R_3	R_1	0,40	0,20	0,60
R_4	R_5	0,40	0,30	0,70
R_4	R_1	0,30	0,30	0,60
R_5	R_8	0,50	0,17	0,67
R_6	R_3	1,12	0,35	1,47
R_7	R_6	0,20	0,35	0,55
R_8	R_4	0,26	0,32	0,58

os outros relés e observa-se que eles estão coordenados e sem restrições violadas.

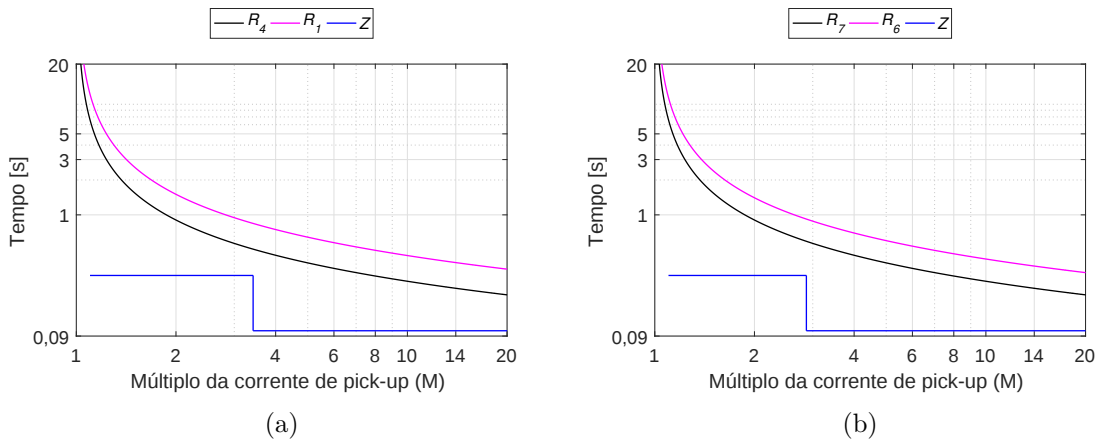


Figura 5.16 - Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 1 com algoritmo genético: (a) R_4 e R_1 , (b) R_7 e R_6 .

A Figura 5.17 apresenta o desempenho do processo de otimização usando algoritmo genético para o Estudo de Caso 2, em que é observado nas primeiras gerações valores

altos da função de avaliação e posteriormente na 820ª geração o valor mínimo da função de avaliação é atingido, permanecendo estagnado até o final do processo de otimização.

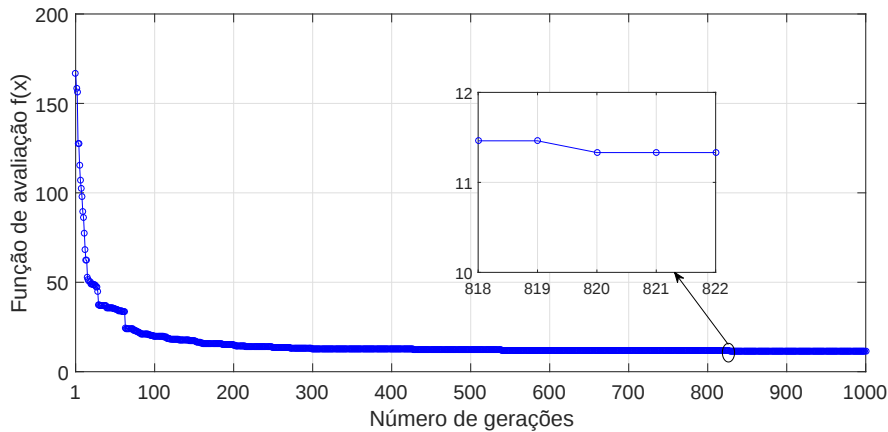


Figura 5.17 - Desempenho do processo de otimização com algoritmo genético: Estudo de Caso 2.

O Estudo de Caso 2 e seus respectivos valores de ajustes dos relés estão dispostos na Tabela 5.22. Para este processo de otimização encontrou-se função de avaliação de 11,39s com 820 gerações. Os pares de relés com valores de *ITC* e tempo mínimo de atuação de cada proteção estão dispostos na Tabela 5.23. Sendo que a restrição adotada para o *ITC* foi atendida em todos os casos.

A Figura 5.18(a) apresenta as curvas de coordenação dos relés R_{15} , R_{17} e proteção de distância Z , para o curto-circuito trifásico a 1% de R_{15} , primeiramente a proteção de distância Z atua de forma instantânea, caso a proteção principal Z não atue, R_{15} atuaria com tempo de 0,51s e R_{17} com tempo de 0,76s, obtendo 0,25s de *ITC*. De forma semelhante para o curto-circuito trifásico a 1% de R_3 caso a proteção principal Z não atue, R_3 atuaria com tempo de 0,52s e R_2 com tempo de 1,03s, obtendo 0,51s de *ITC*, como disposto na Tabela 5.23. Observa-se que todos os outros relés estão coordenados e sem restrições violadas.

5.4.2 Coordenação dos relés direcionais utilizando nuvens de partículas

Para o método nuvens de partículas adotou-se como critério de parada o limite máximo de 50 iterações para o Estudo de Caso 1 e 400 iterações para o Estudo de Caso 2, estes limites foram adotados após observar que eram suficientes para este processo de otimização. No desempenho do processo de otimização utilizando nuvem

Tabela 5.22 - Ajustes com algoritmo genético: Estudo de Caso 2.

Relé	M_T	I_p [A]	T_{PRL} [A]
R_1	0,16	399,60	0,52
R_2	0,22	516,44	0,50
R_3	0,16	399,61	0,52
R_4	0,22	516,41	0,50
R_5	0,23	435,12	0,51
R_6	0,20	346,81	0,51
R_7	0,16	346,81	0,50
R_8	0,22	812,07	0,50
R_9	0,23	435,57	0,52
R_{10}	0,22	788,01	0,50
R_{11}	0,23	463,13	0,52
R_{12}	0,22	349,63	0,50
R_{13}	0,23	463,21	0,52
R_{14}	0,23	349,58	0,52
R_{15}	0,21	399,65	0,51
R_{16}	0,22	410,22	0,50
R_{17}	0,24	612,43	0,54
R_{18}	0,19	360,08	0,59
R_{19}	0,18	399,69	0,51
R_{20}	0,25	399,61	0,56
R_{21}	0,22	635,13	0,50
R_{22}	0,16	360,06	0,53
Função de avaliação	11,39s		
Número de gerações	820		

Tabela 5.23 - Valores de ITC e tempo de atuação mínimo com algoritmo genético: Estudo de Caso 2.

P_{RL}	P_{RR}	ITC [s]	T_{PRL} [s]	T_{PRR} [s]	P_{RL}	P_{RR}	ITC [s]	T_{PRL} [s]	T_{PRR} [s]
R_1	R_4	0,51	0,52	1,03	R_{11}	R_{14}	0,48	0,52	1,00
R_2	R_6	0,35	0,50	0,85	R_{12}	R_{13}	0,32	0,50	0,82
R_2	R_{10}	1,07	0,50	1,57	R_{12}	R_{15}	0,45	0,50	0,94
R_2	R_{12}	0,46	0,50	0,96	R_{12}	R_{19}	0,41	0,50	0,91
R_2	R_{14}	0,50	0,50	1,00	R_{13}	R_6	0,32	0,52	0,84
R_3	R_2	0,51	0,52	1,03	R_{13}	R_{10}	1,01	0,52	1,53
R_4	R_6	0,35	0,50	0,85	R_{13}	R_{12}	0,44	0,52	0,96
R_4	R_{10}	1,41	0,50	1,91	R_{14}	R_{11}	0,30	0,52	0,82
R_4	R_{12}	0,46	0,50	0,96	R_{14}	R_{15}	0,42	0,52	0,94
R_4	R_{14}	0,50	0,50	1,00	R_{14}	R_{19}	0,39	0,52	0,91
R_5	R_{10}	1,06	0,51	1,58	R_{15}	R_{17}	0,25	0,51	0,76
R_5	R_{12}	0,44	0,51	0,96	R_{16}	R_{11}	0,33	0,50	0,82
R_5	R_{14}	0,49	0,51	1,00	R_{16}	R_{13}	0,33	0,50	0,82
R_6	R_8	0,41	0,51	0,92	R_{16}	R_{19}	0,43	0,50	0,93
R_7	R_5	0,44	0,50	0,94	R_{17}	R_{22}	0,20	0,54	0,75
R_8	R_9	0,70	0,50	1,20	R_{18}	R_{16}	0,35	0,59	0,95
R_9	R_6	0,33	0,52	0,86	R_{19}	R_{21}	0,35	0,51	0,86
R_9	R_{12}	0,44	0,52	0,96	R_{20}	R_{11}	0,27	0,56	0,82
R_9	R_{14}	0,48	0,52	1,00	R_{20}	R_{13}	0,27	0,56	0,82
R_{10}	R_7	0,23	0,50	0,73	R_{20}	R_{15}	0,41	0,56	0,96
R_{11}	R_6	0,32	0,52	0,84	R_{21}	R_{18}	0,23	0,50	0,73
R_{11}	R_{10}	1,01	0,52	1,53	R_{22}	R_{20}	0,52	0,53	1,05

de partículas, apresentado na Figura 5.19, para o Estudo de Caso 1, observa-se que na 33ª iteração o valor mínimo da função de avaliação é atingido, permanecendo estagnado até o final do processo de otimização.

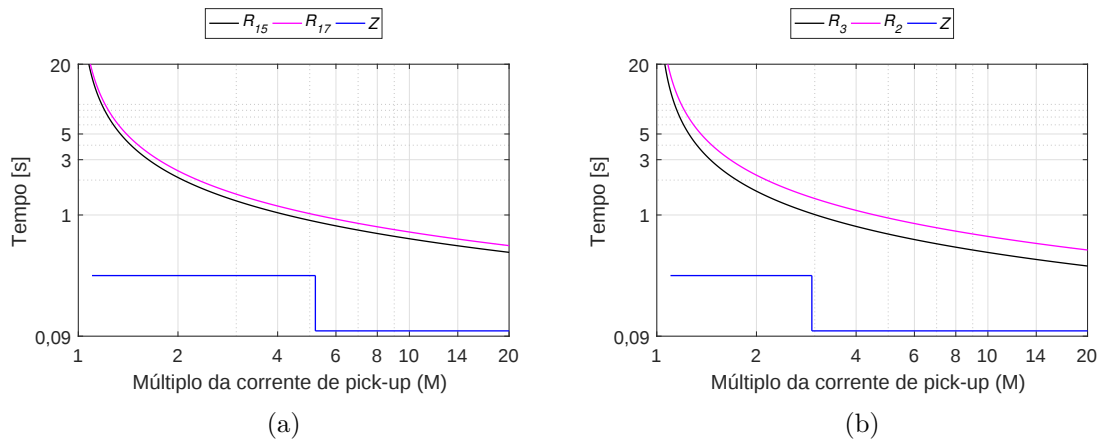


Figura 5.18 - Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com algoritmo genético: (a) R_{15} e R_{17} , (b) R_3 e R_2 .

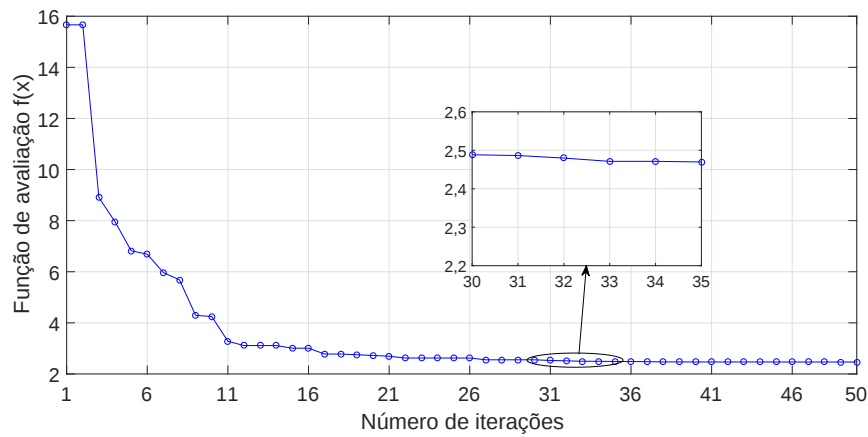


Figura 5.19 - Desempenho do processo de otimização com nuvens de partículas: Estudo de Caso 1.

Na Tabela 5.24 estão dispostos os valores dos ajustes dos relés do Estudo de Caso 1. Encontrou-se para este processo de otimização função de avaliação de 2,47s com 33 iterações. Os pares de relés com valores de ITC e tempo mínimo de atuação de cada proteção estão dispostos na Tabela 5.25. Para todos os casos, a restrição adotada para o ITC foi atendida.

A Figura 5.20 apresenta dois coordenogramas, com os relés R_4 , R_1 e R_7 , R_6 . Nos dois coordenogramas observa-se a atuação inicialmente da proteção de distância seguida da proteção de retaguarda local e por fim da proteção de retaguarda remota. Para o curto-circuito trifásico a 1% de R_4 , primeiramente a proteção de distância Z atua de forma instantânea, caso a proteção principal Z não atue, R_4 atuaria com tempo de

Tabela 5.24 - Ajustes com nuvens de partículas: Estudo de Caso 1.

Relé	M_T	I_p [A]	T_{PRL} [s]
R_1	0,14	600,03	0,40
R_2	0,09	600,17	0,41
R_3	0,06	600,26	0,20
R_4	0,09	600,00	0,30
R_5	0,07	600,00	0,17
R_6	0,14	600,00	0,35
R_7	0,08	608,87	0,31
R_8	0,05	600,00	0,32
Função de avaliação	2,47s		
Número de iterações	33		

Tabela 5.25 - Valores de ITC e tempo de atuação mínimo com nuvens de partículas: Estudo de Caso 1.

P_{RL}	P_{RR}	ITC [s]	T_{PRL} [s]	T_{PRR} [s]
R_2	R_5	0,29	0,41	0,70
R_2	R_7	0,20	0,41	0,61
R_3	R_7	0,42	0,20	0,61
R_3	R_1	0,36	0,20	0,56
R_4	R_5	0,40	0,30	0,70
R_4	R_1	0,26	0,30	0,56
R_5	R_8	0,50	0,17	0,67
R_6	R_3	1,09	0,35	1,43
R_7	R_6	0,24	0,31	0,55
R_8	R_4	0,26	0,32	0,58

0,30s e R_1 com tempo de 0,56s, obtendo 0,26s de ITC . Semelhante para o curto-circuito trifásico a 1% de R_7 caso a proteção principal Z não atue, R_7 atuaria com tempo de 0,31s e R_6 com tempo de 0,55s, obtendo 0,24s de ITC , como disposto na Tabela 5.25. Esta análise pode ser realizada para todos os outros relés e observa-se que todos eles estão coordenados e sem restrições violadas.

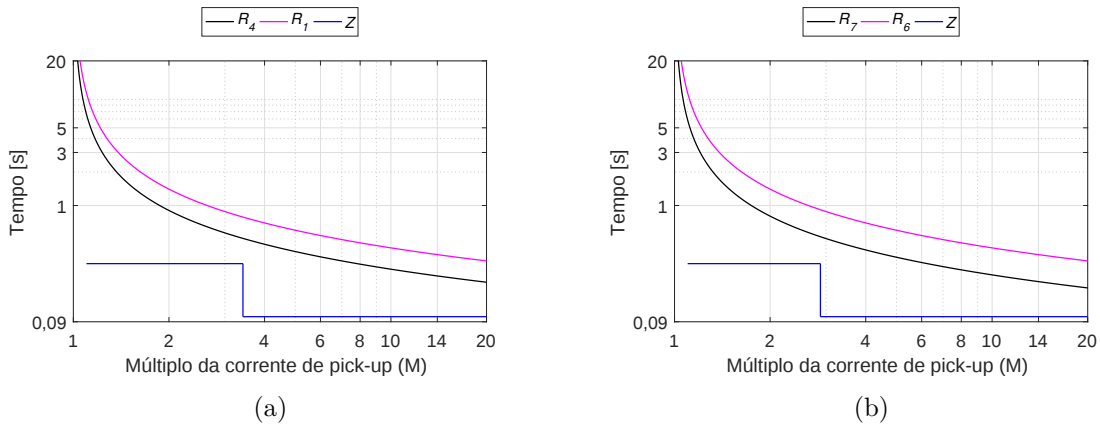


Figura 5.20 - Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 1 com nuvens de partículas: (a) R_4 e R_1 , (b) R_7 e R_6 .

Utilizando o método de nuvem de partículas para o Estudo de Caso 2, apresenta-se na Figura 5.21 o desempenho do processo de otimização. Observa-se que apesar do método iniciar com valor alto da função de avaliação, o mesmo converge para valores satisfatórios.

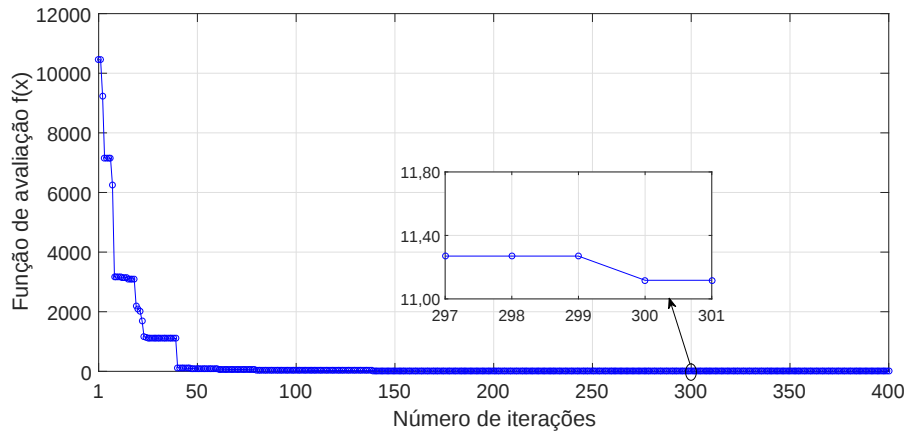


Figura 5.21 - Desempenho do processo de otimização com nuvens de partículas: Estudo de Caso 2.

Os valores dos ajustes dos relés do Estudo de Caso 2 estão dispostos na Tabela 5.26. Encontrou-se para este processo de otimização função de avaliação de 11,17s com 300 iterações. Dispostos na Tabela 5.27 estão os pares de relés com valores de *ITC* e tempo mínimo de atuação de cada proteção. Observa-se que a restrição adotada para o *ITC* foi atendida em todos os casos.

A Figura 5.22 apresenta dois coordenogramas, o par R_{15} e R_{17} e o par R_3 e R_2 , além da curva de proteção do relé de distância Z . Nota-se que o relé de distância atua com tempo menor que R_{15} e menor que R_{17} , respeitando o *ITC*. Para o curto-circuito trifásico a 1% de R_{15} , caso o relé de distância não atue, o relé R_{15} atuaria com tempo de 0,51s e R_{17} atuaria com tempo de 0,73s, obtendo 0,22s de *ITC*. Da mesma forma, para o curto-circuito trifásico a 1% de R_3 , Figura 5.22(b), o relé R_3 atuaria com tempo de 0,52s e R_2 atuaria com tempo de 1,03s, obtendo 0,51s de *ITC*, como disposto na Tabela 5.27. Esta análise pode ser realizada para todos os outros relés e observa-se que todos eles estão coordenados e sem restrições violadas.

5.5 Otimização utilizando métodos híbridos

Nesta etapa foram utilizados quatro métodos no processo de otimização, algoritmo genético híbrido com Nelder-Mead, algoritmo genético híbrido com Quase-Newton,

Tabela 5.26 - Ajustes com nuvens de partículas: Estudo de Caso 2.

Relé	M_T	I_p [A]	T_{PRL} [A]
R_1	0,16	399,60	0,52
R_2	0,22	516,36	0,50
R_3	0,16	399,60	0,52
R_4	0,22	516,36	0,50
R_5	0,23	435,08	0,51
R_6	0,20	346,80	0,51
R_7	0,16	346,80	0,50
R_8	0,22	812,03	0,50
R_9	0,22	435,54	0,50
R_{10}	0,22	787,99	0,50
R_{11}	0,22	463,13	0,50
R_{12}	0,22	349,56	0,50
R_{13}	0,22	463,13	0,50
R_{14}	0,22	349,56	0,50
R_{15}	0,21	399,60	0,51
R_{16}	0,22	410,21	0,50
R_{17}	0,23	612,34	0,52
R_{18}	0,16	445,98	0,56
R_{19}	0,18	399,60	0,51
R_{20}	0,23	399,60	0,51
R_{21}	0,22	635,10	0,50
R_{22}	0,15	376,88	0,51
Função de avaliação	11, 17s		
Número de iterações	300		

Tabela 5.27 - Valores de ITC e tempo de atuação mínimo com nuvens de partículas: Estudo de Caso 2.

P_{RL}	P_{RR}	ITC [s]	T_{PRL} [s]	T_{PRR} [s]	P_{RL}	P_{RR}	ITC [s]	T_{PRL} [s]	T_{PRR} [s]
R_1	R_4	0,51	0,52	1,03	R_{11}	R_{14}	0,46	0,50	0,96
R_2	R_6	0,35	0,50	0,85	R_{12}	R_{13}	0,29	0,50	0,78
R_2	R_{10}	1,07	0,50	1,57	R_{12}	R_{15}	0,45	0,50	0,94
R_2	R_{12}	0,46	0,50	0,96	R_{12}	R_{19}	0,41	0,50	0,91
R_2	R_{14}	0,46	0,50	0,96	R_{13}	R_6	0,34	0,50	0,84
R_3	R_2	0,51	0,52	1,03	R_{13}	R_{10}	1,03	0,50	1,53
R_4	R_6	0,35	0,50	0,85	R_{13}	R_{12}	0,46	0,50	0,96
R_4	R_{10}	1,41	0,50	1,91	R_{14}	R_{11}	0,29	0,50	0,78
R_4	R_{12}	0,46	0,50	0,96	R_{14}	R_{15}	0,45	0,50	0,94
R_4	R_{14}	0,46	0,50	0,96	R_{14}	R_{19}	0,41	0,50	0,91
R_5	R_{10}	1,06	0,51	1,58	R_{15}	R_{17}	0,22	0,51	0,73
R_5	R_{12}	0,44	0,51	0,96	R_{16}	R_{11}	0,29	0,50	0,79
R_5	R_{14}	0,44	0,51	0,96	R_{16}	R_{13}	0,29	0,50	0,79
R_6	R_8	0,41	0,51	0,92	R_{16}	R_{19}	0,43	0,50	0,93
R_7	R_5	0,44	0,50	0,94	R_{17}	R_{22}	0,20	0,52	0,72
R_8	R_9	0,65	0,50	1,15	R_{18}	R_{16}	0,39	0,56	0,95
R_9	R_6	0,36	0,50	0,86	R_{19}	R_{21}	0,35	0,51	0,86
R_9	R_{12}	0,46	0,50	0,96	R_{20}	R_{11}	0,28	0,51	0,79
R_9	R_{14}	0,46	0,50	0,96	R_{20}	R_{13}	0,28	0,51	0,79
R_{10}	R_7	0,23	0,50	0,73	R_{20}	R_{15}	0,45	0,51	0,96
R_{11}	R_6	0,34	0,50	0,84	R_{21}	R_{18}	0,20	0,50	0,70
R_{11}	R_{10}	1,03	0,50	1,53	R_{22}	R_{20}	0,46	0,51	0,97

nuvem de partículas híbrido com Nelder-Mead e nuvem de partículas híbrido com Quase-Newton. Por se tratarem de métodos híbridos, o processo de otimização não necessita do valor inicial, bastando apenas colocar os limites operativos e as configurações de cada método. O método híbrido se inicia pelo algoritmo heurístico e a me-

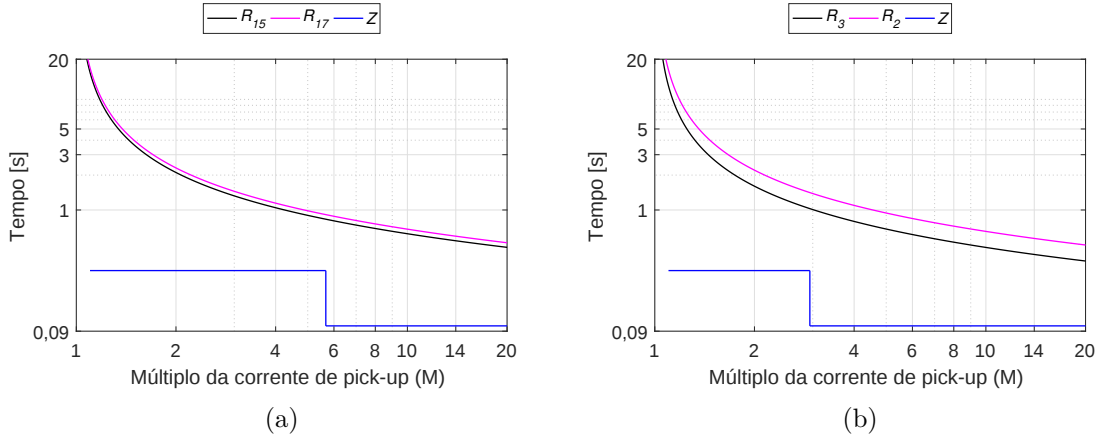


Figura 5.22 - Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas: (a) R_{15} e R_{17} , (b) R_3 e R_2 .

lhora resposta do método heurístico será o valor x_0 para o algoritmo determinístico. As configurações dos algoritmos híbridos são as mesmas utilizadas anteriormente para cada método.

5.5.1 Coordenação dos relés direcionais utilizando otimização híbrida: algoritmo genético com Nelder-Mead

Nos dois estudos de caso utilizando algoritmo genético com Nelder-Mead, adotou-se como critério de parada 200 gerações para o Estudo de Caso 1 e 300 gerações para o Estudo de Caso 2. O limite máximo de gerações foi definido após várias simulações na qual observou-se que este valor era suficiente para o processo de otimização. No desempenho do processo de otimização, apresentado na Figura 5.23, usando algoritmo genético com Nelder-Mead para o Estudo de Caso 1, observa-se que na 173ª geração o valor mínimo da função de avaliação é atingido, permanecendo estagnado até o final do processo de otimização.

Na Tabela 5.28 estão dispostos os resultados dos ajustes de múltiplo de tempo, corrente de *pick-up* e o tempo de atuação para cada relé utilizando algoritmo genético com Nelder-Mead. Neste processo foi obtido valor da função de avaliação de 2,48s com 173 gerações. Estão dispostos na Tabela 5.29 os valores de *ITC* e tempo de atuação mínimo dos pares de relés para o sistema elétrico do Estudo de Caso 1 utilizando algoritmo genético com Nelder-Mead. Observa-se que a restrição de 0,2s adotada para o *ITC* foi atendida para todos os relés.

Dois coordenogramas são apresentados na Figura 5.24, o da Figura 5.24(a) apresenta

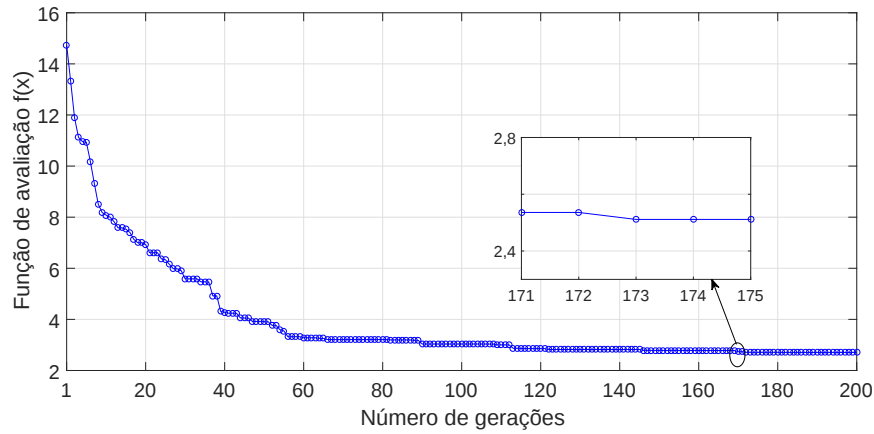


Figura 5.23 - Desempenho do processo de otimização com algoritmo genético & Nelder-Mead: Estudo de Caso 1.

Tabela 5.28 - Ajustes com algoritmo genético & Nelder-Mead: Estudo de Caso 1.

Relé	M_T	I_p [A]	T_{PRL} [s]
R_1	0,14	603,10	0,40
R_2	0,09	606,53	0,42
R_3	0,06	600,36	0,20
R_4	0,09	600,00	0,30
R_5	0,07	633,08	0,18
R_6	0,14	607,75	0,35
R_7	0,08	610,67	0,32
R_8	0,05	611,75	0,33
Função de avaliação	2,48s		
Número de gerações	173		

Tabela 5.29 - Valores de ITC e tempo de atuação mínimo com algoritmo genético & Nelder-Mead: Estudo de Caso 1.

P_{RL}	P_{RR}	ITC [s]	T_{PRL} [s]	T_{PRR} [s]
R_2	R_5	0,35	0,42	0,76
R_2	R_7	0,20	0,42	0,62
R_3	R_7	0,42	0,20	0,62
R_3	R_1	0,36	0,20	0,56
R_4	R_5	0,46	0,30	0,76
R_4	R_1	0,26	0,30	0,56
R_5	R_8	0,52	0,18	0,70
R_6	R_3	1,09	0,35	1,43
R_7	R_6	0,23	0,32	0,55
R_8	R_4	0,25	0,33	0,58

o par R_4 e R_1 , além da curva de proteção do relé de distância Z . Onde a atuação preferencial é a do relé de distância seguida de R_4 e por fim R_1 . Para o curto-circuito trifásico a 1% de R_4 , o relé R_4 atuaria com tempo de 0,30s e R_1 atuaria com tempo de 0,56s, obtendo 0,26s de ITC . De igual forma, para o curto-circuito trifásico a 1% de R_7 , o relé R_7 atuaria com tempo de 0,32s e R_6 atuaria com tempo de

0,55s, obtendo 0,23s de *ITC*, como disposto na Tabela 5.29. Esta análise pode ser realizada para todos os outros relés e observa-se que todos eles estão coordenados e sem restrições violadas.

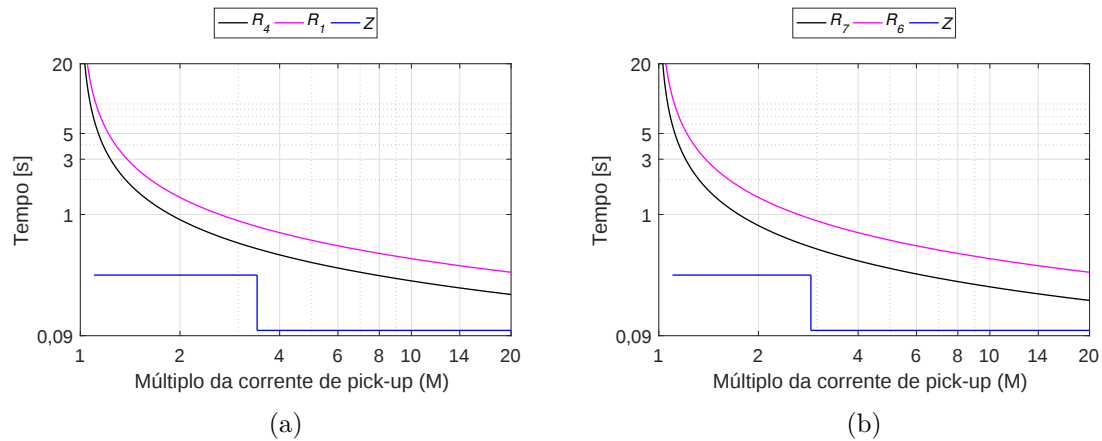


Figura 5.24 - Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 1 com algoritmo genético & Nelder-Mead: (a) R_4 e R_1 , (b) R_7 e R_6 .

Para o Estudo de Caso 2 a Figura 5.25 apresenta o desempenho do processo de otimização utilizando algoritmo genético com Nelder-Mead. Observa-se que somente na 298ª geração o valor mínimo da função de avaliação é atingido.

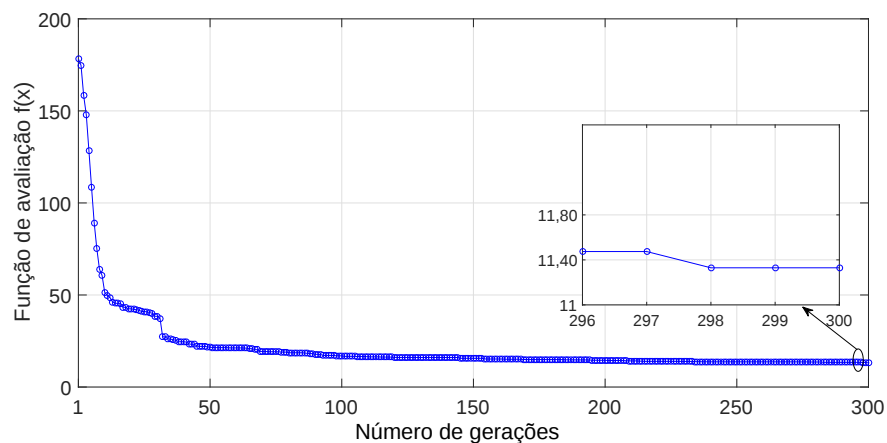


Figura 5.25 - Desempenho do processo de otimização com algoritmo genético & Nelder-Mead: Estudo de Caso 2.

Na Tabela 5.30, utilizando algoritmo genético com Nelder-Mead estão dispostos os resultados dos ajustes de múltiplo de tempo, corrente de *pick-up* e o tempo de atu-

ação dos relés. Foi obtido valor da função de avaliação de 11,35s com 298 gerações. Utilizando algoritmo genético com Nelder-Mead, os valores de ITC e tempo de atuação mínimo dos pares de relés para o sistema elétrico do Estudo de Caso 2, estão dispostos na Tabela 5.31. Foi atendida para todos os relés a restrição de 0,2s adotada para o ITC .

Tabela 5.30 - Ajustes com algoritmo genético & Nelder-Mead: Estudo de Caso 2.

Relé	M_T	I_p [A]	T_{PRL} [A]
R_1	0,16	399,60	0,52
R_2	0,22	516,36	0,50
R_3	0,16	399,60	0,52
R_4	0,22	516,36	0,50
R_5	0,23	435,08	0,51
R_6	0,20	346,80	0,51
R_7	0,16	346,80	0,50
R_8	0,22	815,06	0,50
R_9	0,22	436,46	0,50
R_{10}	0,22	787,99	0,50
R_{11}	0,22	582,36	0,54
R_{12}	0,22	351,42	0,50
R_{13}	0,24	465,71	0,55
R_{14}	0,22	352,26	0,50
R_{15}	0,21	435,27	0,53
R_{16}	0,22	410,21	0,50
R_{17}	0,22	699,59	0,52
R_{18}	0,19	360,00	0,59
R_{19}	0,18	402,56	0,51
R_{20}	0,24	399,60	0,53
R_{21}	0,22	635,10	0,50
R_{22}	0,15	382,96	0,51
Função de avaliação	11,35s		
Número de gerações	298		

A Figura 5.26 apresenta dois coordenogramas, o da Figura 5.26(a) apresenta o par R_{15} e R_{17} e a Figura 5.26(b) apresenta o par R_3 e R_2 além da curva de proteção do relé de distância Z . Nota-se que a atuação preferencial é a do relé de distância seguida de R_{15} e por fim R_{17} . Para o curto-circuito trifásico a 1% de R_{15} , caso o relé de distância não atue, o relé R_{15} atuaria com tempo de 0,53s e R_{17} com tempo de 0,74s, obtendo 0,21s de ITC . Da mesma maneira, para o curto-circuito trifásico a 1% de R_3 , Figura 5.26(b), caso o relé de distância não atue, como disposto na Tabela 5.31 o relé R_3 atuaria com tempo de 0,52s e R_2 com tempo de 1,03s, obtendo 0,51s de ITC . Assim para todos os outros relés, tendo como base a Tabela 5.31, observa-se que eles estão coordenados e sem restrições violadas.

Tabela 5.31 - Valores de ITC e tempo de atuação mínimo com algoritmo genético & Nelder-Mead: Estudo de Caso 2.

P_{RL}	P_{RR}	ITC [s]	T_{PRL} [s]	T_{PRR} [s]	P_{RL}	P_{RR}	ITC [s]	T_{PRL} [s]	T_{PRR} [s]
R_1	R_4	0,51	0,52	1,03	R_{11}	R_{14}	0,42	0,54	0,97
R_2	R_6	0,35	0,50	0,85	R_{12}	R_{13}	0,36	0,50	0,86
R_2	R_{10}	1,07	0,50	1,57	R_{12}	R_{15}	0,50	0,50	1,00
R_2	R_{12}	0,46	0,50	0,96	R_{12}	R_{19}	0,42	0,50	0,92
R_2	R_{14}	0,46	0,50	0,96	R_{13}	R_6	0,29	0,55	0,84
R_3	R_2	0,51	0,52	1,03	R_{13}	R_{10}	0,99	0,55	1,53
R_4	R_6	0,35	0,50	0,85	R_{13}	R_{12}	0,42	0,55	0,96
R_4	R_{10}	1,41	0,50	1,91	R_{14}	R_{11}	0,39	0,50	0,89
R_4	R_{12}	0,46	0,50	0,96	R_{14}	R_{15}	0,50	0,50	1,00
R_4	R_{14}	0,46	0,50	0,96	R_{14}	R_{19}	0,42	0,50	0,92
R_5	R_{10}	1,06	0,51	1,58	R_{15}	R_{17}	0,21	0,53	0,74
R_5	R_{12}	0,45	0,51	0,96	R_{16}	R_{11}	0,40	0,50	0,90
R_5	R_{14}	0,45	0,51	0,96	R_{16}	R_{13}	0,36	0,50	0,86
R_6	R_8	0,41	0,51	0,92	R_{16}	R_{19}	0,44	0,50	0,94
R_7	R_5	0,44	0,50	0,94	R_{17}	R_{22}	0,21	0,52	0,73
R_8	R_9	0,65	0,50	1,15	R_{18}	R_{16}	0,35	0,59	0,95
R_9	R_6	0,36	0,50	0,86	R_{19}	R_{21}	0,35	0,51	0,86
R_9	R_{12}	0,46	0,50	0,96	R_{20}	R_{11}	0,36	0,53	0,90
R_9	R_{14}	0,46	0,50	0,96	R_{20}	R_{13}	0,33	0,53	0,86
R_{10}	R_7	0,23	0,50	0,73	R_{20}	R_{15}	0,49	0,53	1,02
R_{11}	R_6	0,30	0,54	0,84	R_{21}	R_{18}	0,23	0,50	0,73
R_{11}	R_{10}	0,99	0,54	1,53	R_{22}	R_{20}	0,50	0,51	1,01

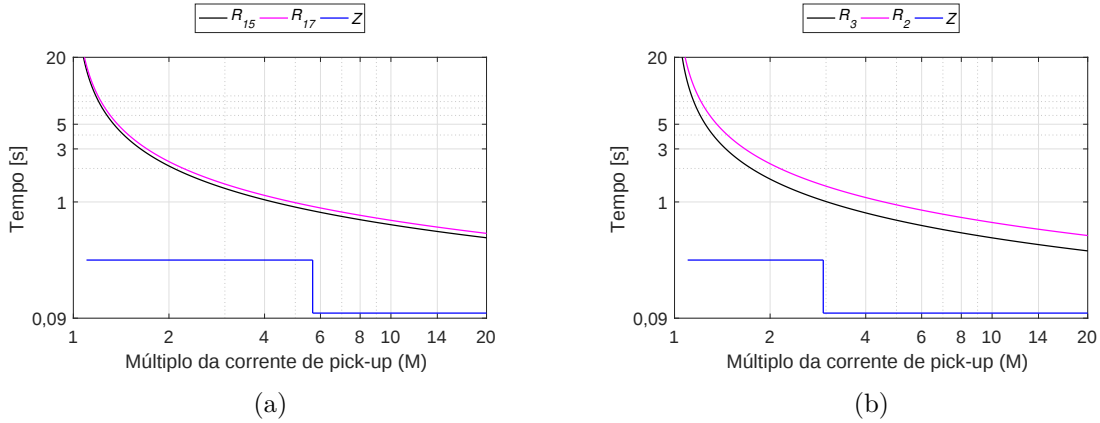


Figura 5.26 - Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com algoritmo genético & Nelder-Mead: (a) R_{15} e R_{17} , (b) R_3 e R_2 .

5.5.2 Coordenação dos relés direcionais utilizando otimização híbrida: algoritmo genético com Quase-Newton

Para os dois estudos de caso utilizando algoritmo genético com Quase-Newton, adotou-se como critério de parada o limite máximo de 200 gerações para o Estudo de Caso 1 e 300 gerações para o Estudo de Caso 2. A Figura 5.27 apresenta o desempenho do processo de otimização utilizando algoritmo genético com Quase-Newton para o Estudo de Caso 1, onde é observado que na 182ª geração o valor

mínimo da função de avaliação é atingido, permanecendo estagnado até o final do processo.

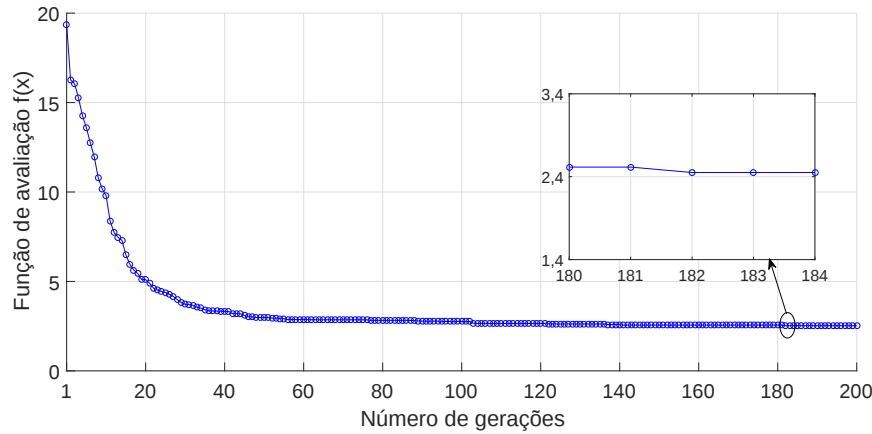


Figura 5.27 - Desempenho do processo de otimização com algoritmo genético & Quase-Newton: Estudo de Caso 1.

Os resultados dos ajustes de múltiplo de tempo, corrente de *pick-up* e o tempo de atuação para cada relé utilizando algoritmo genético com Quase-Newton estão dispostos na Tabela 5.32. Neste processo foi obtido valor da função de avaliação de 2,47s com 182 gerações. Na Tabela 5.33 estão dispostos os valores de *ITC* e tempo de atuação mínimo dos pares de relés para o sistema elétrico do Estudo de Caso 1 utilizando algoritmo genético com Quase-Newton. Observa-se que a restrição de 0,2s adotada para o *ITC* foi atendida para todos os relés.

Tabela 5.32 - Ajustes com algoritmo genético & Quase-Newton: Estudo de Caso 1.

Relé	M_T	I_p [A]	T_{PRL} [s]
R_1	0,14	600,41	0,40
R_2	0,09	601,22	0,41
R_3	0,06	600,24	0,20
R_4	0,09	600,76	0,30
R_5	0,07	601,31	0,17
R_6	0,14	601,43	0,35
R_7	0,08	619,55	0,32
R_8	0,05	600,62	0,32
Função de avaliação	2,47s		
Número de gerações	182		

A Figura 5.28 apresenta dois coordenogramas, sendo o relé R_4 o relé direcional de retaguarda local e R_1 o relé direcional de retaguarda remoto, juntamente com a curva de proteção do relé de distância Z . Verifica-se que a atuação preferencial é a

Tabela 5.33 - Valores de ITC e tempo de atuação mínimo com algoritmo genético & Quase-Newton: Estudo de Caso 1.

P_{RL}	P_{RR}	ITC [s]	T_{PRL} [s]	T_{PRR} [s]
R_2	R_5	0,29	0,41	0,70
R_2	R_7	0,21	0,41	0,63
R_3	R_7	0,43	0,20	0,63
R_3	R_1	0,36	0,20	0,56
R_4	R_5	0,40	0,30	0,70
R_4	R_1	0,26	0,30	0,56
R_5	R_8	0,50	0,17	0,67
R_6	R_3	1,09	0,35	1,43
R_7	R_6	0,23	0,32	0,55
R_8	R_4	0,26	0,32	0,58

do relé de distância seguida de R_4 e por fim R_1 , com intervalo de tempo maior que o ITC estabelecido. Para o curto-circuito trifásico a 1% de R_4 , o relé mais próximo ao curto-circuito no caso R_4 atuaria com tempo de 0,30s e R_1 com tempo de 0,56s, tendo 0,26s de ITC . De forma semelhante, para o curto-circuito trifásico a 1% de R_7 , o relé R_7 atuaria com tempo de 0,32s e R_6 com tempo de 0,55s, obtendo 0,23s de ITC , como disposto na Tabela 5.33. Todos os pares de relés foram analisados e os mesmos estão coordenados sem restrições violadas.

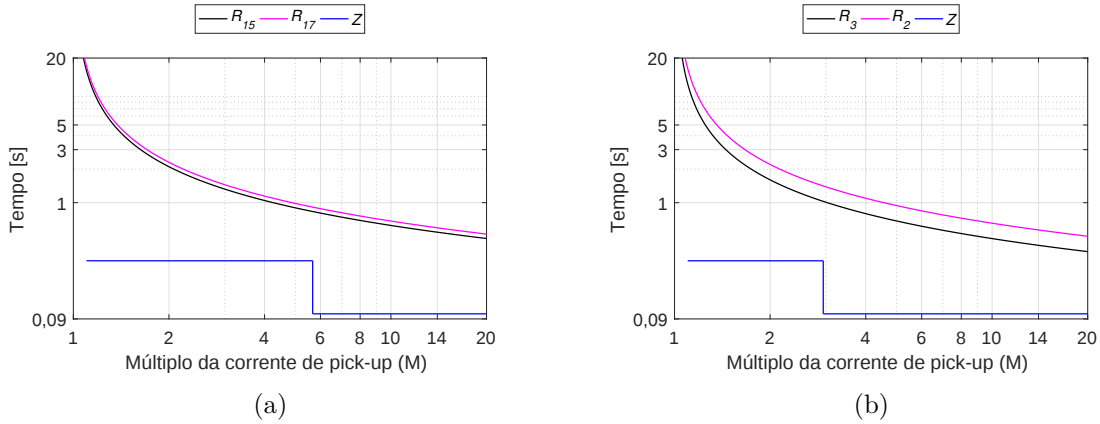


Figura 5.28 - Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 1 com algoritmo genético & Quase-Newton: (a) R_4 e R_1 , (b) R_7 e R_6 .

A Figura 5.29 apresenta o desempenho do processo de otimização utilizando algoritmo genético com Quase-Newton para o Estudo de Caso 2, onde é observado que somente na 294ª geração o valor mínimo da função de avaliação é atingido.

Os resultados dos ajustes de múltiplo de tempo, corrente de *pick-up* e o tempo de atuação para cada relé utilizando algoritmo genético com Quase-Newton estão

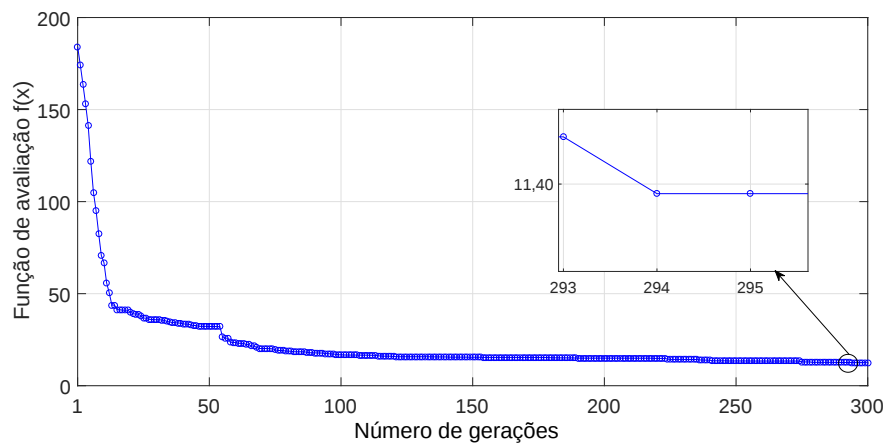


Figura 5.29 - Desempenho do processo de otimização com algoritmo genético & Quase-Newton: Estudo de Caso 2.

dispostos na Tabela 5.34. Neste processo foi obtido valor da função de avaliação de 11,36s com 294 gerações. Na Tabela 5.35 estão dispostos os valores de *ITC* e tempo de atuação mínimo dos pares de relés para o sistema elétrico do Estudo de Caso 2 utilizando algoritmo genético com Quase-Newton. Observa-se que a restrição de 0,2s adotada para o *ITC* foi atendida para todos os relés.

Tabela 5.34 - Ajustes com algoritmo genético & Quase-Newton: Estudo de Caso 2.

Relé	M_T	I_p [A]	T_{PRL} [A]
R_1	0,16	399,60	0,52
R_2	0,22	532,68	0,50
R_3	0,16	399,60	0,52
R_4	0,22	516,36	0,50
R_5	0,24	435,08	0,54
R_6	0,21	346,80	0,54
R_7	0,16	352,50	0,50
R_8	0,22	812,03	0,50
R_9	0,22	435,54	0,50
R_{10}	0,22	787,99	0,50
R_{11}	0,22	495,46	0,51
R_{12}	0,22	349,65	0,50
R_{13}	0,22	515,11	0,52
R_{14}	0,22	349,56	0,50
R_{15}	0,21	399,60	0,51
R_{16}	0,24	413,15	0,55
R_{17}	0,22	644,27	0,51
R_{18}	0,19	360,00	0,59
R_{19}	0,18	403,52	0,51
R_{20}	0,23	399,60	0,51
R_{21}	0,23	635,10	0,52
R_{22}	0,15	372,00	0,50
Função de avaliação	11,36s		
Número de gerações	294		

A Figura 5.30 apresenta dois coordenogramas, o primeiro com o par de relés R_{15} e

Tabela 5.35 - Valores de ITC e tempo de atuação mínimo com algoritmo genético & Quase-Newton: Estudo de Caso 2.

P_{RL}	P_{RR}	ITC [s]	T_{PRL} [s]	T_{PRR} [s]	P_{RL}	P_{RR}	ITC [s]	T_{PRL} [s]	T_{PRR} [s]
R_1	R_4	0,51	0,52	1,03	R_{11}	R_{14}	0,45	0,51	0,96
R_2	R_6	0,39	0,50	0,89	R_{12}	R_{13}	0,33	0,50	0,83
R_2	R_{10}	1,06	0,50	1,57	R_{12}	R_{15}	0,45	0,50	0,94
R_2	R_{12}	0,45	0,50	0,96	R_{12}	R_{19}	0,42	0,50	0,92
R_2	R_{14}	0,45	0,50	0,96	R_{13}	R_6	0,36	0,52	0,88
R_3	R_2	0,54	0,52	1,06	R_{13}	R_{10}	1,02	0,52	1,53
R_4	R_6	0,39	0,50	0,89	R_{13}	R_{12}	0,44	0,52	0,96
R_4	R_{10}	1,41	0,50	1,91	R_{14}	R_{11}	0,31	0,50	0,81
R_4	R_{12}	0,46	0,50	0,96	R_{14}	R_{15}	0,45	0,50	0,94
R_4	R_{14}	0,46	0,50	0,96	R_{14}	R_{19}	0,42	0,50	0,92
R_5	R_{10}	1,04	0,54	1,58	R_{15}	R_{17}	0,20	0,51	0,71
R_5	R_{12}	0,42	0,54	0,96	R_{16}	R_{11}	0,27	0,55	0,82
R_5	R_{14}	0,42	0,54	0,96	R_{16}	R_{13}	0,29	0,55	0,84
R_6	R_8	0,38	0,54	0,92	R_{16}	R_{19}	0,39	0,55	0,94
R_7	R_5	0,48	0,50	0,98	R_{17}	R_{22}	0,21	0,51	0,71
R_8	R_9	0,65	0,50	1,15	R_{18}	R_{16}	0,44	0,59	1,04
R_9	R_6	0,40	0,50	0,90	R_{19}	R_{21}	0,39	0,51	0,90
R_9	R_{12}	0,46	0,50	0,96	R_{20}	R_{11}	0,31	0,51	0,82
R_9	R_{14}	0,46	0,50	0,96	R_{20}	R_{13}	0,32	0,51	0,84
R_{10}	R_7	0,24	0,50	0,74	R_{20}	R_{15}	0,45	0,51	0,96
R_{11}	R_6	0,37	0,51	0,88	R_{21}	R_{18}	0,21	0,52	0,73
R_{11}	R_{10}	1,02	0,51	1,53	R_{22}	R_{20}	0,46	0,50	0,97

R_{17} , e o segundo com o par R_3 e R_2 , além da curva de proteção do relé de distância Z . Observa-se que a atuação preferencial é a do relé de distância seguida de R_{15} e por último R_{17} . Para o curto-circuito trifásico a 1% de R_{15} , caso o relé de distância não atue, o relé R_{15} atuaria com tempo de 0,51s e R_{17} atuaria com tempo de 0,71s, obtendo 0,20s de ITC . Da mesma forma, para o curto-circuito trifásico a 1% de R_3 , Figura 5.18(b), caso o relé de distância não atue, o relé R_3 atuaria com tempo de 0,52s e R_2 atuaria com tempo de 1,06s, obtendo 0,54s de ITC , como disposto na Tabela 5.35. Todos os pares de relés foram analisados e os mesmos estão coordenados sem restrições violadas.

5.5.3 Coordenação dos relés direcionais utilizando otimização híbrida: nuvens de partículas com Nelder-Mead

Para os dois estudos de caso utilizando nuvens de partículas com Nelder-Mead, adotou-se como critério de parada o limite máximo de 50 iterações para o Estudo de Caso 1 e 400 iterações para o Estudo de Caso 2, após várias simulações observou-se que estes limites eram suficientes para o processo de otimização. A Figura 5.31 apresenta o desempenho do processo de otimização utilizando nuvens de partículas com Nelder-Mead para o Estudo de Caso 1, no qual pode-se observar que na 38ª iteração o valor mínimo da função de avaliação é alcançado.

Os valores dos ajustes dos relés do Estudo de Caso 1 estão dispostos na Tabela 5.36.

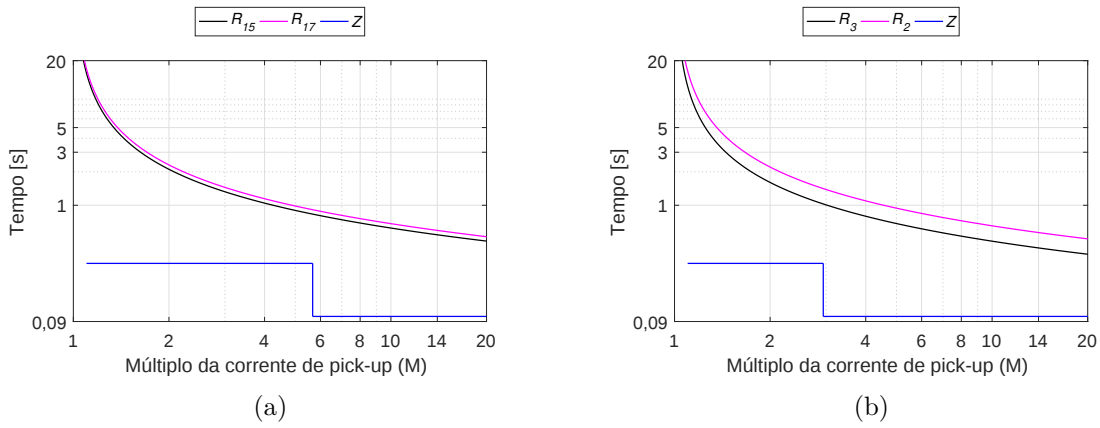


Figura 5.30 - Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com algoritmo genético & Quase-Newton: (a) R_{15} e R_{17} , (b) R_3 e R_2 .

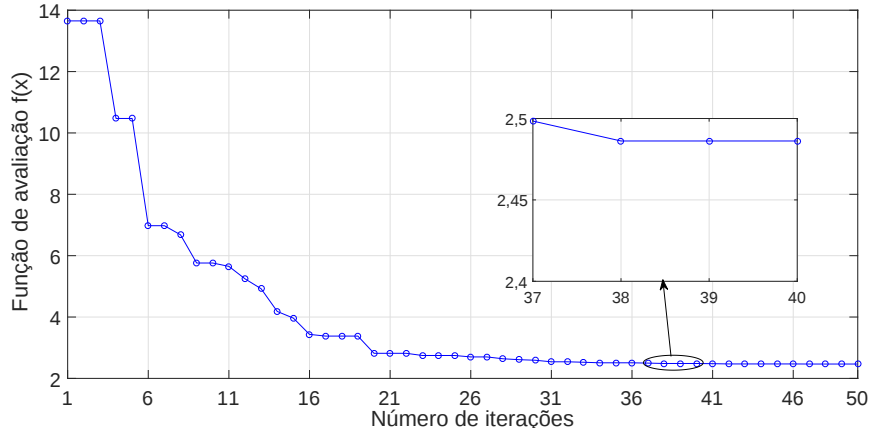


Figura 5.31 - Desempenho do processo de otimização com nuvens de partículas & Nelder-Mead: Estudo de Caso 1.

Para este processo de otimização encontrou-se função de avaliação de 2,47s com 38 iterações. Na Tabela 5.37 estão dispostos os pares de relés com valores de ITC e tempo mínimo de atuação de cada proteção. Observa-se que a restrição adotada para o ITC foi atendida em todos os casos.

A Figura 5.32(a) apresenta as curvas de coordenação dos relés R_4 , R_1 e proteção de distância Z , para o curto-circuito trifásico a 1% de R_4 , primeiramente a proteção de distância Z atua de forma instantânea, R_4 atuaria com tempo de 0,30s e R_1 com tempo de 0,56s, obtendo 0,26s de ITC . De maneira semelhante, para o curto-circuito trifásico a 1% de R_7 o mesmo atuaria com tempo de 0,31s e R_6 com tempo de 0,55s, obtendo 0,24s de ITC , como disposto na Tabela 5.37. Esta análise pode

Tabela 5.36 - Ajustes com nuvens de partículas & Nelder-Mead: Estudo de Caso 1.

Relé	M_T	I_p [A]	T_{PRL} [s]
R_1	0,14	600,00	0,40
R_2	0,09	600,00	0,41
R_3	0,06	600,45	0,20
R_4	0,09	600,00	0,30
R_5	0,07	600,48	0,17
R_6	0,14	600,00	0,35
R_7	0,08	607,87	0,31
R_8	0,05	600,00	0,32
Função de avaliação	2,47s		
Número de iterações	38		

Tabela 5.37 - Valores de ITC e tempo de atuação mínimo com nuvens de partículas & Nelder-Mead: Estudo de Caso 1.

P_{RL}	P_{RR}	ITC [s]	T_{PRL} [s]	T_{PRR} [s]
R_2	R_5	0,29	0,41	0,70
R_2	R_7	0,20	0,41	0,61
R_3	R_7	0,42	0,20	0,61
R_3	R_1	0,36	0,20	0,56
R_4	R_5	0,40	0,30	0,70
R_4	R_1	0,25	0,30	0,56
R_5	R_8	0,50	0,17	0,67
R_6	R_3	1,09	0,35	1,43
R_7	R_6	0,24	0,31	0,55
R_8	R_4	0,26	0,32	0,58

ser realizada para todos os outros relés e observa-se que todos estão coordenados e sem restrições violadas.

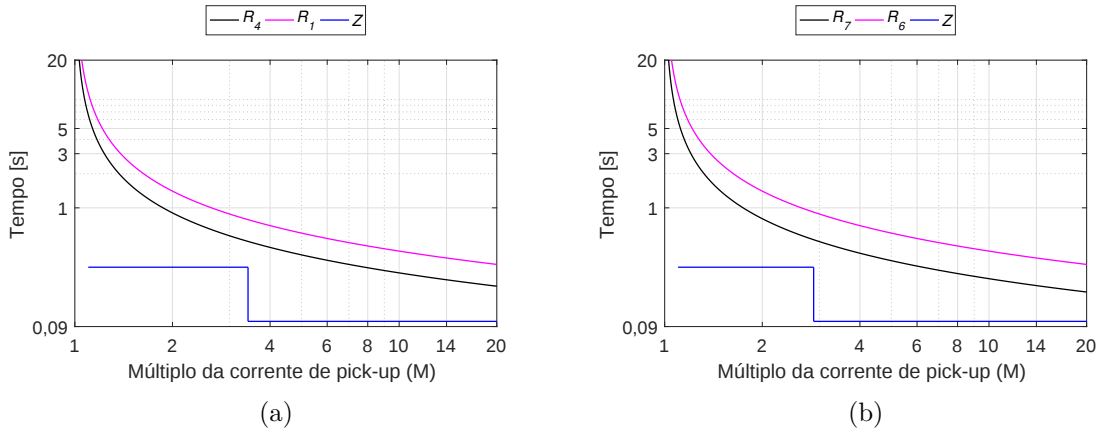


Figura 5.32 - Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 1 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_4 e R_1 , (b) R_7 e R_6 .

A Figura 5.33 apresenta o desempenho do processo de otimização utilizando algoritmo nuvem de partículas com Nelder-Mead para o Estudo de Caso 2, no qual é

observado nas primeiras iterações valores altos da função de avaliação e após 70 iterações este valor reduz, estagnando e atingindo o valor mínimo da função de avaliação na iteração 293.

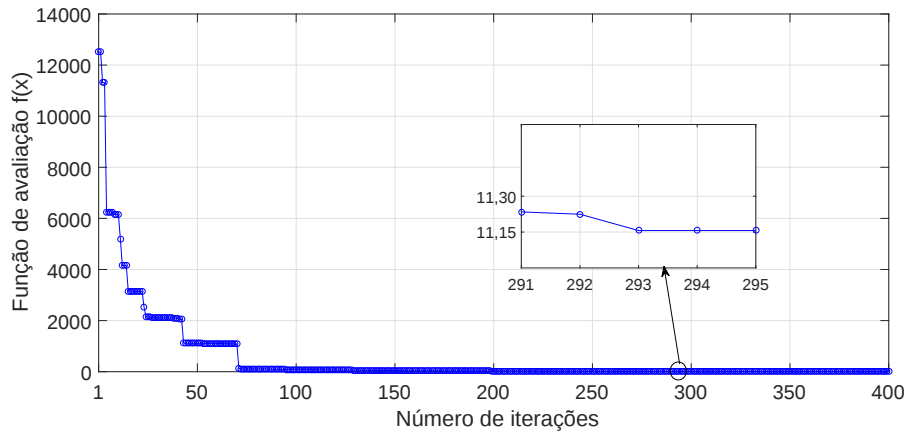


Figura 5.33 - Desempenho do processo de otimização com nuvens de partículas & Nelder-Mead: Estudo de Caso 2.

Os valores dos ajustes dos relés do Estudo de Caso 2 estão dispostos na Tabela 5.38. Para este processo de otimização encontrou-se função de avaliação de 11,15s com 293 iterações. Na Tabela 5.39 estão dispostos os pares de relés com valores de *ITC* e tempo mínimo de atuação de cada proteção. Observa-se que a restrição adotada para o *ITC* foi atendida em todos os casos.

A Figura 5.34(a) apresenta as curvas de coordenação dos relés R_{15} , R_{17} e proteção de distância Z , para o curto-circuito trifásico a 1% de R_{15} , primeiramente a proteção de distância Z atua de forma instantânea, R_{15} atuaria com tempo de 0,51s e R_{17} com tempo de 0,71s, obtendo 0,20s de *ITC*. De forma semelhante para o curto-circuito trifásico a 1% de R_3 o mesmo atuaria com tempo de 0,52s e R_2 com tempo de 1,03s, obtendo 0,51s de *ITC*, como disposto na Tabela 5.39. Esta análise pode ser realizada para todos os outros relés e observa-se que todos estão coordenados e sem restrições violadas.

5.5.4 Coordenação dos relés direcionais utilizando otimização híbrida: nuvens de partículas com Quase-Newton

Para os dois estudos de caso utilizando nuvens de partículas com Quase-Newton, adotou-se como critério de parada o limite máximo de 50 iterações para o Estudo de Caso 1 e 400 iterações para o Estudo de Caso 2, estes limites foram adotados

Tabela 5.38 - Ajustes com nuvens de partículas & Nelder-Mead: Estudo de Caso 2.

Relé	M_T	I_p [A]	T_{PRL} [A]
R_1	0,16	399,60	0,52
R_2	0,22	516,36	0,50
R_3	0,16	399,60	0,52
R_4	0,22	516,36	0,50
R_5	0,23	435,08	0,51
R_6	0,20	346,80	0,51
R_7	0,16	346,80	0,50
R_8	0,22	812,03	0,50
R_9	0,22	435,54	0,50
R_{10}	0,22	787,99	0,50
R_{11}	0,22	463,13	0,50
R_{12}	0,22	349,56	0,50
R_{13}	0,22	463,13	0,50
R_{14}	0,22	349,56	0,50
R_{15}	0,21	399,60	0,51
R_{16}	0,22	410,21	0,50
R_{17}	0,22	643,99	0,51
R_{18}	0,16	445,98	0,56
R_{19}	0,18	399,60	0,51
R_{20}	0,23	399,60	0,51
R_{21}	0,22	635,10	0,50
R_{22}	0,15	366,57	0,50
Função de avaliação	11, 15s		
Número de iterações	293		

Tabela 5.39 - Valores de ITC e tempo de atuação mínimo com nuvens de partículas & Nelder-Mead: Estudo de Caso 2.

P_{RL}	P_{RR}	ITC [s]	T_{PRL} [s]	T_{PRR} [s]	P_{RL}	P_{RR}	ITC [s]	T_{PRL} [s]	T_{PRR} [s]
R_1	R_4	0,51	0,52	1,03	R_{11}	R_{14}	0,46	0,50	0,96
R_2	R_6	0,35	0,50	0,85	R_{12}	R_{13}	0,29	0,50	0,78
R_2	R_{10}	1,07	0,50	1,57	R_{12}	R_{15}	0,45	0,50	0,94
R_2	R_{12}	0,46	0,50	0,96	R_{12}	R_{19}	0,41	0,50	0,91
R_2	R_{14}	0,46	0,50	0,96	R_{13}	R_6	0,34	0,50	0,84
R_3	R_2	0,51	0,52	1,03	R_{13}	R_{10}	1,03	0,50	1,53
R_4	R_6	0,35	0,50	0,85	R_{13}	R_{12}	0,46	0,50	0,96
R_4	R_{10}	1,41	0,50	1,91	R_{14}	R_{11}	0,29	0,50	0,78
R_4	R_{12}	0,46	0,50	0,96	R_{14}	R_{15}	0,45	0,50	0,94
R_4	R_{14}	0,46	0,50	0,96	R_{14}	R_{19}	0,41	0,50	0,91
R_5	R_{10}	1,06	0,51	1,58	R_{15}	R_{17}	0,20	0,51	0,71
R_5	R_{12}	0,44	0,51	0,96	R_{16}	R_{11}	0,29	0,50	0,79
R_5	R_{14}	0,44	0,51	0,96	R_{16}	R_{13}	0,29	0,50	0,79
R_6	R_8	0,41	0,51	0,92	R_{16}	R_{19}	0,43	0,50	0,93
R_7	R_5	0,44	0,50	0,94	R_{17}	R_{22}	0,20	0,51	0,71
R_8	R_9	0,65	0,50	1,15	R_{18}	R_{16}	0,39	0,56	0,95
R_9	R_6	0,36	0,50	0,86	R_{19}	R_{21}	0,35	0,51	0,86
R_9	R_{12}	0,46	0,50	0,96	R_{20}	R_{11}	0,28	0,51	0,79
R_9	R_{14}	0,46	0,50	0,96	R_{20}	R_{13}	0,28	0,51	0,79
R_{10}	R_7	0,23	0,50	0,73	R_{20}	R_{15}	0,45	0,51	0,96
R_{11}	R_6	0,34	0,50	0,84	R_{21}	R_{18}	0,20	0,50	0,70
R_{11}	R_{10}	1,03	0,50	1,53	R_{22}	R_{20}	0,47	0,50	0,97

após observar que eram suficientes para o processo de otimização. A Figura 5.35 apresenta o desempenho do processo de otimização utilizando nuvens de partículas com Quase-Newton para o Estudo de Caso 1, onde é observado que na 48ª iteração o valor mínimo da função de avaliação é atingido, permanecendo estagnado até o

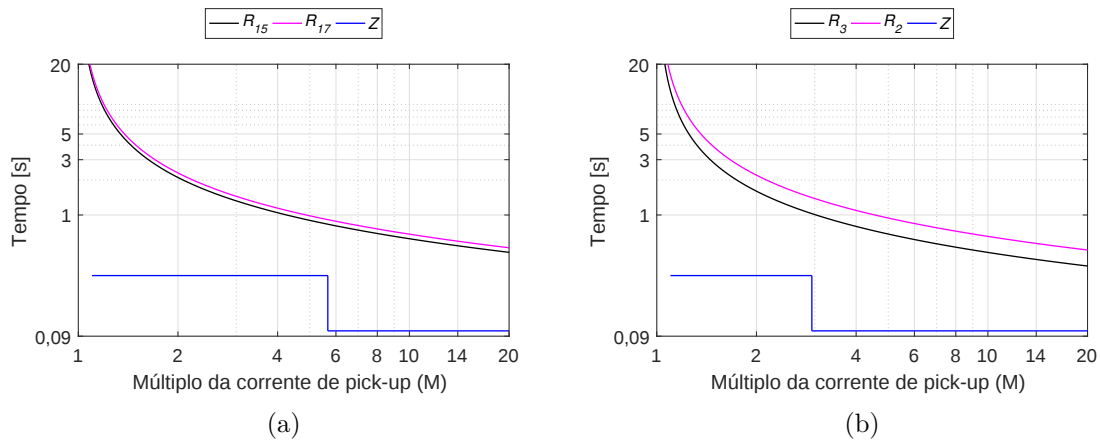


Figura 5.34 - Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_{15} e R_{17} , (b) R_3 e R_2 .

final do processo.

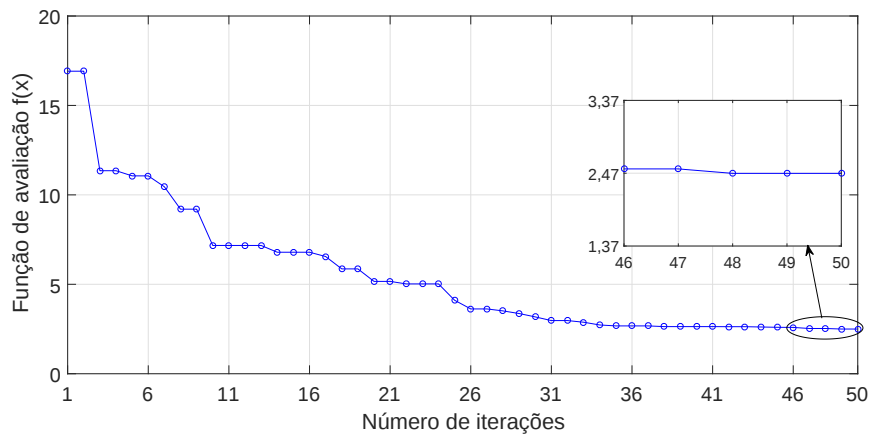


Figura 5.35 - Desempenho do processo de otimização com nuvens de partículas & Quase-Newton: Estudo de Caso 1.

Os valores dos ajustes dos relés do Estudo de Caso 1 estão dispostos na Tabela 5.40. Para este processo de otimização encontrou-se função de avaliação de 2,47s com 48 iterações. Na Tabela 5.41 estão dispostos os pares de relés com valores de ITC e tempo mínimo de atuação de cada proteção. Observa-se que a restrição adotada para o ITC foi atendida em todos os casos.

A Figura 5.36 apresenta dois coordenogramas, com os relés R_4 , R_1 e R_7 , R_6 , nos dois coordenogramas observa-se a atuação primeiramente da proteção de distância

Tabela 5.40 - Ajustes com nuvens de partículas & Quase-Newton: Estudo de Caso 1.

Relé	M_T	I_p [A]	T_{PRL} [s]
R_1	0,14	600,00	0,40
R_2	0,09	600,00	0,41
R_3	0,06	600,57	0,20
R_4	0,09	600,00	0,30
R_5	0,07	600,00	0,17
R_6	0,14	611,04	0,35
R_7	0,08	608,04	0,31
R_8	0,05	600,00	0,32
Função de avaliação	2,47s		
Número de iterações	48		

Tabela 5.41 - Valores de ITC e tempo de atuação mínimo com nuvens de partículas & Quase-Newton: Estudo de Caso 1.

P_{RL}	P_{RR}	ITC [s]	T_{PRL} [s]	$T_{P_{RR}}$ [s]
R_2	R_5	0,29	0,41	0,70
R_2	R_7	0,20	0,41	0,61
R_3	R_7	0,42	0,20	0,61
R_3	R_1	0,36	0,20	0,56
R_4	R_5	0,40	0,30	0,70
R_4	R_1	0,26	0,30	0,56
R_5	R_8	0,50	0,17	0,67
R_6	R_3	1,09	0,35	1,43
R_7	R_6	0,24	0,31	0,55
R_8	R_4	0,26	0,32	0,58

seguida da proteção de retaguarda local e por fim da proteção de retaguarda remota. Para o curto-circuito trifásico a 1% de R_4 , a proteção de distância Z atua de forma instantânea, caso a proteção principal Z não atue, R_4 atuaria com tempo de 0,30s e R_1 com tempo de 0,56s, obtendo 0,26s de ITC . De maneira semelhante para o curto-circuito trifásico a 1% de R_7 caso a proteção principal Z não atue, R_7 atuaria com tempo de 0,31s e R_6 com tempo de 0,55s, obtendo 0,24s de ITC , como disposto na Tabela 5.41. Esta análise pode ser realizada para todos os outros relés e observa-se que todos estão coordenados e sem restrições violadas.

A Figura 5.37 apresenta o desempenho do processo de otimização utilizando nuvens de partículas com Quase-Newton para o Estudo de Caso 2, na qual é observado que apesar do método começar com valor alto da função de avaliação, o mesmo converge para valores satisfatórios.

Os valores dos ajustes dos relés do Estudo de Caso 2 estão dispostos na Tabela 5.42. Para este processo de otimização encontrou-se função de avaliação de 11,16s com 380 iterações. Na Tabela 5.43 estão dispostos os pares de relés com valores de ITC e tempo mínimo de atuação de cada proteção. Observa-se que a restrição adotada para o ITC foi atendida em todos os casos.

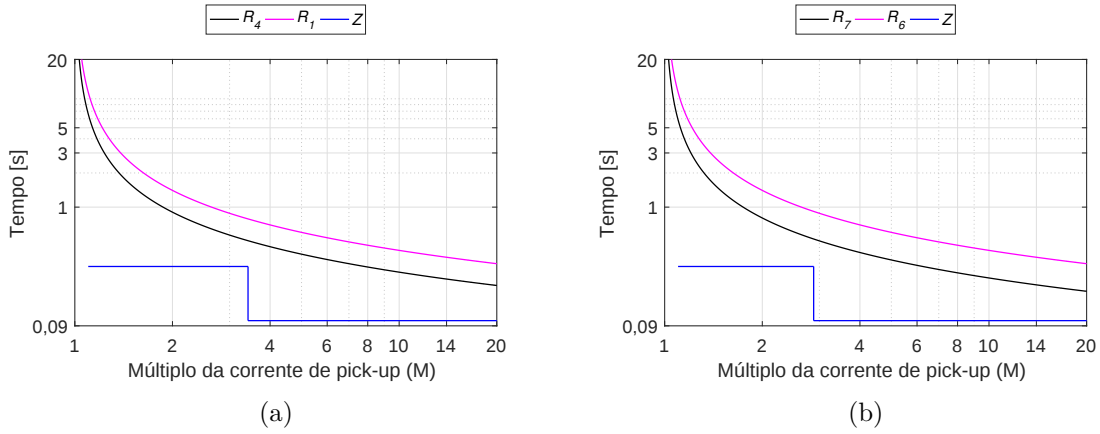


Figura 5.36 - Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 1 com nuvens de partículas & Quase-Newton: (a) R_4 e R_1 , (b) R_7 e R_6 .

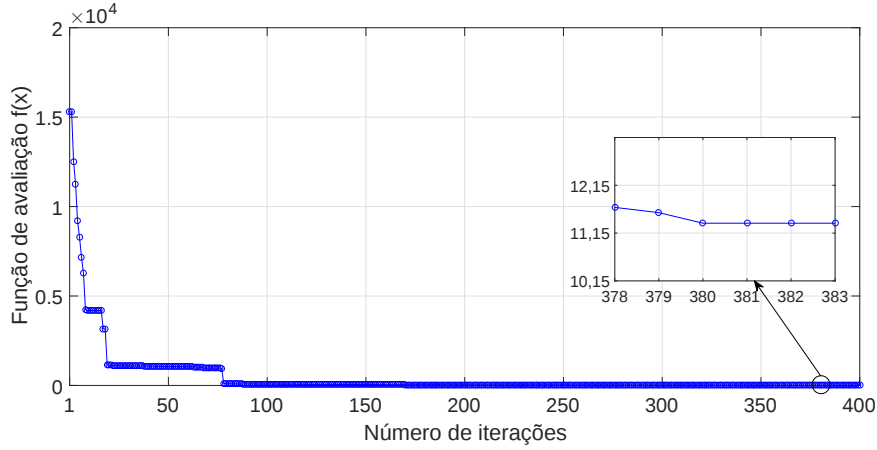


Figura 5.37 - Desempenho do processo de otimização com nuvens de partículas & Quase-Newton: Estudo de Caso 2.

A Figura 5.38 apresenta dois coordenogramas, o par R_{15} e R_{17} e o par R_3 e R_2 , além da curva de proteção do relé de distância Z . Observa-se que o relé de distância atua com tempo menor que R_{15} e menor que R_{17} , respeitando o ITC . Para o curto-circuito trifásico a 1% de R_{15} , caso o relé de distância não atue, o relé R_{15} atuaria com tempo de 0,51s e R_{17} atuaria com tempo de 0,71s, obtendo 0,20s de ITC . De maneira semelhante, para o curto-circuito trifásico a 1% de R_3 , Figura 5.38(b), caso o relé de distância não atue, o relé R_3 atuaria com tempo de 0,52s e R_2 atuaria com tempo de 1,03s, obtendo 0,51s de ITC , como disposto na Tabela 5.43. Esta análise pode ser realizada para todos os outros relés e observa-se que todos estão coordenados e sem restrições violadas.

Tabela 5.42 - Ajustes com nuvens de partículas & Quase-Newton: Estudo de Caso 2.

Relé	M_T	I_p [A]	T_{PRL} [A]
R_1	0,16	399,60	0,52
R_2	0,22	516,36	0,50
R_3	0,16	399,60	0,52
R_4	0,22	516,36	0,50
R_5	0,23	435,08	0,51
R_6	0,20	346,80	0,51
R_7	0,16	346,80	0,50
R_8	0,22	812,03	0,50
R_9	0,22	435,54	0,50
R_{10}	0,22	787,99	0,50
R_{11}	0,22	463,13	0,50
R_{12}	0,22	349,56	0,50
R_{13}	0,22	463,13	0,50
R_{14}	0,22	349,56	0,50
R_{15}	0,21	399,60	0,51
R_{16}	0,22	410,21	0,50
R_{17}	0,22	643,99	0,51
R_{18}	0,17	404,77	0,56
R_{19}	0,18	399,60	0,51
R_{20}	0,23	399,60	0,51
R_{21}	0,22	635,10	0,50
R_{22}	0,15	366,57	0,50
Função de avaliação	11, 16s		
Número de iterações	380		

Tabela 5.43 - Valores de ITC e tempo de atuação mínimo com nuvens de partículas & Quase-Newton: Estudo de Caso 2.

P_{RL}	P_{RR}	ITC [s]	T_{PRL} [s]	T_{PRR} [s]	P_{RL}	P_{RR}	ITC [s]	T_{PRL} [s]	T_{PRR} [s]
R_1	R_4	0,51	0,52	1,03	R_{11}	R_{14}	0,46	0,50	0,96
R_2	R_6	0,35	0,50	0,85	R_{12}	R_{13}	0,29	0,50	0,78
R_2	R_{10}	1,07	0,50	1,57	R_{12}	R_{15}	0,45	0,50	0,94
R_2	R_{12}	0,46	0,50	0,96	R_{12}	R_{19}	0,41	0,50	0,91
R_2	R_{14}	0,46	0,50	0,96	R_{13}	R_6	0,34	0,50	0,84
R_3	R_2	0,51	0,52	1,03	R_{13}	R_{10}	1,03	0,50	1,53
R_4	R_6	0,35	0,50	0,85	R_{13}	R_{12}	0,46	0,50	0,96
R_4	R_{10}	1,41	0,50	1,91	R_{14}	R_{11}	0,29	0,50	0,78
R_4	R_{12}	0,46	0,50	0,96	R_{14}	R_{15}	0,45	0,50	0,94
R_4	R_{14}	0,46	0,50	0,96	R_{14}	R_{19}	0,41	0,50	0,91
R_5	R_{10}	1,06	0,51	1,58	R_{15}	R_{17}	0,20	0,51	0,71
R_5	R_{12}	0,44	0,51	0,96	R_{16}	R_{11}	0,29	0,50	0,79
R_5	R_{14}	0,44	0,51	0,96	R_{16}	R_{13}	0,29	0,50	0,79
R_6	R_8	0,41	0,51	0,92	R_{16}	R_{19}	0,43	0,50	0,93
R_7	R_5	0,44	0,50	0,94	R_{17}	R_{22}	0,20	0,51	0,71
R_8	R_9	0,65	0,50	1,15	R_{18}	R_{16}	0,38	0,56	0,95
R_9	R_6	0,36	0,50	0,86	R_{19}	R_{21}	0,35	0,51	0,86
R_9	R_{12}	0,46	0,50	0,96	R_{20}	R_{11}	0,28	0,51	0,79
R_9	R_{14}	0,46	0,50	0,96	R_{20}	R_{13}	0,28	0,51	0,79
R_{10}	R_7	0,23	0,50	0,73	R_{20}	R_{15}	0,45	0,51	0,96
R_{11}	R_6	0,34	0,50	0,84	R_{21}	R_{18}	0,20	0,50	0,70
R_{11}	R_{10}	1,03	0,50	1,53	R_{22}	R_{20}	0,47	0,50	0,97

5.6 Comparação dos resultados de otimização

Para comparar a eficiência entre os métodos de otimização, calcula-se os tempos de:

i) **simulação**, ii) **otimização** e iii) **processamento**. O tempo de **simulação** é o

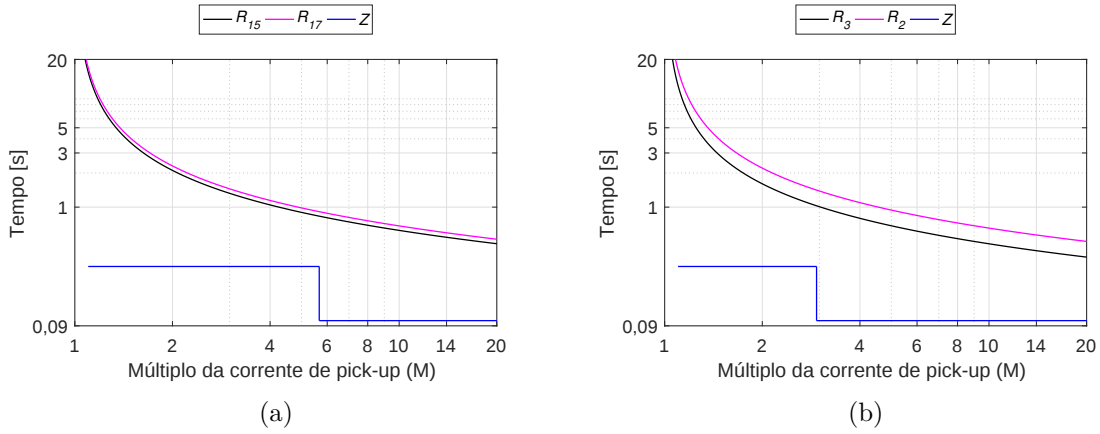


Figura 5.38 - Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Quase-Newton: (a) R_{15} e R_{17} , (b) R_3 e R_2 .

tempo médio gasto pela máquina para realizar a simulação de um dos estudos de caso. Isto significa que o tempo de **simulação** é o mesmo para todos os métodos de otimização e muda de estudo de caso para estudo de caso. O simulador utilizado neste trabalho é analítico e encontra-se no Apêndice A, tendo como entradas os ajustes de *pick-up*, múltiplos de tempo M_T , valores de corrente de curto-circuito, o tipo de curva característica do relé e os pares de relés. Os simuladores analíticos, normalmente são de rápida execução/simulação.

O tempo de **otimização** é a média do tempo gasto no método de otimização para realizar uma iteração. O tempo de **processamento** é a soma do tempo de **simulação** com o tempo de **otimização**, sendo assim tempo médio de processamento. Para encontrar os tempos de **simulação** e de **otimização** cada método foi simulado/rodado 50 vezes. Para o Estudo de Caso 1 o tempo de simulação foi de **0,000260s** e para o Estudo de Caso 2 o tempo de simulação foi de **0,000446s**. Nas Tabela 5.44 e Tabela 5.45 estão dispostos os tempos de otimização e de processamento para os Estudo de Caso 1 e Estudo de Caso 2, respectivamente.

Levando em conta os tempos de simulação: 0,000260s para o Estudo de Caso 1 e 0,000446s para o Estudo de Caso 2 e os tempos de otimização dispostos nas Tabela 5.44 e Tabela 5.45, pode-se calcular a parcela de tempo de simulação no **tempo total de processamento**, ou seja, quanto foi consumido de tempo na simulação e quanto foi consumido de tempo no processo de otimização. As Tabela 5.46 e Tabela 5.47 dispõem os valores médios dos tempos utilizados por método de otimização proposto.

Tabela 5.44 - Tempos de otimização e de processamento: Estudo de caso 1.

Método	Tempo de otimização [s]	Tempo de processamento [s]
Nelder-Mead	0,005747	0,006007
Quase-Newton	0,002929	0,003189
Algoritmo genético	0,000101	0,000361
Nuvem de partículas	0,000110	0,000370
Algoritmo genético-Nelder-Mead	0,000676	0,000936
Algoritmo genético-Quase Newton	0,000676	0,000936
Nuvem de partículas-Nelder-Mead	0,000685	0,000945
Nuvem de partículas-Quase Newton	0,000403	0,000663

Tabela 5.45 - Tempos de otimização e de processamento: Estudo de caso 2.

Método	Tempo de otimização [s]	Tempo de processamento [s]
Nelder-Mead	0,009454	0,009900
Quase-Newton	0,008094	0,008540
Algoritmo genético	0,000554	0,001000
Nuvem de partículas	0,000544	0,000990
Algoritmo genético-Nelder-Mead	0,001499	0,001945
Algoritmo genético-Quase Newton	0,001363	0,001809
Nuvem de partículas-Nelder-Mead	0,001489	0,001935
Nuvem de partículas-Quase Newton	0,001353	0,001799

Tabela 5.46 - Parcela do tempo de simulação no tempo de processamento: Estudo de Caso 1.

Método	Tempo processamento	% Tempo simulação
Nelder-Mead	0,00601	4,33
Quase-Newton	0,00319	8,15
Algoritmo genético	0,00036	72,02
Nuvem de partículas	0,00037	70,27
Algoritmo genético-Nelder-Mead	0,00094	27,79
Algoritmo genético-Quase-Newton	0,00094	27,79
Nuvem de partículas-Nelder-Mead	0,00094	27,52
Nuvem de partículas-Quase-Newton	0,00066	39,22

Tabela 5.47 - Parcela do tempo de simulação no tempo de processamento: Estudo de Caso 2.

Método	Tempo processamento	% Tempo simulação
Nelder-Mead	0,00990	4,51
Quase-Newton	0,00854	5,22
Algoritmo genético	0,00100	44,60
Nuvem de partículas	0,00099	45,05
Algoritmo genético-Nelder-Mead	0,00195	22,93
Algoritmo genético-Quase-Newton	0,00181	24,65
Nuvem de partículas-Nelder-Mead	0,00194	23,04
Nuvem de partículas-Quase-Newton	0,00180	24,79

É observado nas Tabela 5.46 e Tabela 5.47 que nos métodos híbridos ocorre a redução do tempo gasto na simulação. A hibridização reduz o tempo de simulação

de aproximadamente 70% para aproximadamente 27% para o Estudo de Caso 1 e de aproximadamente 45% para aproximadamente 23% para o Estudo de Caso 2. Nos algoritmos híbridos foram implementados/adotado que a cada dez gerações/iteração do algoritmo heurístico, o algoritmo determinístico seria chamado/utilizado. Com isto, o tempo de otimização dos métodos híbridos é a soma do tempo de otimização do algoritmo heurístico mais um décimo do tempo de otimização do algoritmo determinístico. Para o algoritmo genético, o cálculo do tempo de otimização foi realizado dividindo o tempo de otimização gasto para uma geração pelo número de indivíduo da geração. E para o algoritmo nuvens de partícula, o cálculo foi realizado de forma similar ao do algoritmo genético.

O esforço computacional no processo de otimização está intimamente ligado a não linearidade do problema a ser solucionado e ao número de parâmetros a serem otimizados. Para o Estudo de Caso 1 foram otimizados dezesseis parâmetros e para o Estudo de Caso 2 foram otimizados 44 parâmetros. Por este motivo existe a diferença no tempo de processamento entre Estudo de Caso 1 e o Estudo de Caso 2, com tempo a mais de aproximadamente 28% para os métodos determinísticos, 107% para os métodos heurísticos e 88% para os métodos híbridos. Após a realização do processo de otimização utilizando os oito métodos propostos, analisa-se a otimização dos métodos determinísticos Nelder-Mead e Quase Newton sem a abordagem semi-empírica. A Tabela 5.48 dispõe os valores obtidos do desempenho destes métodos encontrando o valor de x_0 como a média aritmética dos valores mínimos e máximos dos parâmetros de entrada, dados por (4.7) e (4.9).

Tabela 5.48 - Desempenho dos métodos determinísticos sem a abordagem semi-empírica.

Estudo de Caso 1			
Método	Função de Avaliação [s]	Tempo de processamento [s]	Número de iterações
Nelder-Mead	15	2,96	≈ 100
Quase-Newton	2,53	1,34	≈ 50
Estudo de Caso 2			
Nelder-Mead	2013,37	5,94	≈ 100
Quase-Newton	1504,68	3,23	≈ 50

Os valores dispostos na Tabela 5.48 indicam o quanto os métodos determinísticos necessitam de boas sementes (chute inicial x_0) para realizar o processo de otimização. Quando utilizada a **abordagem semi-empírica** para encontrar os valores de x_0 , obtêm-se o disposto na Tabela 5.49. Os valores altos da função de avaliação dispostos na Tabela 5.48 se deve as penalizações atribuídas à função de avaliação. As restrições aumentam a quantidade de vales e picos existentes no processo de otimização e

provocam o aumento dos pontos/regiões de ótimos locais. Na Tabela 5.49, os valores obtidos utilizando a **abordagem semi-empírica**, não violou nenhuma restrição, ocasionando valores da função de avaliação menores. Neste caso, a abordagem semi-empírica realizou a busca global enquanto o método de otimização determinístico realizou a busca local.

Tabela 5.49 - Desempenho dos métodos determinísticos com a abordagem semi-empírica.

Estudo de Caso 1			
Método	Função de Avaliação [s]	Tempo de processamento [s]	Número de iterações
Nelder-Mead	2,47	0,012	2
Quase-Newton	2,51	0,051	16
Estudo de Caso 2			
Nelder-Mead	11,45	0,198	20
Quase-Newton	11,80	0,154	18

A função de avaliação é a medida que indica a eficiência dos parâmetros de entrada testados. Para uma função de avaliação de 11s, por exemplo, significa que o **tempo total** de atuação das proteções de retaguarda local é 11s. Caso fosse 20s, este valor poderia comprometer a atuação das proteções. Definido os tempos de simulação, otimização e processamento e a adequação de geração para iteração, é possível comparar os oito métodos propostos, indicando qual o mais eficiente para cada um dos dois estudos de caso.

Os tempos de processamento dos métodos determinísticos foram levados em consideração a utilização da **abordagem semi-empírica**. Para o Estudo de Caso 1 o método de Nelder-Mead obteve função de avaliação 2,47s e tempo de processamento de 0,012s, sendo o mais eficiente, como disposto na Tabela 5.50. Os **tempos de processamento total** disposto na Tabela 5.50 é o número de iterações encontrados para cada método de otimização multiplicado pelo tempo de processamento de uma iteração, disposto na Tabela 5.44 para o Estudo de Caso 1. Neste estudo de caso, todos os métodos convergiram, observando que a diferença máxima no valor da função de avaliação de um método para o outro é de 2,76%, com média de 2,48s e desvio padrão de 0,02.

O Estudo de Caso 2 trata-se de sistema de grande porte, onde os métodos determinísticos não conseguem realizar o processo de otimização e obter resultados satisfatórios, como disposto na Tabela 5.48. No entanto, utilizando a **abordagem semi-empírica**, foi possível realizar a otimização com os métodos determinísticos e comparar os resultados. Para o Estudo de Caso 2, o algoritmo nuvem de partículas hibridizado com Nelder-Mead foi o método mais eficiente, como disposto na

Tabela 5.50 - Número de iteração e **tempo de processamento total** para cada método de otimização: Estudo de Caso 1.

Métodos propostos	Função de avaliação [s]	Tempo de processamento [s]	Número de iterações
Nelder-Mead	2,47	0,012	2
Quase-Newton	2,51	0,051	16
Algoritmo genético	2,54	6,390	17700
Nuvem de partículas	2,47	1,221	3300
Algoritmo genético-Nelder Mead	2,48	8,094	8650
Algoritmo genético-Quase Newton	2,47	8,515	9100
Nuvem de partículas-Nelder Mead	2,47	3,590	3800
Nuvem de partículas-Quase Newton	2,47	3,182	4800

Tabela 5.51. Todos os métodos de otimização utilizados no Estudo de Caso 2 convergiram, com diferença de no máximo 5,51% entre os valores da função de avaliação, obtendo média de 11,35s e desvio padrão de 0,2.

Tabela 5.51 - Número de iteração e **tempo de processamento total** para cada método de otimização: Estudo de Caso 2.

Métodos propostos	Função de avaliação [s]	Tempo de processamento [s]	Número de iterações
Nelder-Mead	11,45	0,198	20
Quase-Newton	11,80	0,154	18
Algoritmo genético	11,39	41,000	41000
Nuvem de partículas	11,17	29,700	30000
Algoritmo genético-Nelder Mead	11,35	28,986	14900
Algoritmo genético-Quase Newton	11,36	26,598	14700
Nuvem de partículas-Nelder Mead	11,15	56,707	29300
Nuvem de partículas-Quase Newton	11,16	68,377	38000

A partir das Tabela 5.50 e Tabela 5.51 é possível realizar comparação entre os métodos propostos neste trabalho e os métodos propostos por Moro (2014) e Bottura (2014). A Tabela 5.52 dispõe a eficiência dos métodos propostos em comparação com os métodos encontrados na literatura. Como foi utilizado a mesma função de avaliação validada nas Tabela 5.2 e Tabela 5.4, pode-se realizar a comparação entre os métodos.

Tabela 5.52 - Comparação entre método proposto e literatura.

Estudo de Caso 1			
Método	Função de avaliação [s]	Tempo de processamento	Número de iterações
Nuvem de partículas Moro (2014)	4,068	9,46 [mim]	5000
Nelder-Mead proposto	2,47	0,012 [s]	2
Estudo de Caso 2			
Algoritmo genético híbrido Bottura (2014)	11,60	28 [mim]	3000
Nuvem de partículas-Nelder Mead proposto	11,15	56,707 [s]	29300

No Estudo de Caso 1, [Moro \(2014\)](#) provavelmente não utilizou outro critério de parada a não ser o número de iterações e o valor da função de avaliação. Desta forma, seu algoritmo somente parava seu fluxo com 5000 iterações. Com relação ao Estudo de Caso 2, o algoritmo genético utilizado por [Bottura \(2014\)](#) foi de codificação binária e possivelmente necessitando de elevado esforço computacional. Estas podem ser as explicações dos elevados tempos de processamento e número de iterações.

5.7 Comentários

Para o sistema elétrico do Estudo de Caso 1 e Estudo de Caso 2, todos os métodos convergiram para valores otimizados, pois os ajustes encontrados são próximos dos limites inferiores e as restrições para os valores de *ITC* foram atendidas em todos os casos. Os valores das funções de avaliação obtidos são menores que o da literatura, com tempos de processamento inferiores.

Escolheu-se as mesmas curvas de relés para serem apresentadas nos coordenogramas para efeitos de comparação entre os métodos. No entanto, a análise foi realizada para todos os outros relés e pode-se afirmar que nos outros pares de relés foi atingida a coordenação. As curvas geradas pelo melhor método de otimização do Estudo de Caso 1 e Estudo de Caso 2 estão no Apêndice B e Apêndice C, respectivamente. Optou-se pela curva norma inversa como parâmetro apenas para comparar os resultados com outras pesquisas da literatura, o ajuste realizado em sistemas reais dependem da curva do relé mais próximo a ser coordenado.

Observou-se neste trabalho que para sistemas elétricos com várias variáveis o desempenho dos métodos determinísticos não obteve resultados satisfatórios sem a utilização da **abordagem semi-empírica**. Para os métodos heurísticos a maior dificuldade foi determinar as variáveis internas do método, como: para o algoritmo genético, o número máximo de gerações, o tamanho do torneio, taxas de mutação e de cruzamento entre outros e para o método nuvem de partículas, o tamanho da população, parâmetro cognitivo, parâmetro social e coeficiente de inércia. Para ajustar os parâmetros dos algoritmos genético e nuvem de partículas foi realizado processo empírico, pois estes parâmetros são dependentes do problema em questão. Para os métodos determinísticos a dificuldade foi realizar a **abordagem semi-empírica**.

Neste trabalho, inicialmente foram testados os métodos determinísticos, verificando que tanto para o Estudo de Caso 1 quanto para o Estudo de Caso 2, estes métodos não convergiam devido a ampla faixa de valores no espaço de busca dos parâmetros de entrada do simulador. A **abordagem semi-empírica** foi capaz de retirar os

métodos determinísticos dos mínimos locais, testando vários chutes iniciais x_0 .

Os métodos propostos neste trabalho foram testados em sistema elétrico com 44 parâmetros (Estudo de Caso 2), para se obter mais comparativos, os métodos poderão ser testados em sistemas elétricos com mais variáveis. Para o estudo de otimização de relés direcionais de sobrecorrente, o maior problema é definir os limites operativos do sistema, pois são eles que vão definir o espaço de busca das variáveis a serem otimizadas.

O tempo gasto na abordagem semi-empírica para encontrar o valor inicial x_0 foi de 4,10s em 300 simulações para o Estudo de Caso 1, e 23,98s em 500 simulações para o Estudo de Caso 2. Neste trabalho foi utilizada somente a distribuição uniforme na abordagem semi-empírica, no entanto, pode-se utilizar outras funções de distribuição que melhor se adéque ao problema a ser resolvido. Nos trabalhos utilizados para comparação, [Moro \(2014\)](#) e [Bottura \(2014\)](#), não é definido iteração. Portanto, não é possível afirmar que na Tabela 5.52, o que chama-se iteração é o mesmo para todos os trabalhos.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO

Na literatura há vários estudos de coordenação de relés direcionais usando técnicas inteligentes. O uso destes algoritmos se dão por se tratar de técnicas capazes de solucionar problemas não lineares. No entanto, o tempo de processamento utilizando estas técnicas é elevado, não havendo a comparação com métodos determinísticos, heurísticos e híbridos, a fim de analisar a eficiência destes métodos. Este trabalho realizou a comparação dos métodos determinísticos Nelder-Mead e Quase Newton com os métodos heurísticos algoritmo genético e nuvens de partículas e com métodos hibridizados dos determinísticos com heurísticos.

Os métodos analisados apresentaram-se eficientes, garantindo a coordenação dos relés direcionais com ajustes otimizados. O trabalho apresentou métodos para determinar os ajustes de parametrização de relés direcionais de sobrecorrente utilizando como estudo de caso dois sistemas: o Estudo de Caso 1 é sistema de transmissão malhado onde a contribuição das correntes de curto-circuito se dão por ambos os lados e o Estudo de Caso 2 trata-se de sistema real que é porção do sistema elétrico brasileiro, situado em São Paulo sob concessão da CTEEP com 22 relés e onze linhas de transmissão, tendo contribuição de correntes de curto-circuito em todos os sentidos.

Os métodos determinísticos só convergiram para soluções ótimas, devido a utilização da abordagem semi-empírica para encontrar o valor inicial x_0 . A definição do espaço de busca de cada parâmetro é fundamental, pois acelera o processo de otimização, melhorando assim o desempenho do algoritmo. Principalmente para os valores de M_T mínimo pois estes valores impedem que o relé direcional atue antes do relé de distância. A ferramenta proposta neste trabalho é apenas auxílio para o engenheiro, visto que é necessário a análise dos resultados para que não haja atuação indevida das proteções.

Desta forma, conclui-se que o método proposto obteve resultados satisfatórios, fazendo com que esta metodologia se torne importante ferramenta na realização de estudos de seletividade em sistemas que tenham relés direcionais de sobrecorrente.

6.1 Contribuições do Trabalho

As contribuições podem assim serem descritas:

- Desenvolvimento de software para aplicação prática.
- Comparações entre métodos determinísticos (Quase-Newton, Nelder-Mead), heurísticos (genético, PSO) e híbridos na proteção direcional de sobrecorrente.
- Indicação do melhor método de otimização com tempo de processamento $\times$ número de variáveis.
- Aplicação da abordagem semi-empírica para determinação do valor inicial x_0 .
- Redução do tempo de atuação da proteção direcional de sobrecorrente.

Artigos em congresso:

- Souza, L. A. P; Calixto, W. P; Silva, C. L. B. **Optimized Coordination of Directional Overcurrent Relays Using Genetic Algorithm.** EE-EIC 2018.
- Souza, L. A. P; Calixto, W. P; Silva, C. L. B. **Optimized Setting of Directional Overcurrent Relays via Genetic Algorithm.** SBSE 2018 IEEE.
- Souza, L. A. P; Calixto, W. P; Silva, C. L. B. **Optimization of directional relay adjustments using heuristic and deterministic method.** EEEIC 2019.

6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

- Estudo considerando as proteções de neutro.
- Estudo considerando outras zonas da proteção de distância.
- Implementar os algoritmos em linguagem de programação para fins comerciais e aplicação na prática dos valores obtidos.
- Estudos em sistemas com geração distribuída, considerando contingências no sistema.
- Estudo considerando a proteção diferencial de linha e falha de disjuntor.

APÊNDICE A

SIMULADOR

```
%-----Dados de entrada-----
ITD=0.2;
x = [0.14 600.00 0.09 600.46 0.06 600.00 0.09 609.17 0.07 614.68
0.14 600.00 0.08 615.65 0.05 601.61];
Icc_principal = [6476.2 2705.2 4879.2 4576.6 9648.3 9451.2 3502.9
1764.2];
Icc_pares = [2 5 1200.2 2705.2 ; 2 7 1505.1 2705.2 ; 3 7 1505.1
4879.2;3 1 3381.2 4879.2 ; 4 5 1200.2 4576.6; 4 1 3381.2 4576.6;
5 8 1008.4 9648.3; 6 3 804.1 9451.2 ; 7 6 3502.9 3502.9; 8 4
1764.2 1764.2];
lb=[0.14 600 0.09 600 0.06 600 0.09 600 0.07 600 0.14 600 0.08 600
0.05 600];
ub=[1 1000 1 1000 1 1000 1 1000 1 1000 1 1000 1 1000];
% -----Dados de entrada para tipo de curva-----
A = 0.14;
B = 0;
p = 0.02;
a = 1;
punicao = 0;
%-----Calcula o tempo de atuação para cada relé-----
for i=1:2:size(x,2)
M(a) = Icc_principal(a)/x(1,i+1);
ta(a) = (x(1,i)*(A/((M(a)^p)-1)+B)); %Tempo de atuação
ip(a)=x(1,i+1);
mt(a)=x(1,i);
a = a+1;
end
%-----
b=1;
for y = 1:size(Icc_pares,1)
%Calcula tempo de atuação dos pares para relé de retaguarda
M_retaguarda(b) = Icc_pares(b,3)/x(1,Icc_pares(y,2)+
Icc_pares(y,2));
```

```

ta_retaguarda(b) = ((x(1,Icc_pares(y,2)+Icc_pares(y,2)-1))*...
(A/((M_retaguarda(b)^p)-1)+B));
%-----
%      Calcula tempo de atuação dos pares para relé principal
M_principal(b) = Icc_pares(b,4)/x(1,Icc_pares(y,1)+
Icc_pares(y,1));
ta_principal(b) = ((x(1,Icc_pares(y,1)+Icc_pares(y,1)-1))*...
(A/((M_principal(b)^p)-1)+B));
tempo_diferenca = ta_retaguarda(b)- ta_principal(b);
%-----Realiza a punição conforme restrição-----
z=0;
for i=1:size(x,2)
z=z+1;
if x(z)>ub(z) || x(z)<lb(z)
punicao = 1000;
end
end
if tempo_diferenca < ITD ||ta_principal(b) < 0 ||
ta_retaguarda(b)<0
punicao = abs(tempo_diferenca) + 100 + punicao;
end
b = b+1;
end
funcao_avaliacao = sum(ta(1,:))+punicao
ITC = ta_retaguarda-ta_principal;

```

APÊNDICE B

CURVAS DE COORDENAÇÃO DO ESTUDO DE CASO 1

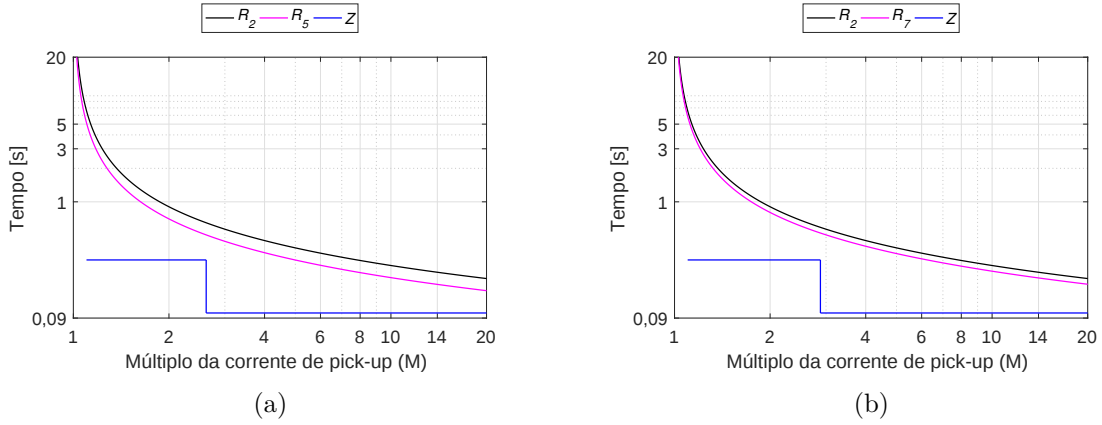


Figura B.1 - Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 1 com Nelder-Mead: (a) R_2 e R_5 , (b) R_2 e R_7 .

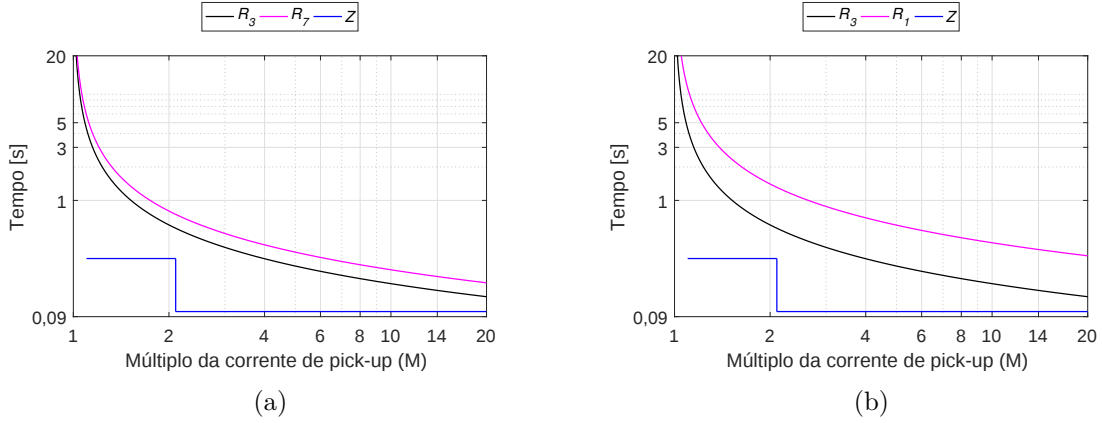
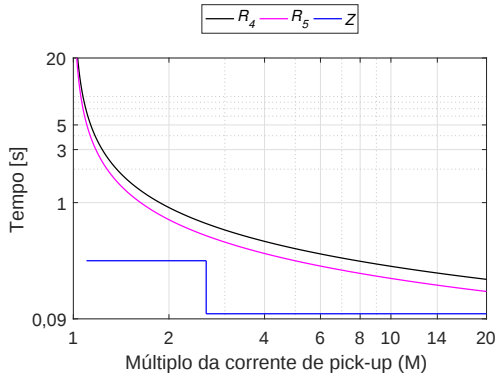
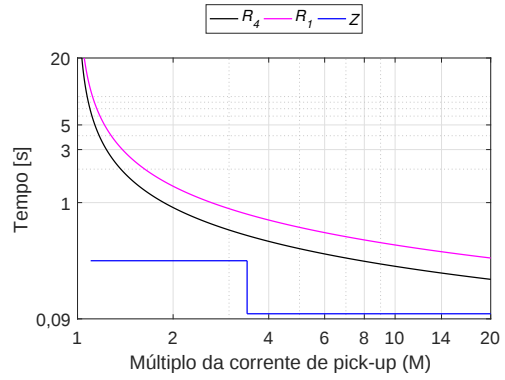


Figura B.2 - Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 1 com Nelder-Mead: (a) R_3 e R_7 , (b) R_3 e R_1 .

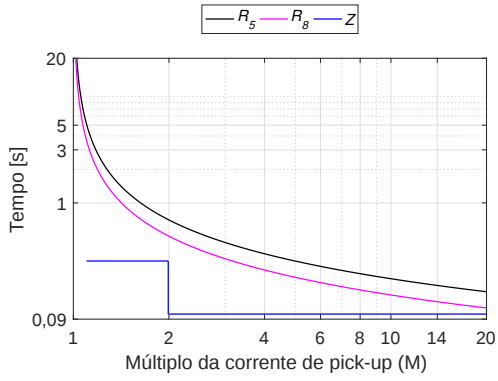


(a)

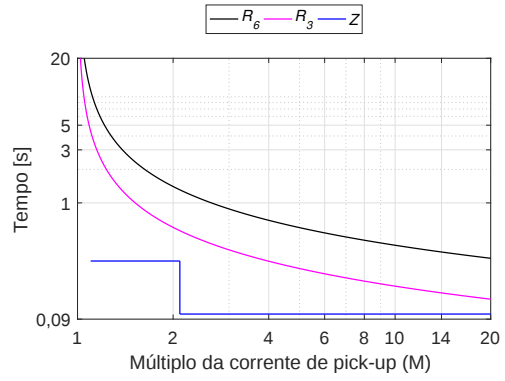


(b)

Figura B.3 - Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 1 com Nelder-Mead: (a) R_4 e R_5 , (b) R_4 e R_1 .

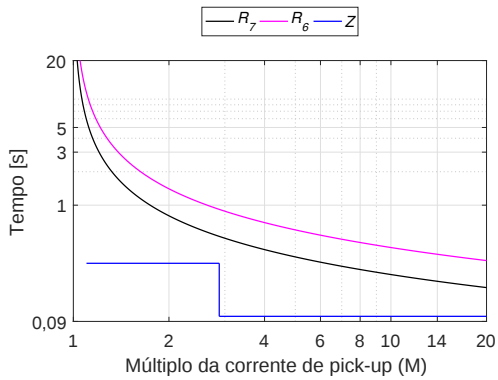


(a)

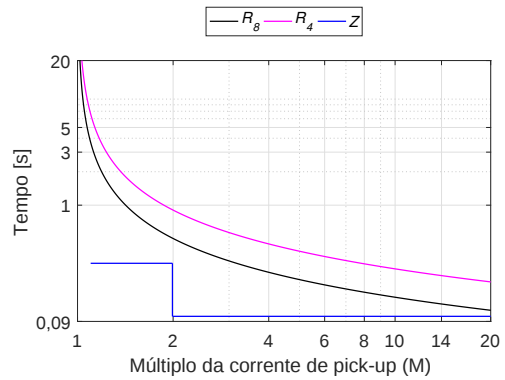


(b)

Figura B.4 - Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 1 com Nelder-Mead: (a) R_5 e R_8 , (b) R_6 e R_3 .



(a)



(b)

Figura B.5 - Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 1 com Nelder-Mead: (a) R_7 e R_6 , (b) R_8 e R_4 .

APÊNDICE C

CURVAS DE COORDENAÇÃO DO ESTUDO DE CASO 2

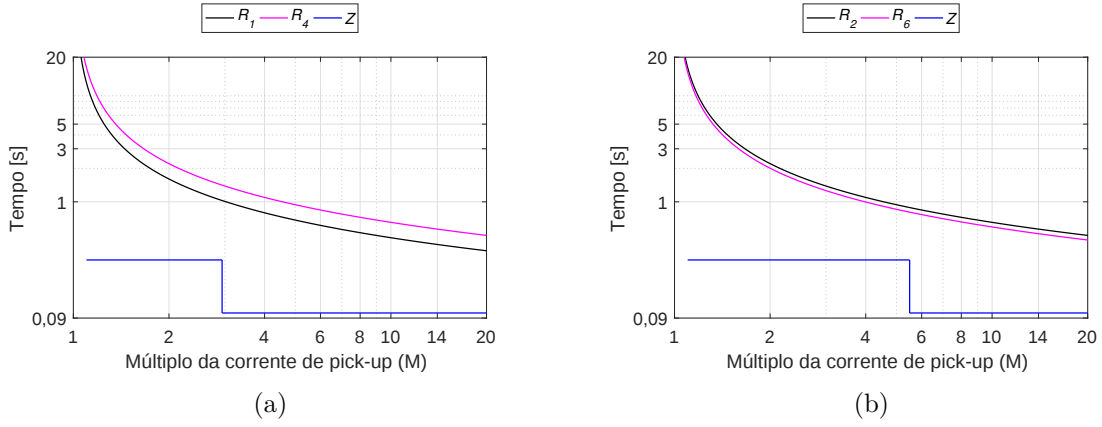


Figura C.1 - Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_1 e R_4 , (b) R_2 e R_6 .

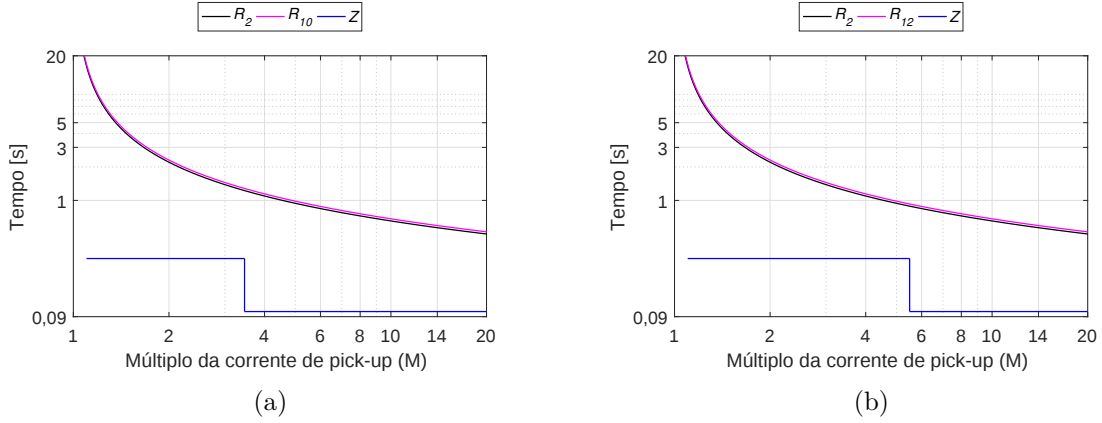
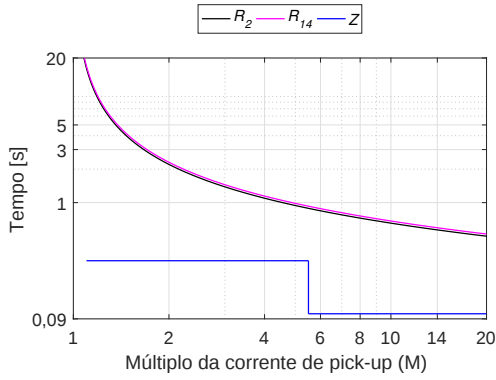
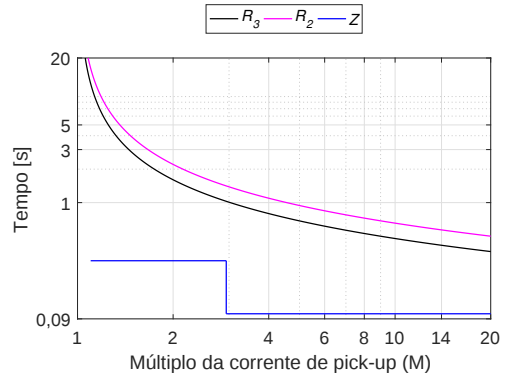


Figura C.2 - Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_2 e R_{10} , (b) R_2 e R_{12} .

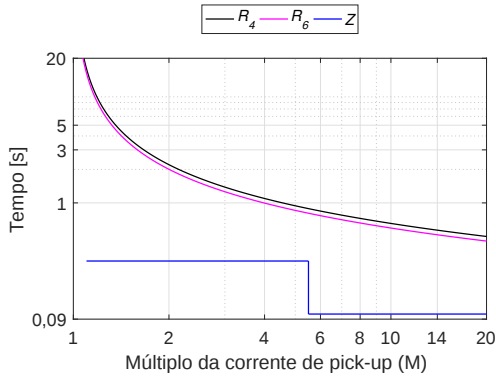


(a)

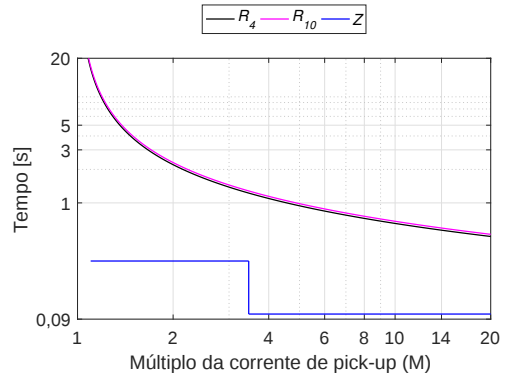


(b)

Figura C.3 - Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_2 e R_{14} , (b) R_3 e R_2 .

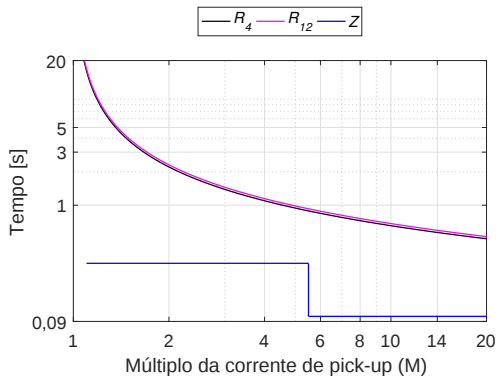


(a)

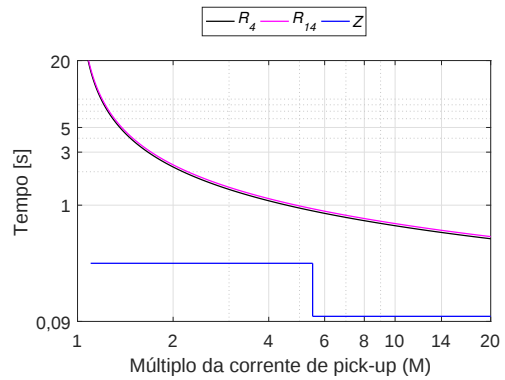


(b)

Figura C.4 - Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_4 e R_6 , (b) R_4 e R_{10} .

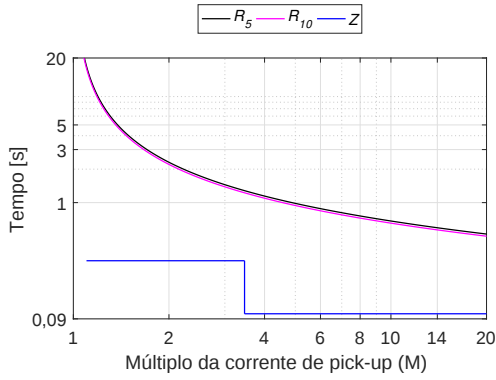


(a)

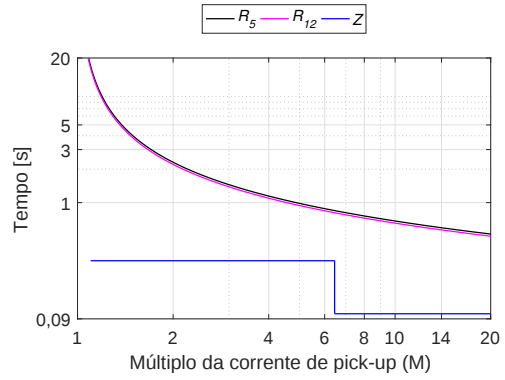


(b)

Figura C.5 - Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_4 e R_{12} , (b) R_4 e R_{14} .

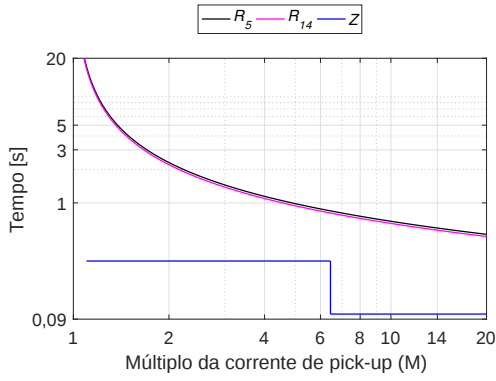


(a)

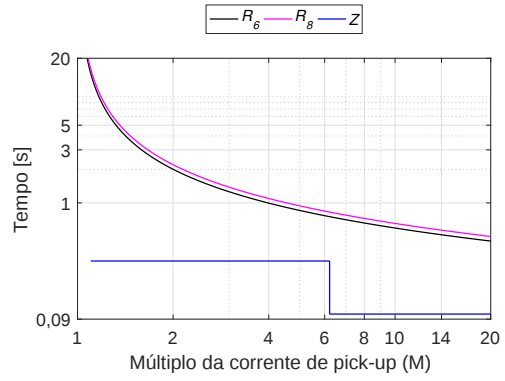


(b)

Figura C.6 - Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_5 e R_{10} , (b) R_5 e R_{12} .

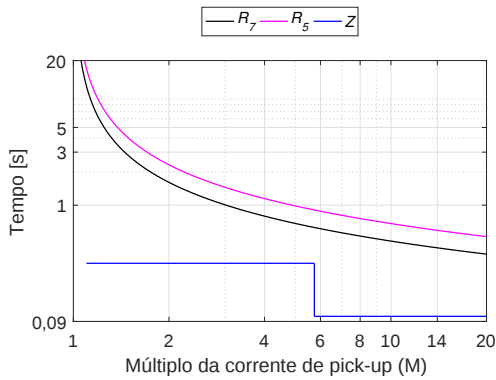


(a)

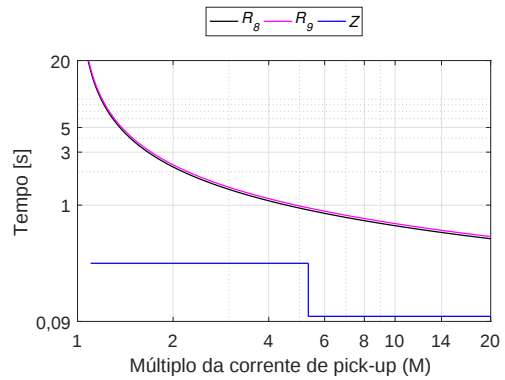


(b)

Figura C.7 - Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_5 e R_{14} , (b) R_6 e R_8 .

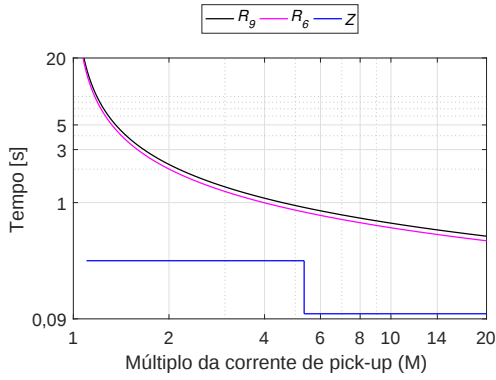


(a)

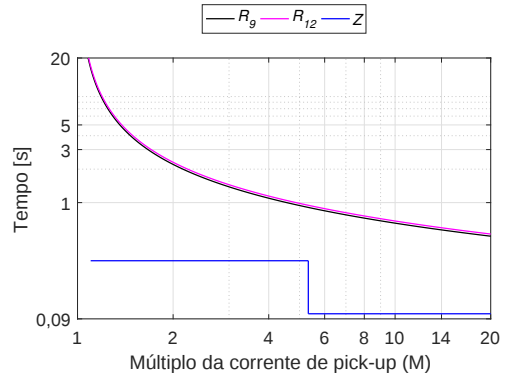


(b)

Figura C.8 - Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_7 e R_5 , (b) R_8 e R_9 .

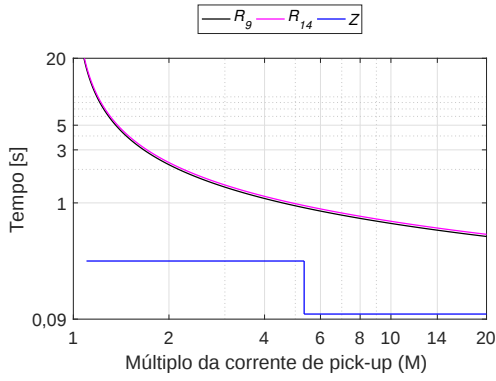


(a)

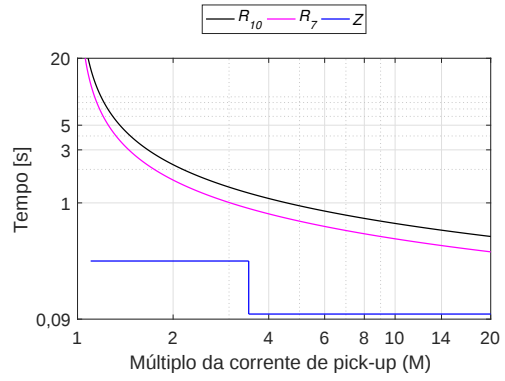


(b)

Figura C.9 - Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_9 e R_6 , (b) R_9 e R_{12} .

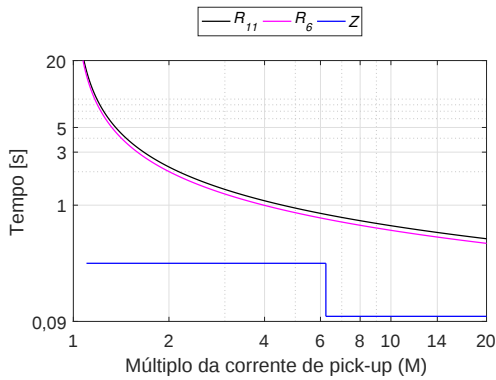


(a)

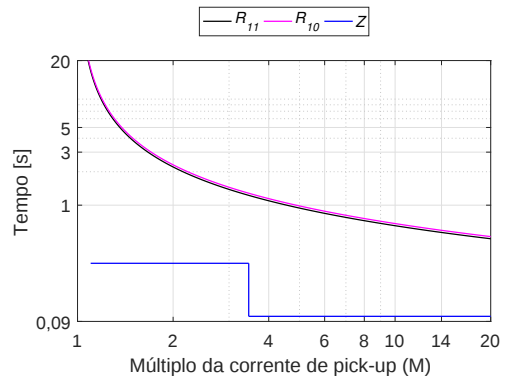


(b)

Figura C.10 - Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_9 e R_{14} , (b) R_{10} e R_7 .

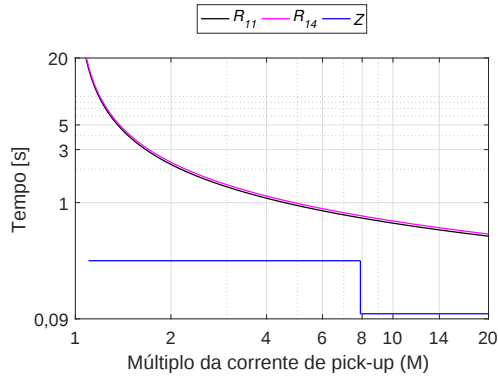


(a)

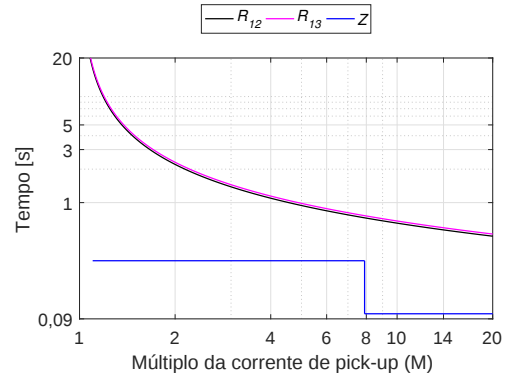


(b)

Figura C.11 - Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_{11} e R_6 , (b) R_{11} e R_{10} .

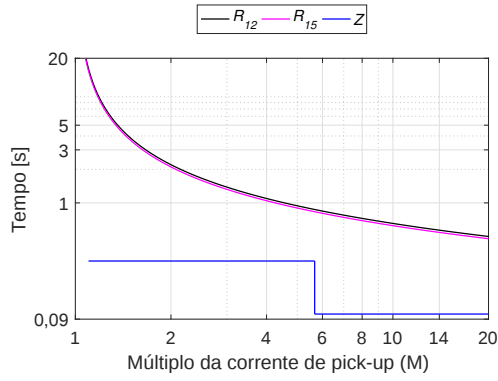


(a)

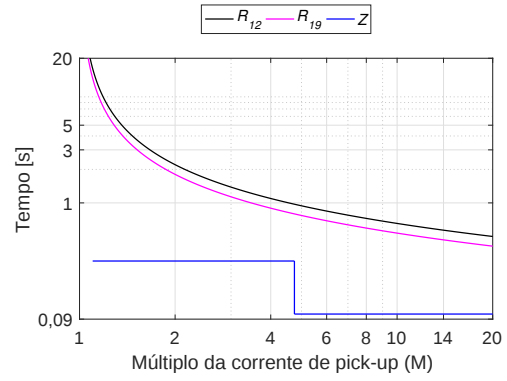


(b)

Figura C.12 - Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_{11} e R_{14} , (b) R_{12} e R_{13} .

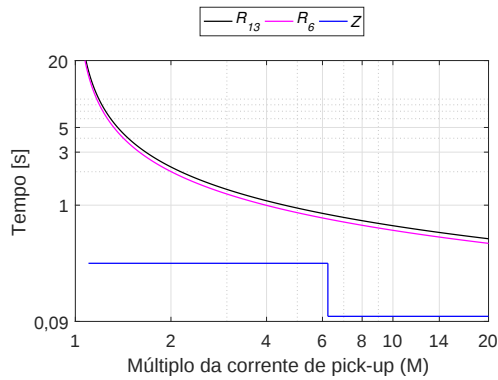


(a)

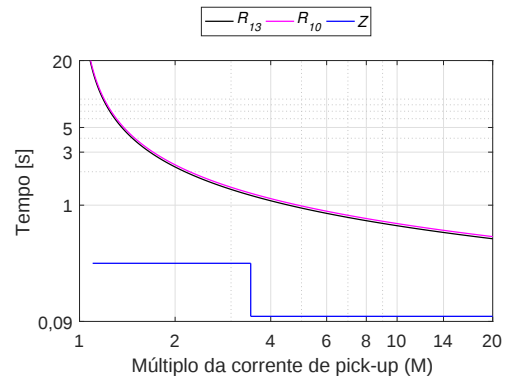


(b)

Figura C.13 - Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_{12} e R_{15} , (b) R_{12} e R_{19} .

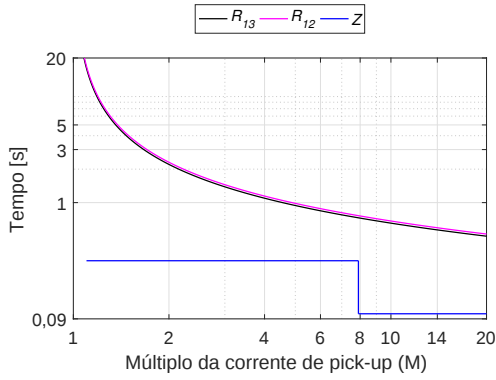


(a)

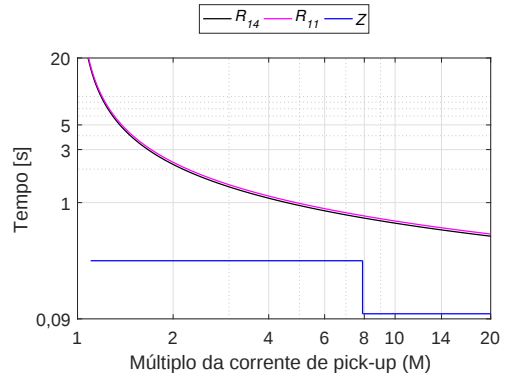


(b)

Figura C.14 - Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_{13} e R_6 , (b) R_{13} e R_{10} .

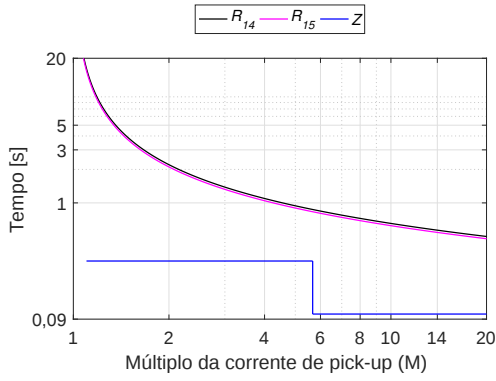


(a)

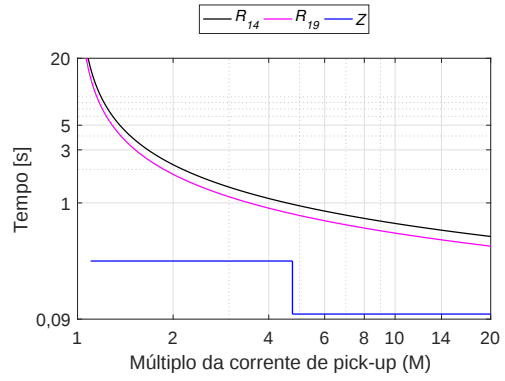


(b)

Figura C.15 - Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_{13} e R_{12} , (b) R_{14} e R_{11} .

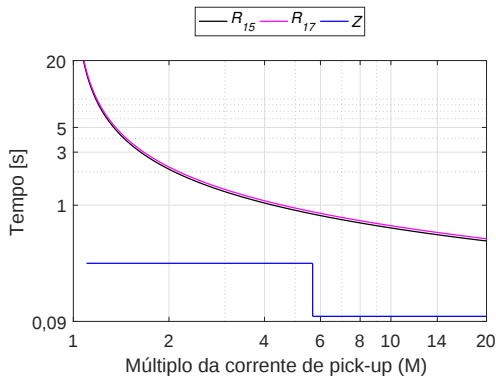


(a)

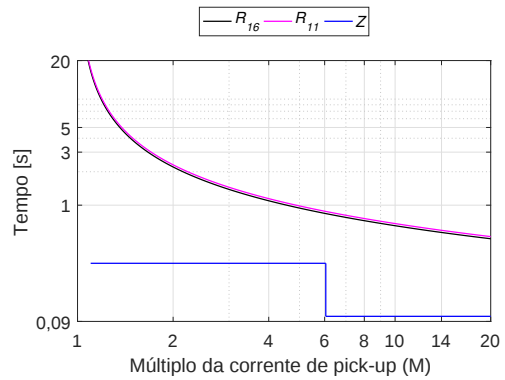


(b)

Figura C.16 - Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_{14} e R_{15} , (b) R_{14} e R_{19} .

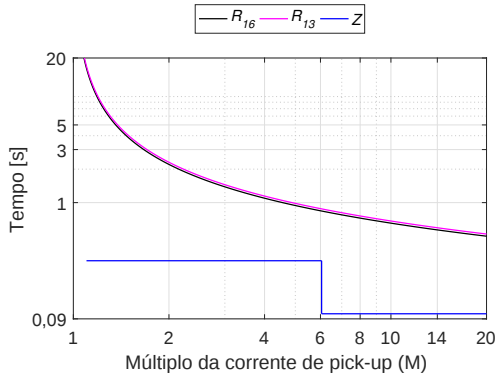


(a)

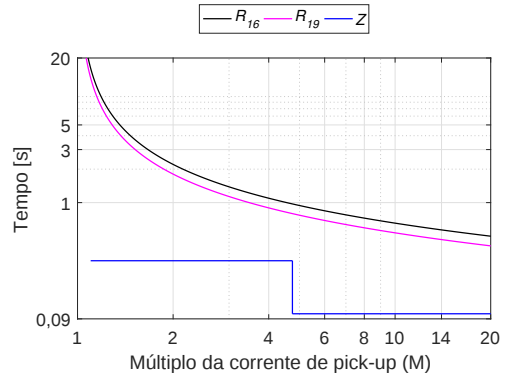


(b)

Figura C.17 - Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_{15} e R_{17} , (b) R_{16} e R_{11} .

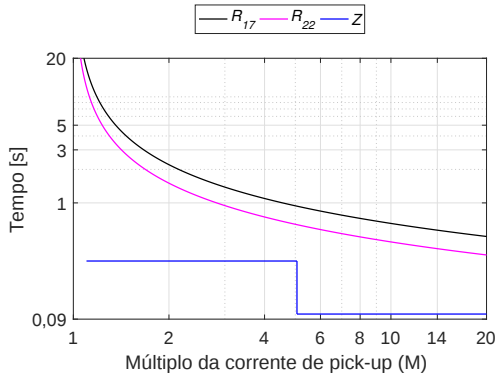


(a)

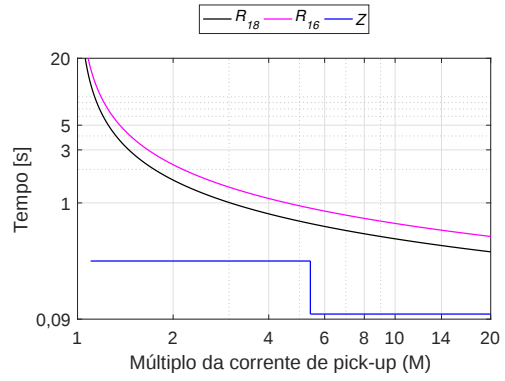


(b)

Figura C.18 - Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_{16} e R_{13} , (b) R_{16} e R_{19} .

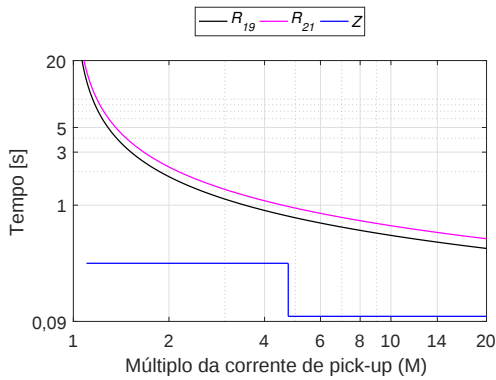


(a)

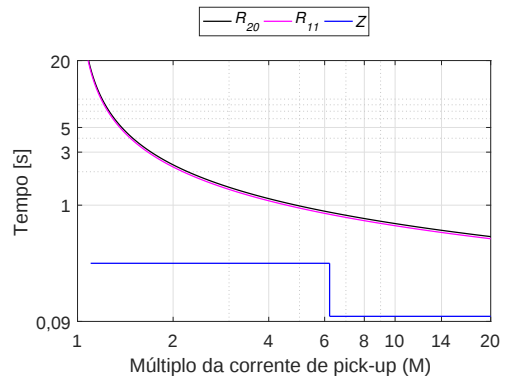


(b)

Figura C.19 - Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_{17} e R_{22} , (b) R_{18} e R_{16} .

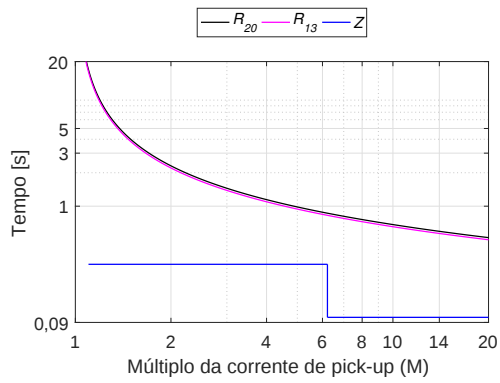


(a)

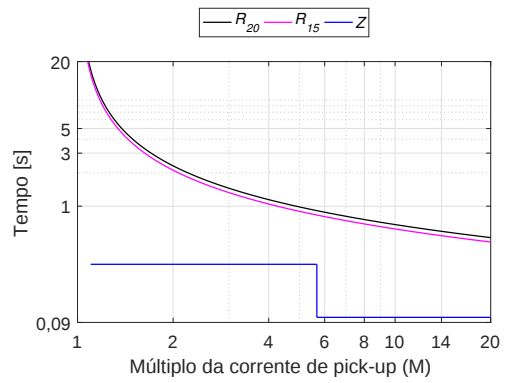


(b)

Figura C.20 - Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_{19} e R_{21} , (b) R_{20} e R_{11} .

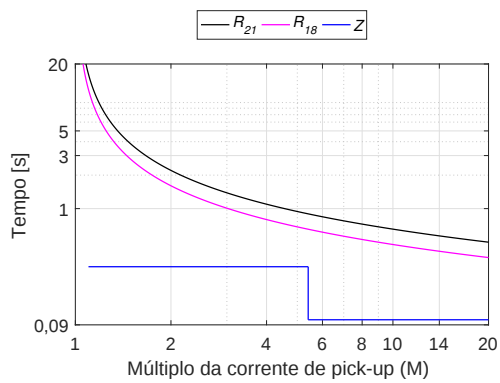


(a)

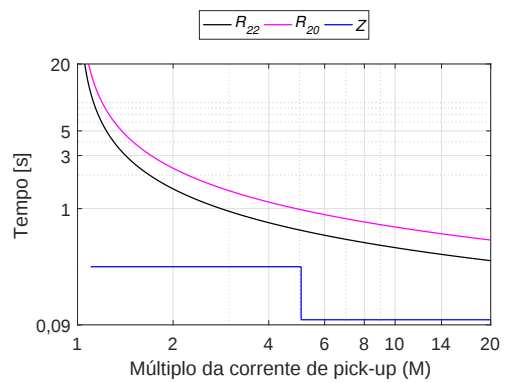


(b)

Figura C.21 - Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_{20} e R_{13} , (b) R_{20} e R_{15} .



(a)



(b)

Figura C.22 - Curva de coordenação dos relés do Estudo de Caso 2 com nuvens de partículas & Nelder-Mead: (a) R_{21} e R_{18} , (b) R_{22} e R_{20} .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, M. L. S. de. **Proteção diferencial de linhas de transmissão baseada no plano alfa de potências complexas**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Brasília, Brasília, Brasil, 2016. 36
- ANDERSON, P. M. **Power system protection**. 1^a edição. [S.l.: s.n.], 1999. 39
- ARENALES, S.; DAREZZO, A. **Cálculo numérico aprendizagem com apoio de software**. [S.l.]: Thomson, 2008. 49
- BASHIR, M.; TAGHIZADEH, M.; SADEH, J.; MASHHADI, H. R. A new hybrid particle swarm optimization for optimal coordination of over current relay. In: **2010 International Conference on Power System Technology**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–6. 29, 30
- BEDEKAR, P. P.; BHIDE, S. R. Optimum coordination of directional overcurrent relays using the hybrid ga-nlp approach. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 26, n. 1, p. 109–119, Jan 2011. ISSN 0885-8977. 30
- _____. Optimum coordination of overcurrent relay timing using continuous genetic algorithm. **Expert Systems with Applications**, v. 38, n. 9, p. 11286 – 11292, 2011. ISSN 0957-4174. 30
- BERNARDES, W. M. S. **Algoritmo enxame de partículas discreto para coordenação de relés direcionais em sistemas elétricos de potência**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013. 30
- BOTTURA, F. B. **Algoritmo de otimização híbrido para a coordenação de relés direcionais de sobrecorrente em um sistema elétrico malhado**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014. 19, 31, 40, 41, 63, 64, 65, 66, 110, 111, 112
- BRAGA, A. S.; SARAIVA, J. T. Coordination of overcurrent directional relays in meshed networks using the simplex method. In: **Proceedings of 8th Mediterranean Electrotechnical Conference on Industrial Applications in Power Systems, Computer Science and Telecommunications (MELECON 96)**. [S.l.: s.n.], 1996. v. 3, p. 1535–1538 vol.3. 43, 44
- CALIXTO, W. P. **Métodos matemático e computacional aplicados a prospecção geoelétrica com estratificação tridimensional**. Tese

- (Doutorado) — Faculdade de Engenharia Elétricas, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2012. 51, 52, 53
- CEPEL. **CEPEL-ANAFAS**. 2016. 55
- CHURCHMAN, C. W. **Introdução à Teoria dos Sistemas**. [S.l.: s.n.], 1971. 47
- CORREA, R. **Otimização da coordenação de relés de sobrecorrente direcionais em sistemas elétricos de potência utilizando a programação inteira binária**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2012. 30
- COURY, D. V.; OLESKOVICZ, M.; GIOVANINI, R. **Proteção digital de sistemas elétricos de potência: dos relés eletromecânicos aos microprocessados inteligentes**. 1^a edição. [S.l.: s.n.], 2007. 27, 33, 36
- GOMES, P. H. G. **Geometria de dutos de escape otimizada para aplicação na cogeração da produção de energia elétrica**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Goiás, 2017. 47, 48, 50, 52, 54
- GURDA, Z. A. et al. **Elements of Structural Optimization**. [S.l.]: Springer, 1992. 49
- IEC. Electrical relays - part 3: Single input energizing quantity measuring relays with dependent or independent time. **International Electrotechnical Commission IEC 60255-3:1989**, p. i–, 1989. 40, 56
- IEEE. Ieee standard inverse-time characteristic equations for overcurrent relays. **IEEE Std C37.112-1996**, p. i–, 1997. 40, 56
- KENNEDY, J. Particle Swarm Optimization. **IEEE International Conference**, 1995. 53
- KINDERMANN, G. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. . 1^a edição. [S.l.: s.n.], 2005. 33, 37, 38, 42, 56
- LAGARIAS, J.; REEDS, J. A.; WRIGHT, M. H.; WRIGHT, P. Convergence properties of the nelder–mead simplex method in low dimensions. **SIAM Journal on Optimization**, v. 9, p. 112–147, 12 1998. 50
- LEE, K. Y. **Modern Heuristic Optimization Techniques : Theory and Applications to Power Systems**. [S.l.: s.n.], 2008. ISBN 0470225858. 54

LEITE, H.; BARROS, J.; MIRANDA, V. The evolutionary algorithm epso to coordinate directional overcurrent relays. In: **10th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2010). Managing the Change**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–5. [29](#)

LINDEN, R. **Algoritmos Genéticos**. 2ª edição. 1: Brasport, 1992. [51](#), [52](#), [53](#)

MAMEDE, D. R.; FILHO, J. M. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. . 1ª edição. [S.l.: s.n.], 2011. [36](#)

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**, v. 22, n. 3, p. 1400–1410, July 2007. ISSN 0885-8977. [29](#)

MICHALEWICZ, Z. **Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs (3rd Ed.)**. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1996. ISBN 3-540-60676-9. [53](#)

MORO, V. de C. **Metodologia para coordenação otimizada entre relés de distância e direcionais de sobrecorrente em sistemas de transmissão de energia elétrica**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014. [19](#), [31](#), [36](#), [43](#), [53](#), [54](#), [63](#), [64](#), [65](#), [110](#), [111](#), [112](#)

NEGRÃO, D. L. A. **Metodologia para a coordenação e seletividade da proteção direcional de sobrecorrente em sistemas de transmissão de energia elétrica**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015. [31](#)

NELDER, J. A.; MEAD, R. A simplex method for function minimization. **Computer Journal**, v. 7, p. 308–313, 1965. [50](#)

ONS. **ONS RE 3/076/2013 - Análise Estatística dos Desligamentos Forçados de Componentes do Sistema Elétrico Brasileiro Referente ao Ano de 2012**. . 2013. [35](#)

PEREIRA, D. R. **Um sistema de software para execução De estudos de coordenação e Seletividade em sistemas de Distribuição**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. [28](#)

PEREZ, L. G.; URDANETA, A. J. Optimal coordination of directional overcurrent relays considering definite time backup relaying. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 14, n. 4, p. 1276–1284, Oct 1999. ISSN 0885-8977. [28](#)

PHADKE, R.; THORP, J. **Computer relaying for power systems**. 1^a edição. [S.l.: s.n.], 1990. [34](#)

PIDD, M. **Modelagem empresarial: ferramentas para tomada de decisão**. 1. ed. Porto Alegre: Bookman, 1998. [48](#)

RAZAVI, F.; ABYANEH, H. A.; AL-DABBAGH, M.; MOHAMMADI, R.;
TORKAMAN, H. A new comprehensive genetic algorithm method for optimal
overcurrent relays coordination. **Electric Power Systems Research**, v. 78, n. 4,
p. 713 – 720, 2008. ISSN 0378-7796. [30](#)

RECHTIN, E.; MAIER, M. W. **The Art of Systems Architecting**. Boca
Raton, FL, USA: CRC Press, Inc., 1997. ISBN 0-8493-7836-2. [47](#)

REIS, M. R. da C. **Análise Comparativa de Métodos de Otimização
Aplicados à Sintonia do Controlador PI**. Dissertação (Mestrado) —
Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil, 2014. [47](#), [54](#)

RUGGIERO; LOPES. **Calculo Numérico: Aspectos teóricos e
computacionais**. 2.ed. Sao Paulo: Makron Books, 1996. [49](#)

SANTOS, F. M. de P. **Algoritmo enxame de partículas evolutivo para o
problema de coordenação de relés de sobrecorrente direcionais em
sistemas elétricos de potência**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São
Paulo, São Carlos, 2013. [31](#)

SATO, F.; FREITAS, W. **Análise de Curto-Circuito e Princípios de
Proteção Em Sistemas de Energia Elétrica - Fundamentos e Prática**. 1^a
edição. [S.l.: s.n.], 2015. [34](#), [35](#), [36](#), [41](#)

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, São Carlos, 2009. [28](#)

SONNEMANN, W. K. A study of directional element connections for phase relays.
Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, v. 69,
n. 2, p. 1438–1451, Jan 1950. ISSN 0096-3860. [27](#)

TSIEN, H. Y. An automatic digital computer program for setting transmission line
directional overcurrent relays. **IEEE Transactions on Power Apparatus and
Systems**, v. 83, n. 10, p. 1048–1053, Oct 1964. ISSN 0018-9510. [27](#)

URDANETA, A. J.; NADIRA, R.; JIMENEZ, L. G. P. Optimal coordination of directional overcurrent relays in interconnected power systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 3, n. 3, p. 903–911, Jul 1988. ISSN 0885-8977. [28](#), [30](#)

ZEIENLDIN, H.; EL-SAADANY, E. F.; SALAMA, M. A. A novel problem formulation for directional overcurrent relay coordination. In: **2004 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering (IEEE Cat. No.04EX819)**. [S.l.: s.n.], 2004. p. 48–52. [29](#)

ZEINELDIN, H.; EL-SAADANY, E.; SALAMA, M. Optimal coordination of overcurrent relays using a modified particle swarm optimization. **Electric Power Systems Research**, v. 76, n. 11, p. 988 – 995, 2006. ISSN 0378-7796. [29](#)

