



Centro de Tecnologia e Urbanismo  
Departamento de Engenharia Elétrica

Alexandre Akira Kida

# Metodologias para a Coordenação de Relés de Sobrecorrente Utilizando Técnicas de Otimização Matemática

Dissertação apresentada ao Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
da Universidade Estadual de Londrina  
para obtenção do Título de Mestre em  
Engenharia Elétrica.

Londrina - PR, 2016



Alexandre Akira Kida

# Metodologias para a Coordenação de Relés de Sobrecorrente Utilizando Técnicas de Otimização Matemática

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Especialidade: Proteções de Sistemas Elétricos

Orientador:

Prof. Dr. Luis Alfonso Gallego Pareja

## Ficha Catalográfica

Kida, Alexandre Akira

Metodologias para a Coordenação de Relés de Sobrecorrente Utilizando Técnicas de Otimização Matemática. Londrina - PR, 2016, . 192 p.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Londrina, PR. Departamento de Engenharia Elétrica

1. Sistemas Elétricos de Potência. 2. Proteção de Sobrecorrente. 3. Programação Linear Inteira. 4. Programação Linear Inteira Mista. 5. Algoritmo Genético. 6. Algoritmos Híbridos. I. Universidade Estadual de Londrina. Departamento de Engenharia Elétrica.

Alexandre Akira Kida

# Metodologias para a Coordenação de Relés de Sobrecorrente Utilizando Técnicas de Otimização Matemática

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Especialidade: Proteções de Sistemas Elétricos

## Comissão Examinadora

---

Prof. Dr. Antonio Padilha Feltrin  
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita  
Filho

---

Prof. Dr. Taufik Abrão  
Universidade Estadual de Londrina

---

Prof. Dr. Luis Alfonso Gallego Pareja  
Orientador

Londrina, 19 de abril de 2016

Dedico este trabalho a meus pais, Antonio Kida e Amelia Tomiko Seki Kida,  
que nunca deixaram de me apoiar nesta caminhada.

# Agradecimentos

A dissertação de mestrado é um trabalho individual, entretanto sua realização não seria possível sem as pessoas citadas aqui. Primeiramente, agradeço a DEUS por dar-me a oportunidade de continuar meus estudos. Aos meus pais Antonio Kida e Amelia Tomiko Seki Kida pelo apoio emocional e, principalmente, por terem me mostrado o caminho de Deus. A minha namorada engenheira eletricista Cintia Ayumi Kagueyama, que inúmeras vezes me incentivou e ajudou a revisar minha dissertação e artigos durante o curso de mestrado. Ao orientador Dr. Luis Alfonso Gallego Pareja, pela sua vasta contribuição técnica, pelos conselhos pessoais e profissionais, pelas revisões e apoio durante todo mestrado. Aos membros da banca Dr. Antonio Padilha Feltrin e Dr. Taufik Abrão, pelas críticas construtivas que ajudaram a melhorar a qualidade do trabalho. Aos amigos engenheiros eletricistas Andres Alvarez Echavarria, Daniel Batista Strufaldi, Sebastian Manrique de Jesus, Karina Yamashita e David Pereira Junior os quais eu partilhava minhas dificuldades, angústias e conquistas. Por fim, agradeço à agência de fomento CAPES/CNPq pelo apoio financeiro.

# Resumo

Em sistemas de energia elétrica, a coordenação e seletividade dos dispositivos destinados às suas proteções são fundamentais para uma operação segura e melhoria dos indicadores de continuidade e confiabilidade. Os principais dispositivos de proteção são os relés de proteção, disjuntores, chaves fusíveis e religadores automáticos. O objetivo deste trabalho consiste em implementar e avaliar diferentes metodologias para solucionar o problema da coordenação de relés de sobrecorrente (RSs) de tempo inverso, em sistemas de distribuição e transmissão de energia elétrica. O problema consiste em encontrar os ajustes dos RSs de forma a minimizar seus tempos de atuação, sem comprometer a seletividade, confiabilidade e a sensibilidade. Primeiramente, é empregada a técnica de Programação Linear (PL) como método de solução do problema da coordenação. Para sistemas de distribuição radiais, nos quais são utilizados os RSs não direcionais, são implementadas outras três metodologias: Programação Linear Inteira Mista (PLIM), Algoritmo de Busca por Enumeração (ABE) e Algoritmo Genético de Chu-Beasley (AGCB) - ABE (AGCB-ABE). As duas primeiras tratam o problema de forma linear, onde apenas os ajustes de tempo (*Dials*) são variáveis de decisão. O AGCB-ABE trata o problema de forma não linear, onde são considerados os ajustes de *plug* (*PSs*), *Dials*, tipos de curvas e tipos de relés como variáveis de decisão. As três metodologias possuem a capacidade de lidar com os ajustes discretos de *Dial*. Para solucionar o problema da coordenação de RSs direcionais em sistemas de transmissão, são implementadas três metodologias híbridas: AGCB-PL, AGCB - Programação Linear Inteira (AGCB - PLI) e Busca Local - PL (BL-PL). O AGCB-PL e o AGCB-PLI consideram os *PSs*, *Dials*, tipos de curvas e tipos de relés como variáveis de decisão. Entretanto, a BL-PL trata apenas os *PSs* e os *Dials* como variáveis de decisão. Dentre as três técnicas, apenas o AGCB-PLI lida com *Dials* discretos. As metodologias implementadas são validadas em dois sistemas radiais de distribuição e cinco de transmissão (3, 6, 8, 9 e 15 barras). Os resultados apresentados mostram que as metodologias implementadas são eficazes para solucionar o problema da coordenação.

# Abstract

In the electrical power systems, coordination and selectivity of protective devices are crucial for safe operation and improvement of continuity and reliability indicators. The main protective devices are protective relays, circuit breakers, switches, fuses and automatic reclosers. The objective of this work is to implement and evaluate different approaches to solve the coordination problem of inverse time overcurrent relays (OCRs), in the distribution and transmission systems. The problem consists of finding suitable OCRs settings in order to minimize their operating times without compromising the selectivity, reliability and sensitivity. First, it is used linear programming technique (LP) as the solving method for the coordination problem. For radial distribution systems, in which the non-directional OCRs are widely used, three other methods are implemented: Mixed Integer Linear Programming (MILP), Enumeration Search Algorithm (ESA) and Genetic Algorithm of Chu-Beasley (GACB) - ESA (GACB-ESA). The first two methods deal with the problem in a linear way, where only the time dial settings (*Dials*) are decision variables. The GACB-ESA deals with the non-linear problem, considering plug settings (*PSs*), *Dials*, curve types and relay types as decision variables. These three methods can consider discrete *Dials*. To solve the coordination problem of directional overcurrent relays (DOCRs) in transmission systems, three hybrid methodologies are implemented: GACB-LP, GACB - Integer Linear Programming (GACB-ILP) and Local Search - LP (LS-LP). The GACB-LP and GACB-ILP treat *PSs*, *Dials*, types of curves and types of relays as decision variables. However, the LS-LP is only considered *PSs* and *Dials* as decision variables. Among these three techniques, only GACB-ILP handles discrete *Dials*. The implemented methodologies are validated in two radial distribution systems and five transmission systems (3, 6, 8, 9 and 15 bus). The results show that the implemented methods are effective to solve the coordination problem.



# Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Abreviaturas

Convenções e Lista de Símbolos

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Considerações Iniciais . . . . .	1
1.2	Principais Objetivos . . . . .	3
1.3	Estado da Arte . . . . .	3
1.4	Justificativas . . . . .	8
1.5	Estrutura do Trabalho . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Proteção contra Sobrecorrente</b>	<b>12</b>
2.1	Disjuntores de Média Tensão . . . . .	12
2.1.1	Características de Especificação de Disjuntores de Média Tensão . . . . .	14
2.2	Relés de Sobrecorrente . . . . .	15
2.2.1	Relés de Sobrecorrente de Tempo Definido . . . . .	17
2.2.2	Relés de Sobrecorrente de Tempo Inverso . . . . .	18
2.2.3	Relés de Sobrecorrente Direcionais . . . . .	23
2.2.4	Critérios de Ajustes da Unidade Temporizada . . . . .	24
2.2.5	Critérios de Ajustes da Unidade de Tempo Definido . . . . .	25
2.3	Critérios de Coordenação e Seletividade . . . . .	25

2.3.1	Zonas de Proteção . . . . .	25
2.3.2	Dispositivos de Proteção Primária e Retaguarda . . . . .	26
2.3.3	Coordenação Relé – Relé . . . . .	28
2.4	Síntese do Capítulo . . . . .	28
<b>3</b>	<b>Formulação do Problema da Coordenação de Relés de Sobrecorrente</b>	<b>29</b>
3.1	Formulação Matemática . . . . .	29
3.1.1	Função Objetivo . . . . .	30
3.1.2	Restrições . . . . .	31
3.2	Síntese do Capítulo . . . . .	33
<b>4</b>	<b>Técnicas de Otimização Aplicadas à Coordenação de Relés de Sobrecorrente</b>	<b>34</b>
4.1	Programação Linear . . . . .	35
4.2	Programação Linear Inteira Mista . . . . .	36
4.2.1	Enumeração . . . . .	36
4.2.2	Processo Iterativo . . . . .	37
4.3	Algoritmo de Busca por Enumeração . . . . .	39
4.3.1	Processo Iterativo . . . . .	39
4.4	Algoritmo Genético de Chu-Beasley – Algoritmo de Busca por Enumeração . . . . .	41
4.4.1	Codificação . . . . .	43
4.4.2	População Inicial . . . . .	44
4.4.3	Função Objetivo . . . . .	45
4.4.4	Seleção . . . . .	45
4.4.5	Recombinação . . . . .	46
4.4.6	Mutação . . . . .	46
4.4.7	Busca Local . . . . .	47
4.4.8	Critérios de Aceitação . . . . .	48

4.4.9	Critério de Parada . . . . .	48
4.5	Algoritmo Genético de Chu-Beasley – Programação Linear . . . .	48
4.6	Algoritmo Genético de Chu-Beasley – Programação Linear Inteira	49
4.6.1	Programação Linear Inteira . . . . .	51
4.7	Busca Local - Programação Linear . . . . .	53
4.7.1	Inicialização . . . . .	54
4.7.2	Processo Iterativo . . . . .	54
4.8	Estimativa do Espaço de Solução . . . . .	59
4.9	Síntese do Capítulo . . . . .	59
<b>5</b>	<b>Sistemas Testes</b>	<b>60</b>
5.1	Sistemas de Distribuição Radiais . . . . .	60
5.1.1	Sistema I . . . . .	60
5.1.2	Sistema II . . . . .	61
5.2	Sistemas de Transmissão Malhados . . . . .	62
5.2.1	Sistema de 3 Barras . . . . .	62
5.2.2	Sistema de 6 Barras . . . . .	63
5.2.3	Sistema de 8 Barras . . . . .	65
5.2.4	Sistema de 9 Barras . . . . .	66
5.2.5	Sistema de 15 Barras . . . . .	68
5.2.6	Considerações . . . . .	70
5.3	Síntese do Capítulo . . . . .	71
<b>6</b>	<b>Resultados</b>	<b>72</b>
6.1	Programação Linear . . . . .	73
6.1.1	Sistema I . . . . .	73
6.1.2	Sistema II . . . . .	77
6.1.3	Discussões . . . . .	78
6.2	Programação Linear Inteira Mista . . . . .	78

6.2.1	Sistema I . . . . .	79
6.2.2	Sistema II . . . . .	81
6.2.3	Considerações . . . . .	84
6.2.4	Discussões . . . . .	84
6.3	Algoritmo de Busca por Enumeração . . . . .	85
6.3.1	Sistemas I e II . . . . .	85
6.3.2	Discussões . . . . .	87
6.4	Algoritmo Genético de Chu-Beasley - Algoritmo de Busca por Enumeração . . . . .	87
6.4.1	Sistemas I e II . . . . .	88
6.4.2	Discussões . . . . .	93
6.5	Algoritmo Genético de Chu-Beasley - Programação Linear . . . . .	94
6.5.1	Sistemas I e II . . . . .	94
6.5.2	Sistema de 3 Barras . . . . .	96
6.5.3	Sistema de 6 Barras . . . . .	98
6.5.4	Sistema de 8 Barras . . . . .	101
6.5.5	Sistema de 9 Barras . . . . .	102
6.5.6	Sistema de 15 Barras . . . . .	105
6.5.7	Sistema de 15 Barras (Considerando Tipos de Curvas e Relés como Variáveis de Decisão) . . . . .	106
6.5.8	Discussões . . . . .	107
6.6	Algoritmo Genético de Chu-Beasley - Programação Linear Inteira . . . . .	108
6.6.1	Sistemas I e II . . . . .	108
6.6.2	Sistema de 6 Barras . . . . .	110
6.6.3	Sistema de 8 Barras . . . . .	112
6.6.4	Sistemas I e II – Apenas <i>Dials</i> como Variáveis de Decisão . . . . .	113
6.6.5	Discussões . . . . .	114
6.7	Busca Local - Programação Linear . . . . .	115

6.7.1	Sistemas I e II . . . . .	115
6.7.2	Sistema de 3 Barras . . . . .	115
6.7.3	Sistema de 6 Barras . . . . .	116
6.7.4	Sistema de 8 Barras . . . . .	117
6.7.5	Sistema de 9 Barras . . . . .	118
6.7.6	Sistema de 15 Barras . . . . .	119
6.7.7	Discussões . . . . .	120
6.8	Síntese do Capítulo . . . . .	120
<b>7</b>	<b>Conclusões</b>	<b>122</b>
7.1	Trabalhos Futuros . . . . .	124
7.2	Trabalhos Desenvolvidos . . . . .	125
	<b>Referências</b>	<b>126</b>
	<b>Apêndice A – Transformadores de Instrumentação</b>	<b>132</b>
A.1	Transformadores de Instrumentação . . . . .	132
A.1.1	Transformador de Corrente . . . . .	132
	<b>Apêndice B – Exemplo da Coordenação entre Dois Relés de Sobre-</b> <b>corrente</b>	<b>135</b>
	<b>Apêndice C – Equações do Problema de Programação Linear</b>	<b>136</b>
	<b>Apêndice D – Coordenogramas</b>	<b>139</b>
	<b>Apêndice E – Tempos de Atuação dos Relés</b>	<b>148</b>
	<b>Apêndice F – Parâmetros do Algoritmo Genético de Chu-Beasley</b>	<b>158</b>
	<b>Apêndice G – Publicações</b>	<b>162</b>

# Lista de Figuras

2.1	Disjuntor tripolar PVO de média tensão 17,5 kV - 50/60 Hz, para uso interno. . . . .	13
2.2	Relé de sobrecorrente microprocessado. . . . .	16
2.3	Curva de atuação do relé de sobrecorrente de tempo definido. Neste exemplo, $PS_{DT} = 10A$ e $RTC = 10$ . . . . .	17
2.4	Curvas do relé de sobrecorrente do tipo IEC (curva inversa) variando o Dial, com $PS = 1 A$ e $RTC = 100$ . . . . .	18
2.5	Curvas do relé de sobrecorrente do tipo IEC (curva inversa) variando $PS$ , com $RTC = 100$ e $Dial = 2$ . . . . .	19
2.6	Família de curvas do RS do tipo IEC, com $Dial = 2,0$ , $PS = 1A$ , $RTC = 100$ . . . . .	20
2.7	Família de curvas do RS do tipo IAC, com $Dial = 2,0$ , $PS = 1A$ , $RTC = 100$ . . . . .	21
2.8	Família de curvas do RS do tipo US, com $Dial = 2,0$ , $PS = 1A$ , $RTC = 100$ . . . . .	22
2.9	Curvas do relé de sobrecorrente do tipo IEEE, com $Dial = 2,0$ , $PS = 1A$ , $RTC = 100$ . . . . .	23
2.10	Zonas de proteção em um sistema elétrico. . . . .	26
2.11	Sistema radial genérico. . . . .	27
2.12	Sistema malhado genérico. . . . .	27
3.1	Curva de recozimento dos condutores de alumínio. . . . .	33
4.1	Sistema com relés enumerados em camadas. . . . .	37
4.2	Fluxograma do processo iterativo. . . . .	38
4.3	Fluxograma do AGCB-ABE. . . . .	43
4.4	Exemplo do cromossomo do AGCB-ABE. . . . .	44

4.5	Exemplo do método da roleta. . . . .	46
4.6	Exemplo da fase da recombinação. . . . .	46
4.7	Exemplo da fase da mutação. . . . .	47
4.8	Fluxograma do AGCB-PL. . . . .	49
4.9	Fluxograma do AGCB-PLI. . . . .	50
4.10	Exemplo da vizinhança dos valores de $PS_i$ , para um relé cujos valores de PS variam de 0,5 a 2,0 A, em passos de 0,1 A. . . . .	53
4.11	Fluxograma do processo iterativo da BL-PL. . . . .	55
4.12	Exemplo da BL-PL em $R_i$ : análise dos valores da FO ao incrementar e decrementar o valor de $PS_i$ atual. . . . .	57
4.13	Exemplo da BL-PL em $R_i$ : valores possíveis de $PS_i$ que podem ser escolhidos aleatoriamente. . . . .	58
4.14	Exemplo da BL-PL em $R_i$ : caso em que a busca piora o valor de FO. . . . .	58
5.1	Diagrama unifilar do sistema I. . . . .	60
5.2	Diagrama unifilar do sistema II. . . . .	61
5.3	Diagrama unifilar do sistema de 3 barras. . . . .	63
5.4	Diagrama unifilar do sistema de 6 barras. . . . .	64
5.5	Diagrama unifilar do sistema de 8 barras. . . . .	66
5.6	Diagrama unifilar do sistema de 9 barras. . . . .	67
5.7	Diagrama unifilar do sistema de 15 barras. . . . .	69
6.1	Coordenograma para o $R_1$ (Retaguarda). Sistema I, PL. . . . .	76
6.2	Coordenograma para o $R_2$ (Retaguarda). Sistema I, PL. . . . .	76
6.3	Coordenograma para o $R_3$ (Retaguarda). Sistema I, PL. . . . .	77
6.4	Adição das restrições e comportamento iterativo da técnica de PLIM. . . . .	79
6.5	Coordenograma para o $R_1$ (Retaguarda). Sistema I, PLIM. . . . .	81
6.6	Coordenograma para o $R_2$ (Retaguarda). Sistema I, PLIM. . . . .	82
6.7	Coordenograma para o $R_3$ (Retaguarda). Sistema I, PLIM. . . . .	82
6.8	Coordenograma para o $R_1$ (retaguarda), sistema I, caso I. . . . .	90

6.9	Coordenograma para o $R_1$ (retaguarda) sistema I, caso II. . . . .	91
6.10	Coordenograma para o $R_1$ (retaguarda) sistema I, caso III. . . . .	91
6.11	Evolução da função objetivo em relação ao número iterações do AGCB-ABE, para o sistema I. . . . .	93
6.12	Evolução da função objetivo em relação ao número de iterações do AGCB-ABE, para o sistema II. . . . .	93
B.1	Exemplo coordenação relé – relé. . . . .	135
B.2	Coordenograma do exemplo da coordenação relé – relé. . . . .	135
D.1	Coordenograma para o $R_1$ (retaguarda) referente ao sistema II, utilizando PL. . . . .	139
D.2	Coordenograma para o $R_2$ (retaguarda) referente ao sistema II, utilizando PL. . . . .	140
D.3	Coordenograma para o $R_3$ (retaguarda) referente ao sistema II, utilizando PL. . . . .	140
D.4	Coordenograma para o $R_7$ (retaguarda) referente ao sistema II, utilizando PL. . . . .	141
D.5	Coordenograma para o $R_8$ (retaguarda) referente ao sistema II, utilizando PL. . . . .	141
D.6	Coordenograma para o $R_1$ (retaguarda) referente ao sistema II, utilizando PLIM. . . . .	142
D.7	Coordenograma para o $R_2$ (retaguarda) referente ao sistema II, utilizando PLIM. . . . .	142
D.8	Coordenograma para o $R_3$ (retaguarda) referente ao sistema II, utilizando PLIM. . . . .	143
D.9	Coordenograma para o $R_7$ (retaguarda) referente ao sistema II, utilizando PLIM. . . . .	143
D.10	Coordenograma para o $R_8$ (retaguarda) referente ao sistema II, utilizando PLIM. . . . .	144
D.11	Coordenograma para o $R_2$ (retaguarda) referente ao sistema I, caso I.	144
D.12	Coordenograma para o $R_3$ (retaguarda) referente ao sistema I, caso I.	145



D.13	Coordenograma para o $R_2$ (retaguarda) referente ao sistema I, caso II. . . . .	145
D.14	Coordenograma para o $R_3$ (retaguarda) referente ao sistema I, caso II. . . . .	146
D.15	Coordenograma para o $R_2$ (retaguarda) referente ao sistema I, caso III. . . . .	146
D.16	Coordenograma para o $R_3$ (retaguarda) referente ao sistema I, caso III. . . . .	147
F.1	Comportamento da FO do sistema II (caso I) em relação à variação do parâmetro $k_{pi}$ , considerando $\mu = 5\%$ . . . . .	159
F.2	Comportamento da FO do sistema II (caso I) em relação à variação do parâmetro $\mu$ , considerando $k_{pi} = 40$ . . . . .	159

# Lista de Tabelas

2.1	Constantes dos tipos de curvas (IEC). . . . .	20
2.2	Constantes dos tipos de curvas (IAC). . . . .	21
2.3	Constantes dos tipos de curvas (US). . . . .	22
2.4	Constantes dos tipos de curvas (IEEE). . . . .	23
4.1	Número de PLs solucionados e de FO variando os índices de sensibilidade, para o sistema de 15 barras. . . . .	56
5.1	Dados de RTC, $I_{carga}$ , $PS$ e tipo de curva para cada relé do sistema I. . . . .	61
5.2	Dados dos relés no sistema II. . . . .	62
5.3	Dados dos níveis de curto-circuito para o sistema de 3 barras. . . . .	63
5.4	Valores de RTC dos relés do sistema de 3 barras. . . . .	63
5.5	Dados dos níveis de curto-circuito para o sistema de 6 barras. . . . .	64
5.6	Dados dos níveis de curto-circuito dos dispositivos de proteção primária. . . . .	65
5.7	Dados dos níveis de curto-circuito para o sistema de 8 barras. . . . .	66
5.8	Valores de RTC dos relés do sistema de 8 barras. . . . .	66
5.9	Dados dos níveis de curto-circuito para o sistema de 9 barras. . . . .	68
5.10	Valores de RTC dos relés do sistema de 15 barras. . . . .	69
5.11	Dados dos níveis de curto-circuito para o sistema de 15 barras. . . . .	70
5.12	Resumo das considerações dos ajustes dos relés para cada sistema elétrico utilizado neste trabalho. . . . .	71
6.1	Valores de FO e <i>Dials</i> ótimos do sistema I. . . . .	74
6.2	Tempos de atuação dos relés para o sistema I, considerando <i>Dials</i> contínuos. . . . .	75
6.3	Valores de FO e <i>Dials</i> ótimos do sistema II. . . . .	77

6.4	Tempos de atuação dos relés para o sistema II, <i>Dials</i> contínuos. . .	78
6.5	Valores de <i>Dials</i> e FO para cada PL solucionado, sistema I. . . .	80
6.6	Tempos de atuação dos relés para o sistema I, <i>Dials</i> discretos. . .	81
6.7	Valores de <i>Dials</i> e FO para cada PL solucionado, sistema II. . . .	83
6.8	Tempos de atuação dos relés para o sistema II, <i>Dials</i> discretos. . .	83
6.9	Factibilidade das soluções do problema da coordenação nos sistemas I e II. . . . .	84
6.10	Comparativo dos tempos computacionais demandados entre as técnicas de solução para o sistema I. . . . .	86
6.11	Comparativo dos tempos computacionais demandados entre as técnicas de solução para o sistema II. . . . .	86
6.12	Evolução dos valores de <i>Dial</i> , para cada relé de proteção de reatguarda, ao longo do processo iterativo do ABE, considerando <i>Dials</i> contínuos (sistema I). . . . .	86
6.13	Evolução dos valores de <i>Dial</i> , para cada relé de proteção de reatguarda, ao longo do processo iterativo do ABE, considerando <i>Dials</i> discretos (sistema I). . . . .	87
6.14	Parâmetros do algoritmo genético para os sistemas I e II. . . . .	88
6.15	Resultados do AGCB-ABE para o sistema I. . . . .	88
6.16	Resultados do AGCB-ABE para o sistema II. . . . .	89
6.17	Resultado das simulações para o caso I, sendo que DP é o desvio padrão. . . . .	92
6.18	Resultado das simulações para o caso II. . . . .	92
6.19	Resultado das simulações para o caso III. . . . .	92
6.20	Resultados do AGCB-PL para o sistema I. . . . .	95
6.21	Resultados do AGCB-PL para o sistema II. . . . .	95
6.22	Resultado das simulações para o caso I, utilizando o AGCB-PL. . .	96
6.23	Resultado das simulações para o caso II, utilizando o AGCB-PL. . .	96
6.24	Resultado das simulações para o caso III, utilizando o AGCB-PL. . .	96
6.25	Valores de <i>PSs</i> e <i>Dials</i> para o sistema de 3 barras. . . . .	97

6.26	Tempos de atuação dos relés para o sistema de 3 barras. . . . .	97
6.27	Resultado das simulações para o sistema de 3 barras. . . . .	97
6.28	Comparativo entre os resultados do sistema de 3 barras. . . . .	98
6.29	Valores de <i>PSs</i> e <i>Dials</i> para o sistema de 6 barras. . . . .	98
6.30	Tempos de atuação dos relés para o sistema de 6 barras. . . . .	99
6.31	Tempos de atuação das proteções primárias para o sistema de seis barras (AGCB-PL). . . . .	100
6.32	Resultado das simulações para o sistema de 6 barras. . . . .	100
6.33	Comparativo entre os resultados do sistema de 6 barras. . . . .	100
6.34	Valores de <i>PSs</i> e <i>Dials</i> para o sistema de 8 barras. . . . .	101
6.35	Tempos de atuação dos relés para o sistema de 8 barras. . . . .	101
6.36	Resultado das simulações para o sistema de 8 barras. . . . .	102
6.37	Comparativo entre os resultados do sistema de 8 barras. . . . .	102
6.38	Valores ótimos de <i>PSs</i> e <i>Dials</i> para o sistema de 9 barras. . . . .	103
6.39	Tempos de atuação dos relés para o sistema de 9 barras. . . . .	103
6.40	Resultado das simulações para o sistema de 9 barras. . . . .	104
6.41	Comparativo entre os resultados do sistema de 9 barras. . . . .	104
6.42	Valores de <i>PSs</i> e <i>Dials</i> para o sistema de 15 barras. . . . .	105
6.43	Resultado das simulações para o sistema de 15 barras. . . . .	106
6.44	Comparativo entre os resultados do sistema de 15 barras. . . . .	106
6.45	Valores de <i>PSs</i> e <i>Dials</i> para o sistema de 15 barras, considerando a adição das características dos relés como variáveis de decisão. . .	107
6.46	Resultados do AGCB-PLI para o sistema I. . . . .	108
6.47	Resultados do AGCB-PLI para o sistema II. . . . .	109
6.48	Resultado das simulações para o caso I, utilizando o AGCB-PLI. .	109
6.49	Resultado das simulações para o caso II, utilizando o AGCB-PLI.	110
6.50	Resultado das simulações para o caso III, utilizando o AGCB-PLI.	110
6.51	Valores de <i>PSs</i> e <i>Dials</i> para o sistema de 6 barras. . . . .	110

6.52	Tempos de atuação dos relés para o sistema de 6 barras. . . . .	111
6.53	Tempos de atuação das proteções primárias para o sistema de seis barras (AGCB-PLI). . . . .	111
6.54	Resultado das simulações para o sistema de 6 barras, AGCB-PLI.	112
6.55	Comparativo entre os resultados do sistema de 6 barras. . . . .	112
6.56	Valores ótimos de <i>PSs</i> e <i>Dials</i> para o sistema de 8 barras. . . . .	113
6.57	Tempos de atuação dos relés para o sistema de 8 barras. . . . .	113
6.58	Resultado das simulações para o sistema de 8 barras, AGCB-PLI.	114
6.59	Comparativo entre os resultados do sistema de 8 barras. . . . .	114
6.60	Comparativo entre os tempos computacionais demandados pelas técnicas PLI, PLIM e ABE para os sistemas I e II. . . . .	114
6.61	Resultado das simulações utilizando a BL-PL, para os sistemas I e II. . . . .	115
6.62	Resultado das simulações para o sistema de 3 barras. . . . .	116
6.63	Comparativo entre os resultados do sistema de 3 barras. . . . .	116
6.64	Resultado das simulações para o sistema de 6 barras. . . . .	116
6.65	Comparativo entre os resultados do sistema de 6 barras. . . . .	117
6.66	Resultado das simulações para o sistema de 8 barras. . . . .	117
6.67	Comparativo entre os resultados do sistema de 8 barras. . . . .	118
6.68	Resultado das simulações para o sistema de 9 barras. . . . .	118
6.69	Comparativo entre os resultados do sistema de 9 barras. . . . .	119
6.70	Resultado das simulações para o sistema de 15 barras. . . . .	119
6.71	Comparativo entre os resultados do sistema de 15 barras. . . . .	120
E.1	Tempos de atuação dos relés para o sistema I, caso I, utilizando AGCB-ABE. . . . .	148
E.2	Tempos de atuação dos relés para o sistema I, caso II, utilizando AGCB-ABE. . . . .	149
E.3	Tempos de atuação dos relés para o sistema I, caso III, utilizando AGCB-ABE. . . . .	149

E.4	Tempos de atuação dos relés para o sistema II, caso I, utilizando AGCB-ABE. . . . .	149
E.5	Tempos de atuação dos relés para o sistema II, caso II, utilizando AGCB-ABE. . . . .	150
E.6	Tempos de atuação dos relés para o sistema II, caso III, utilizando AGCB-ABE. . . . .	150
E.7	Tempos de atuação dos relés para o sistema I, caso I, utilizando AGCB-PL. . . . .	151
E.8	Tempos de atuação dos relés para o sistema I, caso II, utilizando AGCB-PL. . . . .	151
E.9	Tempos de atuação dos relés para o sistema I, caso III, utilizando AGCB-PL. . . . .	151
E.10	Tempos de atuação dos relés para o sistema II, caso I, utilizando AGCB-PL. . . . .	152
E.11	Tempos de atuação dos relés para o sistema II, caso II, utilizando AGCB-PL. . . . .	152
E.12	Tempos de atuação dos relés para o sistema II, caso III, utilizando AGCB-PL. . . . .	153
E.13	Tempos de atuação dos relés para o sistema I, caso I, utilizando AGCB-PLI. . . . .	153
E.14	Tempos de atuação dos relés para o sistema I, caso II, utilizando AGCB-PLI. . . . .	153
E.15	Tempos de atuação dos relés para o sistema I, caso III, utilizando AGCB-PLI. . . . .	154
E.16	Tempos de atuação dos relés para o sistema II, caso I, utilizando AGCB-PLI. . . . .	154
E.17	Tempos de atuação dos relés para o sistema II, caso II, utilizando AGCB-PLI. . . . .	155
E.18	Tempos de atuação dos relés para o sistema II, caso III, utilizando AGCB-PLI. . . . .	155
E.19	Tempos de atuação dos relés para o sistema de 15 barras. . . . .	156

E.20	Tempos de atuação dos relés para o sistema de 15 barras, considerando as características dos relés como variáveis de decisão. . . . .	157
F.1	Parâmetros do algoritmo genético para o sistema I, caso I. . . . .	159
F.2	Parâmetros do algoritmo genético para o sistema I, caso II. . . . .	160
F.3	Parâmetros do algoritmo genético para o sistema I, caso III. . . . .	160
F.4	Parâmetros do algoritmo genético para o sistema II, caso I. . . . .	160
F.5	Parâmetros do algoritmo genético para o sistema II, caso II. . . . .	160
F.6	Parâmetros do algoritmo genético para o sistema II, caso III. . . . .	160
F.7	Parâmetros do algoritmo genético para o sistema de 3 barras. . . . .	161
F.8	Parâmetros do algoritmo genético para o sistema de 6 barras. . . . .	161
F.9	Parâmetros do algoritmo genético para o sistema de 8 barras. . . . .	161
F.10	Parâmetros do algoritmo genético para o sistema de 9 barras. . . . .	161
F.11	Parâmetros do algoritmo genético para o sistema de 15 barras. . . . .	161

# Lista de Abreviaturas

**ABC** Algoritmo de Busca *Cuckoo*

**ABE** Algoritmo de Busca por Enumeração

**AC-IP** Algoritmo Construtivo para Inicialização da População

**ADE** Algoritmo Diferencial Evolutivo

**ADEA** Algoritmo Diferencial Evolutivo Adaptativo

**ADECBO** Algoritmo Diferencial Evolutivo Caótico Baseado em Oposição

**ADECBO** Algoritmo Diferencial Evolutivo Caótico Baseado em Oposição

**AG** Algoritmo Genético

**AG-PL** Algoritmo Híbrido que combina o Algoritmo Genético com Programação Linear

**AG-PNL** Algoritmo Híbrido que combina o Algoritmo Genético com Programação Não Linear

**AGCB** Algoritmo Genético de Chu e Beasley (1997)

**AGH** Algoritmo Genético Híbrido

**ANEEL** Agência Nacional de Energia Elétrica

**ANSI** *American National Standards Institute*

**BL-PL** Algoritmo Híbrido que combina a Busca Local com Programação Linear

**BH** Busca Harmônica

**DEC** Duração Equivalente de interrupção por unidade Consumidora

**DP** Desvio Padrão

**E.I** Curva Extremamente Inversa

**FEC** Frequência Equivalente de Interrupção por unidade Consumidora



**FO** Função Objetivo

**GAMS** *General Algebraic Modeling System*

**GVO** Grande Volume de Óleo

**I** Curva do tipo Inversa

**I.C** Curva do tipo Inversa Curta

**I.L** Curva do tipo Inversa Longa

**I.M** Curva do tipo Inversa Moderada

**IAC** *Intersocietal Accreditation Commission*

**IEC** *International Electrotechnical Commission*

**IEEE** Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos

**M.I** Curva do tipo Muito Inversa

**NBR** Norma Brasileira Regulatória

**OAS** Otimização por Algoritmo *Seeker*

**OBB** Otimização Baseada em Biogeografia

**OBB-PL** Técnica híbrida que combina a Otimização Baseada em Biogeografia com Programação Linear

**OCA** Otimização por Colônia de Abelhas

**OCF** Otimização por Colônia de Formigas

**OEP** Otimização por Enxame de Partículas

**OEP-PL** Técnica híbrida que combina a Otimização por Enxame de Partículas com Programação Linear

**PIB** Programação Inteira Binária

**PL** Programação Linear

**PLI** Programação Linear Inteira

**PLIM** Programação Linear Inteira Mista

**PNL** Programação Não Linear

**PNLIM** Programação Não Linear Inteira Mista

**PQS** Programação Quadrática Sequencial

**PS** *Plug settings*

**PVO** Pequeno Volume de Óleo

**RE** Rede Externa

**RS** Relé de Sobrecorrente

**RSD** Relé de Sobrecorrente Direcional

**RTC** Relação de transformação do Transformador de Corrente

**SBB** *Standard Branch-and-Bound*

**SF<sub>6</sub>** Hexafluoreto de Enxofre

**TC** Transformador de Corrente

**TP** Transformador de Potencial

# Convenções e Lista de Símbolos

Neste trabalho os seguintes símbolos são utilizados:

Símbolo	Descrição
$\Delta T$	diferença entre $T_{ret.}$ e $T_{pri.}$
$\Delta T_{rele-rele}$	tempo de coordenação entre relé – relé
$\mathbf{A}$	matriz com os coeficientes que representam o lado esquerdo das restrições de desigualdade
$A_i$	constante do tipo de curva, para $R_i$
$\mathbf{A}_{eq}$	matriz com os coeficientes que representam o lado esquerdo das restrições de igualdade
$B_i$	constante do tipo de curva, para $R_i$
$\mathbf{b}$	vetor coluna com os valores que representam o lado direito das restrições de desigualdade
$\mathbf{b}_{eq}$	vetor coluna com os valores que representam o lado direito das restrições de igualdade
$C_i$	constante do tipo de curva, para $R_i$
$D_i$	constante do tipo de curva, para $R_i$
$Dial$	ajuste de tempo do relé
$Dial_i$	ajuste de tempo do relé $i$
$Dial_{min}$	ajuste mínimo de $Dial$ permitido pelos relés
$Dial_{max}$	ajuste máximo de $Dial$ permitido pelos relés
$Dial_i^{min}$	ajuste mínimo de $Dial_i$
$Dial_i^{max}$	ajuste máximo de $Dial_i$
$E_i$	constante do tipo de curva, para $R_i$
$\mathbf{f}$	vetor coluna com os coeficientes da função objetivo
$FC$	fator de crescimento de carga
$FS$	fator de sobrecorrente dos transformadores de corrente
$F_i$	falha em $i$
$FT$	fator térmico do transformador de corrente, considerando sobrecarga ininterrupta

*continua...*

Símbolo	Descrição
$I_{cc}$	corrente de curto-circuito
$I_{DT}$	corrente de atuação da unidade de tempo definido
$I_p$	corrente de atuação da unidade temporizada
$I_p^{neutro}$	corrente de atuação da unidade temporizada de neutro
$I_{carga}^{max}$	corrente de carga máxima considerada
$I_{carga,pri.}^{max}$	corrente de carga máxima considerada no dispositivo de proteção primária
$I_{cc_{1\theta}}$	curto-circuito monofásico
$I_{cc_{2\theta}}$	curto-circuito bifásico
$I_{cc_{3\theta}}$	curto-circuito trifásico
$I_{cc_{2\theta}}^{min}$	corrente de curto-circuito bifásica mínima no trecho protegido
$I_{cc_{3\theta}}^{max}$	corrente de curto-circuito trifásica máxima no trecho protegido
$I_{cc_{1\theta}}^{min}$	corrente de curto-circuito monofásica mínima no trecho protegido
$I_{cc_{1\theta}}^{max}$	corrente de curto-circuito monofásica máxima no trecho protegido
$I_{cc_{i,j}^k}$	corrente de falha vista por $R_i$ para uma falha dentro da zona de proteção primária de $R_j$ para o nível $k$
$I_{cc_{pri.}}$	corrente de curto-circuito vista pelo dispositivo de proteção primária
$I_{cc_{ret.}}$	corrente de curto-circuito vista pelo dispositivo de proteção de retaguarda
$I_{carga}$	corrente de carga
$I_{inst}$	corrente de atuação da unidade instantânea
$I_{TC}^{nom}$	corrente nominal do primário do transformador de corrente
$k$	índice relacionado ao nível de falha analisado
$K_{desequilibrio}$	constante relacionada ao desequilíbrio do sistema
$K_{penal}$	fator de penalização da função objetivo
$\mathbf{lb}$	vetor linha com os valores mínimos das incógnitas do problema
$m$	número de relés

*continua...*

Símbolo	Descrição
$n_{anos}$	quantidade de anos do planejamento
$N_{Dial}$	número de valores de <i>Dial</i> disponíveis no relé
$N_{violadas}$	número de restrições violadas
$NPS_i$	quantidade de ajustes de <i>PS</i> , disponíveis em $R_i$ , que satisfazem as restrições (3.8) e (3.9)
$NTC_i$	número total de tipos de curvas distintas de $R_i$ , podendo considerar os tipos de curvas relacionados aos diferentes tipos de relés
$p$	número de faltas consideradas dentro da zona de proteção primária
$P_i$	constantes do tipo de curva, para $R_i$
$Passos_{Dial}$	tamanho dos passos de <i>Dial</i> dos relés
$PL_{max}$	número máximo de problemas de programação linear que podem ser solucionados de modo a avaliar todo espaço de solução
$PS$	ajuste de <i>plug</i> da unidade de tempo inverso
$PS_{DT}$	ajuste de <i>plug</i> da unidade de tempo definido
$PS_{DT}^{neutro}$	ajuste de <i>plug</i> da unidade de tempo definido de neutro
$PS_i$	ajuste de <i>plug</i> de $R_i$
$R_i$	relé de sobrecorrente $i$
$R_{pri.}$	Relé de proteção primária
$R_{ret.}$	Relé de proteção retaguarda
$RTC_i$	Relação de transformação do transformador de corrente de $R_i$ '
$t_{cres}$	taxa de crescimento da carga anual do sistema
$T$	tempo de atuação do relé
$T^i$	tempo de atuação de $R_i$
$T^{min}$	tempo mínimo de atuação dos relés
$T^{max}$	tempo máximo de atuação de relés
$T_{pri.}$	tempo de atuação de $R_{pri.}$
$T_{pri.}^i$	tempo de atuação de $R_i$ quando este atua como proteção primária
$T_{ret.}$	tempo de atuação de $R_{ret.}$
$T_{i,i}^k$	tempo de atuação de $R_i$ para $Icc_{i,i}^k$

*continua...*

Símbolo	Descrição
$T_{i,j}^k$	tempo de operação de $R_i$ para $Icc_{i,j}^k$
$\mathbf{ub}$	vetor linha com os valores máximos das incógnitas do problema
$V_{PS_i(i)}$	vizinhança nos valores de $PS_i$
$V_{PS_{gene}(i)}$	vizinhança nos valores de $PS_{gene}(i)$
$V_{Tipo\_Curva_{gene}(i)}$	vizinhança nos valores de $Tipo\_Curva_{gene}(i)$
$\mathbf{x}$	vetor linha de incógnitas do problema

# 1 Introdução

## 1.1 Considerações Iniciais

Um sistema elétrico completamente imune a falhas é economicamente inviável, no entanto é necessário protegê-lo contra tais eventos. Os dispositivos de proteção (relés, disjuntores, chaves fusíveis, religadores automáticos etc.) exercem um papel fundamental na preservação de equipamentos, tais como: geradores, chaves seccionadoras, condutores, capacitores, transformadores etc. Adicionalmente, é necessário garantir a máxima continuidade de fornecimento de energia elétrica para os consumidores, de modo a melhorar os índices de continuidade DEC<sup>1</sup> e FEC<sup>2</sup>. Esses índices estão relacionados com a duração (DEC) e frequência (FEC) das interrupções ocorridas, uma vez que as interrupções causam prejuízos para usuários e concessionárias de energia elétrica. Para estas, as interrupções podem ocasionar perdas de faturamento, prejuízo de sua imagem junto aos clientes e multas aplicadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (FILHO; MAMEDE, 2011).

Os dispositivos de proteção possuem o objetivo principal de detectar e isolar os elementos submetidos à falha, e, simultaneamente, deixar a maior parte do sistema em operação. Assim, é minimizado o impacto negativo das interrupções ao evitar interrupções desnecessárias ao fornecimento de energia. Isso só é possível caso os dispositivos de proteção estejam coordenados de forma seletiva. A seletividade impõe uma ordem de atuação nos dispositivos de proteção, de forma que os mais próximos à falha operam primeiro. Ademais, outras características são desejadas nos esquemas de proteção, tais como (URDANETA; NADIRA; PEREZ, 1988):

- Sensibilidade: os dispositivos de proteção devem ser sensibilizados pelas menores correntes de falha presumidas;
- Confiabilidade: os dispositivos de proteção devem apresentar uma alta con-

---

<sup>1</sup>Duração Equivalente de interrupção por unidade Consumidora.

<sup>2</sup>Frequência Equivalente de Interrupção por unidade Consumidora.

fiabilidade, sendo esperado que os mesmos atuem corretamente. Para elevar a confiabilidade do sistema de proteção, utiliza-se a proteção de retaguarda, cuja função consiste em eliminar a falha na casualidade da proteção primária falhar em eliminá-la;

- Velocidade: uma consequência natural de uma falha é a elevação dos níveis de corrente no sistema. Assim, as proteções devem atuar o mais rápido possível, de forma a minimizar esforços térmicos e mecânicos nos equipamentos pertencentes ao sistema elétrico protegido.

As redes elétricas motivaram o desenvolvimento comercial, industrial e tecnológico em diferentes áreas geográficas do país e do mundo, porém muitas delas são antigas e não estão tecnologicamente desenvolvidas. No momento, o governo brasileiro vem incentivando as concessionárias de energia elétrica a realizar investimentos em suas redes para torná-las mais confiáveis, seguras e modernas. Desta forma, estão sendo desenvolvidas as *smart grids*. Essas são redes elétricas que utilizam tecnologias avançadas de monitoramento, e agem com base nas informações sobre o comportamento dos usuários finais e geradores de energia. A *smart grid* coordena as necessidades dos geradores de energia, operadores de rede e consumidores, com objetivo de operar o sistema de forma mais eficiente possível, minimizando os custos e impactos ambientais, ao mesmo tempo aumentando a sua confiabilidade e estabilidade (GRIDS, 2011). Nas *smart grids*, os centros de controle de energia precisam de metodologias/algoritmos eficazes e confiáveis, a fim de serem utilizados em aplicações em tempo real. Há um grande interesse das concessionárias de energia elétrica em utilizar técnicas, métodos ou algoritmos computacionais para solucionar os problemas dentro das suas redes elétricas. Um desses problemas é a coordenação de relés de sobrecorrente em tempo real.

O uso de técnicas que possam ser aplicadas em tempo real é fundamental para obter esquemas de proteção que eliminem as falhas de forma mais rápida, e, simultaneamente, reduzir o número de atuações errôneas dos dispositivos de proteção (SHIH, 2013). Técnicas eficientes podem ser aplicadas em um sistema de coordenação *online*. Assim, a cada mudança topológica da rede (saída/entrada de uma linha ou gerador no sistema, por exemplo) os parâmetros dos dispositivos de proteção são reajustados por meio de alguma técnica de otimização (SHIH; ENRÍQUEZ; TORRES, 2014). Quando as situações de contingência são consideradas no processo de coordenação *offline*, os tempos de atuação dos dispositivos de proteção podem ser elevados e a coordenação *online* contorna este problema (CORRÊA et al., 2015).



## 1.2 Principais Objetivos

Esta dissertação de mestrado tem como objetivo estudar, investigar, avaliar, validar e implementar metodologias para realizar a coordenação de relés de sobre-corrente (RSs) não direcionais e direcionais de tempo inverso em sistemas de distribuição e transmissão de energia elétrica nos quais não se justifica o uso de chaves fusíveis – devido ao níveis de tensão empregado.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Desenvolver ferramentas para auxiliar nos estudos de coordenação e seletividade em sistemas de distribuição ou transmissão de energia elétrica;
- Apresentar a formulação do problema da coordenação como um problema de otimização matemática, contendo função objetivo (FO) e um conjunto de restrições;
- Apresentar como linearizar o problema da coordenação e comparar os resultados da formulação linear com a não linear;
- Investigar metodologias capazes de fornecer os ajustes dos RSs que minimizem os tempos de atuação dos relés sem comprometer a seletividade, sensibilidade e confiabilidade;
- Propor metodologias capazes de considerar os ajustes discretos dos relés;
- Verificar o impacto da inclusão de outras variáveis de decisão no problema de otimização;
- Comparar as metodologias implementadas com as reportadas na literatura especializada;
- Investigar os desempenhos computacionais das técnicas implementadas, de modo a avaliar sua aplicabilidade na coordenação em tempo real.

## 1.3 Estado da Arte

A partir de 1960, pesquisadores propuseram diversas técnicas computacionais para solucionar o problema da coordenação de relés de sobre-corrente (RSs) de tempo inverso. De forma geral, esses dispositivos possuem três parâmetros: ajuste de *plug* (*PS*), ajuste de tempo (*Dial*) e tipo de curva. Normalmente, os tipos de curvas são previamente escolhidos com base em algum critério prático. As

técnicas aplicadas à coordenação de relés podem ser divididas em três categorias: tentativa e erro, análise topológica e técnicas de otimização matemática (RAZA et al., 2013). O foco deste trabalho está nas técnicas de otimização matemática. Na coordenação ótima, procura-se encontrar a combinação dos ajustes dos relés de forma a minimizar seus tempos de atuação (critério de velocidade) sem prejuízo à seletividade, sensibilidade e confiabilidade. A consideração dos ajustes de *PSs* e *Dials* discretos adicionam uma maior complexidade ao problema.

A primeira vez em que o problema da coordenação foi formulado como um problema de otimização – contendo função objetivo (FO) e um conjunto de restrições – foi no trabalho de Urdaneta, Nadira e Perez (1988). Os autores demonstraram que o problema da coordenação é um problema de otimização não linear. Porém, caso os valores de *PSs* e os tipos de curvas sejam previamente determinados, o problema pode ser linearizado. Assim, as variáveis do problema de otimização passam a ser os *Dials*, e seus valores ótimos podem ser calculados utilizando técnicas de Programação Linear (PL). Em Elrafie e Irving (1993) e Chattopadhyay, Sachdev e Sidhu (1996), o problema da coordenação linearizado foi solucionado utilizando o método dual Simplex revisado e o Simplex de duas fases, respectivamente. Outros trabalhos também solucionaram o problema utilizando técnicas de PL, como os apresentados em Zapata e Mejía (2003); Estrada, Carmona e Ruiz (2006); Bedekar, Bhide e Kale (2009) e Niyomphant et al. (2012).

O uso de técnicas de PL é limitado a problemas lineares. Para contornar esta limitação, é necessário solucionar o problema de forma não linear. Desta forma, é possível considerar outras variáveis de decisão, como os valores de *PSs* e tipos de curvas, com objetivo de obter um esquema de proteção mais rápido, reduzindo os tempos de atuação dos relés. Pelo fato do problema da coordenação ser não convexo (NOGHABI; SADEH; MASHHADI, 2009; RAJPUT; PANDYA; JOSHI, 2015) as técnicas meta-heurísticas são amplamente utilizadas na literatura especializada para solucionar este problema. As técnicas meta-heurísticas são métodos de solução que combinam procedimentos de melhoramento local com estratégias de alto nível para escapar de ótimos locais, de forma a realizar uma busca robusta no espaço de solução do problema (GLOVER; KOCHENBERGER, 2003). As técnicas meta-heurísticas mais utilizadas para solucionar o problema da coordenação são:

- Algoritmo Diferencial Evolutivo (ADE);
- Algoritmo Diferencial Evolutivo Adaptativo (ADEA);
- Algoritmo Diferencial Evolutivo Caótico Baseado em Oposição (ADEBO);

- Algoritmo Genético (AG);
- Algoritmo Busca *Cuckoo* (ABC);
- Busca Harmônica (BH);
- Otimização por Algoritmo *Seeker* (OAS);
- Otimização Baseada em Biogeografia (OBB);
- Otimização por Colônia de Abelhas (OCA);
- Otimização por Colônia de Formigas (OCF);
- Otimização por Enxame de Partículas (OEP).

Em So (1997), o problema foi solucionado com o Algoritmo Genético (AG) pela primeira vez. Neste trabalho, as variáveis *PSs* e *Dials* foram codificadas de forma binária no cromossomo do AG. Em Zeineldin, El-Saadany e Salama (2006), foi proposto um algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas (OEP) modificado para solucionar o problema da coordenação, considerando *PSs* discretos e *Dials* contínuos. A modificação proposta pelos autores no algoritmo de OEP está relacionada à utilização da PL, via técnica denominada de pontos interiores, para calcular os valores factíveis de *Dial*, durante a formação da população inicial. Com a metodologia utilizada, foi possível encontrar respostas melhores do que as fornecidas pelo *software General Algebraic Modeling System*, demandando menor tempo computacional. Mansour, Mekhamer e El-Kharbawe (2007) propuseram um algoritmo de OEP modificado para solucionar o problema da coordenação. Uma das modificações propostas pelos autores está relacionada ao algoritmo de reparo, que força as partículas que violaram alguma restrição a voltarem para a região de factibilidade. A metodologia proposta obteve os mesmos resultados que a PL.

Em Kavehnia et al. (2006), os autores propuseram um AG que considera na sua codificação as variáveis de *Dial*, *PS* e tipos de curvas. Dessa forma, houve uma significativa redução nos tempos de atuação dos relés ao considerar essas três variáveis de decisão ao problema. No trabalho de Razavi et al. (2008), foi adicionado um novo parâmetro à FO do AG. Este parâmetro adiciona uma penalização à FO, quando o arredondamento dos *Dials* para os valores permitidos pelos relés causam problemas de seletividade. Assim, os autores solucionaram o problema da coordenação considerando valores discretos ou contínuos de *Dials*. Em Noghabi, Sadeh e Mashhadi (2009), foi proposto um algoritmo híbrido que

combina AG com PL (AG-PL). Desta forma, o espaço de solução foi reduzido, visto que as variáveis de *Dial* não precisam ser incluídas na codificação do cromossomo. Isso porque os valores ótimos de *Dial* podem ser obtidos por meio de técnicas de PL. A técnica de PL é utilizada como um otimizador local do AG. Neste trabalho, foram consideradas mudanças topológicas da rede no problema de otimização. Devido ao otimizador local, o AG-PL convergiu mais rapidamente do que o AG.

No artigo de Rashtchi, Gholinezhad e Farhang (2010), foi proposta a meta-heurística de Otimização por Colônia de Abelhas (OCA) para solucionar o problema da coordenação. Os autores utilizaram a mesma FO proposta em Razavi et al. (2008). Dessa forma, foi possível considerar os *Dials* como variáveis discretas. No trabalho de Thangaraj, Pant e Deep (2010), foi realizado um estudo comparativo entre cinco versões modificadas do Algoritmo Diferencial Evolutivo (ADE<sup>3</sup>) e o ADE tradicional. As versões modificadas apresentaram melhores respostas (menores tempos de atuação dos relés) e foram mais rápidas do que o ADE tradicional. Em Bedekar e Bhide (2011b), o problema da coordenação foi solucionado com o AG contínuo. Os autores demonstraram que este algoritmo é mais rápido e requer menos memória que o AG binário, pois os valores de *Dial* do cromossomo não precisam ser decodificados. Neste trabalho, apenas os *Dials* foram tratados como variáveis de decisão.

Ezzeddine e Kaczmarek (2011) solucionaram o problema considerando uma nova abordagem na qual cada parâmetro (*PS* e *Dial*) são otimizados independentemente, com o uso de técnicas de PL. Desta forma, foi possível considerar *PS* e *Dial* como variáveis discretas. Em Liu e Yang (2012), a coordenação foi solucionada com a meta-heurística de OEP em conjunto com o método de busca Nelder-Mead Simplex, para melhorar sua eficiência. Neste trabalho, foram considerados *PSs* e *Dials* como variáveis discretas e contínuas, respectivamente. Em Sueiro et al. (2012), os autores propuseram um algoritmo híbrido que combina o ADE com PL. No caso do problema ser infactível, a metodologia proposta pelos autores é capaz de identificar e eliminar as restrições, com objetivo de obter uma coordenação parcial dos relés.

Em Bedekar e Bhide (2011a), os autores utilizaram um algoritmo híbrido que combina o AG com uma técnica de Programação Não Linear (AG-PNL) como método de solução do problema da coordenação. A técnica de Programação Não Linear (PNL) utilizada foi a Programação Quadrática Sequencial (PQS). Os autores demonstraram que o uso do AG ou da PQS de forma isolada não produz

---

<sup>3</sup>ADE 1, ADE 2, ADE 3, ADE 4 e ADE 5.

resultados satisfatórios. Porém, ao combinar ambas as técnicas, os autores encontraram respostas de boa qualidade. Neste trabalho, 40 gerações do AG foram utilizadas como ponto de partida para a técnica de PQS. Amraee (2012) propôs a meta-heurística de Otimização por Algoritmo *Seeker* (OAS) e o *Standard Branch – and – Bound* (SBB) para solucionar o problema da coordenação. O desempenho do OAS foi superior ao SBB. Os resultados encontrados pelos autores foram melhores que os publicados em Noghabi, Sadeh e Mashhadi (2009). Adicionalmente, foram considerados *PSs* como variáveis discretas e *Dials* como contínuas. No trabalho de Dash et al. (2013), os autores propuseram um Algoritmo Diferencial Evolutivo Adaptativo (ADEA) para solucionar o problema da coordenação. Sendo que, a etapa de mutação acontece de forma adaptativa, pois o operador de mutação varia de acordo com a FO do indivíduo. Os resultados apresentados foram melhores que os reportados em Thangaraj, Pant e Deep (2010).

No trabalho de Papaspiliotopoulos, Kurashvili e Korres (2014), os autores propuseram uma técnica híbrida que combina o algoritmo de OEP com PL (OEP - PL) para solucionar o problema da coordenação. O algoritmo proposto obteve resultados satisfatórios em relação à FO e ao esforço computacional. Em Chelliah et al. (2014), foram propostos dois Algoritmos Diferenciais Evolutivos Caóticos Baseados em Oposição (ADEBOs) para solucionar o problema da coordenação. Estes algoritmos meta-heurísticos utilizam o conceito de aprendizado por oposição e um fator de escala caótico. O aprendizado por oposição considera, simultaneamente, duas estimativas para aproximar a solução candidata: normal e oposta. O fator de escala caótico tem como objetivo prevenir a convergência prematura do ADE (CHELLIAH et al., 2014). Os resultados foram melhores que aos publicados por Thangaraj, Pant e Deep (2010), porém inferiores aos apresentados em Dash et al. (2013).

Shih, Enríquez e Torres (2014) propuseram um esquema de proteção *online* de RSDs e compararam os desempenhos entre as meta-heurísticas ADE, AG e Otimização por Colônia de Formigas (OCF). A coordenação *online* proposta pelos autores considera os seguintes passos: 1) coletar os dados das últimas modificações nas topologias das redes; 2) computar os pares de coordenação dos RSDs (dispositivos de proteção primária e retaguarda); 3) calcular os valores das correntes de falha e de carga do sistema; 4) realizar a coordenação por meio de algum algoritmo de otimização. Assim, os parâmetros dos relés são reajustados em tempo real, de acordo com as mudanças topológicas do sistema. Em relação às técnicas de otimização utilizadas, o ADE apresentou melhores respostas que o

AG e OCF, demandando menos tempo computacional.

Nos trabalhos de Salazar e Enriquez (2014) e Castillo, Conde e Elisa (2015), os autores utilizaram AGs para solucionar o problema da coordenação, considerando as constantes relacionadas aos tipos de curvas como variáveis de decisão. Assim, foi possível considerar tipos de curvas não convencionais. Os autores demonstraram que o uso dessas curvas melhorou a coordenação entre os relés. Em Corrêa et al. (2015), os autores propuseram uma técnica de Programação Inteira Binária (PIB) para solucionar o problema da coordenação. Sendo assim, foi possível considerar valores discretos de *PS* e *Dial*. Também foi proposto uma metodologia de pré-processamento para reduzir o número de variáveis do modelo de PIB. Os resultados mostraram essa técnica tem um desempenho superior em relação ao ADE proposto por Shih, Enríquez e Torres (2014).

Darji et al. (2015) propuseram a meta-heurística Algoritmo Busca *Cuckoo* (ABC) para solucionar o problema da coordenação. Este algoritmo mostrou-se superior ao AG e AG-NLP. Em Alam, Das e Pant (2015) foi realizado um estudo comparativo entre diversas técnicas de otimização meta-heurísticas, tais como: AG, OEP, ADE, Busca Harmônica (BH) e OAS. Entre os algoritmos apresentados, o ADE apresentou a melhor resposta. Este algoritmo mostrou-se ser praticamente imune à variação de parâmetros, tais como o tamanho da população inicial e as taxas de recombinação e mutação. Em Marcolino, Leite e Mantovani (2015), a coordenação entre RSs é realizada com conjunto com relés de distância. Nesta formulação, os autores utilizaram como método de solução um AG. Adicionalmente, diferentes tipos de curvas dos relés do tipo IEC foram consideradas na formulação do problema da coordenação. No trabalho de Albasri, Alroomi e Talaq (2015), os autores utilizaram um algoritmo híbrido que combina a Otimização Baseada em Biogeografia (OBB) com PL (OBB-PL) para solucionar o problema da coordenação. Este algoritmo híbrido obteve um desempenho superior à OBB. De forma geral, a OBB-PL mostrou-se ser superior a diversas metodologias publicadas na literatura, como o OAS, OEP, AG-PL e AG-PNL. Devido aos baixos tempos computacionais demandados pela OBB-PL, esta metodologia é interessante para aplicações em sistemas de coordenação *online*.

## 1.4 Justificativas

Conforme apresentado anteriormente, há um grande interesse por parte dos pesquisadores em desenvolver metodologias para coordenar os de relés de sobrecorrente (RSs) de tempo inverso. Este trabalho de mestrado propõe analisar e validar

a eficácia de metodologias para solucionar o problema da coordenação entre RSs.

Primeiramente, o problema da coordenação é solucionado por meio da técnica de Programação Linear (PL) (URDANETA; NADIRA; PEREZ, 1988). Esta é base para as técnicas propostas de Programação Linear Inteira Mista (PLIM), Algoritmo Genético de Chu-Beasley (AGCB) - PL (AGCB-PL) e Busca Local - PL (BL-PL), que são implementadas neste trabalho.

Para solucionar o problema da coordenação de RSs não direcionais, em sistemas de distribuição radiais, são implementadas as metodologias de PLIM, Algoritmo de Busca por Enumeração (ABE) e AGCB-ABE.

A técnica de PLIM diferencia-se da PL proposta por Urdaneta, Nadira e Perez (1988) por considerar os passos discretos dos *Dials* durante o processo iterativo. Essa técnica baseia-se na adição de restrições sobre os passos discretos dos *Dials*, em uma ordem específica, no problema de PL. Desse modo, evita-se problemas na coordenação quando os relés não possuem ajustes de *Dial* pequenos o suficiente para que sejam tratados como variáveis contínuas.

A técnica intitulada como ABE é baseada nas ideias da coordenação manual apresentadas em Zapata e Mejía (2003), Kindermann (2005), Soares (2009). A metodologia utilizada possui as seguintes diferenças: 1) são considerados os tempos mínimos de atuação dos relés; 2) a ordem na qual os relés são analisados é ditada pela etapa de enumeração. Enquanto nas referências supracitadas, esta ordem é escolhida visualmente ou por uma matriz de rede.

No problema da coordenação, as técnicas híbridas vêm ganhando popularidade desde o trabalho de Noghabi, Sadeh e Mashhadi (2009). Sendo assim, o AGCB-ABE difere-se das outras técnicas híbridas propostas na literatura especializada (NOGHABI; SADEH; MASHHADI, 2009; ALBASRI; ALROOMI; TALAQ, 2015; PAPASPILIOTOPOULOS; KURASHVILI; KORRES, 2014; BEDEKAR; Bhide, 2011a; BOTTURA, 2014) em relação à meta-heurística utilizada (AGCB), à técnica de hibridização (ABE) e às variáveis de decisão (*PS*, *Dial*, tipos de curvas e tipos de relés). Adicionalmente, são considerados os passos discretos de *Dial*. Exceto o AG híbrido proposto por Bottura (2014), as demais técnicas híbridas encontradas na literatura não fazem essa consideração. A adição dos tipos de relés como variáveis de decisão é respaldada pelo fato de que alguns relés no mercado aceitam outros padrões de tipo de curva, como por exemplo o SEPAM série 20 da Schneider e o 735/737 da General Electric que aceitam curvas características

do tipo IEC<sup>4</sup>, IAC<sup>5</sup> e IEEE<sup>6</sup> (SCHNEIDER, 2009; ELETRIC, 2009).

Para solucionar o problema da coordenação de relés de sobrecorrente direcionais (RSDs), em sistemas de transmissão malhados, são implementadas as metodologias AGCB - PL, AGCB - Programação Linear Inteira (AGCB - PLI) e BL - PL.

O AGCB-PL é uma metodologia híbrida que combina o AGCB com PL. De modo igual ao AG-PL (NOGHABI; SADEH; MASHHADI, 2009), a PL é utilizada como um otimizador local do algoritmo meta-heurístico. A metodologia proposta diferencia-se das outras técnicas híbridas encontradas na literatura em relação à meta-heurística utilizada (AGCB) e pelas variáveis de decisão que podem ser consideradas (*PS*, *Dial*, tipos de curvas e tipos de relés).

O AGCB-PLI é uma técnica híbrida que se assemelha ao AGCB-PL, exceto por ser uma técnica que emprega a programação linear inteira (PLI) ao invés da PL. Essa é uma abordagem nova para o cálculo dos *Dials*. A metodologia mais próxima da PLI encontrada na literatura para solucionar este problema é a PIB (CORRÊA, 2012). A metodologia proposta trata as variáveis como inteiras durante o processo de otimização, e no final elas são desnormalizadas. Ao passo que em Corrêa (2012), as variáveis são tratadas como binárias. Outra diferença é que a metodologia proposta não adiciona variáveis e restrições extras. Entretanto, a PLI trata apenas os *Dials* como variáveis de decisão, enquanto a PIB otimiza os *PSs* e *Dials*. Para contornar esse problema, é utilizado a técnica de PLI em conjunto com o AGCB.

A BL-PL é uma técnica híbrida que combina a metodologia de melhoria iterativa gulosa denominada de *Hill Climbing* (subida de encosta) (RUSSELL; NORVIG, 1995) com PL. Dessa forma, o algoritmo realiza sucessivas buscas locais nas variáveis de *PSs* até que não seja mais possível melhorar a função objetivo. A cada busca local é solucionado um problema de PL. Essa técnica é uma abordagem diferente das técnicas meta-heurísticas normalmente utilizadas para solucionar o problema da coordenação.

## 1.5 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido em sete capítulos. No Capítulo 2 é apresentado a teoria fundamental dos dispositivos de proteção utilizados nos sistemas elétricos:

---

<sup>4</sup>*International Electrotechnical Commission.*

<sup>5</sup>*Intersocietal Accreditation Commission.*

<sup>6</sup>Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos.



disjuntores de média tensão, relés de sobrecorrente (RSs) e transformadores de corrente. Também são apresentados os critérios básicos de coordenação e seletividade entre RSs. O Capítulo 3 apresenta a formulação matemática do problema da coordenação de RSs de tempo inverso. O problema é formulado contendo uma função objetivo (FO) e um conjunto de restrições. No Capítulo 4, são apresentadas as metodologias utilizadas neste trabalho para solucionar o problema da coordenação, tais como: PL, PLIM, ABE, AGCB-ABE, AGCB-PL, AGCB-PLI e BL-PL. O Capítulo 5 apresenta os sistemas elétricos utilizados para validar as metodologias apresentadas no Capítulo 4, bem como as considerações realizadas para cada sistema. No Capítulo 6, são apresentados e discutidos os principais resultados numéricos obtidos com as metodologias implementadas nos sistemas elétricos apresentados no Capítulo 5. O Capítulo 7 apresenta as principais conclusões sobre o trabalho desenvolvido, as sugestões para trabalhos futuros e os artigos científicos desenvolvidos durante o mestrado.

No Apêndice A, são apresentados os critérios para o dimensionamento dos transformadores de instrumentação. O Apêndice B apresenta um exemplo da coordenação entre dois relés de sobrecorrente. No Apêndice C são apresentadas as equações necessárias para solucionar o problema linear da coordenação para o sistema I. No Apêndice D são apresentados os coordenogramas das proteções dos sistemas elétricos utilizados. No Apêndice E são apresentadas tabelas que possuem os tempos de atuação dos relés para os sistemas elétricos utilizados. O Apêndice F apresenta a metodologia e os resultados da calibração dos parâmetros do algoritmo genético. No Apêndice G são apresentados os trabalhos publicados realizados durante o curso de mestrado.

## 2 Proteção contra Sobrecorrente

Os curtos-circuitos e sobrecargas são condições anormais, porém inerentes ao funcionamento dos sistemas elétricos. Essas anormalidades podem ter consequências irrelevantes ou mesmo desastrosas, dependendo se o esquema de proteção está preparado para esta situação particular (FILHO; MAMEDE, 2011). Embora existam outros tipos de anormalidades, por exemplo, frequência e tensões fora dos valores limites, este trabalho foca na proteção contra sobrecorrente.

Durante uma falta, uma das principais consequências ao sistema elétrico é a elevação da magnitude da corrente elétrica. Desta forma, é natural que esta grandeza seja utilizada como parâmetro para determinar se o sistema sofre um curto-circuito. Os dispositivos mais comuns desta categoria são os relés de sobrecorrente (RSs), fusíveis e disjuntores termomagnéticos (ZAPATA; MEJÍA, 2003). A principal funcionalidade do dispositivo de proteção é detectar e desconectar o sistema elétrico submetido a uma anormalidade. Usualmente, os RSs são utilizados como proteção primária em três tipos de sistemas: subtransmissão, distribuição e industriais. Estes relés são normalmente utilizados como proteção de retaguarda em sistemas de transmissão (CORRÊA, 2012).

Os RSs trabalham em conjunto com os disjuntores e transformadores de corrente (TCs). Neste capítulo são apresentadas as principais características e critérios de especificação dos disjuntores de média tensão, RSs e TCs. Ademais, são apresentados os conceitos básicos sobre os dispositivos de proteção primária e retaguarda, as zonas de proteção e os critérios de coordenação entre RSs.

### 2.1 Disjuntores de Média Tensão

O disjuntor é um dispositivo eletromecânico destinado à manobra e proteção do sistema elétrico. Sendo capaz de estabelecer, conduzir e interromper as correntes nas condições nominais do circuito. Assim como estabelecer, conduzir – durante

um tempo especificado – e interromper as correntes sob condições anormais do circuito (LEDESMA, 2012). Enquanto os relés atuam como sensores capazes de serem sensibilizados por condições anormais do sistema, os disjuntores são diretamente responsáveis por interromper o circuito e isolar a falta. Os relés e os disjuntores trabalham de forma conjunta, pois sem estes os relés seriam apenas um tipo de alarme (BLACKBURN; DOMIN, 2006). Na Figura 2.1, é apresentado um disjuntor tripolar de média tensão (17,5kV).

**Figura 2.1:** Disjuntor tripolar PVO de média tensão 17,5 kV - 50/60 Hz, para uso interno.



Fonte: Romagnole (2015).

As características do disjuntor, sua capacidade de interrupção de arcos elétricos, e a suportabilidade de sobretensões, variam de acordo com o meio utilizado para a extinção do arco (PEREIRA, 2007). Os mais utilizados são (DUALIBE, 1999):

1. Disjuntores a óleo – possuem o princípio de extinção do arco baseado na decomposição do óleo em moléculas de gases, devido à alta temperatura do arco. Estes gases possuem duas funções: 1) reduzir a temperatura do arco e 2) aumentar a pressão em torno do arco, elevando o gradiente de tensão. Esses disjuntores são divididos em duas categorias: grande volume de óleo (GVO) e pequeno volume de óleo (PVO). Estes possuem volume reduzido devido à câmara de extinção com fluxo forçado sobre o arco, que aumenta a eficiência do processo de interrupção da falta. A vantagem dos disjuntores GVO é sua grande capacidade de interrupção das correntes de falta em altas tensões, porém estes tipos de disjuntores estão entrando em desuso;
2. Disjuntores a ar comprimido – a extinção do arco acontece nas câmaras de

ar comprimido, que sopra sobre a região entre os contatos, para determinar o resfriamento do arco e sua compressão. As válvulas de exaustão, em cada câmara, abrem-se simultaneamente para ventilar a região entre os contatos. A atuação desses disjuntores produz uma quantidade elevada de ruídos devido à exaustão do ar para a atmosfera, podendo ser reduzidos através de silenciadores. Atualmente, os disjuntores de ar comprimido possuem câmaras pressurizadas de 25/30 bars e reservatórios de ar comprimido com pressão de 150/200 bars;

3. Disjuntores a gás hexafluoreto de enxofre ( $\text{SF}_6$ ) – a extinção do arco acontece em câmaras com  $\text{SF}_6$ . Este gás possui rigidez dielétrica 2,5 vezes superior à do ar, e aumenta rapidamente com a pressão. Por ser um gás eletronegativo, possui facilidade em capturar elétrons livres. Desta forma, consegue-se eliminar rapidamente os elétrons presentes no plasma do arco, resultando em uma significativa redução da condutibilidade do mesmo quando a corrente passa por zero.
4. Disjuntores a vácuo – a extinção do arco acontece em câmaras contendo vácuo. Nesses disjuntores, o arco é formado de forma diferente dos demais: os íons são provenientes do material metálico vaporizado dos contatos, que atuam como catodos. Quando a corrente passa por zero, a região entre os contatos é rapidamente desionizada (pela condensação do vapor metálico, na ordem de milissegundos), o que confere a esses disjuntores características dielétricas quase ideais. A baixa velocidade dos contatos, aliada à excursão reduzida (consegue-se um alto dielétrico com distâncias mínimas) e à pequena massa desses, demanda uma baixa quantidade de energia para seu correto funcionamento. Assim, os desgastes são extremamente reduzidos (ordem de 10.000 operações), garantindo baixa manutenção (SIEMENS, 2015a).

### 2.1.1 Características de Especificação de Disjuntores de Média Tensão

Para que o disjuntor opere corretamente, deve-se satisfazer – no mínimo – os seguintes requisitos (FILHO; MAMEDE, 2011):

- A tensão nominal do disjuntor deve ser igual ou superior à tensão nominal do sistema;

- A corrente nominal do disjuntor deve ser superior à máxima corrente de carga multiplicada por um fator de crescimento de carga esperado;
- A capacidade de interrupção do disjuntor deve ser superior à maior corrente de curto-circuito (mono ou trifásica) no seu local de instalação;
- O nível de isolamento do disjuntor deve ser compatível com o do sistema.

## 2.2 Relés de Sobrecorrente

O relé de sobrecorrente (RS) é um dispositivo destinado à proteção do sistema elétrico, atuando como sensor de corrente elétrica, comandando a atuação do disjuntor – quando sujeito às condições anormais de curtos-circuito ou sobrecargas. O RS monitora permanentemente a corrente do trecho protegido, e o relé atua caso esta atinja um valor superior ao ajuste pré-estabelecido. A atuação do RS é caracterizada pelo envio de um sinal que resulta na ação de sinalização, bloqueio ou atuação de um ou mais disjuntores. Assim, é isolada a parte defeituosa do sistema. Os RSs são normalmente conectados ao sistema elétrico de forma indireta por meio de transformadores de corrente (TCs) (ALMEIDA, 2000). Os critérios para o dimensionamento dos TCs são apresentados no Apêndice A.

De acordo com seu tipo construtivo, os RSs podem ser classificados como: eletromagnéticos, estáticos (analógicos e digitais) e microprocessados (PEREIRA, 2007). Na Figura 2.2 é apresentado um relé microprocessado da Siemens. Os RSs podem ser classificados de acordo com as características dos seus tempos de atuação (ELETROBRAS, 1982):

- Tempo definido – esse tipo de RS atua assim que a sua corrente for superior à de atuação, com ou sem retardo proposital, independente da magnitude da corrente percorrida. Maiores detalhes na Subseção 2.2.1.
- Tempo inverso – seu tempo de atuação é inversamente proporcional à magnitude da corrente percorrida. Suas curvas de atuação são padronizadas de acordo com o tipo do relé (IEEE<sup>1</sup>, IEC<sup>2</sup>, IAC<sup>3</sup>, US etc.). Maiores detalhes na Subseção 2.2.2.

Os RSs mais modernos (digitais e microprocessados) apresentam várias funções, dentre as quais pode-se citar (FILHO; MAMEDE, 2011):

<sup>1</sup>Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos.

<sup>2</sup>International Electrotechnical Commission.

<sup>3</sup>Intersocietal Accreditation Commission.

**Figura 2.2:** Relé de sobrecorrente microprocessado.

Fonte: Siemens (2015b).

1. Proteção de sobrecorrente de tempo definido (ANSI 50);
2. Proteção de sobrecorrente de tempo inverso (ANSI 51);
3. Intertravamento reverso – com objetivo de aumentar a velocidade do esquema de proteção em sistemas radiais, mais de uma unidade de proteção de tempo definido é adicionada ao relé, que pode ser bloqueadas individualmente pelo intertravamento reverso;
4. Proteção de falha do disjuntor – quando uma falha não é eliminada em um tempo hábil, o relé envia um comando para o disjuntor operar;
5. Oscilografia de falhas – medição das tensões e correntes de falha em função do tempo;
6. Registro de eventos – registros das atuações dos relés;
7. Comunicação serial – comunicação com o relé por meio de interface serial;
8. Automonitoramento – o relé constantemente se automonitora para verificar falhas internas.

O RS pode possuir uma unidade de sobrecorrente temporizada (tempo inverso) e uma de tempo definido, para ajustes de fase e neutro (FILHO; MAMEDE, 2011).

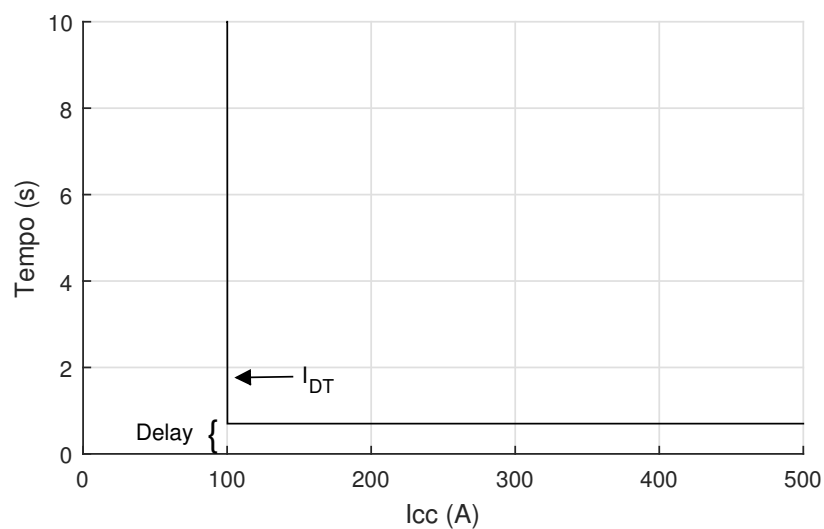
### 2.2.1 Relés de Sobrecorrente de Tempo Definido

O RS de tempo definido é conhecido como relé de tempo independente da corrente. Os dispositivos de proteção podem ser identificados pelo seu número ANSI<sup>4</sup>, de acordo com o padrão IEEE C37.2-2008. A unidade de tempo definido é conhecida pelo número ANSI 50. Sendo assim, o RS que possui a função 50 está equipado com unidade de tempo definido. Em relés modernos, é possível parametrizar o ajuste de *plug* da unidade de tempo definido ( $PS_{DT}$ ) e o tempo de atuação ( $Delay$ ). Porém, alguns relés permitem ajustar apenas o  $PS_{DT}$ , caracterizando a unidade de tempo instantânea, onde não há nenhum retardo de tempo intencional. O  $PS_{DT}$  se relaciona com a corrente de atuação da unidade de tempo definido ( $I_{DT}$ ), no primário do TC, de acordo com a equação (2.1). A Figura 2.3 apresenta um exemplo da curva de atuação do relé de tempo definido. Note que para correntes de curto-circuito ( $I_{cc}$ ) maiores que  $I_{DT}$ , o tempo de atuação do RS não varia.

$$I_{DT} = RTC \cdot PS_{DT} \quad (2.1)$$

sendo que,  $I_{DT}$  – corrente de atuação da unidade de tempo definido;  $RTC$  – relação de transformação do transformador de corrente;  $PS_{DT}$  – ajuste de *plug* da unidade de tempo definido.

**Figura 2.3:** Curva de atuação do relé de sobrecorrente de tempo definido. Neste exemplo,  $PS_{DT} = 10A$  e  $RTC = 10$ .



Fonte: O próprio autor.

<sup>4</sup>American National Standards Institute.

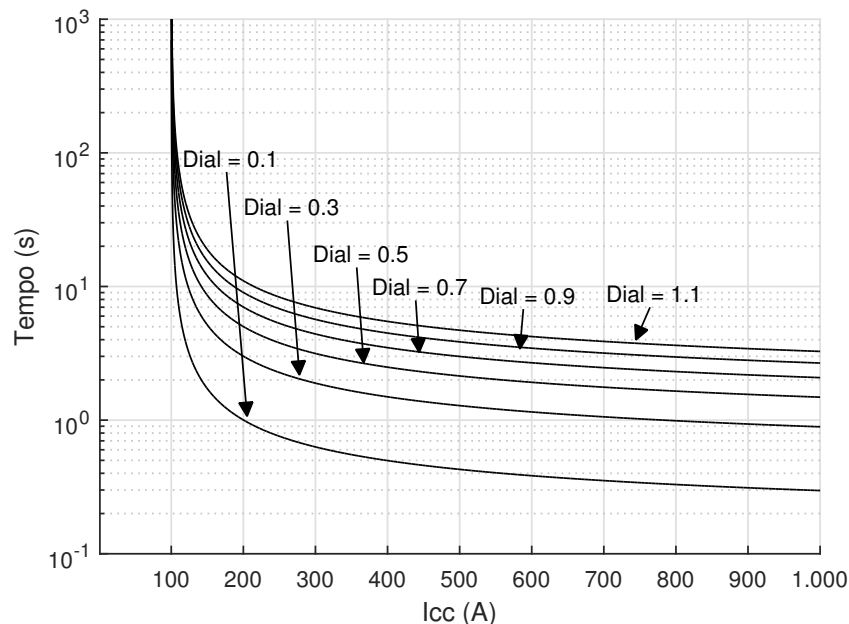
### 2.2.2 Relés de Sobrecorrente de Tempo Inverso

No RS de tempo inverso, seu tempo de atuação é inversamente proporcional à intensidade da corrente monitorada. A unidade temporizada do RS é conhecida pelo número ANSI 51. O RS possui três parâmetros básicos: ajuste de tempo *Dial*, ajuste de *plug* da unidade temporizada (*PS*) e tipo de curva. O *PS* se relaciona com a corrente de atuação da unidade temporizada (*Ip*), no circuito primário do TC, por meio da equação (2.2). *Dial* e *PS* são responsáveis por deslocar verticalmente e horizontalmente a curva tempo-corrente do relé, respectivamente. O tipo de curva está relacionado com o formato da curva tempo-corrente. As Figuras 2.4 e 2.5 mostram as famílias das curvas características de tempo inverso variando *Dial* e *PS*, respectivamente.

$$I_p = RTC \cdot PS \quad (2.2)$$

sendo que, *Ip* – corrente de atuação da unidade temporizada; *RTC* – relação de transformação do transformador de corrente; *PS* – ajuste de *plug* da unidade temporizada.

**Figura 2.4:** Curvas do relé de sobrecorrente do tipo IEC (curva inversa) variando o Dial, com *PS* = 1 A e *RTC* = 100.

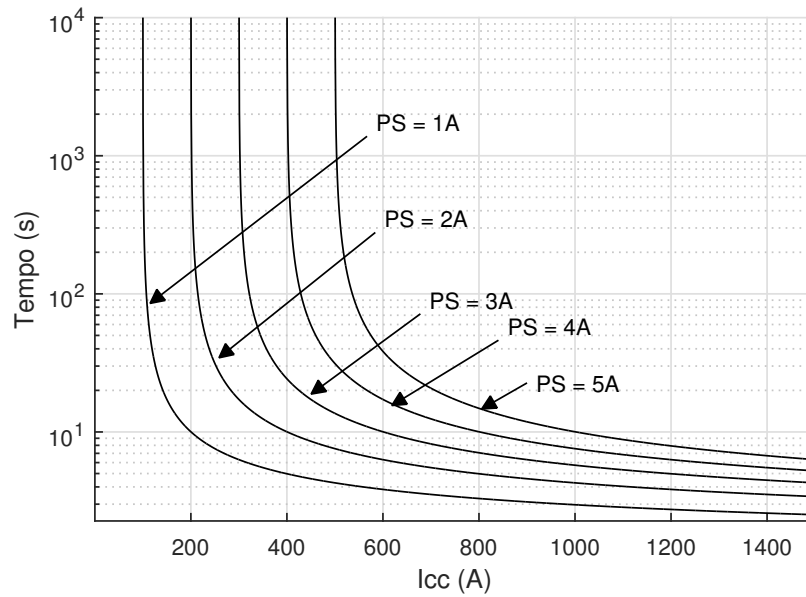


Fonte: O próprio autor.

As curvas dos RSs de tempo inverso são determinadas por equações padronizadas por normas internacionais, como a IEC, IAC, US e IEEE. Usualmente, o RS segue apenas um desses padrões. Entretanto, alguns relés suportam microprocessados suportam múltiplos padrões. Desta forma, é introduzida uma maior



**Figura 2.5:** Curvas do relé de sobrecorrente do tipo IEC (curva inversa) variando  $PS$ , com  $RTC = 100$  e  $Dial = 2$ .



Fonte: O próprio autor.

flexibilidade no esquema de proteção. Para cada tipo (padrão) de RS existe uma família de curvas características conhecidas como inversa, muito inversa, extremamente inversa etc. A seguir, são apresentadas as curvas características (tempo x corrente) dos quatro tipos de relés considerados neste trabalho: IEC, IAC, US e IEEE.

#### Relé de Sobrecorrente IEC

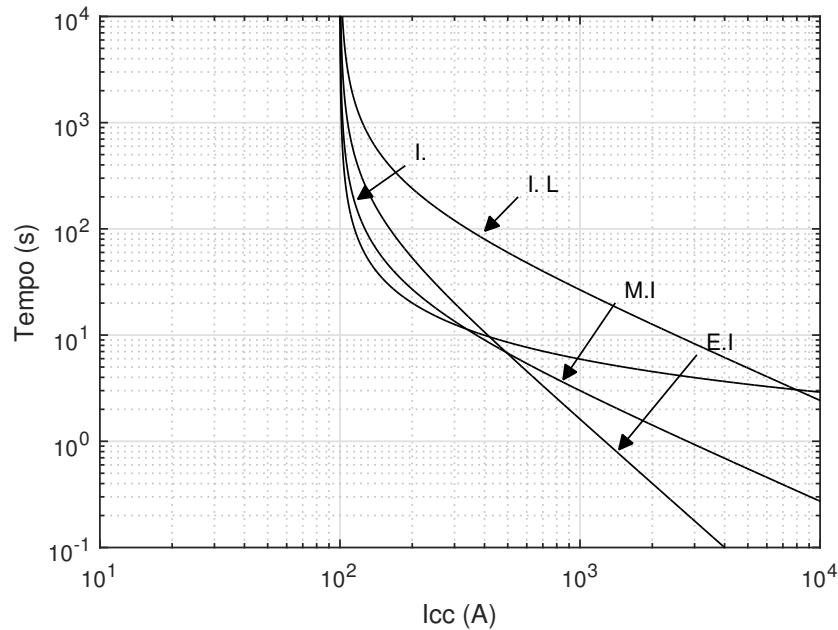
Os relés deste tipo seguem as normas IEC 255-4 e NBR 7099. A equação característica que rege a curva de tempo inverso é apresentada em (2.3). As constantes que regem os tipos das curvas são apresentadas na Tabela 2.1. As famílias de curvas para este tipo de RS são apresentadas na Figura 2.6.

$$T = \frac{Dial \cdot A}{\left(\frac{I_{cc}}{RTC \cdot PS}\right)^N - 1} \quad (2.3)$$

sendo que,  $T$  – tempo de atuação do relé;  $Dial$  – ajuste de tempo;  $I_{cc}$  – corrente de curto-circuito;  $PS$  – ajuste de *plug* da unidade de tempo inverso;  $RTC$  – relação de transformação do transformador de corrente;  $A$  e  $N$  – constantes relacionadas com o tipo da curva, de acordo com a Tabela 2.1.

**Tabela 2.1:** Constantes dos tipos de curvas (IEC).

Tipo de curva	$A$	$N$
Inversa (I)	0,14	0,02
Muito Inversa (M.I)	13,50	1,00
Extremamente Inversa (E.I)	80,00	2,00
Inversa Longa (I.L)	120,00	1,00

**Figura 2.6:** Família de curvas do RS do tipo IEC, com  $Dial = 2,0$ ,  $PS = 1A$ ,  $RTC = 100$ .

Fonte: O próprio autor.

Relé de Sobrecorrente IAC

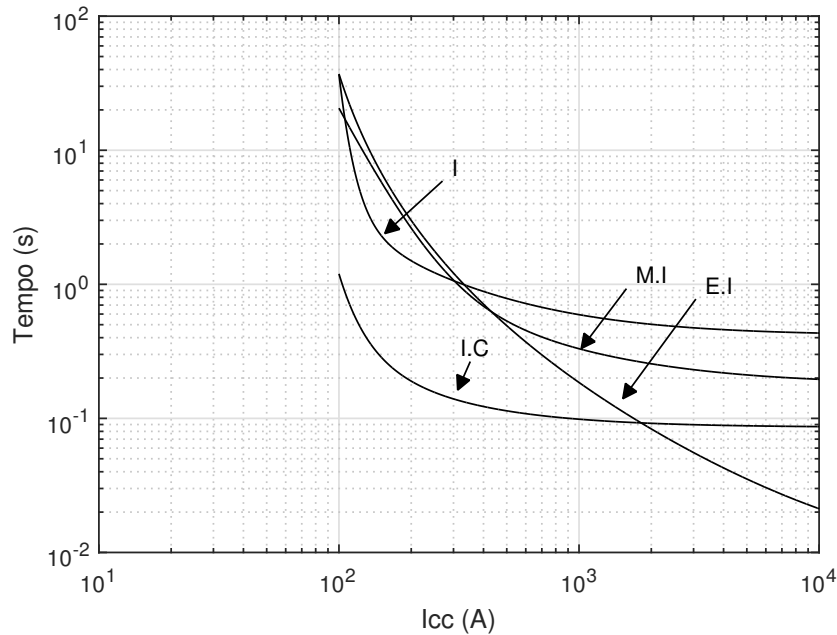
Usualmente, os relés fabricados pela *General Electric* seguem o padrão IAC. A equação característica que rege a curva de tempo inverso é apresentada em (2.4). As constantes que regem os tipos das curvas são apresentadas na Tabela 2.2. As famílias de curvas para este tipo de relé são apresentadas na Figura 2.7.

$$T = Dial \left\{ A + \frac{B}{\left(\frac{I_{cc}}{RTC \cdot PS}\right) - C} + \frac{D}{\left[\left(\frac{I_{cc}}{RTC \cdot PS}\right) - C\right]^2} + \frac{E}{\left[\left(\frac{I_{cc}}{RTC \cdot PS}\right) - C\right]^3} \right\} \quad (2.4)$$

sendo que,  $T$  – tempo de atuação do relé;  $Dial$  – ajuste de tempo;  $I_{cc}$  – corrente de curto-circuito;  $PS$  – ajuste de *plug* da unidade de tempo inverso;  $RTC$  – relação de transformação do transformador de corrente;  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  e  $E$  – constantes relacionadas com o tipo da curva, de acordo com a Tabela 2.2.

**Tabela 2.2:** Constantes dos tipos de curvas (IAC).

Tipo de curva	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>
Extremamente Inversa (E.I)	0,004	0,638	0,620	1,787	0,246
Muito Inversa (M.I)	0,090	0,796	0,100	-1,289	7,959
Inversa (I)	0,208	0,863	0,800	-0,418	0,195
Inversa Curta (I.C)	0,043	0,061	0,620	-0,001	0,022

**Figura 2.7:** Família de curvas do RS do tipo IAC, com  $Dial = 2,0$ ,  $PS = 1A$ ,  $RTC = 100$ .

Fonte: O próprio autor.

### Relé de Sobrecorrente US

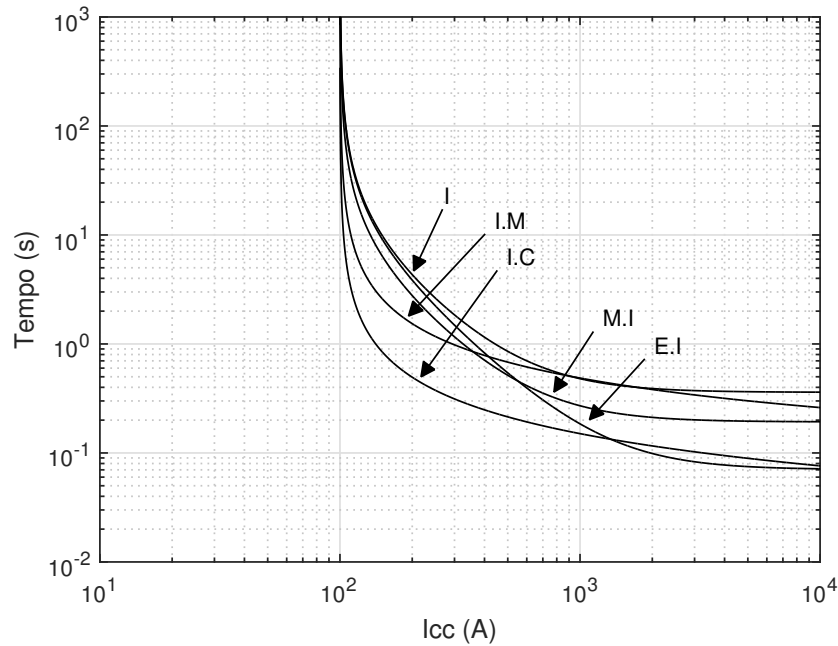
Geralmente, os relés fabricados pela *SEL* seguem o padrão US. A equação característica que rege a curva de tempo inverso é apresentada em (2.5). As constantes que regem os tipos das curvas são apresentadas na Tabela 2.3. As famílias de curvas para este tipo de RS são apresentadas na Figura 2.8.

$$T = Dial \left[ A + \frac{B}{\left( \frac{I_{cc}}{RTC \cdot PS} \right)^N - 1} \right] \quad (2.5)$$

sendo que,  $T$  – tempo de atuação do relé;  $Dial$  – ajuste de tempo;  $I_{cc}$  – corrente de curto-circuito;  $PS$  – ajuste de *plug* da unidade de tempo inverso;  $RTC$  – relação de transformação do transformador de corrente;  $A$ ,  $B$  e  $N$  – constantes relacionadas com o tipo da curva, de acordo com a Tabela 2.3.

**Tabela 2.3:** Constantes dos tipos de curvas (US).

Tipo de curva	$A$	$B$	$N$
Inversa Moderada (I.M)	0,023	0,010	0,020
Muito Inversa (M.I)	0,097	3,880	2,000
Inversa Curta (I.C)	0,003	0,003	0,020
Inversa (I)	0,180	5,950	2,000
Extremamente Inversa (E.I)	0,035	5,670	2,000

**Figura 2.8:** Família de curvas do RS do tipo US, com  $Dial = 2,0$ ,  $PS = 1A$ ,  $RTC = 100$ .

Fonte: O próprio autor.

### Relé de Sobrecorrente IEEE

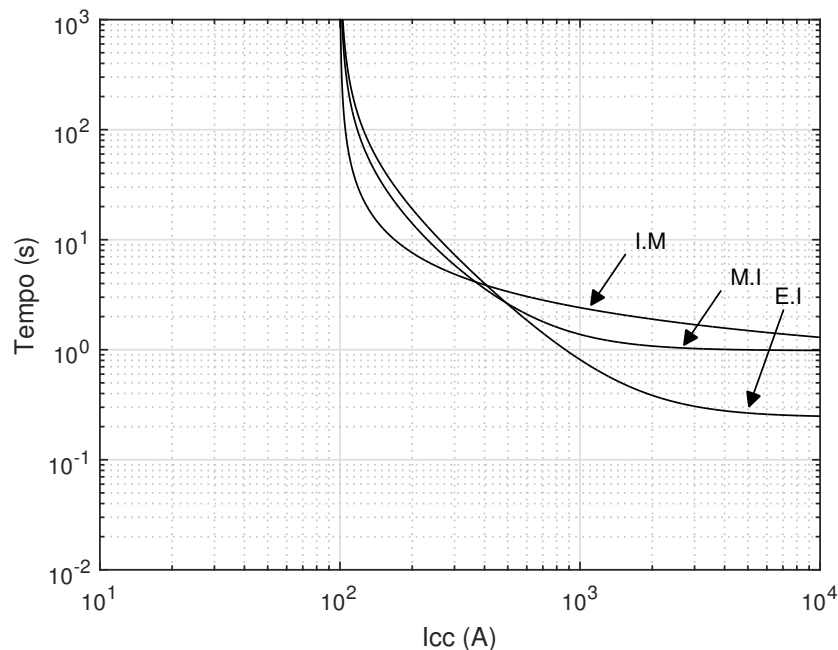
Os relés do tipo IEEE seguem a norma IEEE Std C37.112-1996. A equação característica que rege a curva de tempo inverso é apresentada em (2.6). As constantes que regem os tipos das curvas são apresentadas na Tabela 2.4. As famílias de curvas para este tipo de RS são mostradas na Figura 2.9.

$$T = Dial \left[ \frac{A}{\left( \frac{I_{cc}}{RTC \cdot PS} \right)^P - 1} + B \right] \quad (2.6)$$

sendo que,  $T$  – tempo de atuação do relé;  $Dial$  – ajuste de tempo;  $I_{cc}$  – corrente de curto-circuito;  $PS$  – ajuste de *plug* da unidade de tempo inverso;  $RTC$  – relação de transformação do transformador de corrente;  $A$ ,  $B$  e  $P$  – constantes relacionadas com o tipo da curva, de acordo com a Tabela 2.4.

**Tabela 2.4:** Constantes dos tipos de curvas (IEEE).

Tipo de curva	$A$	$B$	$P$
Extremamente Inversa (E.I)	28,20	0,122	2,00
Muito Inversa (M.I)	19,61	0,491	2,00
Inversa Moderada (I.M)	0,05	0,114	0,02

**Figura 2.9:** Curvas do relé de sobrecorrente do tipo IEEE, com  $Dial = 2,0$ ,  $PS = 1A$ ,  $RTC = 100$ .

Fonte: O próprio autor.

### 2.2.3 Relés de Sobrecorrente Direcionais

O RS é inerentemente não direcional, ou seja, as medições de corrente fornecidas pelos TCs não fornecem indicação referente às direções dos fluxos das correntes de falta. Uma de suas aplicações é em sistemas radiais, cujas direções dos fluxos de corrente são sempre conhecidas. Entretanto, quando o sistema não é radial, é fundamental que os relés atuem em uma sequência de operação específica apenas para faltas em um determinado sentido. Em sistemas malhados ou em anel, é praticamente impossível obter a coordenação de forma seletiva utilizando apenas RSs não direcionais. (HOROWITZ; PHADKE, 2008). Para obter a seletividade nesses casos, são utilizados os relés de sobrecorrentes direcionais (RSDs), identificados pelo número ANSI 67.

A principal característica da proteção direcional, é a sua capacidade em distinguir o sentido dos fluxos das correntes de falta. Os RSDs possuem duas grandezas de entrada: atuação e polarização. De forma que, o relé decide se vai atuar após comparar os fasores da grandeza de atuação em relação à de polarização (AL-

MEIDA, 2000). A grandeza de atuação deve variar de acordo com a localização da falta, sendo assim é utilizado a corrente no circuito a proteger. A grandeza de polarização deve ser independente da localização da falta. Os tipos de polarização mais utilizados são por tensão ou corrente.

A polarização por tensão é realizada avaliando as tensões, por meio de transformadores de potencial (TPs), no local onde o relé encontra-se instalado. Este tipo de polarização é a mais utilizada para relés de fase (HOROWITZ; PHADKE, 2008). A polarização por corrente é realizada avaliando uma corrente de referência do sistema protegido por meio do TC. Esse tipo de polarização é usualmente utilizada na proteção de neutro e terra em alimentadores com múltiplas fontes de correntes de sequência zero (ALMEIDA, 2000).

### 2.2.4 Critérios de Ajustes da Unidade Temporizada

O  $PS$  deve ser grande o suficiente para que o relé não atue quando o sistema se encontra em condições normais, considerando inclusive um eventual crescimento de carga. Adicionalmente, este valor deve ser inferior à corrente de curto-circuito bifásica mínima no trecho protegido, ponderado pela  $RTC$ . Desta forma, o  $PS$  do relé de fase deve satisfazer às condições apresentadas em (2.7) e (2.8). Já o  $PS$  do relé de neutro ( $PS^{neutro}$ ), deve satisfazer às condições apresentadas em (2.9) (ALMEIDA, 2000).

$$\frac{FC \cdot I_{carga}^{max}}{RTC} \leq PS \leq \frac{I_{CC_{2\theta}}^{min}}{RTC} \quad (2.7)$$

$$FC = \left(1 + \frac{t_{cres}}{100}\right)^{n_{anos}} \quad (2.8)$$

$$\frac{K_{desequilibrio} \cdot I_{carga}^{max} \cdot FC}{RTC} \leq PS^{neutro} \leq \frac{I_{CC_{1\theta}}^{min}}{RTC} \quad (2.9)$$

sendo que,  $I_{CC_{2\theta}}^{min}$  – corrente de curto-circuito bifásica mínima no trecho protegido;  $I_{carga}^{max}$  – corrente de carga máxima considerada;  $FC$  – fator de crescimento de carga;  $t_{cres}$  – taxa de crescimento da carga anual do sistema (%);  $n_{anos}$  – quantidade de anos do planejamento;  $RTC$  – relação de transformação do TC;  $K_{desequilibrio}$  – constante relacionada ao desequilíbrio do sistema, podendo variar de 0,1 a 0,3;  $I_{CC_{1\theta}}^{min}$  – corrente de curto-circuito monofásica mínima no trecho protegido.

### 2.2.5 Critérios de Ajustes da Unidade de Tempo Definido

O  $PS_{DT}$  não pode permitir que o relé atue para faltas fora da sua zona de proteção. Adicionalmente, não deve atuar na energização de transformadores. Desta forma, a  $PS_{DT}$  do relé de fase deve satisfazer às condições apresentadas em (2.10) e (2.11). A  $PS_{DT}$  do relé de neutro ( $PS_{DT}^{neutro}$ ) deve satisfazer às condições apresentadas em (2.12) e (2.13) (ALMEIDA, 2000). A constante 8 apresentada em (2.10) e (2.12) refere-se à estimativa da corrente *inrush* pelo sistema elétrico protegido.

$$PS_{DT} \geq \frac{8 \cdot I_{carga}^{max}}{RTC} \quad (2.10)$$

$$PS_{DT} \geq \frac{I_{CC_{3\theta}}^{max}}{RTC} \quad (2.11)$$

$$PS_{DT}^{neutro} \geq \frac{8 \cdot K_{desequilíbrio} \cdot I_{carga}^{max}}{RTC} \quad (2.12)$$

$$PS_{DT}^{neutro} \geq \frac{I_{CC_{1\theta}}^{max}}{RTC} \quad (2.13)$$

sendo que,  $PS_{DT}$  – ajuste de *plug* da unidade de tempo definido;  $PS_{DT}^{neutro}$  – ajuste de *plug* da unidade de tempo definido de neutro;  $I_{CC_{3\theta}}^{max}$  – corrente de curto-circuito trifásica máxima do trecho protegido;  $I_{carga}^{max}$  – corrente de carga máxima considerada;  $K_{desequilíbrio}$  – constante relacionada ao desequilíbrio do sistema, podendo variar de 0,1 a 0,3;  $RTC$  – relação de transformação do TC;  $I_{CC_{1\theta}}^{max}$  – corrente de curto-circuito monofásica máxima do trecho protegido.

## 2.3 Critérios de Coordenação e Seletividade

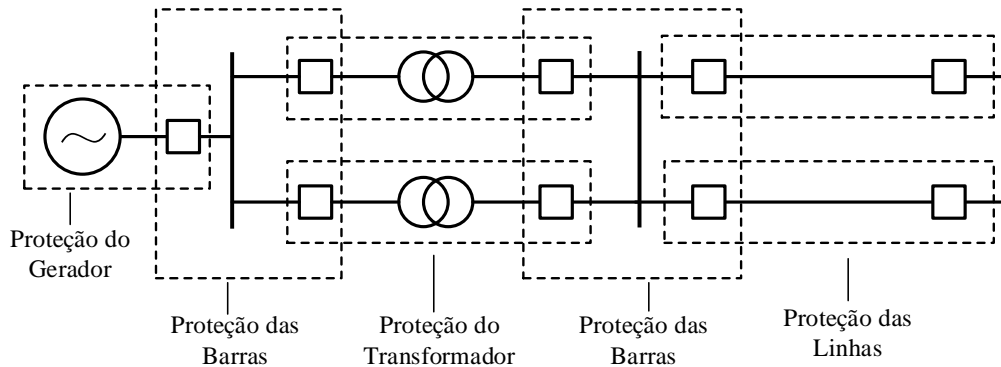
A coordenação e seletividade do sistema de proteção são fundamentais para a melhoria da qualidade do fornecimento de energia, evitando interrupções desnecessárias. O estudo da coordenação e seletividade consiste em especificar os equipamentos e suas parametrizações necessários para que, ante uma condição de falta, eles operem corretamente, isolando a falta e interrompendo o fornecimento de energia ao menor número de usuários possível.

### 2.3.1 Zonas de Proteção

As áreas delimitadas por traços pontilhados na Figura 2.10 demonstram as zonas de proteção de cada dispositivo de proteção. Essas zonas também são conhecidas como zonas de atuação. Elas são responsáveis por delimitar a atuação dos dis-

positivos de proteção primária, sendo que estes devem atuar para faltas dentro da sua respectiva zona. As zonas de proteção são propositalmente sobrepostas, de modo a evitar possíveis pontos cegos na proteção do sistema elétrico (BLACKBURN; DOMIN, 2006).

**Figura 2.10:** Zonas de proteção em um sistema elétrico.



Fonte: O próprio autor.

### 2.3.2 Dispositivos de Proteção Primária e Retaguarda

Os dispositivos de proteção primária são os principais responsáveis por eliminar a falta, devendo atuar para anormalidades dentro da sua zona de proteção. Na casualidade de algum problema na atuação desses dispositivos, as proteções de retaguarda (localizadas nas zonas de proteção adjacentes) devem atuar para eliminar o defeito. Desta forma, uma maior segurança é adicionada ao sistema, garantindo que a falta seja isolada (ANDERSON, 1999). Os dispositivos de proteção primária e de retaguarda também são conhecidos como dispositivos protetores e protegidos, respectivamente (ALMEIDA, 2000).

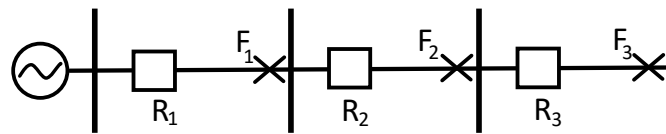
Existem dois tipos de proteção de retaguarda: local e remota. A local é realizada onde a proteção primária encontra-se instalada, ou seja, há uma redundância local com a proteção primária. Sua principal vantagem é a redução do número de usuários afetados pelas interrupções. Entretanto, o custo desse tipo de proteção é mais elevado, devido ao aumento no número de relés. A proteção remota consiste em coordenar os relés situados em localizações distintas e totalmente independentes entre si. Este tipo de proteção de retaguarda é mais barato, porém possui a desvantagem de desconectar um maior número de usuários (CORRÊA, 2012).

Na Figura 2.11, é apresentado um sistema elétrico radial, sendo que  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$  são os RSts não direcionais 1, 2 e 3, respectivamente.  $F_1$ ,  $F_2$  e  $F_3$  correspondem a três faltas no sistema. O relé mais próximo de  $F_3$  é  $R_3$ , sendo que



este atua como proteção primária. A proteção de retaguarda é realizada por  $R_2$ . Em um sistema radial, as correntes de falta que sensibilizam os dispositivos de proteção primária e retaguarda são as mesmas. Para a uma falta em  $F_2$ , a proteção primária é realizada por  $R_2$  e a de retaguarda, por  $R_1$ . Por fim, para a falta em  $F_1$ , a proteção primária é realizada por  $R_1$ . Neste sistema,  $R_3$  apenas atua como proteção primária, pois está no final do ramal. Para a falta em  $F_1$ , não há proteção de retaguarda, visto que  $R_1$  é o único dispositivo entre a fonte e falta.

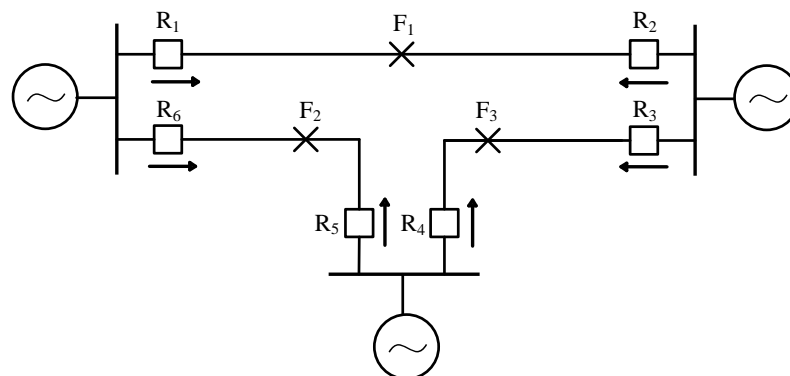
**Figura 2.11:** Sistema radial genérico.



Fonte: O próprio autor.

Um sistema elétrico malhado, com múltiplos geradores, é apresentado na Figura 2.12. As setas indicam sentido das correntes de falta em que os RSDs são sensibilizados. Em sistemas malhados, as correntes que sensibilizam os dispositivos de proteção primária e retaguarda não são necessariamente as mesmas. Neste sistema,  $R_1$  a  $R_6$  correspondem aos RSDs 1 a 6.  $F_1$ ,  $F_2$  e  $F_3$  correspondem a três faltas no sistema. Para uma falta em  $F_1$ ,  $R_1$  e  $R_2$  atuam como proteção primária. A proteção de retaguarda é realizada por  $R_5$  e  $R_4$ . Para um falta em  $F_2$ , os relés  $R_6$  e  $R_5$  atuam como proteção primária.  $R_2$  e  $R_3$  atuam como proteção de retaguarda. Finalmente, para uma falta em  $F_3$ ,  $R_3$  e  $R_4$  atuam como proteção primária.  $R_1$  e  $R_6$  atuam como proteção de retaguarda.

**Figura 2.12:** Sistema malhado genérico.



Fonte: O próprio autor.

### 2.3.3 Coordenação Relé – Relé

A seletividade fica assegurada quando a diferença entre os tempos de atuação dos relés de proteção de retaguarda e primária, para uma determinada falta, são superiores a  $\Delta T_{rele-rele}$ . Esta diferença está relacionada com o tempo de atuação do disjuntor, a tolerância do fabricante e o tempo de segurança de projeto (FILHO; MAMEDE, 2011). Dessa forma, é possível obter a seletividade cronométrica, onde são introduzidos retardos temporais propositais entre os tempos de atuação dos relés de proteção primária-retaguarda. Tipicamente, para RSs eletromecânicos e microprocessados esse valor varia de 0,3 a 0,4 segundos e 0,1 a 0,2 segundos, respectivamente (MANSOUR; MEKHAMER; EL-KHARBAWE, 2007).

Um exemplo da coordenação cronométrica entre dois relés em um sistema elétrico radial é apresentado no Apêndice B.

A seletividade entre as unidades de tempo definido pode ser realizada de forma amperimétrica (discriminação por níveis de corrente) ou cronométrica (discriminação por tempo de atuação). Entretanto, a seletividade cronométrica só pode ser realizada caso haja a possibilidade de ajustar os tempos de atuação das unidades de tempo definido (FILHO; MAMEDE, 2011).

## 2.4 Síntese do Capítulo

Neste capítulo, foi introduzido os principais dispositivos aplicados à proteção contra sobrecorrente em sistemas elétricos, sendo apresentados os conceitos fundamentais sobre os disjuntores de média tensão, relés de sobrecorrente (tempo definido e inverso), relés direcionais e transformadores de corrente. Adicionalmente, foi apresentado os conceitos sobre os critérios de coordenação entre os dispositivos de proteção. Os conceitos apresentados neste capítulo são fundamentais para a compreensão do modelo matemático da coordenação que é apresentado no seguinte capítulo.

# 3 Formulação do Problema da Coordenação de Relés de Sobrecorrente

Neste capítulo, o problema da coordenação de relés de sobrecorrente (RSs) de tempo inverso é formulado como um problema de otimização matemática, contendo uma função objetivo (FO), responsável por minimizar os tempos de atuação dos relés, e um conjunto de restrições.

## 3.1 Formulação Matemática

O problema da coordenação de RSs de tempo inverso é formulado como um problema de otimização não linear, não convexo e com elevado número de restrições (NOGHABI; SADEH; MASHHADI, 2009; RAJPUT; PANDYA; JOSHI, 2015). O RS possui três ajustes básicos: ajuste de *plug* ( $PS$ ), ajuste de tempo ( $Dial$ ) e tipo de curva. Caso algum desses parâmetros seja tratado como variável discreta, o problema passa a ser inteiro-misto. Assim, o problema da coordenação é de alta complexidade matemática, cujas soluções candidatas crescem exponencialmente com o número de dispositivos a serem coordenados.

O tempo de atuação de  $R_i$ , para cada falha  $k$  dentro da zona de proteção primária de  $R_j$  é apresentado em (3.1). Este tempo depende do  $Dial$  de  $R_i$  ( $Dial_i$ ) e  $K_{i,j}^k$ , sendo que,  $K_{i,j}^k$  é o termo que acompanha o  $Dial_i$  para fornecer o tempo de atuação  $T_{i,j}^k$ .  $K_{i,j}^k$  se relaciona com os valores  $PS$  de  $R_i$  ( $PS_i$ ), com a RTC de  $R_i$  ( $RTC_i$ ), com o  $k$ -ésimo nível de curto-circuito considerado dentro da zona de proteção primária de  $R_j$  visto por  $R_i$  e com o tipo de curva de  $R_i$ .  $K_{i,j}^k$  varia com o tipo de  $R_i$ , sendo que as equações (3.2), (3.3), (3.4) e (3.5) são referentes aos tipos IEC, IAC, US e IEEE, respectivamente.

$$T_{i,j}^k = Dial_i \cdot K_{i,j}^k \quad (3.1)$$

$$K_{i,j}^k = \frac{A_i}{\left(\frac{Icc_{i,j}^k}{PS_i \cdot RTC_i}\right)^{N_i} - 1} \quad (3.2)$$

$$K_{i,j}^k = A_i + \frac{B_i}{\frac{Icc_{i,j}^k}{PS_i \cdot RTC_i} - C_i} + \frac{D_i}{\left(\frac{Icc_{i,j}^k}{PS_i \cdot RTC_i} - C_i\right)^2} + \frac{E_i}{\left(\frac{Icc_{i,j}^k}{PS_i \cdot RTC_i} - C_i\right)^3} \quad (3.3)$$

$$K_{i,j}^k = A_i + \frac{B_i}{\left(\frac{Icc_{i,j}^k}{PS_i \cdot RTC_i}\right)^{P_i} - 1} \quad (3.4)$$

$$K_{i,j}^k = \frac{A_i}{\left(\frac{Icc_{i,j}^k}{PS_i \cdot RTC_i}\right)^{P_i} - 1} + B_i \quad (3.5)$$

sendo que,  $k$  – índice relacionado ao nível de falha analisado;  $m$  – número de relés;  $p$  – número de falhas consideradas dentro da zona de proteção primária;  $Dial_i$  – ajuste de tempo de  $R_i$ ;  $Icc_{i,j}^k$  – corrente de falha vista por  $R_i$  para uma falha dentro da zona de proteção primária de  $R_j$  para o nível  $k$ ;  $T_{i,i}^k$  – tempo de atuação de  $R_i$  para  $Icc_{i,i}^k$ ;  $T_{i,j}^k$  – tempo de atuação de  $R_i$  para  $Icc_{i,j}^k$ ;  $PS_i$  – ajuste de *plug* da unidade temporizada de  $R_i$ ;  $RTC_i$  – relação de transformação do transformador de corrente de  $R_i$ ;  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$ ,  $D_i$ ,  $E_i$ ,  $N_i$  e  $P_i$  – constantes relacionadas ao tipo de curva de  $R_i$ ;

### 3.1.1 Função Objetivo

Ante uma situação de falha, uma das consequências ao sistema elétrico é a súbita elevação dos níveis de corrente a valores perigosos. Quanto mais rápida a falha for isolada, menores são os esforços térmicos e mecânicos no sistema. Na coordenação ótima de RSts, procura-se obter os ajustes necessários para que os tempos de atuação das proteções primárias sejam mínimos (AMRAEE, 2012). A FO consiste em minimizar a somatória de todos os tempos de atuação dos relés, quando estes atuam como proteção primária, ou seja, quando  $j = i$ , conforme apresentado em (3.6). Essa formulação está relacionada com os  $p$  níveis de falha considerados para a coordenação.

$$Min. \sum_{k=1}^p \sum_{i=1}^m T_{i,i}^k \quad (3.6)$$

sendo que,  $k$  – índice relacionado ao nível de falha analisado;  $m$  – número de relés;  $p$  – número de falhas consideradas dentro da zona de proteção primária;  $T_{i,i}^k$  – tempo de atuação de  $R_i$  para uma falha  $k$ , quando este atua como proteção primária.

### 3.1.2 Restrições

A FO apresentada em (3.6) está sujeita a três tipos de restrições: critério de seletividade, limites nos ajustes e limites nos tempos de atuação dos relés.

#### 1) Critério de Seletividade

A restrição apresentada em (3.7) refere-se a diferença mínima necessária entre os tempos de atuação dos relés de proteção retaguarda e primária, para que estejam coordenados de forma seletiva. Essa diferença deve ser superior a  $\Delta T_{rele-rele}$ . Um atraso proposital entre os tempos de atuação dos relés é adicionado para que a proteção primária possua tempo suficiente para eliminar a falha, sendo que a proteção de retaguarda só deve atuar caso a primária falhe. Para cada par de relés de proteção primária-retaguarda existem  $p$  restrições de seletividade, uma para cada nível de falha considerado.

$$T_{protegido(i),i}^k - T_{i,i}^k \geq \Delta T_{rele-rele} \quad (3.7)$$

sendo que,  $T_{protegido(i),i}^k$  – tempo de atuação da proteção de retaguarda de  $R_i$  para o  $k$ -ésimo nível de falha considerado dentro da zona de proteção de  $R_i$ ;  $T_{i,i}^k$  – tempo de atuação de  $R_i$  para  $I_{cc_{i,i}}^k$ ;  $\Delta T_{rele-rele}$  – tempo de coordenação entre relés.

#### 2) Limites nos Ajustes dos Relés

Os relés devem permitir a operação normal do sistema. O valor de  $PS$  deve ser superior à máxima corrente de carga – considerando um eventual crescimento de carga – esperada pelo relé, ponderado pela RTC. Pode-se considerar uma sobrecarga leve no sistema, ao invés do crescimento de carga (BEDEKAR; Bhide, 2011a). Para o cálculo da corrente máxima de carga, pode ser considerada diferentes contingências n-1, onde cada elemento do sistema é removido um por vez, sendo executado o fluxo de potência a cada configuração (SHIH; ENRÍQUEZ; TORRES, 2014). O  $PS$  também deve ser menor do que a corrente de curto-circuito mínima dentro da zona de proteção do relé, ponderado pela RTC. Caso contrário, o relé não é sensibilizado pela falha. Essas condições são impostas em (3.8). O problema possui  $m$  restrições deste tipo, uma para cada relé.

$$\frac{FC \cdot I_{carga,i}^{max}}{RTC_i} \leq PS_i \leq \frac{I_{cc_i}^{min}}{RTC_i} \quad (3.8)$$

sendo que,  $FC$  – fator de crescimento de carga;  $I_{carga,i}^{max}$  – corrente de carga máxima considerada através de  $R_i$ ;  $PS_i$  – ajuste de  $plug$  da unidade temporizada de  $R_i$ ;

$RTC_i$  – relação do transformador de corrente de  $R_i$ ;  $Icc_i^{min}$  – corrente de curto-circuito mínima no trecho protegido por  $R_i$ .

Os valores de  $PS$  também são limitados em relação aos valores disponíveis no relé, como é apresentado em (3.9). O problema possui  $m$  restrições deste tipo.

$$PS_i^{min} \leq PS_i \leq PS_i^{max} \quad (3.9)$$

sendo que,  $PS_i^{min}$  – ajuste mínimo de  $PS_i$ ;  $PS_i$  – ajuste de *plug* da unidade temporizada de  $R_i$ ;  $PS_i^{max}$  – ajuste máximo de  $PS_i$ .

Os valores de  $Dial$  também são limitados pelos limites máximos e mínimos disponíveis no relé, como é apresentado em (3.10). O problema possui  $m$  restrições deste tipo.

$$Dial_i^{min} \leq Dial_i \leq Dial_i^{max} \quad (3.10)$$

sendo que,  $Dial_i^{min}$  – ajuste mínimo de  $Dial_i$ ;  $Dial_i$  – ajuste de tempo de  $R_i$ ;  $Dial_i^{max}$  – ajuste máximo de  $Dial_i$ .

### 3) Limites nos Tempos de Atuação dos Relés

Embora deseja-se que os relés atuem o mais rápido possível, eles necessitam de um tempo mínimo para entrar em operação. Entretanto, os relés não podem demorar muito para atuar para não causar danos irreversíveis aos equipamentos (BEDEKAR; Bhide, 2011a). Os tempos de atuação dos relés são limitados pela restrição apresentada em (3.11). Ao analisar as restrições (3.9) e (3.10), pode parecer que a restrição (3.11) seja redundante. Entretanto, o tempo de atuação do relé também depende do nível da corrente de falha. Mesmo que os ajustes de *Dials* e *PSs* estejam dentro dos limites, não implica que os tempos de atuação também estejam (ALAM; DAS; PANT, 2015). Existem  $m \cdot p$  restrições desse tipo no problema da coordenação.

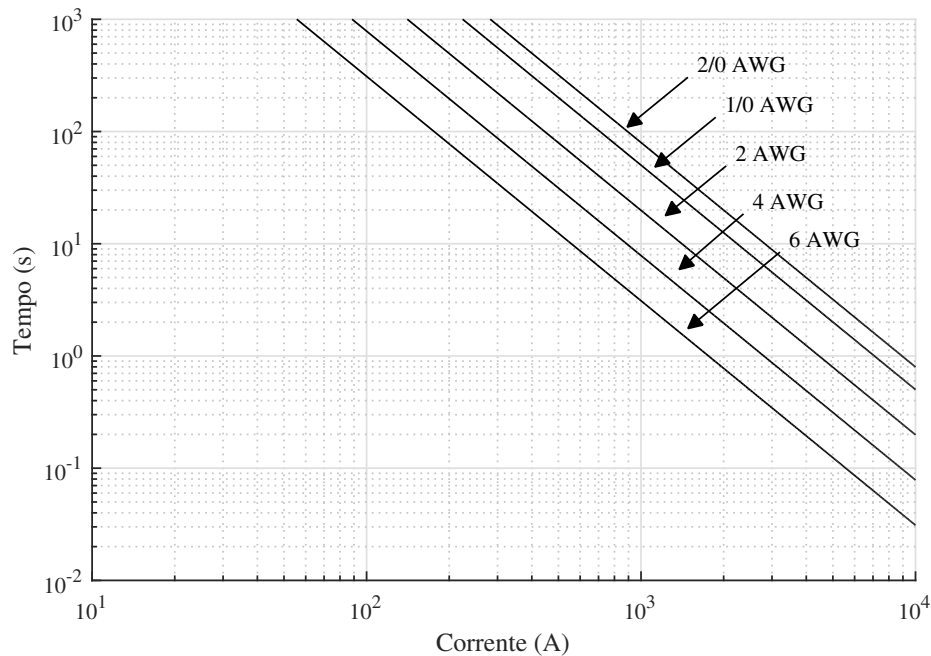
$$T_i^{min} \leq T_i^{pri} \leq T_i^{max} \quad (3.11)$$

sendo que,  $T_i^{min}$  – tempo mínimo de atuação de  $R_i$ ;  $T_i^{pri}$  – tempo de atuação de  $R_i$ , quando este atua como proteção primária;  $T_i^{max}$  – tempo máximo de atuação de  $R_i$ .

Muitas vezes, a restrição de  $T_i^{max}$  está relacionada com a curva de recozimento dos condutores. A elevação da temperatura causada pelas correntes de falha pode causar danos irreversíveis aos condutores. Normalmente, é adotada

a temperatura máxima de 340°C, considerando uma temperatura ambiente de 40°C (ASSOCIATION, 1989). A Figura 3.1 apresenta as curvas de recozimento para condutores nus de alumínio de bitolas 2/0, 1/0, 2, 4 e 6 AWG.

**Figura 3.1:** Curva de recozimento dos condutores de alumínio.



Fonte: O próprio autor.

Os trabalhos de Noghabi, Sadeh e Mashhadi (2009), Zapata e Mejía (2003), Bedekar, Bhide e Kale (2009) não consideram a restrição dos tempos de atuação dos relés. Entretanto, nos trabalhos dos autores Thangaraj, Pant e Deep (2010), Amraee (2012), Alam, Das e Pant (2015), Albasri, Alroomi e Talaq (2015), Rajput, Pandya e Joshi (2015) consideram essa restrição. Neste trabalho, são consideradas as restrições nos tempos de atuação dos relés.

## 3.2 Síntese do Capítulo

Neste capítulo, foi apresentado o problema da coordenação de relés de sobrecorrente de tempo inverso como um problema de otimização matemática, sendo definido sua função objetivo (minimizar os tempos de atuação das proteções primárias) e suas restrições. Foram apresentadas as variáveis do problema de otimização: *Dials*, *PSs* e tipos de curvas. A apresentação do modelo matemático é fundamental para compreender as metodologias baseadas em otimização matemática que são apresentadas no capítulo seguinte.

## 4 Técnicas de Otimização Aplicadas à Coordenação de Relés de Sobrecorrente

Neste capítulo, são apresentadas as metodologias ou técnicas de otimização matemática utilizadas para solucionar o problema da coordenação de relés de sobrecorrente (RSs) de tempo inverso, com ou sem o elemento direcional. Dentro destas, encontram-se a Programação Linear (PL), Programação Linear Inteira Mista (PLIM), Algoritmo de Busca por Enumeração, Algoritmo Genético de Chu-Beasley (AGCB) - PL (AGCB-PL), AGCB - Programação Linear Inteira (AGCB-PLI) e Busca Local - Programação Linear (BL-PL). As técnicas de otimização procuram satisfazer o critério de velocidade, sem abrir mão dos critérios de sensibilidade, confiabilidade e seletividade.

Primeiramente, o problema da coordenação é solucionado utilizando técnicas de PL. É importante apresentá-la pois a PL foi a primeira utilizada para solucionar o problema da coordenação de RSs. Ademais, esta técnica é base para as outras implementadas neste trabalho, tais como: PLIM, AGCB-PL e BL-PL.

Para sistemas de distribuição radiais, nos quais são utilizados os RSs não direcionais, são implementadas as metodologias PLIM, ABE e AGCB-ABE. As duas primeiras tratam o problema de forma linear, onde apenas os *Dials* são variáveis de decisão. O AGCB-ABE trata o problema de forma não linear, sendo considerados os *PSs*, *Dials*, tipos de curvas e tipos de relés como variáveis de decisão. Uma das características dessas três metodologias é que elas possuem a capacidade de lidar com os ajustes discretos de *Dial*.

Em sistemas de transmissão malhados, a coordenação dos relés de sobrecorrente direcionais (RSDs) é realizada por meio das metodologias AGCB-PL, AGCB-PLI e BL-PL. As três metodologias lidam com o problema na forma não linear. O AGCB-PL e AGCB-PLI consideram os *PSs*, *Dials*, tipos de curvas e tipos de relés como variáveis de decisão. A BL-PL trata apenas os *PSs* e os *Dials* como variáveis de decisão. Dentre as três metodologias propostas, apenas



o AGCB-PLI lida com *Dials* discretos.

## 4.1 Programação Linear

Urdaneta, Nadira e Perez (1988), foram os pioneiros a formular o problema da coordenação de RSs como um problema de otimização matemática. Os autores demonstraram como linearizar o problema e o solucionaram utilizando PL. Usualmente, na formulação linear do problema da coordenação os *Dials* são as variáveis de decisão. Quando este problema é solucionado utilizando técnicas de PL, os *Dials* são tratados como variáveis contínuas. Assim, a aplicação de técnicas de PL é restrita a relés cujos passos de *Dial* são pequenos o suficiente para que os *Dials* possam ser modelados como variáveis contínuas.

O problema da coordenação apresentado é não linear, visto que os tempos de atuação dos relés dependem dos *Dials*, *PSs* e dos tipos de curvas. Essas variáveis se relacionam de forma não linear. Assim, as restrições de seletividade e a FO são não lineares. Porém, caso os *PSs* e os tipos de curvas sejam prefixados, o problema passa a ser linear pois as variáveis  $K_{i,j}^k$  (3.1) tornam-se constantes. Na formulação linear, os valores de  $PS_i$  podem ser escolhidos de acordo com alguma regra empírica. Neste trabalho, os valores de  $PS_i$  são os menores valores de  $PS_i$  que satisfazem a restrição (3.8). Deste modo, os relés possuem a maior sensibilidade possível, sem comprometer a coordenação (CORRÊA, 2012).

A coordenação de relés utilizando PL foi solucionada analiticamente com os métodos Simplex (URDANETA; NADIRA; PEREZ, 1988), Simplex de duas fases (URDANETA et al., 1996), pontos interiores (ESTRADA; CARMONA; RUIZ, 2006) e dual Simplex (BEDEKAR; BHIDE; KALE, 2009). Neste trabalho, é utilizado o resolvidor *cplexlp* do CPLEX<sup>®</sup>, no ambiente MATLAB<sup>®</sup>, para solucionar o problema de PL. Este resolvidor soluciona o problema de PL por meio da técnica de pontos interiores (IBM, 2010). Para utilizar esse resolvidor, o problema da coordenação apresentado nas equações (3.7) a (3.11) deve ser formulado de acordo com (4.1) a (4.4).

$$\text{Min. } \mathbf{f}^T \cdot \mathbf{x} \quad (4.1)$$

Sujeito à

$$\mathbf{A}_{eq} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b}_{eq} \quad (4.2)$$

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} \leq \mathbf{b} \quad (4.3)$$

$$\mathbf{lb} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{ub} \quad (4.4)$$

sendo que,  $\mathbf{f}$  – vetor linha com os coeficientes da função objetivo;  $\mathbf{x}$  – vetor linha de incógnitas do problema;  $\mathbf{A}$  – matriz com os coeficientes que representam o lado esquerdo das restrições de desigualdade;  $\mathbf{b}$  – vetor coluna com os valores que representam o lado direito das restrições de desigualdade;  $\mathbf{A}_{eq}$  – matriz com os coeficientes que representam o lado esquerdo das restrições de igualdade;  $\mathbf{b}_{eq}$  – vetor coluna com os valores que representam o lado direito das restrições de igualdade;  $\mathbf{lb}$  e  $\mathbf{ub}$  – vetores linha com os valores mínimos e máximos das incógnitas do problema, respectivamente.

No problema linear da coordenação, o vetor  $\mathbf{x}$  corresponde ao  $Dial_i$  dos  $m$  relés do problema. Neste trabalho, as restrições de igualdade relacionadas com os tempos de atuação dos relés foram incorporadas nas restrições de seletividade e na FO. Para cada variável, há um elemento do vetor  $\mathbf{f}$  relacionado com  $\sum_{k=1}^p K_{i,i}^k$ , relacionado com os tempos de atuação das proteções para falhas dentro da zona de proteção primária de cada relé. Os elementos da matriz  $\mathbf{A}$  estão relacionados com os  $K_{i,j}^k$  de cada par de relés de proteção primária-retaguarda. O vetor  $\mathbf{b}$  está relacionado com os tempos mínimos de coordenação ( $\Delta T_{rele-rele}$ ). Os vetores  $\mathbf{lb}$  e  $\mathbf{ub}$  estão relacionados com os limites dos  $Dials$  mínimos e máximos, disponíveis nos relés.

## 4.2 Programação Linear Inteira Mista

Em alguns relés, os  $Dials$  não são pequenos o suficiente para que sejam tratados como contínuos. Nesta secção, é proposta uma metodologia capaz de tratar o problema da coordenação como discreto, solucionando-o utilizando uma técnica de Programação Linear Inteira Mista (PLIM). A técnica proposta possui aplicação exclusiva em sistemas radiais. O algoritmo consiste em dois passos: enumeração e processo iterativo. Sua ideia principal consiste em adicionar restrições de igualdade referentes aos valores discretos de  $Dial$ , durante o processo iterativo, em uma ordem estabelecida pela enumeração dos relés. A seguir, o passo da enumeração é detalhado.

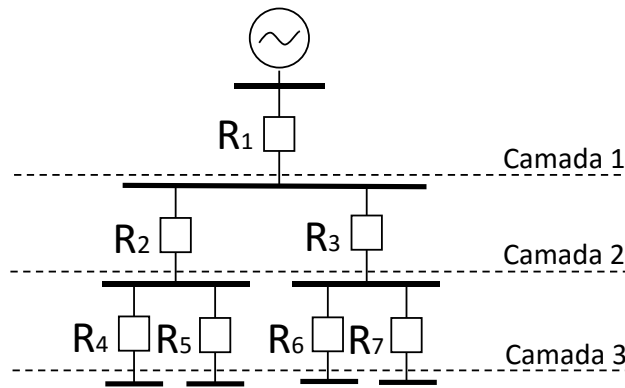
### 4.2.1 Enumeração

O objetivo deste passo consiste em estabelecer uma metodologia sistemática para analisar os relés de retaguarda antes dos primários, de forma que os relés mais afastados da subestação são analisados primeiro. Para isso, a metodologia de enumeração de ramos (SHIRMOHAMMADI et al., 1988) – utilizada para solucionar

o problema do fluxo de potência de varredura – é adaptada para o caso dos relés – para solucionar o problema da coordenação. A metodologia para enumeração de ramos também pode ser encontrada em Kagan, Oliveira e Robba (2010). A enumeração dos relés é importante para que os mesmos sejam analisados uma única vez durante o processo iterativo.

A enumeração dos relés da camada superior se inicia quando os relés da camada anterior forem enumerados. A enumeração começa em  $R_m$  (relé mais afastado da subestação) e termina em  $R_1$  (relé mais próximo da subestação). Na Figura 4.1, é apresentado um exemplo de um sistema com sete relés enumerados. Caso fossem analisados os relés  $R_7, R_6, \dots, R_1$ , nesta ordem, os relés de retaguarda seriam analisados antes dos primários.

**Figura 4.1:** Sistema com relés enumerados em camadas.



Fonte: O próprio autor.

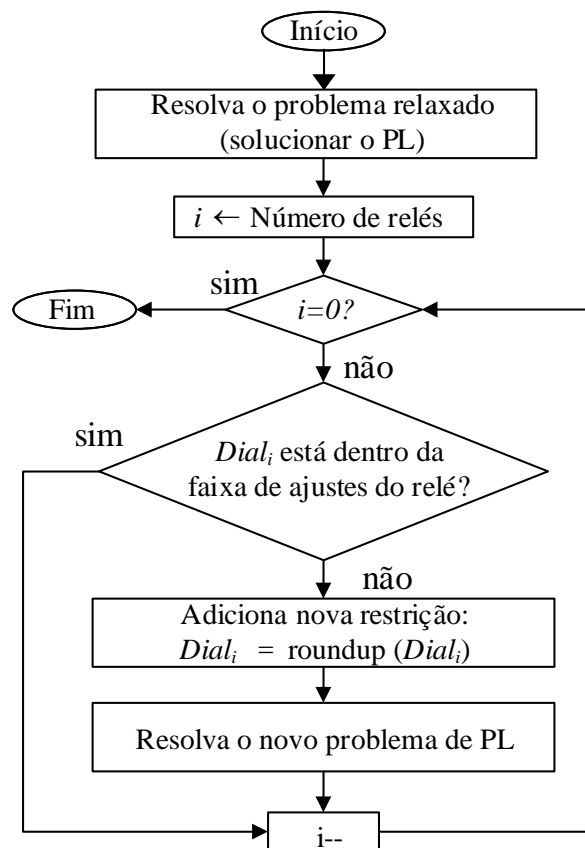
### 4.2.2 Processo Iterativo

O processo iterativo é apresentado no fluxograma da Figura 4.2. Primeiramente, deve-se solucionar o problema relaxado utilizando PL. Este é considerado relaxado pois não são incluídas as restrições dos passos discretos de *Dial*. Caso a solução do problema seja factível, a PL fornece os valores ótimos de *Dial* (contínuos). Como o sistema encontra-se enumerado, o contador  $i$  é iniciado com o número de relés ( $m$ ). Assim, os relés de proteção primária são analisados antes dos de retaguarda. Os passos para acrescentar as restrições de igualdade referentes aos ajustes discretos de *Dial* ao problema são:

- Passo 1: para  $R_i$ , verifique se  $Dial_i$  encontra-se dentro da faixa de valores permitidos pelo relé. Caso  $Dial_i$  esteja nesta faixa, vá para o passo 4. Caso contrário vá para o passo 2;

- Passo 2: adicione a restrição ( $Dial_i = roundup(Dial_i)$ ) ao problema. Sendo que,  $roundup(Dial_i)$  consiste em arredondar o valor de  $Dial_i$  para o próximo valor aceito por  $R_i$ . Sua função é garantir que  $Dial_i$  esteja dentro da faixa de valores permitidos de  $Dial$ ;
- Passo 3: solucione o problema da coordenação novamente utilizando PL, considerando a adição da restrição de igualdade apresentada no passo 2;
- Passo 4: decremente o contador  $i$  e volte ao passo 1, até que todos os relés tenham sido analisados.

**Figura 4.2:** Fluxograma do processo iterativo.



Fonte: O próprio autor.

A restrição  $Dial_i = roundup(Dial_i)$  corresponde ao arredondamento para o próximo valor de  $Dial_i$  aceito pelo relé. Por exemplo, considere que o passo de  $Dial$  igual a 0,01 e o valor de  $Dial_i = 0,5137$ . Caso  $Dial_i$  fosse arredondado para o valor factível anterior, no caso 0,51, ocasionaria perda de seletividade (infactibilidade). Isso porque a técnica de PL fornece os ajustes mínimos de  $Dial$  necessários que satisfazem as restrições de seletividade. Portanto,  $Dial_i$  deve ser arredondado para o próximo valor discreto permitido por  $R_i$ , no caso 0,52. Sendo assim, a restrição de igualdade  $Dial_i = 0,52$  é adicionada ao problema.

## 4.3 Algoritmo de Busca por Enumeração

Até o momento foram apresentadas as metodologias baseadas em técnicas de programação matemática para calcular os valores de *Dial*. Nesta seção, a coordenação de RSs não direcionais em sistemas de distribuição radiais é realizada utilizando um Algoritmo de Busca por Enumeração (ABE). Este explora as características da topologia radial das redes de distribuição, podendo ser dividido em duas etapas: enumeração e processo iterativo. A etapa de enumeração é fundamental para estabelecer uma metodologia para analisar os relés primários antes dos de retaguardas, sendo esta a mesma que a apresentada na Subsecção 4.2.1. O processo iterativo é responsável por coordenar cada relé de proteção primária com seu respectivo relé de retaguarda.

O ABE é baseado nas ideias da coordenação manual apresentadas em Zapata e Mejía (2003), Kindermann (2005), Soares (2009), apresentando as seguintes diferenças:

- É considerado os tempos mínimos de atuação dos relés ( $T^{min}$ );
- A ordem na qual os relés são analisados são ditadas pela etapa de enumeração. Enquanto na referência supracitada, a análise de quais relés são de proteção primária ou retaguarda é realizada de forma visual ou por uma matriz de rede.

Nas metodologias baseadas na coordenação manual, os relés são coordenados seguindo regras empíricas. Assim, não é possível garantir que as soluções encontradas sejam sempre as melhores, pois não é analisado todo espaço de solução do problema (ZAPATA; MEJÍA, 2003).

### 4.3.1 Processo Iterativo

Este passo é apresentado no Pseudocódigo 1, assumindo que todos relés encontram-se previamente enumerados. Primeiramente, os valores de *Dial* são inicializados com  $Dial_{min}$ . Logo após, é verificado para cada relé o valor de *Dial* que fornece o tempo de atuação de  $T^{min}$ . Caso este valor seja maior que o seu atual valor de *Dial*, este é atualizado<sup>1</sup>. Assim, as restrições relacionadas aos tempos mínimos de atuação dos relés (3.11) e de  $Dial_{min}$  (4.12) são satisfeitas.

<sup>1</sup>Caso os valores de *Dial* sejam discretos, deve-se arredondar para o próximo valor de *Dial* aceito pelo relé.

O contador  $i$  é inicializado com  $m$  (número de relés). As variáveis  $K_{i,i}^k$  e  $K_{Retaguarda_i,i}^k$  são determinadas por (3.2) a (3.4), e variam com o tipo de  $R_i$  e  $R_{Retaguarda_i}$ , respectivamente. Sendo que,  $Retaguarda_i$  corresponde ao índice do relé que atua como proteção de retaguarda de  $R_i$ . A variável auxiliar  $T_{aux}$  contém o tempo de atuação de  $R_i$ , para  $Icc_{i,i}^k$  adicionado com  $\Delta T_{rele-rele}$ . Portanto,  $T_{aux}$  está relacionado com o tempo de atuação mínimo necessário para que  $R_{Retaguarda_i}$  esteja coordenado de forma seletiva com  $R_i$ , para  $Icc_{retaguarda_i,i}^k$ .

Com posse de  $T_{aux}$ , é calculado o  $Dial_{aux}$ . Esta variável corresponde ao  $Dial_{Retaguarda_i}$  necessário para que  $R_{Retaguarda_i}$  possua o tempo de atuação de  $T_{aux}$ , para  $Icc_{retaguarda_i,i}^k$ . No caso de  $Dial_{aux}$  ser superior ao valor atual de  $Dial_{Retaguarda_i}$ , este é atualizado com  $Dial_{aux}$ . Quando são considerados valores discretos de  $Dial$ ,  $Dial_{aux}$  é arredondado para o próximo valor aceito por  $R_{Retaguarda_i}$ . Esta análise é realizada para os  $p$  níveis de falha considerados. Em seguida, o contador  $i$  é decrementado e o processo iterativo prossegue até que todos os relés sejam analisados.

Neste algoritmo, os dispositivos de proteção de retaguarda são coordenados com os valores de  $Dial$  necessários para que estejam seletivos com as respectivas proteções primárias, para os  $p$  níveis de falha considerados. O processo inicia-se nos relés mais afastados da subestação e segue até ela. Quando são considerados  $Dials$  discretos, é necessário realizar o arredondamento nos passos descritos no Pseudocódigo 1 para evitar problemas de seletividade.

**Pseudocódigo 1** Algoritmo de Busca por Enumeração (ABE).

---

```

1: Inicia os valores de  $Dial_i$  com  $Dial_{min}$ ;
2: para  $i = 1$  até  $m$  faça
3:   para  $k = 1$  até  $p$  faça
4:     se  $Dial_i < T^{min}/K_{i,i}^k$  então
5:       se  $Dial$  são discretos então
6:          $Dial_i \leftarrow \text{roundup}(T^{min}/K_{i,i}^k)$ 
7:       senão
8:          $Dial_i \leftarrow T^{min}/K_{i,i}^k$ 
9:     fim se
10:   fim se
11: fim para
12: fim para
13: para  $i = m$  até 1 faça
14:   se  $R_i$  possui proteção de retaguarda então
15:      $R_{Retaguarda_i} \leftarrow$  proteção de retaguarda de  $R_i$ 
16:     para  $k = 1$  até  $p$  faça
17:        $T_{aux} \leftarrow Dial_i \cdot K_{i,i}^k + \Delta T_{rele-rele}$ 
18:        $Dial_{aux} \leftarrow T_{aux}/K_{Retaguarda_i,i}^k$ 
19:       se  $Dial_{aux} > Dial_{BP_i}$  então
20:         se  $Dial$  são discretos então
21:            $Dial_{Retaguarda_i} \leftarrow \text{roundup}(Dial_{aux})$ 
22:         senão
23:            $Dial_{Retaguarda_i} \leftarrow Dial_{aux}$ 
24:         fim se
25:       fim se
26:     fim para
27:   fim se
28: fim para

```

---

## 4.4 Algoritmo Genético de Chu-Beasley – Algoritmo de Busca por Enumeração

O uso de técnicas híbridas para solucionar o problema da coordenação iniciou-se com o trabalho de Noghabi, Sadeh e Mashhadi (2009), no qual os autores hibridizaram o Algoritmo Genético (AG) com PL (AG-PL). Uma das vantagens em utilizar algoritmos meta-heurísticos, como o AG, é a capacidade de lidar com problemas não lineares como o problema da coordenação de RSs. Desta forma, pode-se considerar outras variáveis ao problema de otimização. Neste trabalho, é utilizado uma técnica híbrida que combina o AG de Chu e Beasley (1997) com o ABE (AGCB-ABE). As principais diferenças entre o AGCB-ABE e os AGs híbridos encontrados na literatura (NOGHABI; SADEH; MASHHADI, 2009; SADEH; AMINOTOJARI; BASHIR, 2011; BOTTURA, 2014) são:

- Nesta proposta, o AG utilizado é baseado nas ideias de Chu e Beasley (1997) (AGCB). Enquanto na literatura é utilizado o AG clássico (HOLLAND, 1975);
- É combinado do AGCB com ABE. Ao passo que na literatura, o AG é combinado com a PL;
- *Dials*, *PSs*, tipos de curvas e tipo de relés são considerados variáveis de decisão do problema de otimização. No trabalho de Noghabi, Sadeh e Mashhadi (2009), Sadeh, Aminotojari e Bashir (2011), Bottura (2014) apenas *PSs* e *Dials* são considerados como variáveis de decisão.
- O AGCB-ABE possui aplicação restrita a sistemas radiais. Ao passo que os encontrados na literatura podem ser aplicados em sistemas malhados.

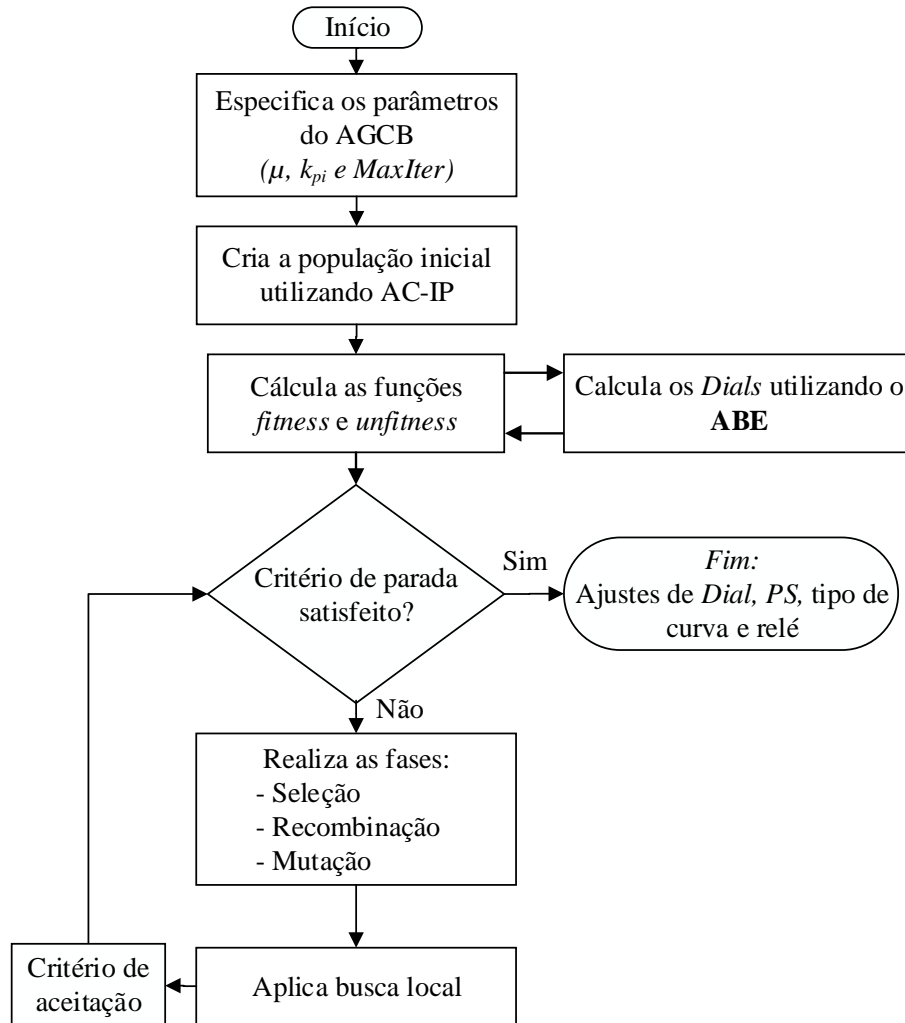
O AGCB-ABE é baseado nas ideias principais do AG apresentado em Chu e Beasley (1997). Este foi inicialmente desenvolvido para solucionar o problema generalizado de atribuição. O AGCB possui algumas diferenças em relação ao AG clássico (HOLLAND, 1975): 1) a cada iteração, apenas um descendente é gerado, e este entra na população atual se preencher os critérios de aceitação; 2) a FO é composta por uma função de aptidão (*fitness*) e inaptidão (*unfitness*); e 3) existe a etapa de busca local para melhorar a FO do descendente.

Algumas modificações no AG de Chu e Beasley (1997) são realizadas para adaptá-lo ao problema de coordenação, como a codificação, inicialização da população, busca local e cálculo da FO. A principal vantagem ao combinar o AGCB com ABE, é que os *Dials* não necessitam ser codificados no cromossomo, reduzindo significativamente o espaço de busca. A metodologia escolhida para o calcular os *Dials* foi o ABE, devido à sua velocidade, eficácia e capacidade de lidar com ajustes discretos.

O AGCB-ABE é apresentado no fluxograma da Figura 4.3. Os parâmetros  $k_{pi}$ ,  $\mu$  e *MaxIter* referem-se ao tamanho da população inicial, taxa de mutação e o critério de parada, respectivamente.



Figura 4.3: Fluxograma do AGCB-ABE.



Fonte: O próprio autor.

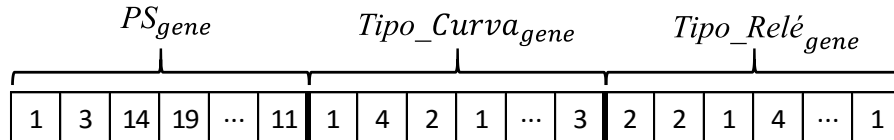
#### 4.4.1 Codificação

Neste trabalho, as variáveis de *Dials*, *PSs*, tipos de curvas e tipos de relés são consideradas variáveis de decisão no problema de otimização. Os *Dials* não são codificados no cromossomo, uma vez que seus valores são determinados pelo ABE. A estrutura do cromossomo é apresentada na Figura 4.4. Sendo que,  $PS_{gene}$ ,  $Tipo\_Curva_{gene}$  e  $Tipo\_Relé_{gene}$  são os genes referentes ao *PS*, tipo de curva e tipo de relé, respectivamente. Cada cromossomo é dividido em três partes: uma para escolher o *PS*, uma para escolher o tipo de curva e a outra para escolher o tipo do relé.

Foi utilizada a codificação decimal nos genes. Cada gene de  $PS_{gene}$  corresponde a um valor de *PS* aceito pelo seu respectivo relé, considerando seus ajustes discretos. Por exemplo, na Figura 4.4,  $PS_{gene}(3) = 14$ . Isso significa que o  $PS_3$  recebe o 14° valor de *PS* aceito por  $R_3$ . Essa codificação é mais interessante do

que a binária, pois não é necessário decodificar os valores em binário cada vez que as informações do cromossomo são extraídas. Cada gene de  $Tipo\_Curva_{gene}$  é relativo a um tipo de curva, podendo variar de um a cinco, pois o padrão US – apresentado na Tabela 2.3 – possui até cinco tipos de curvas distintos. Cada gene de  $Tipo\_Relé_{gene}$  está relacionado a um dos quatro tipos de relés (IEEE, IEC, IAC ou US) considerados neste trabalho.

**Figura 4.4:** Exemplo do cromossomo do AGCB-ABE.



Fonte: O próprio autor.

O motivo pelo qual este trabalho trata os tipos de relés como variáveis de decisão é que alguns RSs no mercado podem ter seus padrões de curvas características alterados. Por exemplo, os RSs SEPAM série 20 da Schneider e os 735/737 da General Electric aceitam curvas características do tipo IEC, IAC e IEEE (SCHNEIDER, 2009; ELETRIC, 2009).

#### 4.4.2 População Inicial

A população inicial de AGCB-ABE pode ser criada aleatoriamente, porém esse procedimento pode levar a uma população de má qualidade (propostas infactíveis). Neste trabalho, um algoritmo construtivo para a inicialização da população (AC-IP) é utilizado para contornar este problema. O algoritmo é apresentado no Pseudocódigo 2. Sua principal ideia consiste em limitar os valores de  $PS_{gene}$  e  $Tipo\_Curva_{gene}$ , a fim de evitar propostas infactíveis.

Cada gene de  $PS_{gene}$  é limitado pelas restrições apresentadas em (3.8) e (3.9). Desta forma, os valores de  $PSs$  são escolhidos aleatoriamente, desde que satisfaçam essas restrições. Cada gene de  $Tipo\_Curva_{gene}$  é limitado pelo respectivo  $Tipo\_Relé_{gene}$ <sup>2</sup>.

<sup>2</sup>Por exemplo, caso o relé analisado seja do tipo IEEE, o respectivo  $Tipo\_Curva_{gene}$  escolherá um valor aleatório entre um e três, referentes às curvas E.I, M.I e I.M.

---

**Pseudocódigo 2** Algoritmo construtivo para inicialização da população (AC-IP).

---

```

1: para  $i = 1$  até  $k_{pi}$  faça
2:   para  $j = 1$  até  $m$  faça
3:      $PS_{gene}(i, j) \leftarrow$  valor aleatório de  $PS_i$  que satisfaz simultaneamente às
     restrições  $PS_i^{min} \leq PS_i \leq PS_i^{max}$  e  $\frac{FC \cdot I_{carga,i}^{max}}{RTC_i} \leq PS_i \leq \frac{Icc_i^{min}}{RTC_i}$ 
4:      $Tipo\_Relé_{gene}(i, j) \leftarrow$  valor aleatório entre 1 e 4
5:     se  $Tipo\_Relé_{gene}(i, j) = 1$  então ▷ IEEE
6:        $Tipo\_Curva_{gene}(i, j) \leftarrow$  valor aleatório entre 1 e 3
7:     senão se  $Tipo\_Relé_{gene}(i, j) = 2$  então ▷ IEC
8:        $Tipo\_Curva_{gene}(i, j) \leftarrow$  valor aleatório entre 1 e 4
9:     senão se  $Tipo\_Relé_{gene}(i, j) = 3$  então ▷ IAC
10:       $Tipo\_Curva_{gene}(i, j) \leftarrow$  valor aleatório entre 1 e 4
11:     senão se  $Tipo\_Relé_{gene}(i, j) = 4$  então ▷ US
12:       $Tipo\_Curva_{gene}(i, j) \leftarrow$  valor aleatório entre 1 e 5
13:   fim se
14: fim para
15: fim para

```

---

### 4.4.3 Função Objetivo

As funções *fitness* e *unfitness* são calculadas ao decodificar as informações de  $PSs$ , tipos de curvas e tipos de relés do cromossomo, sendo que os *Dials* são calculados utilizando o ABE. Com posse dessas variáveis, a função de *fitness* é calculada por (3.6), sendo a somatória dos tempos de atuação dos relés para falhas dentro da sua zona de proteção primária. A função *unfitness* está relacionada com a infactibilidade da solução. Um fator de penalização  $K_{penal} = 10^4$  é adicionado à cada restrição violada, assim a solução infactível passa a possuir baixa qualidade. As funções *fitness* e *unfitness* são combinadas para formar a FO, como apresentado em (4.5).

$$Min. \underbrace{\sum_{k=1}^p \sum_{i=1}^m T_{i,i}^k}_{Fitness} + \underbrace{N_{violadas} \cdot K_{penal}}_{Unfitness} \quad (4.5)$$

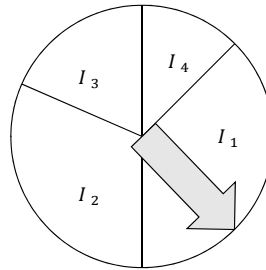
sendo que,  $N_{violadas}$  – número de restrições violadas;  $K_{penal}$  – fator de penalização da função objetivo.

### 4.4.4 Seleção

O método escolhido para a seleção dos pais foi a roleta, onde os indivíduos mais aptos (com melhores FOs) possuem maiores chances de serem selecionados. Uma ilustração do método é apresentada na Figura 4.5. Nesta, os indivíduos  $I_1$  e  $I_4$

são os mais e menos aptos, respectivamente. A roleta é girada duas vezes, de modo a obter dois pais.

**Figura 4.5:** Exemplo do método da roleta.

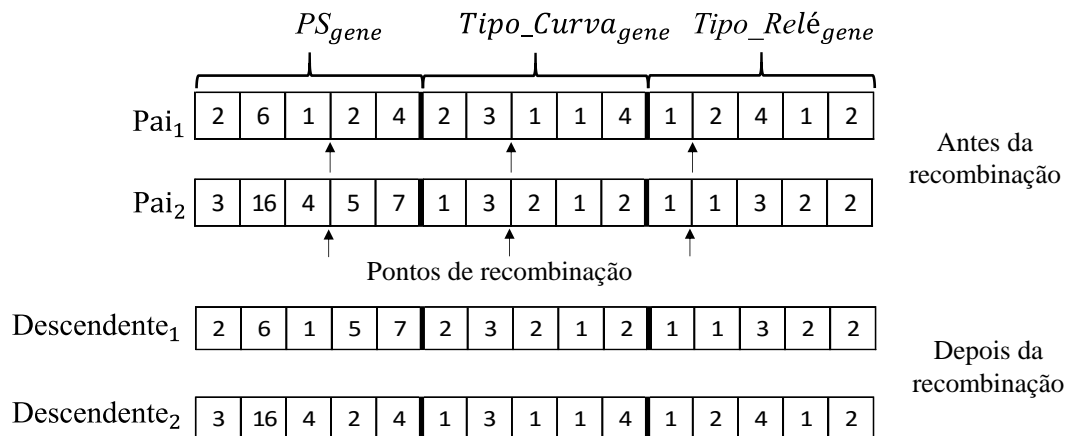


Fonte: O próprio autor.

### 4.4.5 Recombinação

Ambos indivíduos escolhidos na fase de seleção atuarão como pais no processo de recombinação. Neste trabalho, foi utilizado a recombinação em um único ponto, aplicado separadamente para  $PS_{gene}$ ,  $Tipo\_Curva_{gene}$  e  $Tipo\_Relé_{gene}$ , como é apresentado na Figura 4.6. Após a recombinação, dois descendentes são gerados, e apenas o mais apto (com melhor FO) é armazenado.

**Figura 4.6:** Exemplo da fase da recombinação.



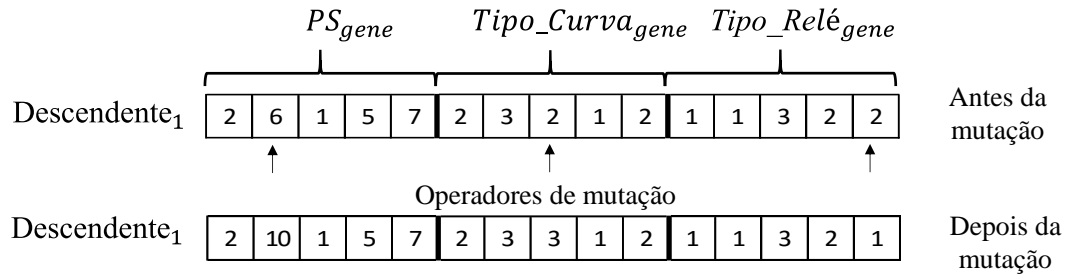
Fonte: O próprio autor.

### 4.4.6 Mutação

Esta fase é responsável por introduzir diversidade genética no indivíduo para que a solução possa sair de um mínimo (ou máximo) local. Neste trabalho, o operador de mutação é aplicado separadamente para  $PS_{gene}$ ,  $Tipo\_Curva_{gene}$

e  $Tipo\_Relé_{gene}$ . O número de genes mutados está relacionado com a taxa de mutação ( $\mu$ ). Os genes mutantes recebem um valor aleatório que satisfaz as mesmas condições consideradas no AC-IP. O descendente mutado é armazenado, caso sua FO seja melhor que a do descendente não mutado. Um exemplo da operação de mutação é apresentado na Figura 4.7.

**Figura 4.7:** Exemplo da fase da mutação.



Fonte: O próprio autor.

#### 4.4.7 Busca Local

Após as fases de seleção, recombinação e mutação, um novo descendente é gerado. Sendo que este pode ser factível ou infactível. Em ambos os casos, a busca local, apresentada no Pseudocódigo 3, é realizada com objetivo de melhorar a qualidade do indivíduo. A busca local realiza uma busca na vizinhança de cada  $PS_{gene}(i)$  e  $Tipo\_Curva_{gene}(i)$ . A vizinhança de  $PS_{gene}(i)$  e  $Tipo\_Curva_{gene}(i)$  é definida como  $V_{PS_{gene}(i)} \in \{PS_{gene}(i) - 1, PS_{gene}(i) + 1\}$  e  $V_{Tipo\_Curva_{gene}(i)} \in \{Tipo\_Curva_{gene}(i) - 1, Tipo\_Curva_{gene}(i) + 1\}$ , respectivamente, e ambas possuem raio igual a 1. O procedimento de busca local para  $Tipo\_Curva_{gene}$  é similar ao utilizado para  $PS_{gene}$ , assim foi apresentado apenas para o caso deste.

---

#### Pseudocódigo 3 Algoritmo de busca local para $PS_{gene}$ .

---

- 1: **para**  $i = 1$  até  $m$  **faça**
  - 2:      $PS_{gene}^{original}(i) \leftarrow PS_{gene}(i)$
  - 3:      $PS_{gene}(i) \leftarrow$  valor imediatamente superior de  $PS_{gene}^{original}(i)$    ▷ se factível
  - 4:     **se** a FO não melhorar **então**
  - 5:          $PS_{gene}(i) \leftarrow$  valor imediatamente inferior de  $PS_{gene}^{original}(i)$  ▷ se factível
  - 6:     **se** a FO não melhorar **então**
  - 7:          $PS_{gene}(i) \leftarrow PS_{gene}^{original}(i)$
  - 8:     **fim se**
  - 9:     **fim se**
  - 10: **fim para**
-

#### 4.4.8 Critérios de Aceitação

O novo descendente entra na população atual caso ele satisfaça dois critérios: 1) deve ser diferente de todos indivíduos; e 2) o valor da sua FO deve ser melhor que a do indivíduo com a pior FO. Caso ambos critérios sejam satisfeitos, o descendente substitui o indivíduo com a pior FO.

#### 4.4.9 Critério de Parada

Caso a solução incumbente não se modifique após *MaxIter* iterações, o algoritmo é finalizado.

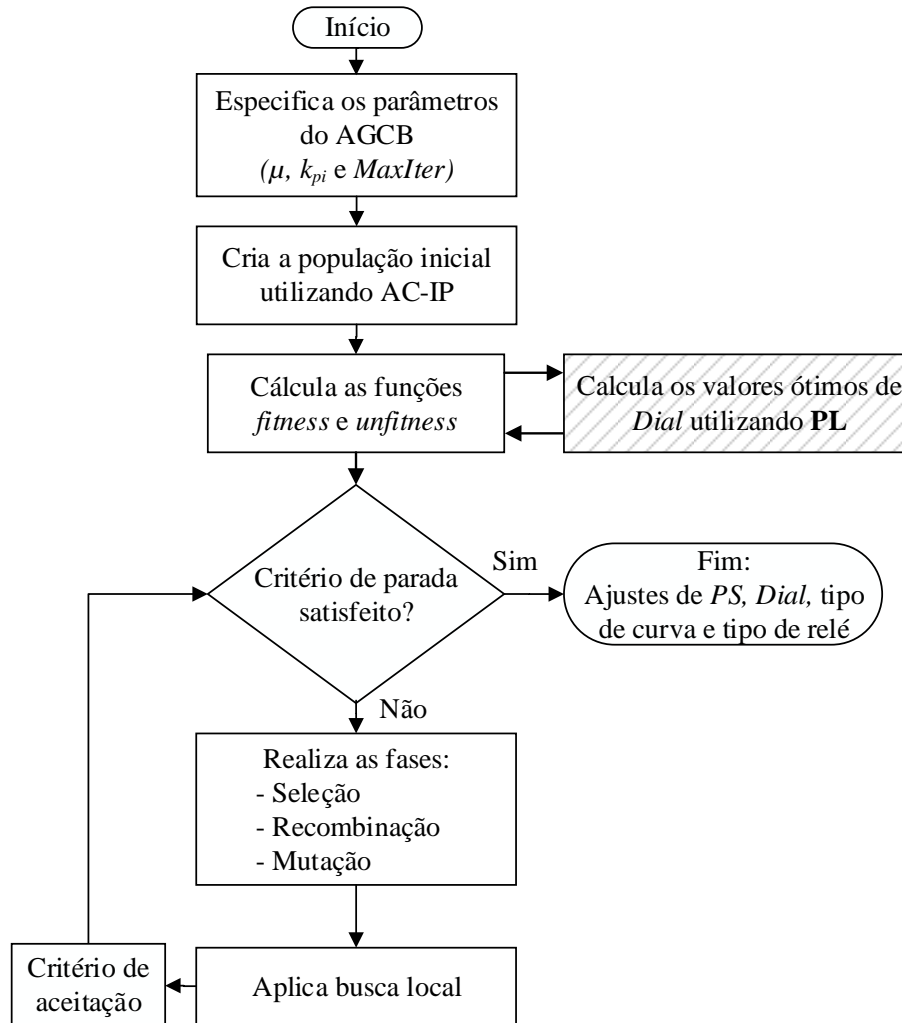
### 4.5 Algoritmo Genético de Chu-Beasley – Programação Linear

Nesta secção é proposta uma metodologia híbrida que combina o Algoritmo Genético de Chu-Beasley com Programação Linear (AGCB-PL) para solucionar o problema da coordenação de RSDs. Esta metodologia utiliza a técnica de PL para calcular os *Dials* ótimos, após decodificar os valores de *PS*, tipos de curvas e tipos de relés do cromossomo do AGCB. Em comparação com o AGCB-ABE, o AGCB-PL perde a capacidade de poder lidar com *Dials* discretos. Entretanto, o AGCB-PL é capaz de solucionar o problema da coordenação de RSDs em sistemas radiais e malhados.

A estrutura do AGCB-PL é a mesma do AGCB-ABE (Secção 4.4), com a principal diferença que os *Dials* são calculados utilizando a técnica de PL ao invés do ABE. A criação da população inicial, codificação, seleção, recombinação, mutação, cálculo da FO e o critério de parada são os mesmos que os apresentados anteriormente. O fluxograma da metodologia proposta é apresentado na Figura 4.8.

O AGCB-PL se diferencia dos AGs híbridos propostos na literatura (NOGHABI; SADEH; MASHHADI, 2009; SADEH; AMINOTOJARI; BASHIR, 2011; BOTTURA, 2014) em relação à meta-heurística utilizada (AGCB) e ao número de variáveis de decisão que podem ser consideradas no problema (*PSs*, *Dials*, tipos de curvas e tipos de relés). Nas referências supracitadas, as meta-heurísticas utilizadas são baseadas no AG clássico (HOLLAND, 1975), e apenas os *PSs* e *Dials* são considerados como variáveis de decisão.

Figura 4.8: Fluxograma do AGCB-PL.



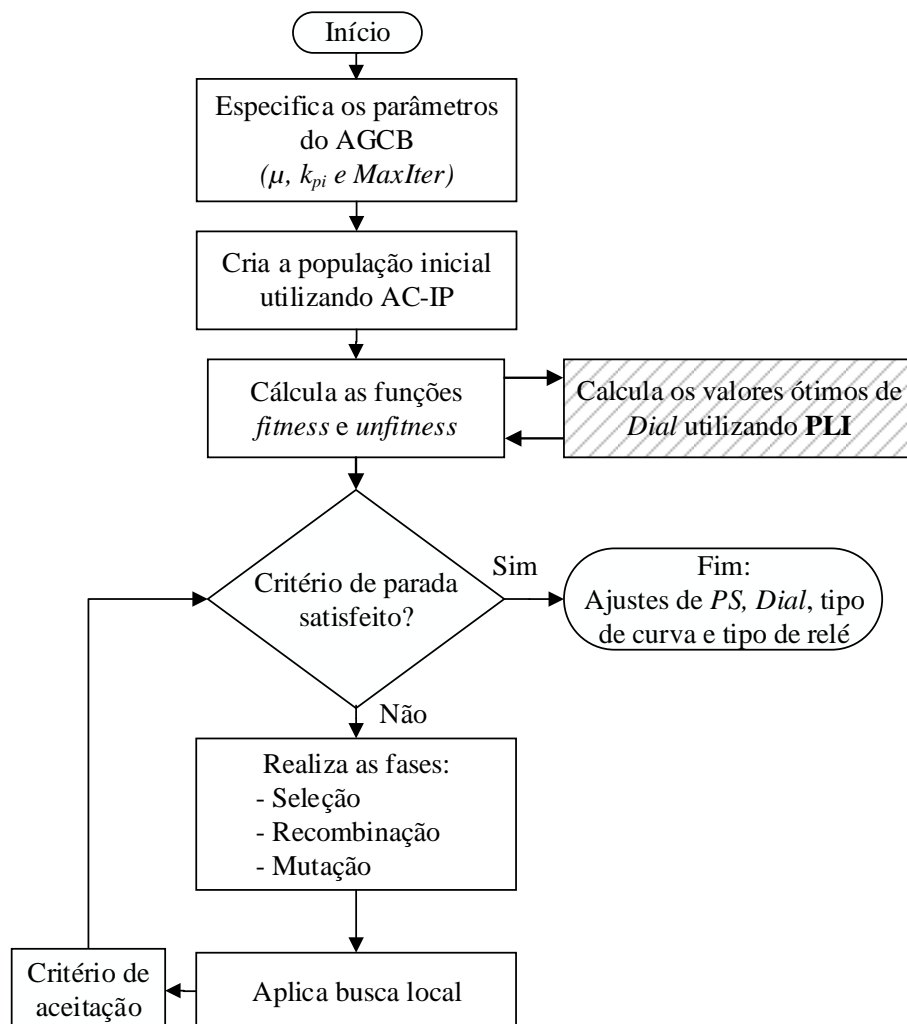
Fonte: O próprio autor.

## 4.6 Algoritmo Genético de Chu-Beasley – Programação Linear Inteira

Nesta secção, é proposta uma técnica híbrida baseada no Algoritmo Genético de Chu-Beasley e Programação Linear Inteira (AGCB-PLI) para solucionar o problema da coordenação de RSDs. O AGCB-PLI é capaz de trabalhar com os *Dials* discretos por causa da técnica de Programação Linear Inteira (PLI) empregada em conjunto com o AGCB. Deste modo, é contornada a limitação do AGCB-PL (Secção 4.5) que, devido a PL, possui aplicação restrita a relés que aceitam valores de *Dials* contínuos. A estrutura do AGCB-PLI é a mesma que o AGCB-ABE apresentado na Secção 4.4, exceto pelo fato de que os *Dials* são calculados utilizando PLI. Dessa forma, a codificação, seleção, recombinação, mutação, cálculo da FO e o critério de parada são os mesmos. O fluxograma da metodologia proposta é apresentado na Figura 4.9.

O AGCB-PLI diferencia-se dos AGs híbridos encontrados na literatura especializada (NOGHABI; SADEH; MASHHADI, 2009; SADEH; AMINOTOJARI; BASHIR, 2011; BOTTURA, 2014) em relação à meta-heurística empregada (AGCB), à técnica utilizada para calcular os *Dials* (PLI) e às variáveis de decisão que podem ser consideradas no problema de otimização (*PSs*, *Dials*, tipos de curvas e tipos de relés). Nas referências supracitadas, a PL é utilizada para computar os valores de *Dials*, as meta-heurísticas são baseadas no AG clássico (HOLLAND, 1975), e apenas os *PSs* e *Dials* podem ser considerados como variáveis de decisão. A seguir, é apresentada a metodologia de PLI utilizada para calcular os *Dials* discretos.

**Figura 4.9:** Fluxograma do AGCB-PLI.



Fonte: O próprio autor.



### 4.6.1 Programação Linear Inteira

Nesta subsecção, é proposta uma metodologia baseada em Programação Linear Inteira (PLI) para calcular os *Dials* discretos. É importante considerar os valores discretos de *Dial* quando os relés não permitem ajustes contínuos, visto que o arredondamento dessas variáveis pode levar à perda de seletividade (RAZAVI et al., 2008). Pelo fato da formulação ser linear, apenas os *Dials* são considerados como variáveis de decisão no problema de otimização. De forma geral, um problema de PLI pode ser formulado de acordo com as equações (4.6) a (4.9).

$$\text{Min. } \mathbf{f}^T \cdot \mathbf{x} \quad (4.6)$$

sujeito à

$$\mathbf{A}_{eq} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b}_{eq} \quad (4.7)$$

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} \leq \mathbf{b} \quad (4.8)$$

$$x_i \text{ inteiro } \forall i. \quad (4.9)$$

A principal diferença entre a PLI em relação à PL (URDANETA; NADIRA; PEREZ, 1988), é que as variáveis (*Dials*) são tratadas como inteiras. Entretanto, os valores reais de *Dial* não são inteiros, mas discretos (0,1, 0,2, 0,3, ..., 1,0, por exemplo). Deste modo, o modelo matemático do problema da coordenação é reformulado para eliminar os efeitos da consideração dos *Dials* inteiros. A FO (3.6) e as restrições (3.7), (3.10) e (3.11) são modificadas, pois estão relacionadas com as variáveis de *Dial*. Após solucionado o problema de PLI, os *Dials* encontrados são desnormalizadas para obter seus valores reais. A seguir, são apresentadas as alterações realizadas no modelo matemático do problema da coordenação.

Os tempos de atuação dos relés estão diretamente relacionados com os valores dos *Dials*. Sendo assim, a FO (3.6) é modificada para (4.10). A variável  $Passo_{Dial}$ , representa o tamanho do passo de *Dial*. A multiplicação desta variável nos tempos de atuação dos relés anula o efeito das variáveis inteiras de *Dial* no problema de otimização.

$$\text{Min. } Passo_{Dial} \sum_{k=1}^p \sum_{i=1}^m T_{i,i}^k \quad (4.10)$$

sendo que,  $Passo_{Dial}$  corresponde ao passo de *Dial* dos relés utilizados.

De modo similar às modificações realizadas à FO, as restrições que se relacionam com os valores de *Dial* também são modificadas. Assim, as restrições (3.7), (3.10) e (3.11) são alteradas para (4.11), (4.12) e (4.13), respectivamente.

$$Passo_{Dial}(T_{Retaguarda(i),i}^k - T_{i,i}^k) \geq \Delta T_{rele-rele} \quad (4.11)$$

$$\frac{Dial_i^{min}}{Passo_{Dial}} \leq Dial_i \leq \frac{Dial_i^{max}}{Passo_{Dial}} \quad (4.12)$$

$$\frac{T^{min}}{Passo_{Dial}} \leq T_i^{pri} \leq \frac{T^{max}}{Passo_{Dial}} \quad (4.13)$$

Após formulado o problema da coordenação de acordo com as modificações apresentadas nesta subsecção, e considerando os valores de  $Dial$  como variáveis inteiras, o problema pode ser solucionado utilizando técnicas de PLI. As abordagens normalmente utilizadas para solucionar essa classe de problema são as técnicas de enumeração (*branch – and – bound*, por exemplo), algoritmos de corte de planos e a teoria de grupos (BRADLEY; HAX; MAGNANTI, 1977). Neste trabalho, o resolvidor utilizado para solucionar o problema de PLI é o *cplexmilp* do CPLEX<sup>®</sup>, no ambiente do MATLAB<sup>®</sup>. Este resolvidor é baseado na técnica de *branch – and – cut* que combina o *branch – and – bound* com algoritmos de cortes de planos (IBM, 2010).

Como saída da PLI, são fornecidos os valores de  $Dials$  inteiros que minimizam os tempos de atuação dos relés. Como os valores de  $Dial$  são originalmente discretos, é aplicada a desnormalização apresentada em (4.14) para todos os valores de  $Dial$ .

$$Dial_i \leftarrow Passo_{Dial} \cdot Dial_i, \quad \forall i \quad (4.14)$$

Na metodologia proposta, não há acréscimo de variáveis e restrições ao problema de otimização. Essa é uma das principais vantagens da PLI em relação à Programação Inteira Binária (PIB) (CORRÊA, 2012; CORRÊA et al., 2015), quando apenas os  $Dials$  são otimizados<sup>3</sup>. Na PIB, são incluídas  $m$  restrições (referentes à consideração dos valores binários). Em relação ao número de variáveis, há  $N_{Dial}$  variáveis para cada relé, totalizando  $(N_{Dial} \cdot m)$  variáveis, onde  $N_{Dial}$  corresponde a quantidade de ajustes de  $Dial$  disponíveis no relé. Deste modo, são adicionadas  $m \cdot (N_{Dial} - 1)$  variáveis no problema de otimização. Por exemplo, considerando um sistema contendo 24 relés, cujos valores de  $Dial$  variam de 0,1 a 1,0 com passos de 0,01. Na formulação por PLI, este problema possui 24 variáveis. Na formulação por PIB, este mesmo problema possui  $24 \cdot 100 = 2400$  variáveis. Em relação ao número de restrições, a PLI possui 24 restrições a menos que a PIB.

<sup>3</sup>No trabalho de Corrêa (2012), o autor propõe dois modelos matemáticos: Modelo 1 e 2. O primeiro, otimiza apenas os valores de  $Dials$ . O segundo, otimiza os  $PSs$  e  $Dials$ .

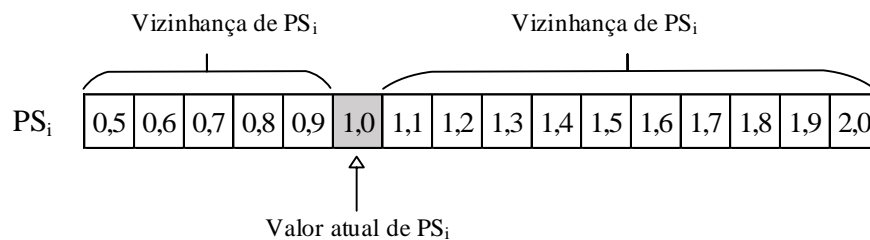
## 4.7 Busca Local - Programação Linear

Nesta secção, é proposta uma metodologia híbrida intitulada como Busca Local – Programação Linear (BL-PL) para solucionar o problema da coordenação de RSDs. O algoritmo proposto é baseado nas ideias principais da técnica heurística de otimização *Hill Climbing* (RUSSELL; NORVIG, 1995) e da técnica de Programação Linear (PL). Neste algoritmo, os *PSs* e os *Dials* são considerados como variáveis de decisão. Utiliza-se a PL para calcular os valores ótimos de *Dials*, para dada configuração de *PSs* fornecidas pela etapa de busca local que é baseada nas ideias de *Hill Climbing*.

O *Hill Climbing* é um algoritmo de melhoria iterativa guloso, que realiza um movimento na direção da melhor solução imediata. O algoritmo é inicializado com uma configuração factível, em seguida inicia-se o processo de melhoria iterativa. São realizadas pequenas modificações na solução atual (realiza-se uma busca local na vizinhança das variáveis de decisão), e esta é atualizada com a solução que fornece a melhor função objetivo (FO). Este processo de melhoria continua até que o algoritmo não consiga melhorar a FO. Quando isso acontece o algoritmo retorna a melhor solução encontrada (KARHI, 2008).

No algoritmo proposto as buscas locais são realizadas somente nas variáveis de *PS*, uma vez que – para cada combinação de *PSs* – os valores ótimos de *Dial* podem ser computados utilizando técnicas de PL. Essas buscas são realizadas em cada RSD até que não seja mais possível melhorar a FO. Um PL é solucionado a cada busca local realizada. A vizinhança de  $PS_i$  ( $V_{PS_i(i)}$ ) é definida como os valores superiores e inferiores de  $PS_i$  atual, respeitando os ajustes discretos disponíveis no relé, como é mostrado na Figura 4.10. Matematicamente,  $V_{PS_i(i)} \in \{PS_{min}, PS_{max}\}$ . O algoritmo é dividido em duas etapas: inicialização e processo iterativo. A seguir, cada etapa é detalhada.

**Figura 4.10:** Exemplo da vizinhança dos valores de  $PS_i$ , para um relé cujos valores de PS variam de 0,5 a 2,0 A, em passos de 0,1 A.



Fonte: O próprio autor.

### 4.7.1 Inicialização

A inicialização do algoritmo apresenta um papel fundamental na sua convergência, pois este deve partir de uma solução factível. No Pseudocódigo 4, é apresentada a metodologia utilizada para construir uma solução inicial factível. Sua ideia principal consiste em escolher aleatoriamente um valor de  $PS$ , para cada relé, que não viole as restrições (3.8) e (3.9). Com posse dos valores de  $PS$  escolhidos, a factibilidade é checada ao solucionar o PL correspondente. Caso a configuração seja infactível, é escolhida outra combinação de  $PS$ s (de forma aleatória, com as mesmas considerações feitas anteriormente), e a factibilidade é checada novamente utilizando PL. Esse processo repete-se até que uma solução factível seja construída.

---

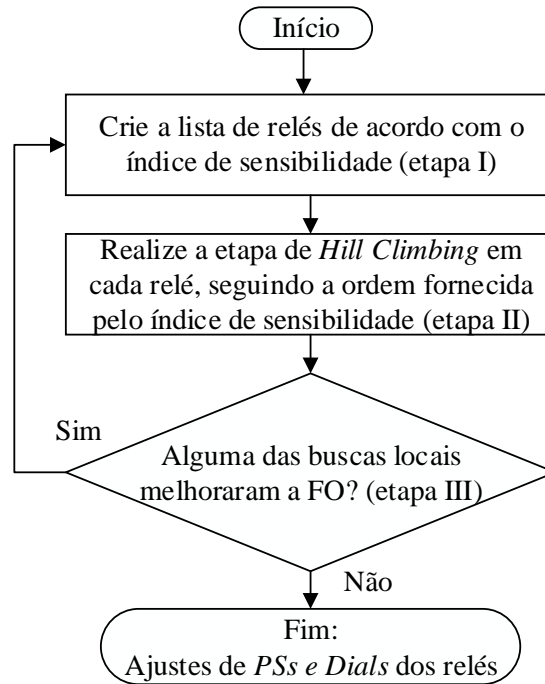
**Pseudocódigo 4** Algoritmo utilizado para criar uma solução inicial factível para a BL-PL.

---

- 1: **enquanto** a solução inicial não é factível **faça**
  - 2:     **para**  $i = 1$  até  $m$  **faça** ▷  $m$  é o número de RSDs
  - 3:          $PS_i \leftarrow$  valor aleatório de  $PS$  aceito por  $R_i$  que satisfaz simultaneamente as restrições (3.8) e (3.9);
  - 4:     **fim para**
  - 5:     Solucione o PL correspondente e verifique a factibilidade;
  - 6: **fim enquanto**
- 

### 4.7.2 Processo Iterativo

Após a solução factível ser criada, inicia-se o processo iterativo da BL-PL apresentado no fluxograma da Figura 4.11. Este processo pode ser dividido em três etapas: I, II e III. A primeira, intitulada como Índice de Sensibilidade, é responsável por criar uma lista com a ordem na qual os relés são analisados. A segunda, nominada de *Hill Climbing*, é encarregada de realizar o procedimento de melhoria iterativa nas variáveis de  $PS$  dos relés, na ordem fornecida pela lista criada na primeira etapa. Por fim, a terceira etapa – chamada de Critério de Parada – é responsável por interromper o processo de otimização quando não for mais possível realizar movimentos na solução atual para melhorar a FO. Em seguida, cada etapa é detalhada.

**Figura 4.11:** Fluxograma do processo iterativo da BL-PL.

Fonte: O próprio autor.

#### Etapa I: Índice de Sensibilidade

No algoritmo implementado, os relés são analisados um de cada vez. Esta etapa é responsável por estabelecer uma ordem, baseada em índices de sensibilidade, em que os relés são analisados. Neste trabalho, foram analisados três índices de sensibilidade: maiores tempos de atuação das proteções primárias (índice I), menores tempos de atuação das proteções primárias (índice II) e aleatório (índice III).

Para verificar o comportamento dos índices de sensibilidade, foi fixada a semente do gerador de números aleatórios do MATLAB e a BL-PL foi aplicada três vezes<sup>4</sup> em um sistema elétrico contendo 15 barras e 42 RSDs. Os resultados referentes a esta simulação são apresentados na Tabela 4.1. Os três índices convergiram para as mesmas respostas. Entretanto, o índice II precisou calcular um menor número de PLs. Assim, o índice de sensibilidade escolhido neste trabalho está relacionado aos menores tempos de atuação das proteções primárias (índice II).

<sup>4</sup>Relativos aos índices I, II e III.

**Tabela 4.1:** Número de PLs solucionados e de FO variando os índices de sensibilidade, para o sistema de 15 barras.

	Índice I	Índice II	Índice III
PLs	715	437	580
FO (s)	10,1512	10,1512	10,1512

Etapa II: Hill Climbing

A etapa II do processo iterativo é realizada após criada a lista com a ordem em que os relés são analisados, sendo apresentada no Pseudocódigo 5. O processo iterativo inicia-se pelo relé que possui o menor tempo de atuação para falhas dentro da sua zona de proteção primária. Em seguida, são avaliados os valores de FO ao incrementar e decrementar o valor atual de  $PS_i$ , sendo que um PL é solucionado a cada alteração no valor de  $PS_i$ . Esse passo é importante para determinar a direção na qual as buscas locais são realizadas. Ou seja, se a FO melhorar ao incrementar o valor de  $PS_i$ , a busca é realizada nos valores superiores de  $PS_i$ . Caso contrário, nos valores inferiores.

**Pseudocódigo 5** Etapa II: *Hill Climbing*.

---

```

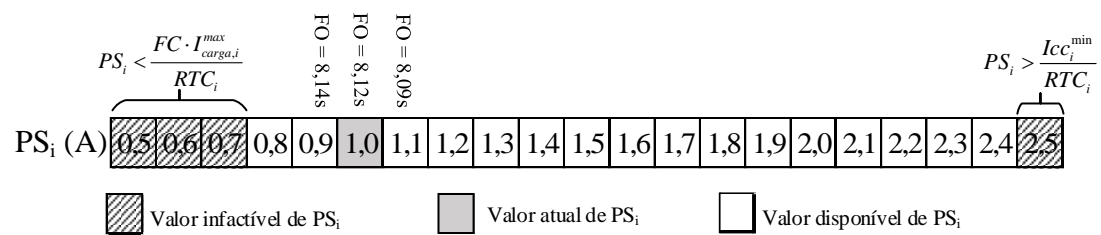
1: para  $pos = 1$  até  $m$ ; faça                                ▷  $m$  é o número de RSDs
2:    $i \leftarrow$  Índice do relé relacionado com  $pos^o$  da lista de relés;
3:   Avalie a FO ao incrementar e decrementar o valor de  $PS_i$  atual;
4:   se a FO melhorar então
5:     A direção da busca é dada na direção do vizinho que apresentar a
     melhor FO;
6:      $Limite\_PS \leftarrow$  maior/menor valor infactível de  $PS_i$ ; ▷ considerando a
     direção da busca
7:      $K \leftarrow 0$ ;
8:     enquanto  $K == 0$  faça
9:        $PS_i \leftarrow$  valor de  $PS$  aleatório compreendido entre  $PS_i$  e  $Limite\_PS$ ;
10:      se a FO piorar então
11:         $Limite\_PS \leftarrow PS_i$ ;
12:         $PS_i \leftarrow$  valor antigo de  $PS_i$ ;
13:        Avalie o vizinho próximo de  $PS_i$ ; ▷ considerando a direção da
busca
14:        se A FO piorar então
15:           $K \leftarrow 1$ ;
16:        fim se
17:      fim se
18:    fim enquanto
19:  fim se
20: fim para

```

---

Na Figura 4.12, é apresentado um exemplo da análise dos valores de FO ao incrementar e decrementar o valor de  $PS_i$  atual. Nesta figura, as caixas listradas são referentes aos valores inactiváveis de  $PS_i$ , ou seja, valores que violam as restrições apresentadas em (3.8) e (3.9). A caixa marcada em cinza, corresponde ao valor atual de  $PS_i$ . Por fim, as caixas marcadas em branco são referentes aos valores factíveis de  $PS$ , considerando os passos dos ajustes disponíveis e as restrições operativas. No exemplo da Figura 4.12 a FO melhora ao aumentar o  $PS_i$ . Assim, a direção da busca corresponde aos valores superiores de  $PS_i$ .

**Figura 4.12:** Exemplo da BL-PL em  $R_i$ : análise dos valores da FO ao incrementar e decrementar o valor de  $PS_i$  atual.

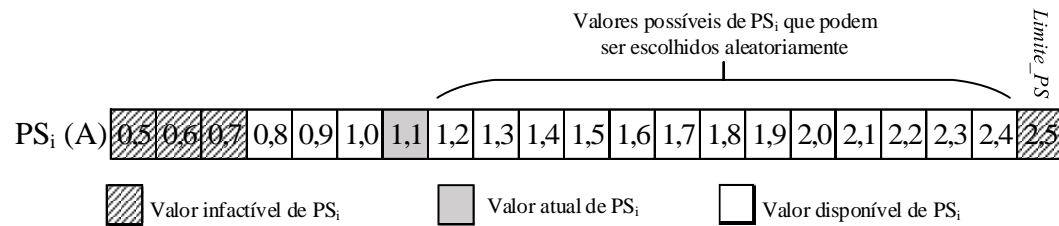


Fonte: O próprio autor.

Em seguida, os valores de  $PS_i$  são incrementados ou decrementados (dependendo da direção da busca) até que não seja mais possível melhorar a FO. Neste trabalho, o tamanho do passo da busca é aleatório, com objetivo de acelerar o processo de busca em relés que possuem passos de  $PS$  pequenos. Assim, é escolhido um valor de  $PS$  compreendido entre o valor de  $PS_i$  atual e o limite denominado de  $Limite\_PS$ , conforme é apresentado no exemplo da Figura 4.13. O valor inicial de  $Limite\_PS$  depende da direção da busca. Para buscas nos valores inferiores de  $PS_i$ , o  $Limite\_PS$  é calculado como o maior valor de  $PS_i$  que viola as restrições de  $\geq$  em (3.8) e (3.9). Para buscas nos valores superiores de  $PS_i$ , é calculado como o menor valor de  $PS_i$  que viola as restrições de  $\leq$  em (3.8) e (3.9). A variável  $K$  é responsável por determinar quando as buscas locais nesse relé é finalizada, sendo inicializada com  $K \leftarrow 0$ .

O  $PS_i$  é atualizado com um valor aleatório compreendido entre o  $PS_i$  atual e  $Limite\_PS$ . Cada vez que a busca melhorar a FO, um novo valor aleatório de  $PS_i$  é escolhido entre  $PS_i$  atual e  $Limite\_PS$ . Entretanto, no caso de piora da FO, o valor de  $Limite\_PS$  é atualizado com o valor atual de  $PS_i$ . Deste modo, o intervalo do passo aleatório de busca é reduzido. O valor atual de  $PS_i$  retorna ao seu antigo valor (que possui uma FO melhor), e é analisado seu vizinho imediato com objetivo de verificar se ainda é possível melhorar a FO ao continuar a busca. O vizinho imediato é o valor de  $PS$  imediatamente superior

**Figura 4.13:** Exemplo da BL-PL em  $R_i$ : valores possíveis de  $PS_i$  que podem ser escolhidos aleatoriamente.

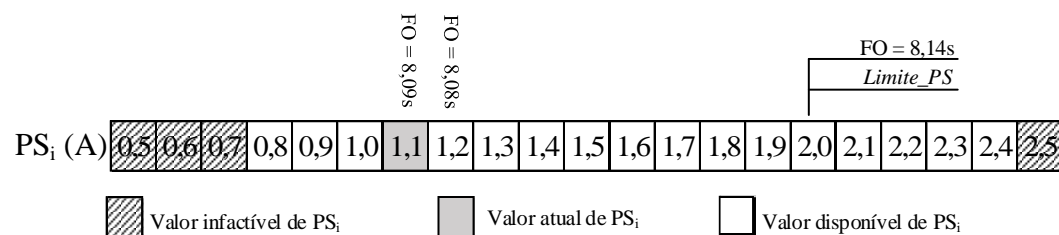


Fonte: O próprio autor.

ou inferior (dependendo da direção da busca) do valor de  $PS_i$  atual. Caso o valor de  $PS$  vizinho imediato melhore a FO, o processo de busca continua. Caso contrário,  $K \leftarrow 1$ , e o processo de busca nesse relé é finalizado. Assim, próximo relé é analisado (respeitando a ordem estabelecida pelo índice de sensibilidade) seguindo a metodologia apresentada.

Um exemplo é apresentado na Figura 4.14, em que o valor de  $PS$  escolhido aleatoriamente pela busca (2,0 A), piora o valor da FO. Deste modo, a variável  $Limite\_PS$  é atualizada, o valor de  $PS_i$  volta ao seu valor antigo (1,1A), e é analisado seu vizinho imediato (1,2 A). Neste caso, como a FO melhora,  $PS_i$  é atualizado e o processo de busca continua.

**Figura 4.14:** Exemplo da BL-PL em  $R_i$ : caso em que a busca piora o valor de FO.



Fonte: O próprio autor.

### Etapa III: Critério de Parada

Após o último relé ser analisado, é verificado se alguma das buscas locais realizadas melhorou a FO, pois a cada busca local bem sucedida, a solução atual se desloca no espaço de solução. Caso alguma busca tenha sido bem sucedida, o processo inicia-se novamente na etapa I. O processo iterativo da BL-PL é finalizado quando nenhuma das buscas locais realizadas na etapa II for bem sucedida. Deste modo, não é mais possível realizar movimentos na solução atual de modo a melhorar a FO.



## 4.8 Estimativa do Espaço de Solução

Neste trabalho, o tamanho do espaço de solução das técnicas híbridas baseadas em PL é estimado baseando-se nas ideias de Noghabi, Sadeh e Mashhadi (2009), que considera o número de combinações possíveis de  $PS$  para a estimativa. Uma vez que caso todos as combinações de  $PS$  disponíveis sejam avaliadas, a solução ótima do problema é encontrada. Isso porque para cada combinação de  $PS$ , os  $Dials$  ótimos podem ser calculados utilizando PL. Neste trabalho, é adicionado as características dos relés (tipos de curvas e tipos de relés) na estimativa. Adicionalmente, os valores de  $PSs$  que violam as restrições (3.8) e (3.9) são excluídos da estimativa. Desta forma, a estimativa do espaço de solução ( $PL_{max}$ ) das técnicas híbridas baseadas em PL pode ser calculada através de equação (4.15).

$$PL_{max} = \prod_{i=1}^m NPS_i \cdot NTC_i \quad (4.15)$$

sendo que,  $NPS_i$  é a quantidade de ajustes de  $PS$ , disponíveis em  $R_i$ , que satisfazem as restrições (3.8) e (3.9).  $NTC_i$  é o número total de tipos de curvas distintas de  $R_i$ , podendo considerar os tipos de curvas relacionados aos diferentes tipos de relés. Quando o problema não considera diferente tipos de curvas e tipos de relés como variáveis de decisão,  $NTC_i = 1, \forall i$ .

## 4.9 Síntese do Capítulo

Neste capítulo, foram apresentadas as metodologias de PL, PLIM, ABE, AGCB-ABE, AGCB-PL, AGCB-PLI e BL-PL como técnicas de solução do problema da coordenação entre relés de sobrecorrente. A PLIM, ABE e o AGCB-ABE são aplicadas apenas para sistemas elétricos radiais. As demais metodologias podem ser aplicadas em redes radiais e malhadas. Adicionalmente, o método utilizado para estimar o tamanho do espaço de solução foi apresentado. Esse capítulo é fundamental para compreender os resultados apresentados no Capítulo 6. No próximo capítulo, é apresentado os sistemas elétricos utilizados para validar as metodologias apresentadas neste capítulo.

## 5 Sistemas Testes

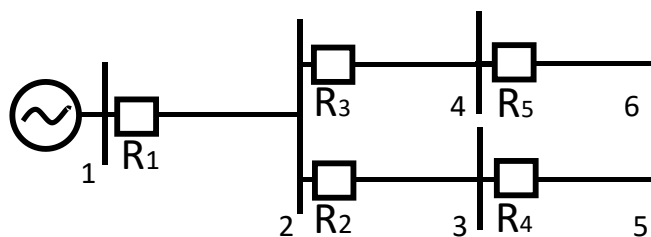
Neste capítulo, são apresentados os sistemas elétricos utilizados para validar as metodologias apresentadas no Capítulo 4. São apresentados dois sistemas de distribuição radiais e cinco de transmissão malhados. Para cada sistema, são apresentadas as considerações sobre os níveis de corrente de falha, topologia, limites dos ajustes de *Dial* e *PS*, RTC, características dos relés e correntes de carga considerados.

### 5.1 Sistemas de Distribuição Radiais

#### 5.1.1 Sistema I

O sistema I é apresentado na Figura 5.1, que contém 5 RSs, 6 barras e 1 gerador (subestação). O valor adotado para *FC* é de 1,5. Os relés possuem *Dial<sub>min</sub>* de 0,1 e *Dial<sub>max</sub>* de 10. *PS* pode variar de 2,5 a 10 A, em passos de 0,75 A. Os relés seguem a norma IEC. *T<sup>min</sup>* e *T<sup>max</sup>* são considerados como 0,05 e 2 segundos, respectivamente. Para a coordenação, são consideradas falhas trifásicas onde os relés encontram-se instalados e falhas bifásicas no final das linhas. *I<sub>CCmin</sub>* e *I<sub>CCmax</sub>* são as correntes de falha mínimas e máximas, respectivamente, dentro da zona de proteção do relé. Na Tabela 5.1, é apresentado para cada relé os valores de RTC, *I<sub>carga</sub>*, *PS*, tipo de curva, correntes de falha mínimas e máximas dentro da sua zona de proteção primária.

**Figura 5.1:** Diagrama unifilar do sistema I.



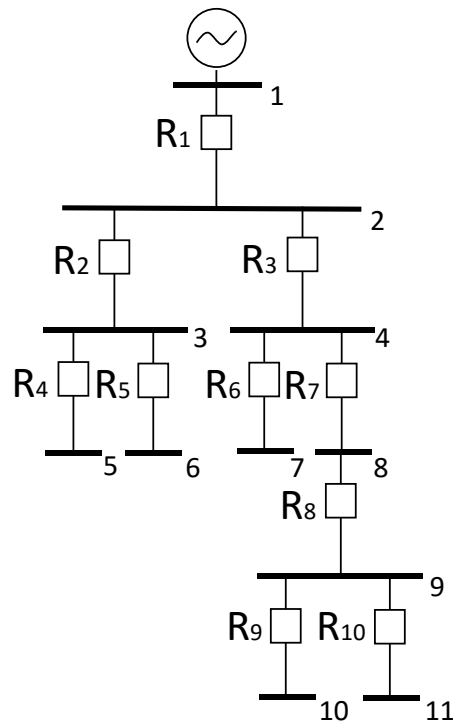
Fonte: O próprio autor.

**Tabela 5.1:** Dados de RTC,  $I_{carga}$ ,  $PS$  e tipo de curva para cada relé do sistema I.

	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	R <sub>5</sub>
RTC (A/A)	300/5	300/5	100/5	200/5	100/5
$I_{carga}$ (A)	199,5	130,8	68,7	100,7	50,0
$PS$ (A)	5,00	3,50	5,25	4,00	4,00
Tipo de curva	M.I	I	I	M.I	E.I
$I_{CC_{max}}$ (A)	3115,0	2010,7	2010,7	1512,5	878,4
$I_{CC_{min}}$ (A)	1741,3	1309,9	760,7	500,3	325,1

### 5.1.2 Sistema II

Na Figura 5.2, é apresentado o sistema II. Este possui 10 RSs, 11 barras e 1 gerador (subestação). Os dados referentes às correntes de falha consideradas, RTCs, correntes de carga,  $PS$ s e os tipos de curvas dos relés são apresentados na Tabela 5.2. São consideradas falhas trifásicas onde os relés encontram-se instalados e falhas bifásicas no final das linhas. Os valores adotados para  $FC$ ,  $\Delta T_{rele-rele}$  são de 1,5, e 0,4 segundos, respectivamente. Os relés seguem a norma IEC e possuem  $Dial_{min}$  e  $Dial_{max}$  de 0,1 e 10, respectivamente. O  $PS$  pode variar de 2,5 a 10 A, em passos de 0,75 A.  $T^{min}$  e  $T^{max}$  são considerados como 0,05 e 2 segundos, respectivamente.

**Figura 5.2:** Diagrama unifilar do sistema II.

Fonte: O próprio autor.

**Tabela 5.2:** Dados dos relés no sistema II.

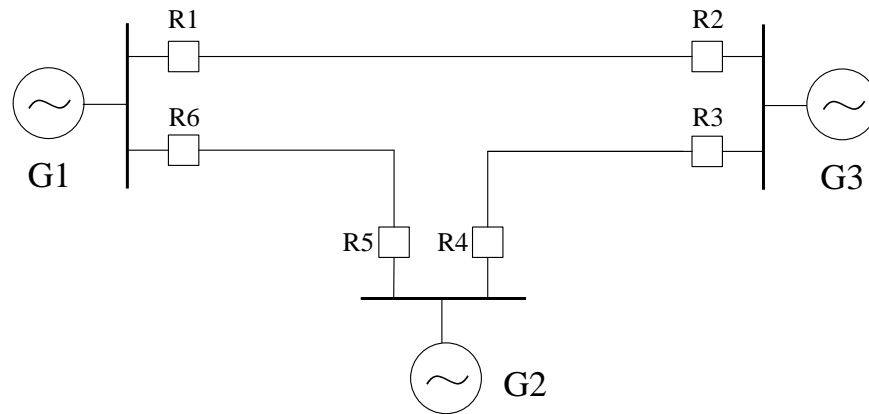
	$PS$ (A)	$I_{cc_{min}}$ (A)	$I_{cc_{max}}$ (A)	$I_{carga}^{max}$ (A)	RTC (A/A)	Relé	Curva
R <sub>1</sub>	4,25	3115,0	1741,3	219,5	400/5	IEC	I
R <sub>2</sub>	4,00	2010,7	1309,9	100,8	200/5	IEC	I
R <sub>3</sub>	4,50	2010,7	1030,6	118,7	200/5	IEC	I
R <sub>4</sub>	4,00	1512,5	630,3	50,7	100/5	IEC	I
R <sub>5</sub>	4,00	1512,5	599,1	50,1	100/5	IEC	I
R <sub>6</sub>	3,00	1190,0	510,5	39,5	100/5	IEC	I
R <sub>7</sub>	3,00	1190,0	823,1	79,2	200/5	IEC	I
R <sub>8</sub>	3,00	950,4	675,5	79,2	200/5	IEC	I
R <sub>9</sub>	3,25	780,1	398,3	40,7	100/5	IEC	I
R <sub>10</sub>	3,00	780,1	372,1	38,5	100/5	IEC	I

## 5.2 Sistemas de Transmissão Malhados

Para a coordenação de RSDs, são utilizados cinco sistemas elétricos bem conhecidos na literatura: 3, 6, 8, 9 e 15 barras. Desta forma, os valores das correntes de curto-circuito, correntes de cargas,  $RTC$  e características dos relés são padronizados.

### 5.2.1 Sistema de 3 Barras

O sistema de 3 barras é apresentado na Figura 5.3. Este foi o primeiro sistema utilizado na coordenação ótima de RSDs (URDANETA; NADIRA; PEREZ, 1988). A rede possui 3 barras, 3 linhas, 3 geradores e 6 RSDs. São consideradas falhas trifásicas no meio de cada linha de transmissão. Os valores das correntes de falha considerados são apresentados na Tabela 5.3. Para este sistema são consideradas duas configurações: normal e transiente. A configuração transiente ocorre quando um dos relés atua dentro da sua zona de proteção primária, operando o disjuntor na extremidade da linha de transmissão (URDANETA; NADIRA; PEREZ, 1988; AMRAEE, 2012). Assim, a seletividade deve ser garantida para ambas configurações. Este problema possui 12 restrições de seletividade, sendo 6 relacionadas à configuração atual, e 6 à transiente. Os valores de  $PSs$  são considerados discretos e podem variar de 1,5 a 5 A em passos uniformes de 0,5 A. Os valores de  $Dial$  variam continuamente de 0,1 a 1,1. É considerado  $\Delta T_{rele-rele}$  de 0,20 segundos. Todos relés seguem a norma IEC com curva inversa. Os valores de  $RTC$  são apresentados na Tabela 5.4. Neste sistema, não são considerados limites para os tempos de atuação dos relés. Todas as considerações deste sistema foram baseadas em Urdaneta, Nadira e Perez (1988), Amraee (2012).

**Figura 5.3:** Diagrama unifilar do sistema de 3 barras.

Fonte: O próprio autor.

**Tabela 5.3:** Dados dos níveis de curto-circuito para o sistema de 3 barras.

Configuração normal				Configuração transitente			
$R_{prim.}$	$R_{ret.}$	$I_{cc_{prim.}}$ (A)	$I_{cc_{ret.}}$ (A)	$R_{prim.}$	$R_{ret.}$	$I_{cc_{prim.}}$ (A)	$I_{cc_{ret.}}$ (A)
$R_1$	$R_5$	1978,90	175,00	$R_1$	$R_5$	2075,00	400,70
$R_2$	$R_4$	1525,70	545,00	$R_2$	$R_4$	1621,70	700,64
$R_3$	$R_1$	1683,90	617,22	$R_3$	$R_1$	1779,60	760,17
$R_4$	$R_6$	1815,40	466,17	$R_4$	$R_6$	1911,50	622,65
$R_5$	$R_3$	1499,66	384,00	$R_5$	$R_3$	1588,50	558,13
$R_6$	$R_2$	1766,30	145,34	$R_6$	$R_2$	1855,40	380,70

Fonte: Amraee (2012).

**Tabela 5.4:** Valores de RTC dos relés do sistema de 3 barras.

	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$
RTC (A/A)	300/5	200/5	200/5	300/5	200/5	400/5

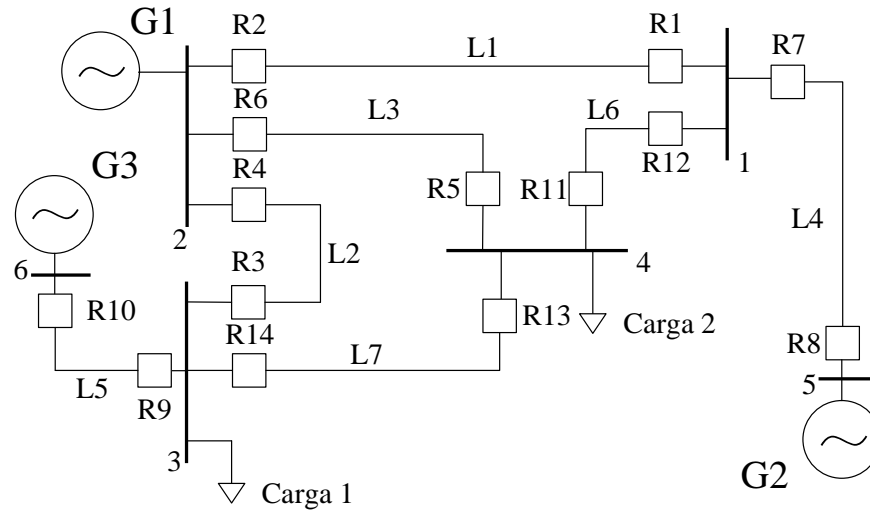
Fonte: Amraee (2012).

### 5.2.2 Sistema de 6 Barras

O sistema de 6 barras utilizado é apresentado na Figura 5.4. Este sistema possui 6 barras, 7 linhas, 3 geradores e 14 RSDs. Neste problema, são consideradas falhas trifásicas no início e no fim das linhas de transmissão. Os valores das correntes de falha, ponderados pela RTC, vistos por cada par de relés de proteção primária-retaguarda, são apresentados na Tabela 5.5. Neste sistema há 48 restrições de seletividade, considerando as falhas no início e fim das linhas. Entretanto, Birla et al. (2006) provou que 10 dessas restrições são relaxadas. Os valores das correntes de curto-circuito (ponderados pela RTC) vistos pelas proteções primárias (necessárias para o cálculo da FO) são apresentados na Tabela 5.6. Os valores

de *Dial* e *PS* variam continuamente de 0,05 a 1,1 e 1,25 a 1,5 A, respectivamente. É adotado  $\Delta T_{rele-rele} = 0,20$  segundos. Os relés seguem a norma IEC com curva inversa. Neste problema, são considerados  $T^{min}$  e  $T^{max}$  de 0,05 e 1 segundo, respectivamente. As considerações sobre este sistema foram baseadas em Thangaraj, Pant e Deep (2010).

**Figura 5.4:** Diagrama unifilar do sistema de 6 barras.



Fonte: O próprio autor.

**Tabela 5.5:** Dados dos níveis de curto-circuito para o sistema de 6 barras.

$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$\frac{I_{cc_{pri.}}}{RTC}$ (A)	$\frac{I_{cc_{ret.}}}{RTC}$ (A)	$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$\frac{I_{cc_{pri.}}}{RTC}$ (A)	$\frac{I_{cc_{ret.}}}{RTC}$ (A)
$R_1$	$R_8$	20,794	2,343	$R_9$	$R_4$	4,465	6,245
$R_1$	$R_8$	9,791	1,679	$R_9$	$R_4$	5,055	7,071
$R_1$	$R_{11}$	20,794	1,667	$R_9$	$R_{13}$	4,465	2,752
$R_2$	$R_3$	10,590	1,278	$R_9$	$R_{13}$	5,055	3,116
$R_2$	$R_3$	23,015	3,425	$R_{11}$	$R_6$	3,343	1,555
$R_3$	$R_{10}$	6,112	2,457	$R_{11}$	$R_6$	5,047	2,541
$R_3$	$R_{10}$	9,438	0,088	$R_{11}$	$R_{14}$	3,343	2,508
$R_3$	$R_{13}$	9,438	2,551	$R_{11}$	$R_{14}$	5,047	3,550
$R_4$	$R_1$	8,529	3,431	$R_{12}$	$R_2$	7,911	5,970
$R_4$	$R_1$	13,704	5,897	$R_{12}$	$R_2$	4,917	1,831
$R_5$	$R_{12}$	5,964	3,292	$R_{12}$	$R_8$	7,911	2,619
$R_5$	$R_{12}$	2,738	1,882	$R_{12}$	$R_8$	4,917	1,906
$R_5$	$R_{14}$	5,964	2,916	$R_{13}$	$R_6$	7,374	2,253
$R_6$	$R_3$	8,734	3,014	$R_{13}$	$R_{12}$	4,107	2,375
$R_6$	$R_3$	8,734	2,309	$R_{13}$	$R_{12}$	7,374	3,528
$R_7$	$R_2$	2,393	7,874	$R_{14}$	$R_4$	9,107	5,310
$R_7$	$R_2$	2,201	7,241	$R_{14}$	$R_4$	4,935	1,801
$R_7$	$R_{11}$	2,393	2,773	$R_{14}$	$R_{10}$	9,107	2,665
$R_7$	$R_{11}$	2,201	2,550	$R_{14}$	$R_{10}$	4,935	1,944

Fonte: Thangaraj, Pant e Deep (2010).

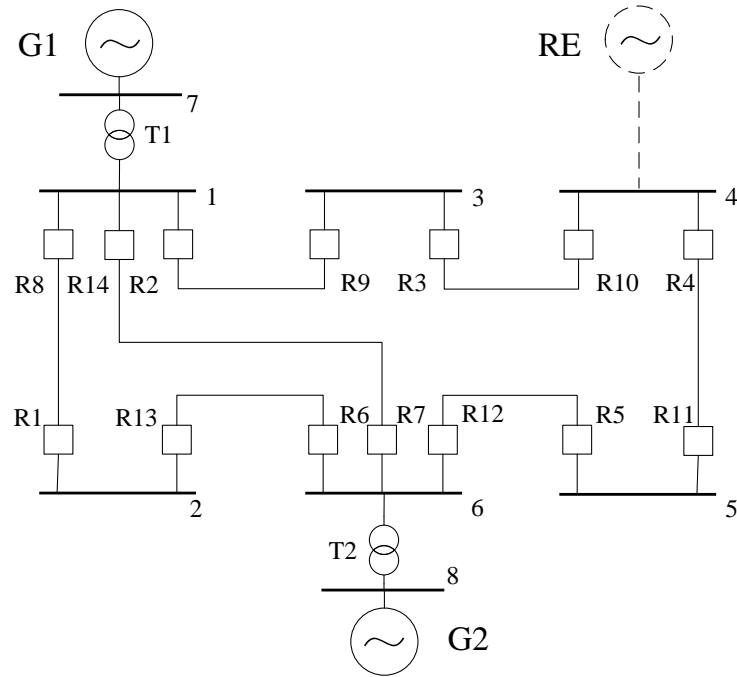
**Tabela 5.6:** Dados dos níveis de curto-circuito dos dispositivos de proteção primária.

$R_{pri.}$	$\frac{I_{ccpri.}}{RTC}$ (A)	$R_{pri.}$	$\frac{I_{ccpri.}}{RTC}$ (A)
$R_1$	9,7915	$R_2$	23,0155
$R_2$	10,5903	$R_1$	20,7938
$R_3$	6,1121	$R_4$	13,7037
$R_4$	8,5291	$R_3$	9,4380
$R_5$	2,7382	$R_6$	8,7342
$R_6$	3,8776	$R_5$	5,9643
$R_7$	2,2006	$R_8$	3,6480
$R_8$	3,2176	$R_7$	2,3931
$R_9$	4,4645	$R_{10}$	3,7126
$R_{10}$	3,3827	$R_9$	5,0553
$R_{11}$	3,3433	$R_{12}$	7,9110
$R_{12}$	4,9173	$R_{11}$	5,0466
$R_{13}$	4,1067	$R_{14}$	4,9347
$R_{14}$	9,1072	$R_{13}$	7,3737

Fonte: Thangaraj, Pant e Deep (2010).

### 5.2.3 Sistema de 8 Barras

Na Figura 5.5, é apresentado o sistema de 8 barras. Este possui 8 barras, 7 linhas, 2 geradores e 14 RSDs. O gerador indicado por RE corresponde a uma rede elétrica externa modelada com capacidade de curto-circuito de 400 MVA. São consideradas falhas trifásicas no início da linha (do ponto de vista do relé de proteção primária). Os valores das correntes de falha que sensibilizam cada par de relés de proteção primária-retaguarda e o valor da RTC de cada relé são apresentados nas Tabelas 5.7 e 5.8, respectivamente. Este sistema possui 20 restrições de seletividade. Os *Dials* podem variar continuamente de 0,1 a 1,1. Os *PSs* disponíveis são 0,5, 0,6, 0,8, 1,0, 1,5, 2,0 e 2,5 A. Os relés seguem a norma IEC, com curva inversa. É considerado  $\Delta T_{rele-rele}$  de 0,30 segundos. Neste sistema, não são considerados limites para os tempos de atuação dos relés. As considerações sobre este sistema foram baseadas em Amraee (2012).

**Figura 5.5:** Diagrama unifilar do sistema de 8 barras.

Fonte: O próprio autor.

**Tabela 5.7:** Dados dos níveis de curto-circuito para o sistema de 8 barras.

$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$I_{cc_{pri.}}$ (A)	$I_{cc_{ret.}}$ (A)	$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$I_{cc_{pri.}}$ (A)	$I_{cc_{ret.}}$ (A)
$R_1$	$R_6$	3232	3232	$R_8$	$R_7$	6093	1890
$R_2$	$R_1$	5924	996	$R_8$	$R_9$	6093	1165
$R_2$	$R_7$	5924	1890	$R_9$	$R_{10}$	2484	2484
$R_3$	$R_2$	3556	3556	$R_{10}$	$R_{11}$	3883	2344
$R_4$	$R_3$	3783	2244	$R_{11}$	$R_{12}$	3707	3707
$R_5$	$R_4$	2401	2401	$R_{12}$	$R_{13}$	5899	987
$R_6$	$R_5$	6109	1197	$R_{12}$	$R_{14}$	5899	1874
$R_6$	$R_{14}$	6109	1874	$R_{13}$	$R_8$	2991	2991
$R_7$	$R_5$	5223	1197	$R_{14}$	$R_1$	5199	996
$R_7$	$R_{13}$	5223	987	$R_{14}$	$R_9$	5199	1165

Fonte: Amraee (2012).

**Tabela 5.8:** Valores de RTC dos relés do sistema de 8 barras.

Relés	RTC (A/A)
$R_1, R_2, R_4, R_5, R_6, R_8, R_{10}, R_{11}, R_{12}, R_{13}$	1200/5
$R_3, R_7, R_9, R_{14}$	800/5

Fonte: Amraee (2012).

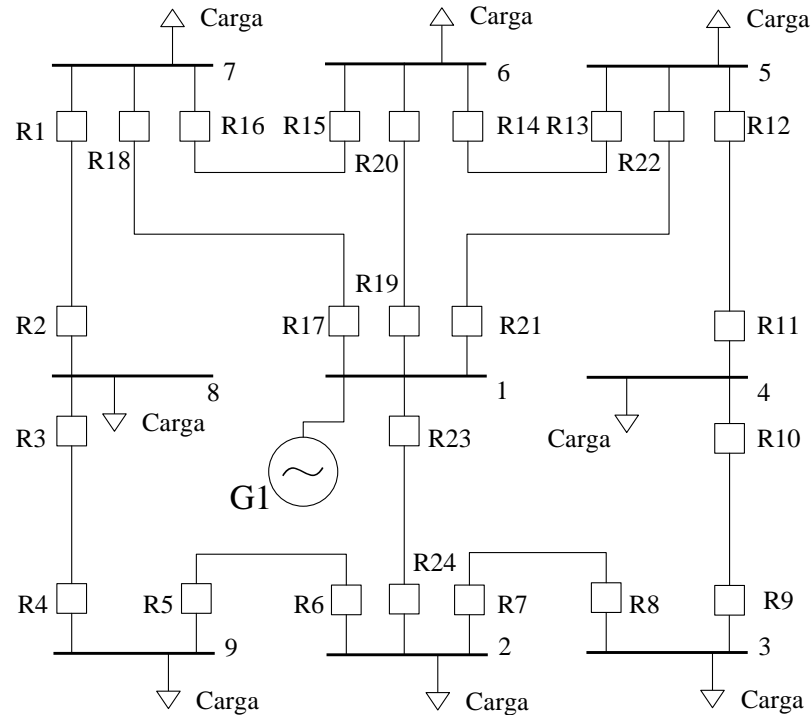
### 5.2.4 Sistema de 9 Barras

O sistema de 9 barras é apresentado na Figura 5.6. Este possui 9 barras, 12 linhas, 1 gerador e 24 RSDs. Os valores das correntes de curto-circuito e de



carga considerados são apresentados na Tabela 5.9. Todas as RTCs são de 500/1. Neste sistema, são consideradas restrições práticas nos valores de  $PS$  apresentadas em (5.1) (BEDEKAR; BHIDE, 2011a). Os relés  $R_{17}$ ,  $R_{19}$ ,  $R_{21}$  e  $R_{23}$  não possuem proteção de retaguarda. Os valores de  $Dial$  e  $PS$  são tratados como contínuos, sendo que os  $Dials$  podem variar de 0,025 a 1,2. Os valores de  $PS$  são limitados apenas pelas restrições apresentadas em (5.1). Este problema de coordenação possui 44 restrições de seletividade. É considerado  $\Delta T_{rele-rele}$  de 0,2 segundos. São consideradas restrições relacionadas aos tempos mínimos de atuação das proteções primárias,  $T^{min}$ , de 0,2 segundos. Todos os relés seguem a norma IEC, com curva inversa. As considerações sobre este sistema foram baseadas em Bedekar e Bhide (2011a).

**Figura 5.6:** Diagrama unifilar do sistema de 9 barras.



Fonte: O próprio autor.

$$\frac{1.25 \cdot I_{carga}^i}{RTC} \leq PS_i \leq \frac{2 \cdot I_{cc_{min}}^i}{3 \cdot RTC} \quad (5.1)$$

**Tabela 5.9:** Dados dos níveis de curto-circuito para o sistema de 9 barras.

$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$I_{cc_{pri.}}$	$I_{cc_{ret.}}$	$I_{carga,pri.}^{max}$	$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$I_{cc_{pri.}}$	$I_{cc_{ret.}}$	$I_{carga,pri.}^{max}$
		(A)	(A)	(A)			(A)	(A)	(A)
$R_1$	$R_{15}$	4863,6	1168,3	121,74	$R_{14}$	$R_{16}$	4172,5	1031,7	30,44
$R_1$	$R_{17}$	4863,6	1293,9	121,74	$R_{14}$	$R_{19}$	4172,5	1264,1	30,44
$R_2$	$R_4$	1634,4	1044,2	-	$R_{15}$	$R_{13}$	4172,5	1031,7	30,44
$R_3$	$R_1$	2811,4	1361,6	21,74	$R_{15}$	$R_{19}$	4172,5	1264,1	30,44
$R_4$	$R_6$	2610,5	1226,0	-	$R_{16}$	$R_2$	3684,5	653,6	-
$R_5$	$R_3$	1778,0	1124,4	-	$R_{16}$	$R_{17}$	3684,5	1293,9	-
$R_6$	$R_8$	4378,5	711,2	78,26	$R_{17}$	-	7611,2	-	441,30
$R_6$	$R_{23}$	4378,5	1345,5	78,26	$R_{18}$	$R_2$	2271,7	653,6	-
$R_7$	$R_5$	4378,5	711,2	78,26	$R_{18}$	$R_{15}$	2271,7	1168,3	-
$R_7$	$R_{23}$	4378,5	1345,5	78,26	$R_{19}$	-	7435,8	-	410,87
$R_8$	$R_{10}$	1778,0	1124,4	-	$R_{20}$	$R_{13}$	2624,2	1031,7	-
$R_9$	$R_7$	2610,5	1226,0	-	$R_{20}$	$R_{16}$	2624,2	1031,7	-
$R_{10}$	$R_{12}$	2811,4	787,2	21,74	$R_{21}$	-	7611,2	-	441,30
$R_{11}$	$R_9$	1634,4	1044,2	-	$R_{22}$	$R_{11}$	2271,7	653,6	-
$R_{12}$	$R_{14}$	2811,4	1168,3	121,74	$R_{22}$	$R_{14}$	2271,7	1168,3	-
$R_{12}$	$R_{21}$	2811,4	1293,9	121,74	$R_{23}$	-	7914,7	-	506,52
$R_{13}$	$R_{11}$	3684,5	653,6	-	$R_{24}$	$R_5$	1665,5	711,2	-
$R_{13}$	$R_{21}$	3684,5	1293,9	-	$R_{24}$	$R_8$	1665,5	711,2	-

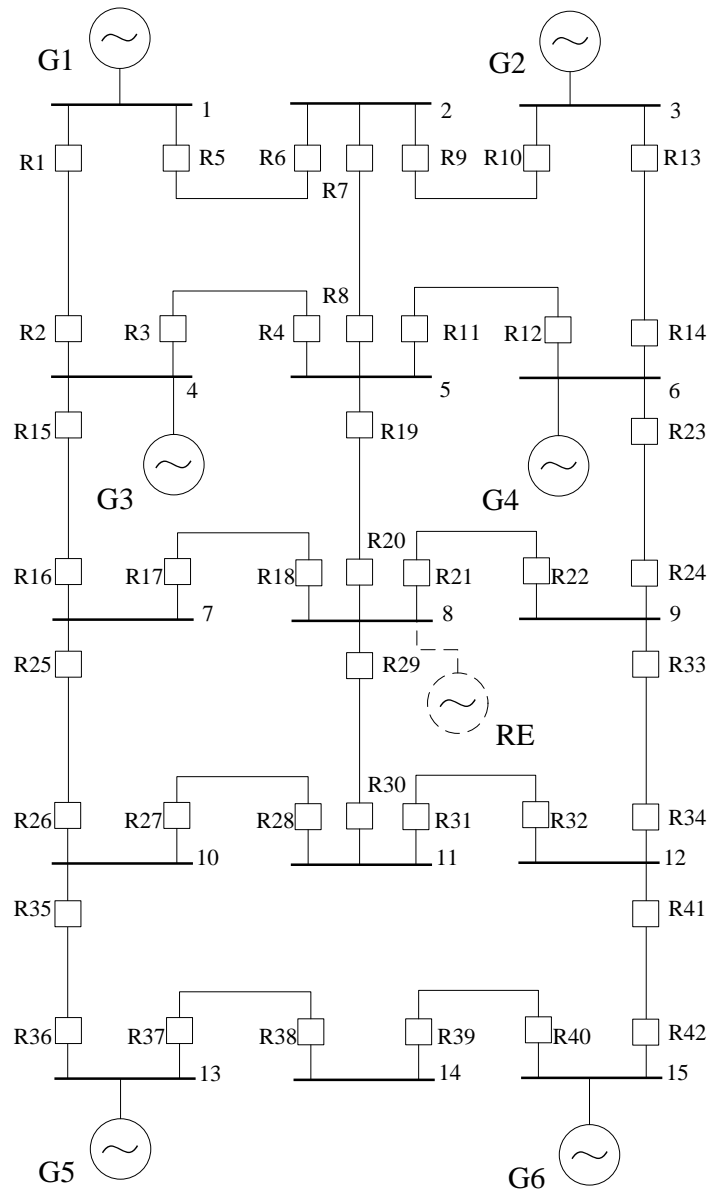
Fonte: Bedekar e Bhide (2011a).

### 5.2.5 Sistema de 15 Barras

O último sistema é apresentado na Figura 5.7. Essa rede contém 15 barras, 21 linhas, 6 geradores e 42 RSDs. A RE corresponde a uma rede externa modelada com capacidade de curto-circuito de 200 MVA. Os valores de RTC e correntes de curto-circuito são apresentados nas Tabelas 5.10 e 5.11, respectivamente. Este problema de coordenação possui 82 restrições relacionadas às falhas trifásicas no início da linha (do ponto de vista da proteção primária).

Os valores mínimos e máximos de  $PSs$  são 0,5 e 2,5 A, em passos uniformes de 0,5 A. Os  $Dials$  são tratados como variáveis contínuas que podem variar de 0,1 a 1,1. É considerado  $\Delta T_{rele-rele}$  de 0,2 segundos. Os relés seguem a norma IEC, com curva inversa. Neste sistema, não são considerados limites para os tempos de atuação dos relés. As considerações sobre este sistema foram baseadas em Amraee (2012).

Figura 5.7: Diagrama unifilar do sistema de 15 barras.



Fonte: O próprio autor.

Tabela 5.10: Valores de RTC dos relés do sistema de 15 barras.

Relés	RTC (A/A)
$R_{17}, R_{22}, R_{30}, R_{34}, R_{38}, R_{39}, R_{41}$	400/5
$R_6, R_7, R_9, R_{16}, R_{24}, R_{25}, R_{26}, R_{27}, R_{28}, R_{31}, R_{32}, R_{33}, R_{35}$	600/5
$R_1, R_3, R_5, R_{10}, R_{13}, R_{19}, R_{36}, R_{37}, R_{40}, R_{42}$	800/5
$R_2, R_4, R_8, R_{11}, R_{12}, R_{14}, R_{15}, R_{23}$	1200/5
$R_{18}, R_{20}, R_{21}, R_{29}$	1600/5

Fonte: Amraee (2012).

**Tabela 5.11:** Dados dos níveis de curto-circuito para o sistema de 15 barras.

$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$Icc_{pri.}$	$Icc_{ret.}$	$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$Icc_{pri.}$	$Icc_{ret.}$	$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$Icc_{pri.}$	$Icc_{ret.}$
		(A)	(A)			(A)	(A)			(A)	(A)
$R_1$	$R_6$	3621	1233	$R_{15}$	$R_4$	4712	1477	$R_{27}$	$R_{36}$	2011	1109
$R_2$	$R_4$	4597	1477	$R_{16}$	$R_{18}$	2225	1320	$R_{28}$	$R_{29}$	2525	1828
$R_2$	$R_{16}$	4597	743	$R_{16}$	$R_{26}$	2225	905	$R_{28}$	$R_{32}$	2525	697
$R_3$	$R_1$	3984	853	$R_{17}$	$R_{15}$	1875	969	$R_{29}$	$R_{17}$	8346	599
$R_3$	$R_{16}$	3984	743	$R_{17}$	$R_{26}$	1875	905	$R_{29}$	$R_{19}$	8346	1372
$R_4$	$R_7$	4382	1111	$R_{18}$	$R_{19}$	8426	1372	$R_{29}$	$R_{22}$	8346	642
$R_4$	$R_{12}$	4382	1463	$R_{18}$	$R_{22}$	8426	642	$R_{30}$	$R_{27}$	1736	1039
$R_4$	$R_{20}$	4382	1808	$R_{18}$	$R_{30}$	8426	681	$R_{30}$	$R_{32}$	1736	697
$R_5$	$R_2$	3319	922	$R_{19}$	$R_3$	3998	1424	$R_{31}$	$R_{27}$	2867	1039
$R_6$	$R_8$	2647	1548	$R_{19}$	$R_7$	3998	1111	$R_{31}$	$R_{29}$	2867	1828
$R_6$	$R_{10}$	2647	1100	$R_{19}$	$R_{12}$	3998	1463	$R_{32}$	$R_{33}$	2069	1162
$R_7$	$R_5$	2497	1397	$R_{20}$	$R_{17}$	7662	599	$R_{32}$	$R_{42}$	2069	907
$R_7$	$R_{10}$	2497	1100	$R_{20}$	$R_{22}$	7662	642	$R_{33}$	$R_{21}$	2305	1326
$R_8$	$R_3$	4695	1424	$R_{20}$	$R_{30}$	7662	681	$R_{33}$	$R_{23}$	2305	979
$R_8$	$R_{12}$	4695	1463	$R_{21}$	$R_{17}$	8384	599	$R_{34}$	$R_{31}$	1715	809
$R_8$	$R_{20}$	4695	1808	$R_{21}$	$R_{19}$	8384	1372	$R_{34}$	$R_{42}$	1715	907
$R_9$	$R_5$	2943	1397	$R_{21}$	$R_{30}$	8384	681	$R_{35}$	$R_{25}$	2095	903
$R_9$	$R_8$	2943	1548	$R_{22}$	$R_{23}$	1950	979	$R_{35}$	$R_{28}$	2095	1192
$R_{10}$	$R_{14}$	3568	1175	$R_{22}$	$R_{34}$	1950	970	$R_{36}$	$R_{38}$	3283	882
$R_{11}$	$R_3$	4342	1424	$R_{23}$	$R_{11}$	4910	1475	$R_{37}$	$R_{35}$	3301	910
$R_{11}$	$R_7$	4342	1111	$R_{23}$	$R_{13}$	4910	1053	$R_{38}$	$R_{40}$	1403	1403
$R_{11}$	$R_{20}$	4342	1808	$R_{24}$	$R_{21}$	2296	175	$R_{39}$	$R_{37}$	1434	1434
$R_{12}$	$R_{13}$	4195	1503	$R_{24}$	$R_{34}$	2296	970	$R_{40}$	$R_{41}$	3140	745
$R_{12}$	$R_{24}$	4195	753	$R_{25}$	$R_{15}$	2289	969	$R_{41}$	$R_{31}$	1971	809
$R_{13}$	$R_9$	3402	1009	$R_{25}$	$R_{18}$	2289	1320	$R_{41}$	$R_{33}$	1971	1162
$R_{14}$	$R_{11}$	4606	1475	$R_{26}$	$R_{28}$	2300	1192	$R_{42}$	$R_{39}$	3295	896
$R_{14}$	$R_{24}$	4606	753	$R_{26}$	$R_{36}$	2300	1109				
$R_{15}$	$R_1$	4712	853	$R_{27}$	$R_{25}$	2011	903				

Fonte: Amraee (2012).

### 5.2.6 Considerações

Para que os resultados estejam compatíveis com os reportados na literatura, é necessário considerar os mesmos valores das correntes de falha, mesmas topologias e restrições em relação aos parâmetros dos relés. Sendo assim, a Tabela 5.12 contém um resumo das considerações realizadas em relação aos ajustes dos relés para cada sistema elétrico utilizado.

**Tabela 5.12:** Resumo das considerações dos ajustes dos relés para cada sistema elétrico utilizado neste trabalho.

	3	6	8	9	15
	barras	barras	barras	barras	barras
Limites de $PS$ (A)	1,5 a 5	1,25 a 1,5	0,5 a 2,5	Eq. (5.1)	0,5 a 2,5
Passos de $PS$ (A)	0,5	Contínuos	0,5, 0,6, 0,8, 1,0, 1,5, 2,0 e 2,5	Contínuos	0,5
Limites de $Dial$	0,1 a 1,1	0,05 a 1,1	0,1 a 1,1	0,025 a 1,2	0,1 a 1,1
Passos de $Dial$			Contínuos		
Tipos de curva			Inversa (IEC)		
$\Delta T_{rele-rele}$ (s)	0,20	0,20	0,30	0,20	0,20
Limite de $T^{min}$ (s)	Não	0,05	Não	0,20	Não
Limite de $T^{max}$ (s)	Não	1,00	Não	Não	Não

### 5.3 Síntese do Capítulo

Neste capítulo, foram apresentados os sistemas elétricos utilizados para validar as metodologias de coordenação apresentadas no Capítulo 4. São utilizados dois sistemas radiais e cinco malhados. Estes são bem conhecidos na literatura, e suas topologias, características dos relés e os níveis de curto-circuito são padronizados. Isso com objetivo de realizar uma comparação clara entre as metodologias implementadas e as reportadas na literatura. No próximo capítulo, as técnicas apresentadas no Capítulo 4 são implementadas nos sistemas elétricos expostos neste capítulo.

## 6 Resultados

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos com as metodologias apresentadas no Capítulo 4 nos sistemas elétricos apresentados no Capítulo 5. As análises são realizadas para os relés de fase, porém estas podem ser estendidas para os de neutro. Para os sistemas elétricos padronizados de 3, 6, 8, 9 e 15 barras, os resultados são confrontados com os reportados na literatura que utilizam as mesmas condições, tais como:

- Topologia;
- FO;
- Níveis de correntes de falha vistas pelos relés;
- Valores mínimos e máximos dos tempos de atuação dos relés quando estes atuam como proteção primária;
- RTC;
- Passos de *PS*;
- Tamanho do passo de *Dial*<sup>1</sup>;
- Limites máximos e mínimos de *PS* e *Dial*;
- Curvas características dos relés.

As simulações foram realizadas em um computador com processador Intel<sup>®</sup> Core<sup>™</sup> i5 CPU@3,5GHz com 16GB de RAM<sup>2</sup> no sistema operacional *Windows* 10 64 bits. Os resolvedores utilizados para solucionar os problemas de PL e PLI são o *cplexlp* e *cplexmilp*, respectivamente, ambos do CPLEX<sup>®</sup>, no ambiente do MATLAB<sup>®</sup>.

---

<sup>1</sup>Quando os *Dials* são tratados como contínuos, suas representações são truncadas após o quarto dígito depois da vírgula.

<sup>2</sup>*Random-access memory*.



$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix}
 -4,010 & 3,754 & 0 & 0 & 0 \\
 -2,368 & 3,029 & 0 & 0 & 0 \\
 -8,791 & 0 & 3,465 & 0 & 0 \\
 -2,367 & 0 & 2,302 & 0 & 0 \\
 0 & -7,994 & 0 & 6,347 & 0 \\
 0 & -3,476 & 0 & 1,597 & 0 \\
 0 & 0 & -6,124 & 0 & 5,157 \\
 0 & 0 & -3,226 & 0 & 0,669 \\
 -2,810 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -1,438 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -3,754 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -3,029 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -3,465 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -2,301 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -6,347 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -1,597 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -5,157 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -0,669 \\
 2,810 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1,438 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 3,754 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 3,029 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 3,465 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 2,301 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 6,347 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1,597 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 5,156 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0,669
 \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

Os dados de saída do problema de otimização são os valores ótimos de *Dial*, apresentados na Tabela 6.1. Estes valores fornecem os menores tempos de atuação possíveis quando os RSs atuam como proteção primária. A somatória desses tempos (FO) é de 4,9248 segundos.

**Tabela 6.1:** Valores de FO e *Dials* ótimos do sistema I.

FO (s)	<i>Dial</i> <sub>1</sub>	<i>Dial</i> <sub>2</sub>	<i>Dial</i> <sub>3</sub>	<i>Dial</i> <sub>4</sub>	<i>Dial</i> <sub>5</sub>
4,9248	0,3750	0,1610	0,1495	0,1000	0,1000

Os tempos de atuação dos relés são apresentados na Tabela 6.2. Sendo que,  $R_{pri.}$  e  $R_{ret.}$  são os relés de proteção primária e retaguarda, respectivamente.  $I_{cc_{pri}}$  é a corrente de curto-circuito na zona de proteção primária.  $T_{pri.}$  corresponde ao tempo de atuação de  $R_{pri.}$ .  $T_{ret.}$  é o tempo de atuação de  $R_{ret.}$ .  $\Delta T$  é a diferença entre  $T_{ret.}$  e  $T_{pri.}$ . As diferenças entre os tempos de atuação das proteções de retaguarda e primária são maiores ou iguais à  $\Delta T_{rele-rele}$ , indicando que o sistema está coordenado de forma seletiva. Na Tabela 6.2, é evidenciada apenas  $I_{cc_{pri.}}$ , pois em sistemas radiais os dispositivos de proteção primária e retaguarda são sensibilizados pelos mesmos níveis de correntes de curto-circuito. Os tempos de

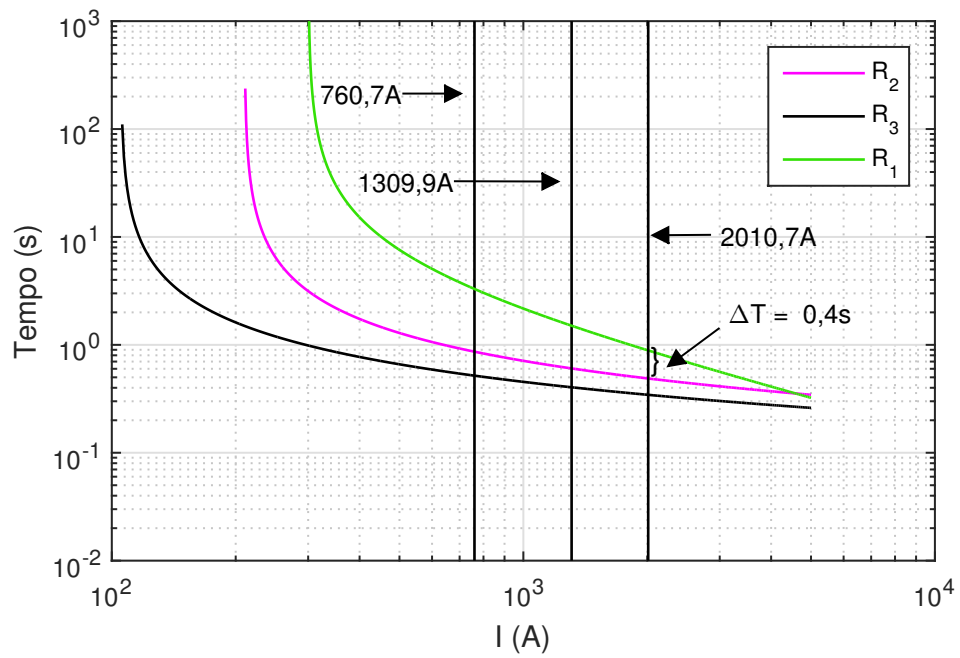


atuação ( $T_{pri.}$ ) estão dentro dos limites estabelecidos, pois são maiores que  $T^{min}$  e menores que  $T^{max}$ .

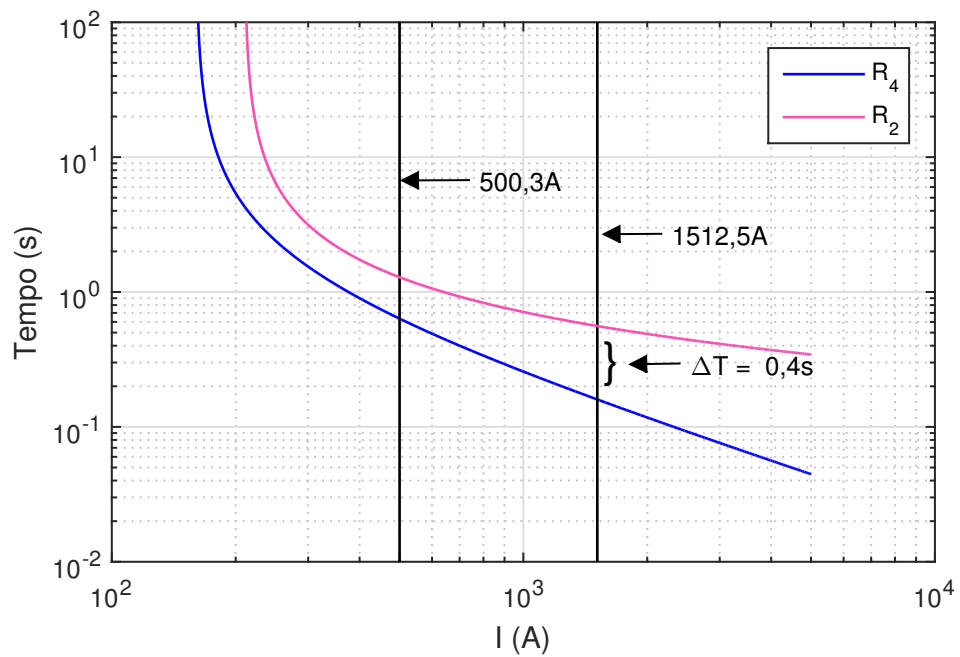
**Tabela 6.2:** Tempos de atuação dos relés para o sistema I, considerando *Dials* contínuos.

$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$I_{CC_{pri.}}$ (A)	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)
$R_1$	-	1741,3	1,0537	-	-
$R_1$	-	3115,0	0,5395	-	-
$R_2$	$R_1$	1309,9	0,6045	1,5038	0,8993
$R_2$	$R_1$	2010,7	0,4878	0,8878	0,4000
$R_3$	$R_1$	760,7	0,5181	3,2965	2,7784
$R_3$	$R_1$	2010,7	0,3442	0,8878	0,5436
$R_4$	$R_2$	500,3	0,6347	1,2872	0,6525
$R_4$	$R_2$	1512,5	0,1597	0,5597	0,4000
$R_5$	$R_3$	325,1	0,5157	0,9157	0,4000
$R_5$	$R_3$	878,4	0,0669	0,4823	0,4154

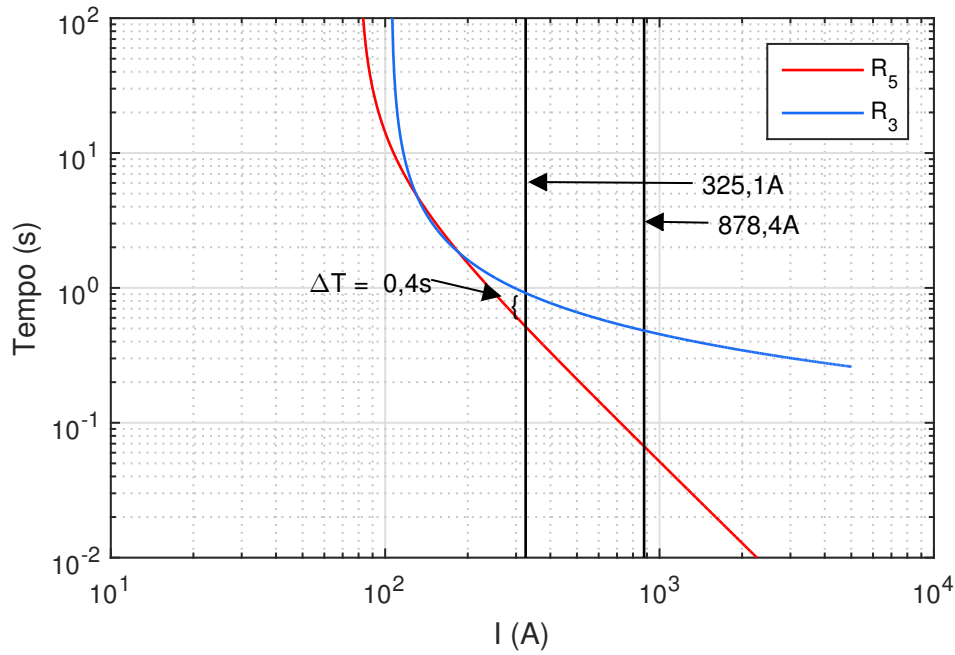
Os coordenogramas das proteções são apresentados nas Figuras 6.1 a 6.3. Por meio desses gráficos, verifica-se que as diferenças entre os tempos de atuação dos dispositivos de proteção primária e retaguarda são os menores possíveis, sendo limitados por  $\Delta T_{rele-rele}$ . Assim, quaisquer valores de *Dial* menores do que os apresentados na Tabela 6.1, resultam em perda da seletividade. Nas Figuras 6.1 e 6.2, os níveis de curtos-circuitos máximos ocasionam os intervalos críticos de coordenação. Ou seja, esses valores ocasionam as menores diferenças entre os tempos de atuação dos relés de proteção primária e retaguarda. De maneira oposta, na Figura 6.3, esse intervalo aconteceu para a corrente de curto-circuito mínima. Caso fossem considerados apenas os níveis máximos de falha, a seletividade não estaria garantida para todos os níveis de falha previstos.

**Figura 6.1:** Coordenograma para o  $R_1$  (Retaguarda). Sistema I, PL.

Fonte: O próprio autor.

**Figura 6.2:** Coordenograma para o  $R_2$  (Retaguarda). Sistema I, PL.

Fonte: O próprio autor.

**Figura 6.3:** Coordenograma para o  $R_3$  (Retaguada). Sistema I, PL.

Fonte: O próprio autor.

### 6.1.2 Sistema II

A solução encontrada ao solucionar o PL (*Dials* ótimos) para o sistema II é apresentada na Tabela 6.3. Como os *Dials* são tratados como variáveis contínuas, sua representação é truncada em quatro casas decimais após a vírgula. Os tempos de atuação dos relés para cada falha são apresentados na Tabela 6.4. O sistema encontra-se coordenado pois todos os  $\Delta T$  são superiores a  $\Delta T_{rele-rele}$ . Os intervalos críticos de coordenação ocorrem para os níveis de curto-circuito máximos. Neste caso, caso fossem consideradas apenas os valores de  $I_{cc_{max}}$ , o sistema apresentaria os mesmos ajustes de *Dial*. Todos os tempos de atuação das proteções primárias encontram-se dentro dos limites estabelecidos, pois são maiores que  $T^{min}$  e menores que  $T^{max}$ .

**Tabela 6.3:** Valores de FO e *Dials* ótimos do sistema II.

FO (s)	<i>Dial</i> <sub>1</sub>	<i>Dial</i> <sub>2</sub>	<i>Dial</i> <sub>3</sub>	<i>Dial</i> <sub>4</sub>	<i>Dial</i> <sub>5</sub>	<i>Dial</i> <sub>6</sub>	<i>Dial</i> <sub>7</sub>	<i>Dial</i> <sub>8</sub>	<i>Dial</i> <sub>9</sub>	<i>Dial</i> <sub>10</sub>
12,6639	0,3666	0,2072	0,3597	0,1000	0,1000	0,1000	0,3046	0,1839	0,1000	0,1000

Os coordenogramas das proteções para o sistema II são apresentados nas Figuras D.1 a D.5. Nestas figuras são evidenciados os tempos críticos de coordenação, sendo possível verificar que o sistema encontra-se seletivo.

**Tabela 6.4:** Tempos de atuação dos relés para o sistema II, *Dials* contínuos.

$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$I_{cc_{pri.}}$ (A)	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)
$R_1$	-	1741,3	1,5456	-	-
$R_1$	-	3115,0	1,1331	-	-
$R_2$	$R_1$	1309,9	0,6754	1,8772	1,2019
$R_2$	$R_1$	2010,7	0,5586	1,4185	0,8599
$R_3$	$R_1$	1030,6	1,4181	2,2887	0,8706
$R_3$	$R_1$	2010,7	1,0185	1,4185	0,4000
$R_4$	$R_2$	630,3	0,3322	1,0433	0,7112
$R_4$	$R_2$	1512,5	0,2312	0,6312	0,4000
$R_5$	$R_2$	599,1	0,3407	1,0840	0,7433
$R_5$	$R_2$	1512,5	0,2312	0,6312	0,4000
$R_6$	$R_3$	510,5	0,3200	2,3905	2,0705
$R_6$	$R_3$	1190,0	0,2274	1,3082	1,0808
$R_7$	$R_3$	823,1	1,0861	1,6315	0,5454
$R_7$	$R_3$	1190,0	0,9082	1,3082	0,4000
$R_8$	$R_7$	675,5	0,7320	1,2127	0,4807
$R_8$	$R_7$	950,4	0,6091	1,0091	0,4000
$R_9$	$R_8$	398,3	0,3792	1,0600	0,6808
$R_9$	$R_8$	780,1	0,2747	0,6747	0,4000
$R_{10}$	$R_8$	372,1	0,3766	1,1244	0,7478
$R_{10}$	$R_8$	780,1	0,2660	0,6747	0,4088

### 6.1.3 Discussões

Com a técnica de PL é possível solucionar o problema linearizado da coordenação, onde são computados os *Dials* ótimos para valores de *PSs* e os tipos de curvas fixos. Quando o problema de otimização é factível, os *Dials* fornecidos pela PL fornecem os tempos de atuação mínimos dos relés, sem violar restrições. Com o resolvidor *cplexlp*, a solução do problema de PL foi simplificada, bastando formulá-lo de acordo com as equações (4.1) a (4.4).

A desvantagem da PL é que o problema da coordenação deve ser linearizado. Assim, apenas os *Dials* são otimizados. A técnica de PL lida apenas com variáveis contínuas, assim sua aplicação é restrita a relés cujos passos de *Dial* são muito pequenos.

## 6.2 Programação Linear Inteira Mista

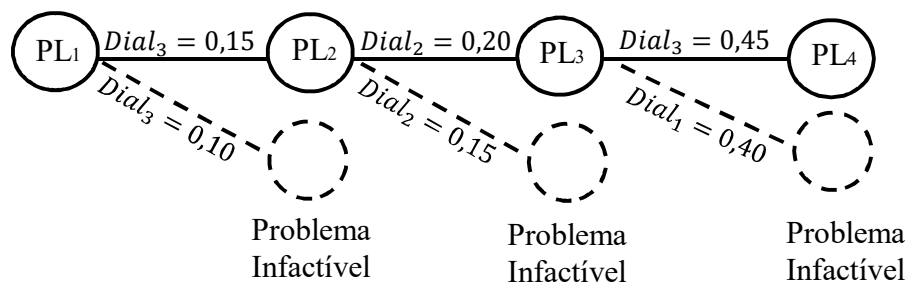
Nesta secção, é implementada a técnica de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) apresentada na Secção 4.2 nos sistemas I e II. Para estes, é considerado que os *Dials* podem variar desde 0,1 até 10 com passos de 0,05 para o sistema I, e com passos de 0,01 para o sistema II. Para solucionar o problema da coordenação utilizando PLIM, o seguinte procedimento deve ser realizado: passo 1) relaxe o problema de PLIM, isto significa considerar que os valores dos *Dials* são contínuos. Neste caso, o problema torna-se um PL, que é solucionado através

da técnica apresentada na Secção 6.1; passo 2) os relés são analisados de acordo com a sua enumeração, ou seja, os mais distantes da subestação são analisados primeiro; passo 3) caso o relé analisado possua ajuste de *Dial* fora dos limites permitidos, uma restrição de igualdade – relacionada ao valor de *Dial* arredondado para o próximo valor aceito pelo relé – é introduzida ao problema. Os passos 2 e 3 são realizados até que todos os relés sejam analisados.

### 6.2.1 Sistema I

Seguindo o procedimento descrito na Secção 4.2, deve-se começar a análise partindo da solução encontrada quando o problema é relaxado ( $PL_1$ ). Neste caso, esta solução corresponde à encontrada pela PL, apresentada na Tabela 6.1. Verifica-se que os *Dials* de  $R_4$  e  $R_5$  possuem valores dentro da faixa permitida (0,1 a 10, com passos de 0,05). O procedimento deve seguir com os outros relés. Neste caso, o seguinte relé é  $R_3$  que possui um *Dial* de 0,1495. Os valores de *Dial* mais próximos aceitos para este relé são 0,10 e 0,15, sendo escolhido o valor imediatamente superior: 0,15. Visto que o menor valor, 0,10, leva à infactibilidade, conforme é apresentado na Figura 6.4. É adicionada a restrição de igualdade  $Dial_3 = 0,15$  em  $PL_1$ , criando um novo problema:  $PL_2$ . Sua solução é apresentada na Tabela 6.5, sendo que os valores em negrito são referentes aos relés analisados a cada PL solucionado. Esta tabela apresenta os valores dos *Dials* e de FO a cada iteração do algoritmo. Verifica-se para  $PL_2$ , que os *Dials* dos relés  $R_1$  e  $R_2$  encontram-se fora da faixa permitida pelos relés.

**Figura 6.4:** Adição das restrições e comportamento iterativo da técnica de PLIM.



Fonte: O próprio autor.

**Tabela 6.5:** Valores de *Dials* e FO para cada PL solucionado, sistema I.

	PL <sub>1</sub>	PL <sub>2</sub>	PL <sub>3</sub>	PL <sub>4</sub>
<i>Dial</i> <sub>1</sub>	0,3750	0,3750	<b>0,4249</b>	0,4500
<i>Dial</i> <sub>2</sub>	0,1610	<b>0,1610</b>	0,2000	0,2000
<i>Dial</i> <sub>3</sub>	<b>0,1495</b>	0,1500	0,1500	0,1500
<i>Dial</i> <sub>4</sub>	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000
<i>Dial</i> <sub>5</sub>	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000
FO (s)	4,9248	4,9276	5,4038	5,5107

Em seguida, é analisado o *Dial* do relé  $R_2$  (0,1610), sendo escolhido o próximo valor permitido pelo relé, no caso 0,20. É adicionada a restrição de igualdade  $Dial_2 = 0,20$  em PL<sub>2</sub>, formando PL<sub>3</sub>. Pela Tabela 6.5, verifica-se que na solução deste PL apenas *Dial*<sub>1</sub> está fora da faixa. Assim,  $R_1$  é analisado ( $Dial_1 = 0,4249$ ). O próximo valor aceito pelo relé é de 0,45. Uma restrição de igualdade ( $Dial_1 = 0,45$ ) é adicionada em PL<sub>3</sub>, formando PL<sub>4</sub>. Ao solucionar o PL<sub>4</sub>, todos os *Dials* encontram-se dentro da faixa permitida pelos relés. Nesta etapa, todos os relés foram analisados. Em (6.7) e (6.8) são apresentados os valores de  $\mathbf{A}_{eq}$  e  $\mathbf{b}_{eq}$ , respectivamente, relativos ao final do processo iterativo.

$$\mathbf{A}_{eq} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

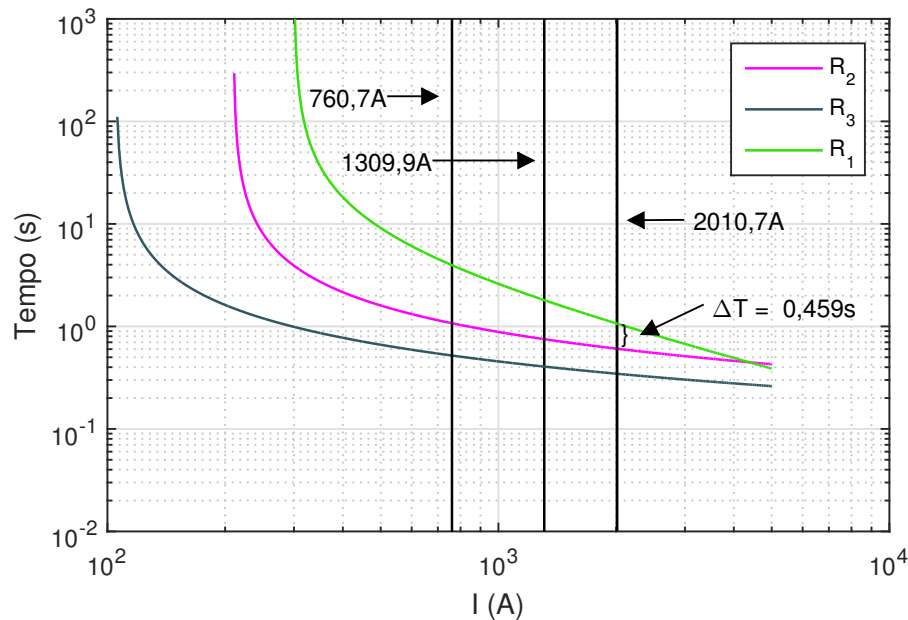
$$\mathbf{b}_{eq} = [0,15 \quad 0,20 \quad 0,45]^T \quad (6.8)$$

A cada restrição inclusa no problema, houve um incremento na FO (4,9248 para 5,5107 segundos) devido aos maiores valores de *Dials*, conforme é verificado na Tabela 6.5. Os tempos de atuação dos relés são apresentados na Tabela 6.6. Verifica-se que os relés estão coordenados de forma seletiva, e os tempos de atuação dos relés de proteção primária estão dentro dos limites de 0,05 ( $T^{min}$ ) a 2,0 ( $T^{max}$ ) segundos.

Os coordenogramas dos relés são apresentados nas Figuras 6.5, 6.6 e 6.7. Nestas figuras são evidenciados os intervalos críticos de coordenação e os níveis de falha dentro das zonas de proteção de cada relé de proteção primária. Neste caso, a seletividade foi garantida para dois níveis de falha (máximo e mínimo), para cada par de relés de proteção primária-retaguarda. Nas Figuras 6.5, 6.6 e 6.7, os intervalos de coordenação críticos são todos superiores a  $\Delta T_{rele-rele}$ , em virtude dos passos discretos de *Dial*. Nas Figuras 6.5 e 6.6, esses intervalos ocorreram para as correntes máximas de curto-circuito. De maneira oposta, na Figura 6.7, esse intervalo ocorre para a corrente de curto-circuito mínima.

**Tabela 6.6:** Tempos de atuação dos relés para o sistema I, *Dials* discretos.

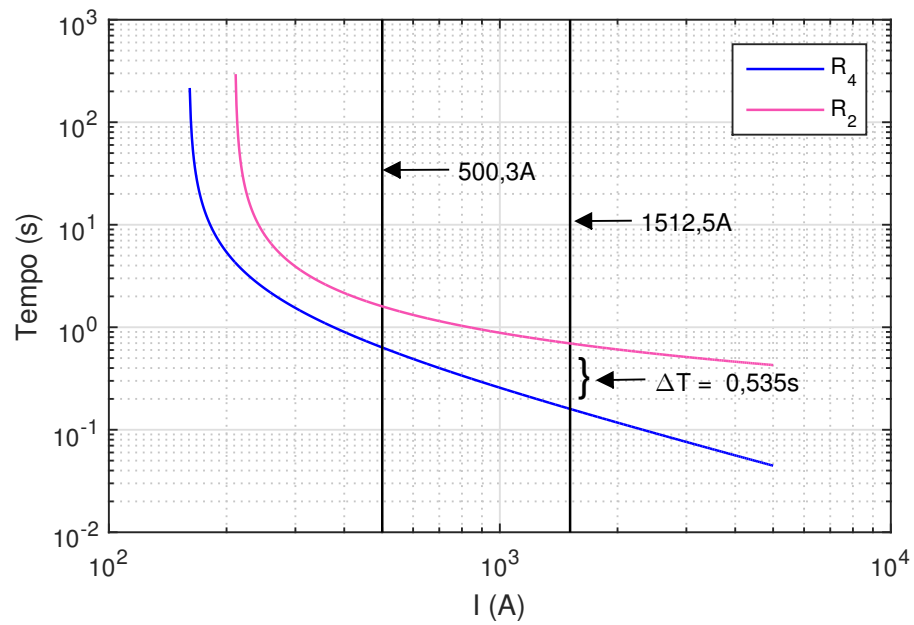
$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$I_{CC_{pri}}$ (A)	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)
$R_1$	-	1741,3	1,2645	-	-
$R_1$	-	3115,0	0,6474	-	-
$R_2$	$R_1$	1309,9	0,7509	1,8046	1,0538
$R_2$	$R_1$	2010,7	0,6058	1,0654	0,4595
$R_3$	$R_1$	760,7	0,5198	3,9559	3,4361
$R_3$	$R_1$	2010,7	0,3453	1,0654	0,7201
$R_4$	$R_2$	500,3	0,6347	1,5988	0,9640
$R_4$	$R_2$	1512,5	0,1597	0,6952	0,5355
$R_5$	$R_3$	325,1	0,5157	0,9186	0,4029
$R_5$	$R_3$	878,4	0,0669	0,4839	0,4170

**Figura 6.5:** Coordenograma para o  $R_1$  (Retaguarda). Sistema I, PLIM.

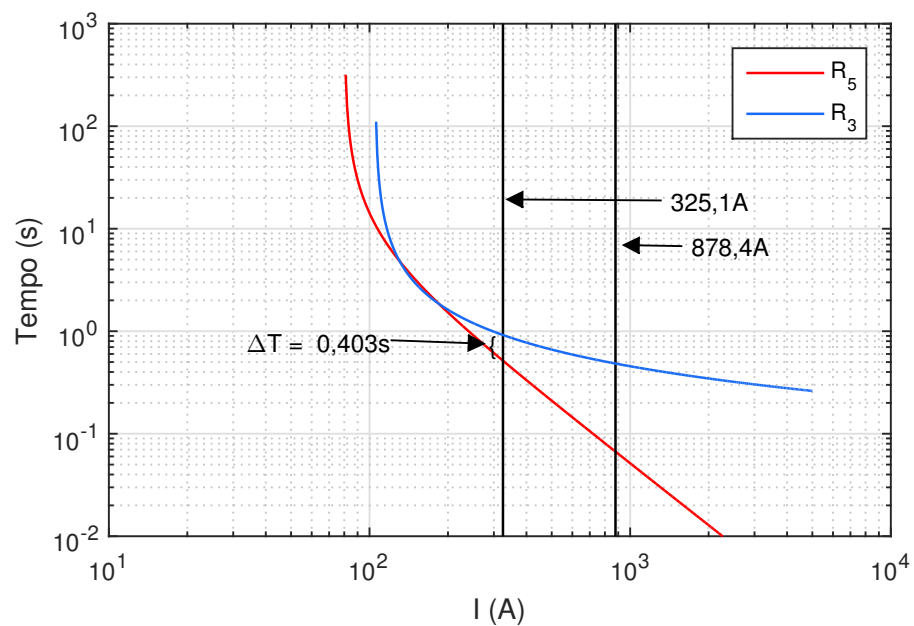
Fonte: O próprio autor.

### 6.2.2 Sistema II

Para este sistema, é aplicado o mesmo procedimento utilizado no sistema I. Neste caso, os valores dos *Dials* do problema relaxado ( $PL_1$ ) são os apresentados na Tabela 6.3. Nota-se que os relés  $R_4$ ,  $R_5$ ,  $R_6$ ,  $R_9$  e  $R_{10}$  possuem ajustes de *Dial* dentro da faixa permitida de 0,1 a 10, com passos de 0,01. Assim, a análise parte do relé  $R_8$ . Os *Dials* e os valores de FO, a cada iteração, são apresentados na Tabela 6.7. Os valores em negrito estão relacionados com os relés analisados a cada iteração do algoritmo. Os *Dial* são maiores ou iguais aos apresentados na Tabela 6.3, o que explica o aumento do valor da FO.

**Figura 6.6:** Coordenograma para o  $R_2$  (Retaguarda). Sistema I, PLIM.

Fonte: O próprio autor.

**Figura 6.7:** Coordenograma para o  $R_3$  (Retaguarda). Sistema I, PLIM.

Fonte: O próprio autor.



**Tabela 6.7:** Valores de *Dials* e FO para cada PL solucionado, sistema II.

	PL <sub>1</sub>	PL <sub>2</sub>	PL <sub>3</sub>	PL <sub>4</sub>	PL <sub>5</sub>	PL <sub>6</sub>
<i>Dial</i> <sub>1</sub>	0,3666	0,3703	0,3759	0,3815	<b>0,3815</b>	0,3900
<i>Dial</i> <sub>2</sub>	0,2072	0,2072	0,2072	<b>0,2072</b>	0,2100	0,2100
<i>Dial</i> <sub>3</sub>	0,3597	0,3648	<b>0,3724</b>	0,3800	0,3800	0,3800
<i>Dial</i> <sub>4</sub>	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000
<i>Dial</i> <sub>5</sub>	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000
<i>Dial</i> <sub>6</sub>	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000
<i>Dial</i> <sub>7</sub>	0,3046	<b>0,3107</b>	0,3200	0,3200	0,3200	0,3200
<i>Dial</i> <sub>8</sub>	<b>0,1839</b>	0,1900	0,1900	0,1900	0,1900	0,1900
<i>Dial</i> <sub>9</sub>	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000
<i>Dial</i> <sub>10</sub>	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000
FO (s)	12,6639	12,8099	12,9627	13,0552	13,0720	13,1345

Os tempos de atuação dos relés são apresentados na Tabela 6.8. Estes são maiores ou iguais aos apresentados na Tabela 6.4, devido aos valores de *Dial* mais elevados. Por causa do arredondamento dos *Dials*, os valores de  $\Delta T$  são todos superiores a  $\Delta T_{rele-rele}$ , e os tempos de atuação estão dentro dos limites considerados de 0,05 a 2 segundos. Da mesma forma que na Tabela 6.4, os intervalos críticos de coordenação apresentados na Tabela 6.8 ocorreram para os níveis máximos de falha.

**Tabela 6.8:** Tempos de atuação dos relés para o sistema II, *Dials* discretos.

$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$I_{cc_{pri.}}$ (A)
$R_1$	-	1,6442	-	-	1741,3
$R_1$	-	1,2054	-	-	3115,0
$R_2$	$R_1$	0,6846	1,9969	1,3123	1309,9
$R_2$	$R_1$	0,5662	1,5089	0,9427	2010,7
$R_3$	$R_1$	1,4980	2,4346	0,9366	1030,6
$R_3$	$R_1$	1,0758	1,5089	0,4331	2010,7
$R_4$	$R_2$	0,3322	1,0576	0,7254	630,3
$R_4$	$R_2$	0,2312	0,6398	0,4086	1512,5
$R_5$	$R_2$	0,3407	1,0988	0,7581	599,1
$R_5$	$R_2$	0,2312	0,6398	0,4086	1512,5
$R_6$	$R_3$	0,3200	2,5252	2,2052	510,5
$R_6$	$R_3$	0,2274	1,3819	1,1545	1190,0
$R_7$	$R_3$	1,1410	1,7234	0,5824	823,1
$R_7$	$R_3$	0,9541	1,3819	0,4278	1190,0
$R_8$	$R_7$	0,7565	1,2741	0,5176	675,5
$R_8$	$R_7$	0,6295	1,0602	0,4307	950,4
$R_9$	$R_8$	0,3792	1,0954	0,7162	398,3
$R_9$	$R_8$	0,2747	0,6973	0,4225	780,1
$R_{10}$	$R_8$	0,3766	1,1620	0,7854	372,1
$R_{10}$	$R_8$	0,2660	0,6973	0,4313	780,1

Os coordenogramas das proteções para o sistema II são apresentados nas Figuras D.6 a D.10. Nestas figuras são evidenciados os tempos críticos de coordenação, sendo possível verificar que o sistema encontra-se seletivo.

### 6.2.3 Considerações

Caso o problema fosse tratado como contínuo, os valores de *Dial* dos relés do problema relaxado seriam arredondados para os próximos valores permitidos. A Tabela 6.9 mostra o comparativo entre os valores de *Dial* do problema relaxado, arredondado e o fornecido pelo algoritmo de PLIM. Em ambos os sistemas, verifica-se que caso o problema fosse tratado como contínuo e os *Dials* fossem arredondados no final, a solução seria infactível. Ou seja, haveria perda de seletividade. Assim, fica demonstrado a importância de tratar o problema da coordenação de forma discreta, quando os relés não aceitam ajustes contínuos.

**Tabela 6.9:** Factibilidade das soluções do problema da coordenação nos sistemas I e II.

	Sistema I			Sistema II			
	Relaxado	Arredondado	PLIM	Relaxado	Arredondado	PLIM	
<i>Dial</i> <sub>1</sub>	0,3750	0,40	0,45	<i>Dial</i> <sub>1</sub>	0,3666	0,37	0,39
<i>Dial</i> <sub>2</sub>	0,1610	0,20	0,20	<i>Dial</i> <sub>2</sub>	0,2072	0,21	0,21
<i>Dial</i> <sub>3</sub>	0,1495	0,15	0,15	<i>Dial</i> <sub>3</sub>	0,3597	0,36	0,38
<i>Dial</i> <sub>4</sub>	0,1000	0,10	0,10	<i>Dial</i> <sub>4</sub>	0,1000	0,10	0,10
<i>Dial</i> <sub>5</sub>	0,1000	0,10	0,10	<i>Dial</i> <sub>5</sub>	0,1000	0,10	0,10
				<i>Dial</i> <sub>6</sub>	0,1000	0,10	0,10
				<i>Dial</i> <sub>7</sub>	0,3046	0,31	0,32
				<i>Dial</i> <sub>8</sub>	0,1839	0,19	0,19
				<i>Dial</i> <sub>9</sub>	0,1000	0,10	0,10
				<i>Dial</i> <sub>10</sub>	0,1000	0,10	0,10
Factível?	Sim	Não	Sim	Sim	Não	Sim	

### 6.2.4 Discussões

A metodologia proposta soluciona o problema da coordenação entre RSs não direcionais considerando *Dials* discretos, sendo uma abordagem mais interessante do que a PL em sistemas radiais. Seu desempenho computacional está diretamente relacionado com o método de solução de PL (pontos interiores ou Simplex) utilizado, sendo que no máximo são solucionados  $m$  problemas de PL.

Uma desvantagem desta técnica é que sua aplicação é restrita a sistemas radiais, podendo ser aplicadas somente na coordenação de RSs não direcionais, devido à lógica nas quais as restrições dos passos de *Dial* são adicionadas ao problema. Durante o processo iterativo, as restrições referentes aos arredondamentos de *Dials* são adicionadas primeiramente nos relés de proteção primária. Nos sistemas radiais, essas restrições impactam apenas nos ajustes dos relés de retaguarda. Outra desvantagem desta metodologia é que apenas os *Dials* são

tratados como variáveis de decisão, visto que os *PSs* e os tipos de curva são previamente estabelecidos.

## 6.3 Algoritmo de Busca por Enumeração

Nesta seção, o Algoritmo de Busca por Enumeração (ABE), apresentado na Secção 4.3, é implementado nos sistemas I e II. Primeiramente, os *Dials* dos relés são inicializados com os *Dials* mínimos. Posteriormente, são computados os valores de *Dials* necessários para que as restrições referentes ao tempos mínimos de atuação das proteções sejam satisfeitas. Em seguida, os relés são analisados de acordo com a sua enumeração, sendo que os mais afastados da subestação são analisados primeiro. Para cada relé analisado, é computado o menor valor de *Dial* da proteção de retaguarda necessário para que o par de relés de proteção primária-retaguarda estejam coordenados de forma seletiva. Caso este valor de *Dial* seja maior que o atual da proteção de retaguarda, este é atualizado. O processo continua até que todos os relés sejam analisados.

### 6.3.1 Sistemas I e II

Ao aplicar o ABE apresentado na Secção 4.3 para solucionar o problema da ordenação nos sistemas I e II, foram encontrados os mesmos valores de *Dial* e FO que os obtidos pelas técnicas PL (Secção 6.2) e PLIM (Secção 6.3). Os tempos computacionais demandados pelo ABE foram confrontados com as técnicas PL e PLIM utilizando dois resolvidores de PL: *linprog* (MALTAB<sup>®</sup>) e *cplexlp* (CPLEX<sup>®</sup>). Sendo que o CPLEX<sup>®</sup> é considerado um resolvidor estado-da-arte (PATIDAR, 2007).

Os resultados deste comparativo são apresentados nas Tabelas 6.10 e 6.11 relacionado com os sistemas I e II, respectivamente. Em ambos sistemas, o *cplexlp* apresentou desempenho superior ao *linprog*. A escolha de um resolvidor eficiente é fundamental para que as técnicas baseadas em PL sejam executadas de forma rápida, visto que os tempos de execução foram reduzidos significativamente ao utilizar o *cplexlp*. Entretanto, independente do resolvidor utilizado, o ABE foi mais rápido. Sua performance fica mais evidente quando são considerados *Dials* discretos, chegando a ser até 90 vezes mais rápido que a técnica de PLIM com o resolvidor *cplexlp*.

**Tabela 6.10:** Comparativo dos tempos computacionais demandados entre as técnicas de solução para o sistema I.

	<i>Dial</i> contínuo			<i>Dial</i> discreto		
	PL		ABE	PLIM		ABE
	<i>linprog</i>	<i>cplexlp</i>		<i>linprog</i>	<i>cplexlp</i>	
Tempo (ms)	6,4453	1,5675	0,1795	26,8795	3,8792	0,1967

**Tabela 6.11:** Comparativo dos tempos computacionais demandados entre as técnicas de solução para o sistema II.

	<i>Dial</i> contínuo			<i>Dial</i> discreto		
	PL		ABE	PLIM		ABE
	<i>linprog</i>	<i>cplexlp</i>		<i>linprog</i>	<i>cplexlp</i>	
Tempo (ms)	8,1291	2,6290	0,2876	324,0340	38,7320	0,4230

Nas Tabelas 6.12 e 6.13, é apresentado o comportamento do processo iterativo do ABE para *Dials* contínuos e discretos no sistema I, respectivamente. Nestas tabelas, são apresentados os valores das variáveis de  $Dial_{aux}$  a cada iteração, sendo que estas variáveis estão relacionadas com o valor de *Dial* necessário para que a proteção de retaguarda esteja coordenado de forma seletiva com a proteção primária. Os valores de *Dial* destacados em negrito correspondem aos escolhidos pelo algoritmo. Como  $R_4$  e  $R_5$  não atuam como proteção de retaguarda, os seus valores de *Dial* são os menores ajustes que satisfazem as restrições relacionadas de  $T^{min}$  e  $Dial_{min}$ , por isso foram suprimidos destas tabelas. Na Tabela 6.12, os *Dials* escolhidos correspondem aos maiores valores de  $Dial_{aux}$ , para o respectivos relés de proteção de retaguarda. Na Tabela 6.13, os *Dials* escolhidos correspondem aos maiores valores de  $Dial_{aux}$ , arredondados para os próximos valores aceitos pelos relés de proteção de retaguarda.

**Tabela 6.12:** Evolução dos valores de *Dial*, para cada relé de proteção de retaguarda, ao longo do processo iterativo do ABE, considerando *Dials* contínuos (sistema I).

Iteração	$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$Dial_{aux}$	<i>Dial</i>	$I_{cc_{pri}}$ (A)
1	$R_5$	$R_3$	0,1495	<b><math>Dial_3 = 0, 1495</math></b>	325,1
2	$R_5$	$R_3$	0,1447	$Dial_3 = 0, 1495$	878,4
3	$R_4$	$R_2$	0,1294	$Dial_2 = 0, 1294$	500,3
4	$R_4$	$R_2$	0,1610	<b><math>Dial_2 = 0, 1610</math></b>	1512,5
5	$R_3$	$R_1$	0,1044	$Dial_1 = 0, 1432$	760,7
6	$R_3$	$R_1$	0,3143	$Dial_1 = 0, 3143$	2010,7
7	$R_2$	$R_1$	0,2505	$Dial_1 = 0, 3143$	1309,9
8	$R_2$	$R_1$	0,3750	<b><math>Dial_1 = 0, 3750</math></b>	2010,7

**Tabela 6.13:** Evolução dos valores de *Dial*, para cada relé de proteção de retaguarda, ao longo do processo iterativo do ABE, considerando *Dials* discretos (sistema I).

Iteração	$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$Dial_{aux}$	$Dial$	$Icc_{pri}$ (A)
1	$R_5$	$R_3$	0,1495	<b><math>Dial_3 = 0, 15</math></b>	325,1
2	$R_5$	$R_3$	0,1447	$Dial_3 = 0, 15$	878,4
3	$R_4$	$R_2$	0,1294	$Dial_2 = 0, 15$	500,3
4	$R_4$	$R_2$	0,1610	<b><math>Dial_2 = 0, 20</math></b>	1512,5
5	$R_3$	$R_1$	0,1046	$Dial_1 = 0, 15$	760,7
6	$R_3$	$R_1$	0,3148	$Dial_1 = 0, 35$	2010,7
7	$R_2$	$R_1$	0,2870	$Dial_1 = 0, 35$	1309,9
8	$R_2$	$R_1$	0,4249	<b><math>Dial_1 = 0, 45</math></b>	2010,7

### 6.3.2 Discussões

O ABE mostrou-se capaz de solucionar o problema da coordenação de RSs, em sistemas radiais, com a capacidade de considerar os passos discretos de *Dial*. Neste caso, as soluções encontradas pela metodologia são de boa qualidade, sendo comparadas à PL e PLIM. Entretanto, não é possível garantir que a metodologia sempre convergirá para a solução ótima (ZAPATA; MEJÍA, 2003). O ABE apresenta algumas vantagens em relação às técnicas baseadas em PL: 1) pode considerar os *Dials* como variáveis discretas; 2) não depende de resolvidores comerciais como o CPLEX<sup>®</sup>, Matlab<sup>®</sup> etc.; 3) é mais rápido; e 4) possui implementação computacional relativamente simples.

A principal desvantagem e limitação do ABE é que sua aplicação é restrita a RSs não direcionais, em sistemas radiais. Outra desvantagem é que apenas os *Dials* são considerados como variáveis de decisão.

## 6.4 Algoritmo Genético de Chu-Beasley - Algoritmo de Busca por Enumeração

Nesta secção, é implementada a metodologia híbrida intitulada de Algoritmo Genético de Chu-Beasley - Algoritmo de Busca por Enumeração (AGCB-ABE) apresentado na Secção 4.4 nos sistemas I e II.

Neste trabalho, é analisado o comportamento da FO ao considerar a adição de *PSs*, *Dials*, tipos de curvas e tipos de relés como variáveis de decisão no problema de otimização. Assim, é verificado o comportamento da FO e do esforço computacional a cada variável de decisão considerada.

### 6.4.1 Sistemas I e II

Para a solução da coordenação nestes sistemas, são considerados três casos: I, II e III. No caso I, *PSs* e *Dials* são variáveis de decisão. No caso II, *PSs*, *Dials* e tipos de curvas são variáveis de decisão. No caso III, *PSs*, *Dials* e tipos de curvas e tipos de relés são variáveis de decisão. O AGCB-ABE foi executado 100 vezes para cada caso, e os valores mínimos, médios e máximos das FOs, quantidade de ABE executados, tempos computacionais e iterações são apresentados com objetivo de verificar a convergência do algoritmo em relação a populações iniciais distintas. Foram considerados passos de *Dial* de 0,05 e 0,01 para os sistemas I e II, respectivamente.

Os parâmetros do AGCB são escolhidos de acordo com a metodologia e os resultados apresentados no Apêndice F. Sendo que, os valores considerados para os sistemas I e II são expostos na Tabela 6.14. Os parâmetros dos relés e os valores de FO fornecidos pelo AGCB-ABE são apresentados nas Tabelas 6.15 e 6.16 para os sistemas I e II, respectivamente.

**Tabela 6.14:** Parâmetros do algoritmo genético para os sistemas I e II.

	Sistema I		Sistema II	
	$k_{pi}$	$\mu$ (%)	$k_{pi}$	$\mu$ (%)
Caso I	40	5	40	5
Caso II	40	10	80	5
Caso III	80	10	100	10

**Tabela 6.15:** Resultados do AGCB-ABE para o sistema I.

	Caso I				Caso II				Caso III			
	<i>PS(A)</i>	<i>Dial</i>	Relé	Curva	<i>PS(A)</i>	<i>Dial</i>	Relé	Curva	<i>PS(A)</i>	<i>Dial</i>	Relé	Curva
$R_1$	7,00	0,25	IEC	M.I	7,75	0,20	IEC	M.I	6,25	3,15	IAC	E.I
$R_2$	4,00	0,15	IEC	I	5,50	0,15	IEC	M.I	4,00	2,50	US	E.I
$R_3$	5,50	0,15	IEC	I	8,50	0,15	IEC	E.I	6,25	3,05	IAC	E.I
$R_4$	4,00	0,10	IEC	M.I	4,00	0,10	IEC	M.I	4,00	1,05	IAC	I.C
$R_5$	4,00	0,10	IEC	E.I	4,00	0,10	IEC	E.I	4,00	1,05	IAC	I.C
FO (s)	4,9511				4,6313				3,0712			

**Tabela 6.16:** Resultados do AGCB-ABE para o sistema II.

	Caso I				Caso II				Caso III			
	<i>PS(A)</i>	<i>Dial</i>	Relé	Curva	<i>PS(A)</i>	<i>Dial</i>	Relé	Curva	<i>PS(A)</i>	<i>Dial</i>	Relé	Curva
$R_1$	8,50	0,20	IEC	I	4,75	0,28	IEC	E.I	7,00	0,30	IEEE	E.I
$R_2$	9,25	0,13	IEC	I	4,00	0,53	IEC	E.I	7,75	0,13	IEC	M.I
$R_3$	9,25	0,21	IEC	I	9,25	0,14	IEC	M.I	5,50	0,75	IEEE	E.I
$R_4$	4,00	0,10	IEC	I	4,00	0,10	IEC	M.I	4,00	1,09	IAC	I.C
$R_5$	4,00	0,10	IEC	I	4,00	0,10	IEC	M.I	4,00	1,09	IAC	I.C
$R_6$	3,25	0,10	IEC	I	3,25	0,10	IEC	M.I	3,25	1,09	IAC	I.C
$R_7$	6,25	0,19	IEC	I	6,25	0,12	IEC	E.I	4,75	0,21	IEC	E.I
$R_8$	7,00	0,10	IEC	I	3,25	0,20	IEC	E.I	7,00	0,52	US	E.I
$R_9$	3,25	0,10	IEC	I	3,25	0,10	IEC	E.I	3,25	1,04	IAC	I.C
$R_{10}$	3,25	0,10	IEC	I	3,25	0,10	IEC	E.I	3,25	1,04	IAC	I.C
FO (s)	12,2149				7,6076				6,4901			

Para o sistema I, a adição de *PSs* como variáveis de decisão reduziu o valor de FO de 5, 5107 (Tabela 6.5) para 4, 9511 (Tabela 6.15) segundos, uma redução de 10,15%. Para o sistema II, a FO foi reduzida de 13, 1345 (Tabela 6.7) para 12, 2149 (Tabela 6.16) segundos, uma redução de 7,00%. Assim, é possível encontrar combinações de *PSs* e *Dials* que não violam nenhuma restrição e, ao mesmo tempo, melhoram a FO. Dessa forma, é mais interessante considerar os *PSs* como variáveis de decisão no problema de otimização do que computá-los por meio de alguma regra empírica.

A adição dos tipos de curvas como variáveis de decisão reduziu o valor de FO. Na Tabela 6.15, verifica-se que a FO passou de 4, 9511 para 4, 6313 segundos, resultando em uma redução de 6,46%. Na Tabela 6.16, verifica-se que a FO passou de 12, 2149 para 7, 6076 segundos, resultando em uma redução de 37,72%. A consideração dos tipos de curvas como variáveis de decisão mostrou-se interessante para obter esquemas de proteção ainda mais rápidos.

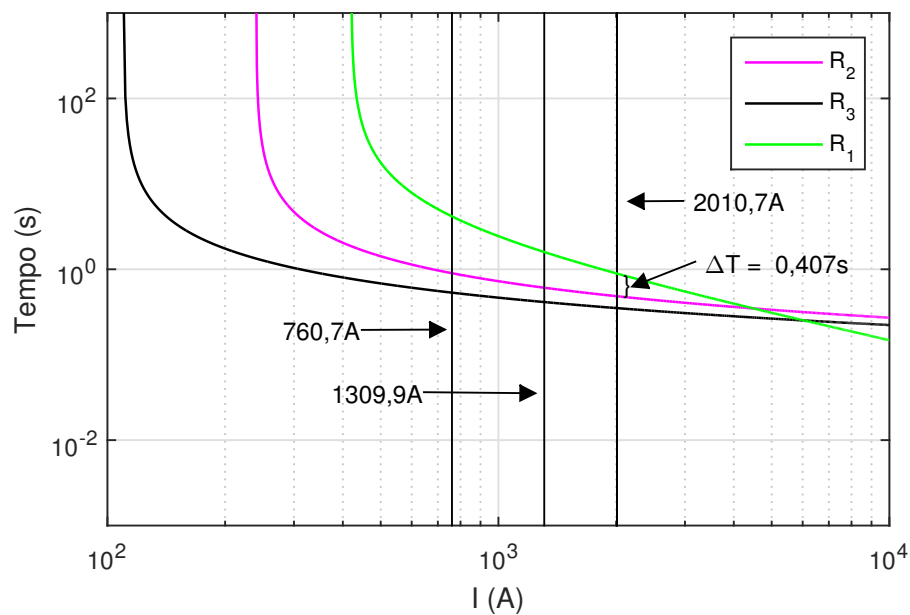
Ao adicionar os tipos dos relés como variáveis no problema de otimização, os valores de FOs foram reduzidos. No sistema I (Tabela 6.15), a FO é reduzida de 4, 6313 para 3, 0712 segundos, resultando em uma redução de 33,69% no valor da FO. No sistema II (Tabela 6.16), a FO é reduzida de 7, 6076 para 6, 4901 segundos, resultando em uma redução de 14,68%. Os tipos de curvas atuam somente nas constantes relacionadas às curvas características de cada relé. Ao variar os tipos de relés, diferentes equações referentes às curvas características são consideradas no problema de otimização, inserindo uma flexibilidade ainda maior nos esquemas de proteção. Os resultados mostram que esta flexibilidade reduziu os valores da FO em ambos os sistemas elétricos utilizados.

Os tempos de atuação dos RSs dos casos I, II e III para o sistema I são

apresentados nas Tabelas E.1, E.2 e E.3, respectivamente. Para o sistema II, os tempos de atuação dos casos I, II e III são apresentados nas Tabelas E.4, E.5 e E.6, respectivamente. Nessas tabelas os tempos de atuação das proteções primárias são todos maiores que 0,05 segundos e menores que 2 segundos, mostrando que as restrições sobre os tempos de atuação não foram violadas. O sistema encontra-se coordenado de forma seletiva pois todos os  $\Delta T$  são iguais ou maiores que 0,4 segundos.

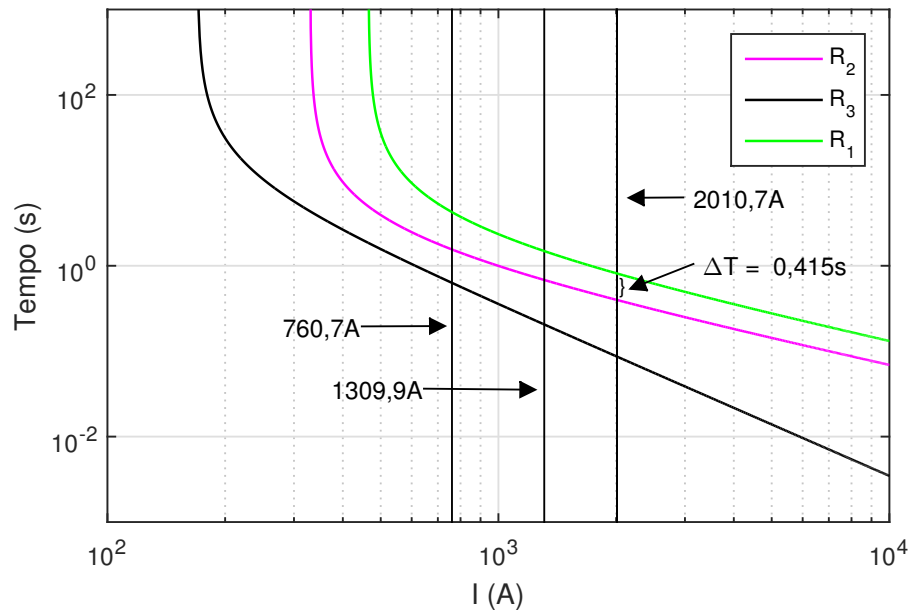
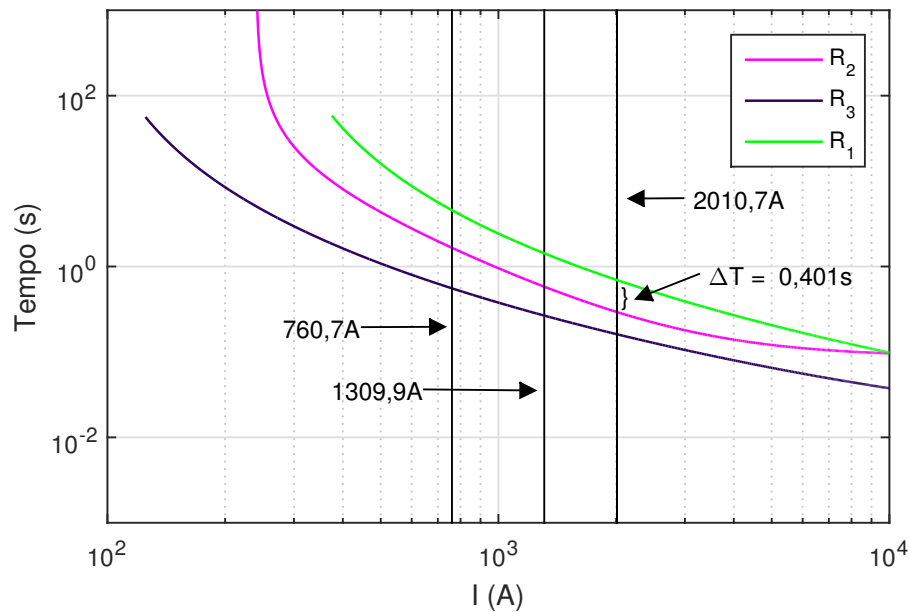
Os coordenogramas em que  $R_1$  é o dispositivo de proteção de retaguarda dos casos I, II e III, no sistema I, são apresentados nas Figuras 6.8, 6.9 e 6.10, respectivamente. Os demais coordenogramas para este sistema são apresentados nas Figuras D.11 a D.16. Em todos os coordenogramas, verifica-se que o sistema encontra-se coordenado de forma seletiva para os níveis de correntes desejados.

**Figura 6.8:** Coordenograma para o  $R_1$  (retaguarda), sistema I, caso I.



Fonte: O próprio autor.



**Figura 6.9:** Coordenograma para o  $R_1$  (retaguarda) sistema I, caso II.**Figura 6.10:** Coordenograma para o  $R_1$  (retaguarda) sistema I, caso III.

As etapas do AGCB-ABE como a criação da população inicial, seleção, recombinação e mutação possuem caráter aleatório. O algoritmo é simulado 100 vezes para verificar sua convergência em relação ao valor de FO, número de ABE calculados, quantidade de iterações e tempo computacional demandado até encontrar a solução final. Os resultados dessas simulações são apresentados nas Tabelas 6.17, 6.18 e 6.19 para os casos I, II e III, respectivamente. Verifica-se que os resultados nem sempre convergiram para a mesma solução. Essa é uma carac-

terística dos algoritmos heurísticos, que pode convergir para diferentes soluções de acordo com a sua população inicial (ponto de partida). Nos três casos, o AGCB-ABE apresentou variações relativamente baixas em relação aos valores de FO. Entretanto, devido às diferentes populações iniciais, o algoritmo apresentou variações relativamente elevadas em relação ao número de iterações e aos tempos computacionais demandados.

Em todas as execuções do algoritmo, os valores das FOs foram reduzidos conforme mais variáveis de decisão foram adicionadas ao problema. Verifica-se também que os tempos computacionais aumentam quanto mais variáveis de decisão são consideradas no problema de otimização.

Nas Tabelas 6.17, 6.18 e 6.19, são evidenciados as quantidades de iterações necessárias até encontrar a solução final. Porém, o algoritmo realiza mais *MaxIter* iterações para garantir que a solução encontrada não possa ser melhorada. Nas Figuras 6.11 e 6.12 são apresentadas as convergências do AGCB-ABE, para os três casos, em relação ao número de iterações nos sistemas I e II, respectivamente.

**Tabela 6.17:** Resultado das simulações para o caso I, sendo que DP é o desvio padrão.

	Sistema I				Sistema II			
	Mínimo	Média	Máximo	DP	Mínimo	Média	Máximo	DP
FO (s)	4,9511	4,9518	5,0170	0,0066	12,2149	12,2167	12,2301	0,0050
ABE executados	109	546,22	6061	901,39	2562	8401,86	19342	3529,3
Tempo (s)	0,0832	0,2626	2,5970	0,3662	2,6115	8,1455	18,6597	3,3406
Iterações	1	35,68	461	69,37	110	364,90	842	153,92

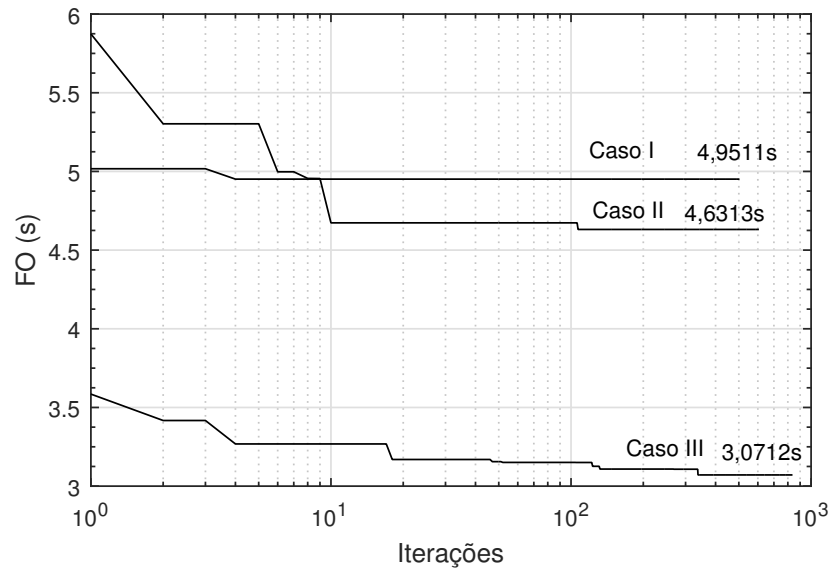
**Tabela 6.18:** Resultado das simulações para o caso II.

	Sistema I				Sistema II			
	Mínimo	Média	Máximo	DP	Mínimo	Média	Máximo	DP
FO (s)	4,6313	4,6338	4,6799	0,0103	7,6076	7,6477	7,8939	0,0637
ABE executados	168	2940,31	17394	2910,01	2077	19840,41	61914	12638,85
Tempo (s)	0,1816	1,1934	6,4486	1,0407	1,9993	16,9399	52,2190	10,6126
Iterações	4	124,88	753	126,72	47	460,46	1439	293,96

**Tabela 6.19:** Resultado das simulações para o caso III.

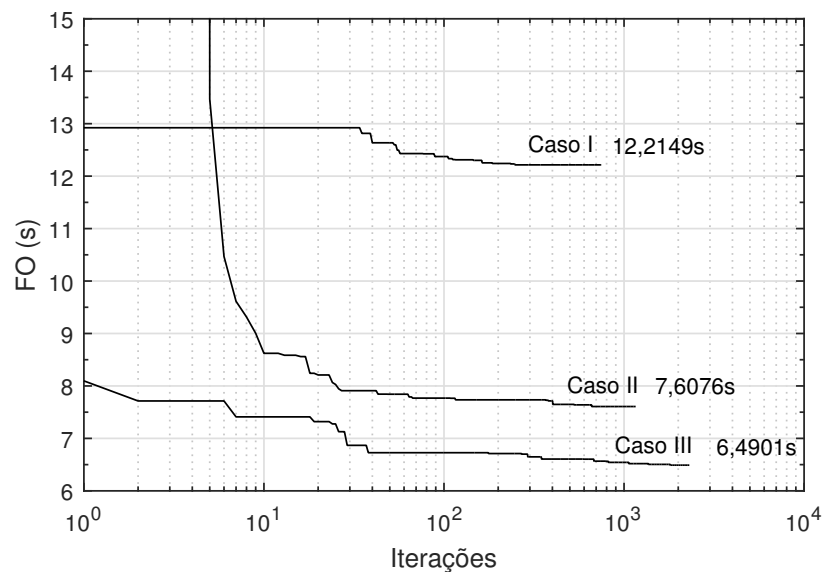
	Sistema I				Sistema II			
	Mínimo	Média	Máximo	DP	Mínimo	Média	Máximo	DP
FO (s)	3,0712	3,0849	3,1382	0,0193	6,4901	6,5792	6,9627	0,0695
ABE executados	2837	12.223,01	32668	5.471,27	10243	44084,87	94319	19004,82
Tempo (s)	1,1762	4,7988	12,1253	2,0811	7,4996	32,1709	77,3581	13,9011
Iterações	125	535,94	1435	240,24	242	1085,68	2372	468,71

**Figura 6.11:** Evolução da função objetivo em relação ao número iterações do AGCB-ABE, para o sistema I.



Fonte: O próprio autor.

**Figura 6.12:** Evolução da função objetivo em relação ao número de iterações do AGCB-ABE, para o sistema II.



Fonte: O próprio autor.

### 6.4.2 Discussões

O AGCB-ABE solucionou o problema da coordenação de forma não linear ao considerar os *PSs*, *Dials*, tipos de curvas e tipos de relés como variáveis de decisão. O uso ABE para calcular os valores de *Dials* é fundamental para deixar o algoritmo mais rápido, visto que o ABE é chamado diversas vezes durante o processo iterativo do AGCB-ABE. Ademais, foi possível considerar *PSs* e *Dials* como variáveis discretas.

Uma desvantagem desta metodologia é que ela só pode ser aplicada em sistemas radiais, devido ao ABE. Embora não seja uma desvantagem da técnica em si, a consideração de diferentes tipos de relés pode ser economicamente interessante em apenas dois casos: 1) os relés utilizados aceitam diferentes padrões de curvas; e 2) o sistema elétrico encontra-se em fase de projeto. Adicionalmente, deve-se verificar se a concessionária de energia permite trabalhar com relés de diferentes fabricantes.

## 6.5 Algoritmo Genético de Chu-Beasley - Programação Linear

Nesta secção, são apresentados os resultados obtidos com o Algoritmo Genético de Chu-Beasley - Programação Linear (AGCB-PL), apresentado na Secção 4.5, para os sistemas radiais I e II, e os malhados de 3, 6, 8, 9 e 15 barras. O algoritmo é executado 100 vezes para cada sistema utilizado. São apresentados os valores dos ajustes de *Dial* e *PS* que forneceram os melhores valores de FO. No Apêndice F, são apresentados os parâmetros e a metodologia utilizados para escolher os valores de população inicial ( $k_{pi}$ ), taxa de mutação ( $\mu$ ) e critério de parada (*MaxIter*) do AGCB.

### 6.5.1 Sistemas I e II

Para os sistemas I e II, os *Dials* são considerados contínuos devido ao uso da PL como otimizador local. Os resultados referentes aos parâmetros dos relés para os sistemas I e II são apresentados nas Tabelas 6.20 e 6.21, respectivamente. Verifica-se nessas tabelas que a FO foi reduzida a cada variável de decisão considerada no problema. Ao comparar os resultados das Tabelas 6.15 e 6.16 com as Tabelas 6.20 e 6.21, observa-se que os valores de FO são menores para o AGCB-PL (Tabelas 6.20 e 6.21) devido aos *Dials* serem contínuos. Para o sistema I, a estimativa  $PL_{max}$  é de 2,38E+04, 2,44E+07 e 2,50E+10 para os casos I, II e III, respectivamente. Para o sistema II, a estimativa  $PL_{max}$  é de 4,20E+09, 4,40E+15 e 4,62E+21 para os casos I, II e III, respectivamente. Os parâmetros do AGCB-PL são os mesmos que os apresentados na Tabela 6.14, utilizados para o AGCB-ABE.

**Tabela 6.20:** Resultados do AGCB-PL para o sistema I.

	Caso I				Caso II				Caso III			
	$PS(A)$	$Dial$	Relé	Curva	$PS(A)$	$Dial$	Relé	Curva	$PS(A)$	$Dial$	Relé	Curva
	7,00	0,2403	IEC	M.I	7,00	0,2079	IEC	M.I	6,25	3,0873	IAC	E.I
	7,00	0,1038	IEC	I	6,25	0,1102	IEC	M.I	4,00	0,5294	IEEE	E.I
	10,00	0,1002	IEC	I	5,50	0,3663	IEC	E.I	5,50	0,3531	IEC	E.I
	4,00	0,1000	IEC	M.I	4,00	0,1000	IEC	E.I	4,00	1,0058	IAC	I.C
	4,00	0,1000	IEC	E.I	4,00	0,1000	IEC	E.I	4,00	1,0269	IAC	I.C
FO (s)	4,8168				4,5661				3,0004			

**Tabela 6.21:** Resultados do AGCB-PL para o sistema II.

	Caso I				Caso II				Caso III			
	$PS(A)$	$Dial$	Relé	Curva	$PS(A)$	$Dial$	Relé	Curva	$PS(A)$	$Dial$	Relé	Curva
	10,00	0,1594	IEC	I	4,75	0,2761	IEC	E.I	4,75	0,2290	IEC	E.I
	10,00	0,1215	IEC	I	4,00	0,5251	IEC	E.I	7,75	0,3313	IEEE	E.I
	9,25	0,1967	IEC	I	9,25	0,1373	IEC	M.I	4,75	0,3866	IEC	E.I
	4,00	0,1000	IEC	I	4,00	0,1000	IEC	M.I	4,00	1,0839	IAC	I.C
	4,00	0,1000	IEC	I	4,00	0,1000	IEC	M.I	4,00	0,2573	US	I.M
	3,25	0,1000	IEC	I	3,25	0,1000	IEC	M.I	3,25	1,0812	IAC	I.C
	10,00	0,1204	IEC	I	6,25	0,1182	IEC	E.I	10,00	0,5401	US	E.I
	7,00	0,1000	IEC	I	4,00	0,1298	IEC	E.I	10,00	0,3214	IAC	M.I
	3,25	0,1000	IEC	I	3,25	0,1000	IEC	E.I	3,25	1,0383	IAC	I.C
	3,25	0,1000	IEC	I	3,25	0,1000	IEC	E.I	3,25	1,0383	IAC	I.C
FO (s)	11,8941				7,5285				6,2842			

Os tempos de atuação das proteções primária e retaguarda são apresentados nas Tabelas E.7, E.8 e E.9, para os casos I, II e III do sistema I, respectivamente. Para o sistema II, os tempos são apresentados nas Tabelas E.10, E.11 e E.12, para os casos I, II e III, respectivamente. Nas Tabelas E.7 a E.12, verifica-se que os esquemas de proteção são seletivos, pois as diferenças entre os tempos de atuação das proteções primária e retaguarda são todas superiores a 0,4 segundo.

Os valores mínimos, médios, máximos e os desvios padrões dos valores de FO, número de PLs, iterações e tempos computacionais demandados durante as 100 execuções do AGCB-PL para os casos I, II e III são apresentados nas Tabelas 6.22, 6.23 e 6.24, respectivamente. Os resultados apresentam poucas variações nos valores de FO durante as execuções do AGCB-PL. Em todos os casos, a média de PLs solucionados foram significativamente inferiores a  $PL_{max}$ .

**Tabela 6.22:** Resultado das simulações para o caso I, utilizando o AGCB-PL.

	Sistema I				Sistema II			
	Mínimo	Média	Máximo	DP	Mínimo	Média	Máximo	DP
FO (s)	4,8168	4,8168	4,8168	0	11,8941	11,8941	11,8941	0
PLs calculados	52	145,04	397	72,56	580	1699,15	3107	558,44
Tempo (s)	0,0559	0,1288	0,3055	0,0523	0,6339	1,6077	4,457	0,5724
Iterações	2	9,27	30	5,67	23	73,94	137	25,1584

**Tabela 6.23:** Resultado das simulações para o caso II, utilizando o AGCB-PL.

	Sistema I				Sistema II			
	Mínimo	Média	Máximo	DP	Mínimo	Média	Máximo	DP
FO (s)	4,5661	4,5672	4,6206	0,0077	7,5285	7,6734	8,068	0,1636
PLs calculados	130	4525,61	29404	5055,45	472	16807,29	75223	13387,54
Tempo (s)	0,1574	2,9423	14,9948	3,0268	0,651	14,1508	61,9063	11,1851
Iterações	4	141,06	564	141,99	6	311,22	1543	267,13

**Tabela 6.24:** Resultado das simulações para o caso III, utilizando o AGCB-PL.

	Sistema I				Sistema II			
	Mínimo	Média	Máximo	DP	Mínimo	Média	Máximo	DP
FO (s)	3,0004	3,0118	3,0589	0,0173	6,2842	6,441	7,0121	0,0979
PLs calculados	561	19840,04	59101	10962,92	1925	52419,36	129146	29302,81
Tempo (s)	0,4798	12,9546	39,5864	7,1719	1,7363	45,3799	109,804	25,4216
Iterações	18	838,09	2448	466,34	37	1269,48	3097	692,4229

### 6.5.2 Sistema de 3 Barras

Os resultados dos ajustes dos relés para este sistema são apresentados na Tabela 6.25. O tempo computacional apresentado é em relação ao tempo médio demandado pelo algoritmo durante suas 100 execuções. Na Tabela 6.26, são apresentados os tempos de atuação dos relés para as falhas consideradas, para as configurações normal e transiente. Sendo que a configuração transiente ocorre quando um dos relés atua dentro da sua zona de proteção primária, operando o disjuntor na extremidade da linha de transmissão (URDANETA; NADIRA; PEREZ, 1988; AMRAEE, 2012). O sistema encontra-se seletivo devido a todos os  $\Delta T$  serem superiores a 0,20 segundos. Neste sistema elétrico, a estimativa  $PL_{max}$  é de 122880. É utilizado  $K_{pi} = 20$  e  $\mu = 5\%$  (vide Apêndice F).

**Tabela 6.25:** Valores de *PSs* e *Dials* para o sistema de 3 barras.

Relé	<i>PS</i>	<i>Dial</i>	Relé	<i>PS</i>	<i>Dial</i>
$R_1$	2,5	0,1067	$R_4$	2,5	0,1000
$R_2$	2,0	0,1083	$R_5$	2,5	0,1000
$R_3$	3,0	0,1000	$R_6$	1,5	0,1119
Tempo (s)			0,2047		
FO (s)			1,5987		

**Tabela 6.26:** Tempos de atuação dos relés para o sistema de 3 barras.

$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$I_{cc_{pri.}}$ (A)	$I_{cc_{ret.}}$ (A)
Configuração normal						
$R_1$	$R_5$	0,2820	1,2439	0,9618	1978,90	175,00
$R_2$	$R_4$	0,2496	0,5356	0,2860	1525,70	545,00
$R_3$	$R_1$	0,2581	0,5204	0,2623	1683,90	617,22
$R_4$	$R_6$	0,2738	0,5696	0,2958	1815,40	466,17
$R_5$	$R_3$	0,2516	0,5948	0,3433	1499,66	384,00
$R_6$	$R_2$	0,2836	1,2621	0,9784	1766,30	145,34
Configuração transiente						
$R_1$	$R_5$	0,2768	0,4973	0,2205	2075,00	400,70
$R_2$	$R_4$	0,2444	0,4472	0,2028	1621,70	700,64
$R_3$	$R_1$	0,2526	0,4526	0,2000	1779,60	760,17
$R_4$	$R_6$	0,2681	0,4681	0,2000	1911,50	622,65
$R_5$	$R_3$	0,2462	0,4484	0,2022	1588,50	558,13
$R_6$	$R_2$	0,2784	0,4784	0,2000	1855,40	380,70

O algoritmo é executado 100 vezes e os valores mínimos, médios, máximos e os desvios padrões dos valores de FO, número de PLs, iterações e tempos computacionais demandados até encontrar a solução final são apresentados na Tabela 6.27. Os resultados não apresentam variações nos valores de FO durante as execuções do AGCB-PL. O número de PLs solucionados, os tempos computacionais demandados e o número de iterações médios apresentaram variações consideráveis. Verifica-se que a média de PLs solucionados (273), até o algoritmo encontrar a solução final, é muito inferior a  $PL_{max}$  (122880).

**Tabela 6.27:** Resultado das simulações para o sistema de 3 barras.

	Mínimo	Média	Máximo	DP
FO (s)	1,5987	1,5987	1,5987	0
PLs solucionados	33	272,60	530,00	103,16
Tempo (s)	0,0351	0,2047	0,3668	0,0673
Iterações	2	18,59	36	7,05

O comparativo com os resultados reportados na literatura é apresentado na Tabela 6.28. O AGCB-PL encontrou a mesma solução ( $FO = 1,5987$  segundos)

que a Otimização Baseada em Biogeografia - Programação Linear (OBB-PL) (ALBASRI; ALROOMI; TALAQ, 2015). Esta solução é melhor do que a encontrada pela Otimização por Enxame de Partículas (OEP) (MANSOUR; MEKHAMER; EL-KHARBAWE, 2007), OBB (ALBASRI; ALROOMI; TALAQ, 2015) e a Otimização por Algoritmo *Seeker* (OAS) (AMRAEE, 2012). Entretanto, o AGCB-PL demandou apenas 6,85% dos tempos computacionais que a OBB-PL. Adicionalmente, a metodologia proposta foi mais rápida que as demais apresentadas nessa tabela.

**Tabela 6.28:** Comparativo entre os resultados do sistema de 3 barras.

Técnica	Autores	Tempo (s)	FO (s)
OEP	(MANSOUR; MEKHAMER; EL-KHARBAWE, 2007)	0,5129	1,9258
OBB	(ALBASRI; ALROOMI; TALAQ, 2015)	16,23	1,6837
OAS	(AMRAEE, 2012)	10,45	1,5990
OBB-PL	(ALBASRI; ALROOMI; TALAQ, 2015)	2,99	1,5987
<b>ACCB-PL</b>	<b>O autor</b>	<b>0,2047</b>	<b>1,5987</b>

### 6.5.3 Sistema de 6 Barras

Os resultados referentes aos parâmetros dos relés fornecidos pelo AGCB-PL, para o sistema de 6 barras, são apresentados na Tabela 6.29. Sendo que, o valor da FO apresentado nesta tabela é referente ao menor valor de FO encontrado durante as 100 execuções do algoritmo. O tempo apresentado é referente à média dos tempos demandados para a execução do algoritmo neste sistema. A estimativa  $PL_{max}$  é de  $4,15E+46$ , considerando uma resolução de quatro casas decimais após a vírgula nos valores de  $PS$ . Para este sistema, é considerado  $K_{pi} = 40$  e  $\mu = 5\%$  (vide Apêndice F).

**Tabela 6.29:** Valores de  $PS$ s e  $Dials$  para o sistema de 6 barras.

Relé	$PS$	$Dial$	Relé	$PS$	$Dial$
$R_1$	1,5000	0,1014	$R_8$	1,2500	0,0500
$R_2$	1,5000	0,1863	$R_9$	1,2500	0,0500
$R_3$	1,2776	0,0946	$R_{10}$	1,3968	0,0500
$R_4$	1,5000	0,1006	$R_{11}$	1,5000	0,0650
$R_5$	1,2500	0,0500	$R_{12}$	1,5000	0,0506
$R_6$	1,3808	0,0500	$R_{13}$	1,4329	0,0500
$R_7$	1,2500	0,0500	$R_{14}$	1,5000	0,0708
Tempo (s)			89,0916		
FO (s)			10,1512		

Os tempos de atuação dos relés relacionados às restrições de seletividade são apresentados na Tabela 6.30. Verifica-se que o sistema encontra-se coordenado de forma seletiva, pois os  $\Delta T$  são superiores a 0,20 segundos. Para uma falha no



começo da linha em que  $R_2$  atua como proteção primária e  $R_3$  como de retaguarda, o tempo de atuação de  $R_3$  é elevado ( $1,32E+5$  segundos). Verifica-se na Tabela 5.5 que a corrente vista por  $R_3$  ( $I_{cc_{ret.}}/RTC = 1,278$  A) é muito próxima do menor valor de  $PS$  disponível em  $R_3$  (1,2 A). Quando esses valores são próximos o tempo de atuação do relé é elevado. Para o par de relés de proteção primária-retaguarda  $R_3$ - $R_{10}$ , a corrente vista por  $R_{10}$  ( $I_{cc_{ret.}}/RTC = 0,088$  A, da Tabela 5.5) é inferior ao menor valor de  $PS$  disponível em  $R_{10}$  (1,2 A). Assim, este relé é insensível para falhas no final da linha do trecho protegido por  $R_3$ . Os tempos de atuação das proteções primárias para as falhas no começo e no fim das linhas de transmissão estão dentro dos limites estabelecidos de 0,05 a 1 segundo, como é verificado na Tabela 6.31.

**Tabela 6.30:** Tempos de atuação dos relés para o sistema de 6 barras.

$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$\frac{I_{cc_{pri.}}}{RTC}$ (A)	$\frac{I_{cc_{ret.}}}{RTC}$ (A)	$R_{prim.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$\frac{I_{cc_{pri.}}}{RTC}$ (A)	$\frac{I_{cc_{ret.}}}{RTC}$ (A)
Faltas no início da linha							Faltas no fim da linha						
$R_1$	$R_8$	0,2632	0,5536	0,2904	20,79	2,34	$R_{14}$	$R_{10}$	0,2699	0,5382	0,2683	9,11	2,67
$R_1$	$R_{11}$	0,2632	4,2984	4,0352	20,79	1,67	$R_1$	$R_8$	0,3715	1,1817	0,8102	9,79	1,68
$R_2$	$R_3$	0,6542	1,32E5	1,32E5	10,59	1,28	$R_2$	$R_3$	0,4646	0,6646	0,2000	23,02	3,43
$R_3$	$R_{10}$	0,4163	0,6163	0,2000	6,11	2,46	$R_4$	$R_1$	0,3114	0,5114	0,2000	13,7	5,90
$R_3$	$R_{10}$	0,3245	-	-	9,44	0,09	$R_5$	$R_{12}$	0,4429	1,5547	1,1119	2,74	1,88
$R_3$	$R_{13}$	0,3244	0,6035	0,2791	9,44	2,55	$R_6$	$R_3$	0,1863	1,1115	0,9252	8,73	2,31
$R_4$	$R_1$	0,3981	0,8493	0,4512	8,53	3,43	$R_7$	$R_2$	0,6153	0,8153	0,2000	2,20	7,24
$R_5$	$R_{12}$	0,2205	0,4466	0,2261	5,96	3,29	$R_7$	$R_{11}$	0,6153	0,8523	0,2370	2,20	2,55
$R_5$	$R_{14}$	0,2205	0,7407	0,5202	5,96	2,92	$R_9$	$R_4$	0,2470	0,4470	0,2000	5,06	7,07
$R_6$	$R_3$	0,1863	0,7646	0,5784	8,73	3,01	$R_9$	$R_{13}$	0,2470	0,4470	0,2000	5,06	3,12
$R_7$	$R_2$	0,5354	0,7734	0,2380	2,39	7,87	$R_{11}$	$R_6$	0,3703	0,5704	0,2000	5,05	2,54
$R_7$	$R_{11}$	0,5354	0,7354	0,2000	2,39	2,77	$R_{11}$	$R_{14}$	0,3703	0,5703	0,2000	5,05	3,55
$R_9$	$R_4$	0,2715	0,4865	0,2150	4,46	6,24	$R_{12}$	$R_2$	0,2945	6,5206	6,2261	4,92	1,83
$R_9$	$R_{13}$	0,2715	0,5328	0,2613	4,46	2,75	$R_{12}$	$R_8$	0,2945	0,8257	0,5312	4,92	1,91
$R_{11}$	$R_6$	0,5629	2,9436	2,3807	3,34	1,55	$R_{13}$	$R_{12}$	0,2102	0,4102	0,2000	7,37	3,53
$R_{11}$	$R_{14}$	0,5629	0,9593	0,3964	3,34	2,51	$R_{14}$	$R_4$	0,4113	3,8037	3,3924	4,93	1,80
$R_{12}$	$R_2$	0,2093	0,9311	0,7218	7,91	5,97	$R_{14}$	$R_{10}$	0,4113	1,0560	0,6447	4,93	1,94
$R_{12}$	$R_8$	0,2093	0,4696	0,2603	7,91	2,62							
$R_{13}$	$R_6$	0,2102	0,7111	0,5009	7,37	2,25							
$R_{13}$	$R_{12}$	0,3289	0,7661	0,4372	4,11	2,38							
$R_{14}$	$R_4$	0,2699	0,5497	0,2798	9,11	5,31							

Na Tabela 6.32, são apresentados os resultados estatísticos em relação as 100 execuções do AGCB-PL para o sistema de 6 barras. Os valores de FO apresentam desvio padrão de 0,0034 segundos. O número de PLs solucionados, os tempos computacionais e a quantidade de iterações apresentam uma variação significativa. Na média, o número de PLs solucionados (155383) pelo algoritmo é significativamente inferior a  $PL_{max}$  ( $4,15E+46$ ).

**Tabela 6.31:** Tempos de atuação das proteções primárias para o sistema de seis barras (AGCB-PL).

Faltas no início da linha		Faltas no fim da linha	
$R_{pri.}$	$T_{pri.}$ (s)	$R_{pri.}$	$T_{pri.}$ (s)
$R_1$	0,3711	$R_2$	0,4646
$R_2$	0,6542	$R_1$	0,2628
$R_3$	0,4163	$R_4$	0,3112
$R_4$	0,3980	$R_3$	0,3245
$R_5$	0,4429	$R_6$	0,1863
$R_6$	0,3355	$R_5$	0,2205
$R_7$	0,6153	$R_8$	0,3233
$R_8$	0,3667	$R_7$	0,5354
$R_9$	0,2715	$R_{10}$	0,3546
$R_{10}$	0,3922	$R_9$	0,2470
$R_{11}$	0,5629	$R_{12}$	0,2093
$R_{12}$	0,2945	$R_{11}$	0,3703
$R_{13}$	0,3289	$R_{14}$	0,4112
$R_{14}$	0,2699	$R_{13}$	0,2102

Os resultados referentes ao comparativo do AGCB-PL com os reportados na literatura são apresentados na Tabela 6.33. A solução encontrada pelo algoritmo (10,1512 segundos) é melhor do que as encontradas pelo Algoritmo Genético (AG) (SWIEF; ABDELAZIZ; NAGY, 2014), Algoritmo Diferencial Evolutivo (ADE) (CHELLIAH et al., 2014), ADE 5 (THANGARAJ; PANT; DEEP, 2010), Algoritmo Diferencial Evolutivo Caótico Baseado em Oposição 2 (ADECBO 2) (CHELLIAH et al., 2014) e Algoritmo Diferencial Evolutivo Adaptativo (ADEA) (DASH et al., 2013). Entretanto, o tempo computacional despendido pelo AGCB-PL foi maior do que o reportado por Chelliah et al. (2014).

**Tabela 6.32:** Resultado das simulações para o sistema de 6 barras.

	Mínimo	Média	Máximo	DP
FO (s)	10,1512	10,1528	10,1810	0,0034
PLs solucionados	33794	72847,29	145577	18964,02
Tempo (s)	40,4506	89,0916	180,656	23,6321
Iterações	1164	2729,09	5632	785,38

**Tabela 6.33:** Comparativo entre os resultados do sistema de 6 barras.

Técnica	Autores	Tempo (s)	FO (s)
AG	(SWIEF; ABDELAZIZ; NAGY, 2014)	-	10,7345
ADE	(CHELLIAH et al., 2014)	129,8	10,6272
ADE 5	(THANGARAJ; PANT; DEEP, 2010)	-	10,3514
ADECBO 2	(CHELLIAH et al., 2014)	10,14	10,3286
ADEA	(DASH et al., 2013)	-	10,2664
<b>AGCB-PL</b>	<b>O autor</b>	<b>89,0916</b>	<b>10,1512</b>

### 6.5.4 Sistema de 8 Barras

Os valores de  $PSs$  e de  $Dials$  encontrados pelo AGCB-PL para o sistema de 8 barras são apresentados na Tabela 6.34. Verifica-se que os valores de  $PSs$  encontram-se dentro dos ajustes discretos aceitos pelos relés. Os tempos de atuação dos relés são apresentados na Tabela 6.35. O sistema encontra-se coordenado de forma seletiva, pois os valores de  $\Delta T$  são todos superiores a 0,30 segundos. Para este problema, a estimativa  $PL_{max}$  é de 6,78E+11. Neste sistema, é utilizado  $K_{pi} = 20$  e  $\mu = 5\%$  (vide Apêndice F).

**Tabela 6.34:** Valores de  $PSs$  e  $Dials$  para o sistema de 8 barras.

Relé	$PS$ (A)	$Dial$	Relé	$PS$ (A)	$Dial$
$R_1$	2,00	0,1132	$R_8$	2,50	0,1697
$R_2$	2,50	0,2602	$R_9$	2,50	0,1473
$R_3$	2,50	0,2251	$R_{10}$	2,50	0,1759
$R_4$	2,50	0,1603	$R_{11}$	2,50	0,1869
$R_5$	2,50	0,1000	$R_{12}$	2,50	0,2664
$R_6$	2,50	0,1731	$R_{13}$	2,00	0,1138
$R_7$	2,50	0,2428	$R_{14}$	2,50	0,2459
Tempo (s)			0,8261		
FO (s)			8,4271		

**Tabela 6.35:** Tempos de atuação dos relés para o sistema de 8 barras.

$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$I_{cc_{pri.}}$ (A)	$I_{cc_{ret.}}$ (A)
$R_1$	$R_6$	0,4076	0,7076	0,3000	3232	3232
$R_2$	$R_1$	0,7774	1,0774	0,3000	5924	996
$R_2$	$R_7$	0,7774	1,0774	0,3000	5924	1890
$R_3$	$R_2$	0,7056	1,0056	0,3000	3556	3556
$R_4$	$R_3$	0,5981	0,8981	0,3000	3783	2244
$R_5$	$R_4$	0,4978	0,7978	0,3000	2401	2401
$R_6$	$R_5$	0,5102	1,0066	0,4964	6109	1197
$R_6$	$R_{14}$	0,5102	1,0973	0,5871	6109	1874
$R_7$	$R_5$	0,6446	1,0066	0,3620	5223	1197
$R_7$	$R_{13}$	0,6446	1,0973	0,4527	5223	987
$R_8$	$R_7$	0,5006	1,0774	0,5768	6093	1890
$R_8$	$R_9$	0,5006	0,9540	0,4533	6093	1165
$R_9$	$R_{10}$	0,5542	0,8542	0,3000	2484	2484
$R_{10}$	$R_{11}$	0,6469	0,9469	0,3000	3883	2344
$R_{11}$	$R_{12}$	0,7053	1,0053	0,3000	3707	3707
$R_{12}$	$R_{13}$	0,7973	1,0973	0,3000	5899	987
$R_{12}$	$R_{14}$	0,7973	1,0973	0,3000	5899	1874
$R_{13}$	$R_8$	0,4276	0,7276	0,3000	2991	2991
$R_{14}$	$R_1$	0,6540	1,0774	0,4235	5199	996
$R_{14}$	$R_9$	0,6540	0,9540	0,3000	5199	1165

O algoritmo é executado 100 vezes. Os valores mínimos, médios, máximos e os

desvios padrões dos valores de FO, PLs solucionados, número de iterações e tempos computacionais demandados até encontrar a solução final são apresentados na Tabela 6.36. Os resultados para a FO não apresentam desvio padrão durante as execuções do AGCB-PL. A quantidade de PLs solucionados, os tempos computacionais demandados e o número de iterações médias apresentam uma variação relativamente elevada. A média de PLs solucionados (773) é significativamente inferior a  $PL_{max}$  (6,78E+11).

**Tabela 6.36:** Resultado das simulações para o sistema de 8 barras.

	Mínimo	Média	Máximo	DP
FO (s)	8,4271	8,4271	8,4271	0
PPL solucionados	441	772,99	1088	152,63
Tempo (s)	0,4949	0,8261	1,1858	0,1571
Iterações	18	33,00	50	7,32

Na Tabela 6.37, são realizados os comparativos entre os resultados obtidos com os reportados na literatura. O AGCB-PL encontrou uma resposta de melhor qualidade, em um tempo computacional menor, do que o Algoritmo Genético - Programação Linear (AG-PL) (NOGHABI; SADEH; MASHHADI, 2009), mostrando que o AGCB é mais recomendado que o AG convencional para solucionar este tipo de problema. A metodologia proposta encontrou a mesma solução do que a OAS (AMRAEE, 2012). Entretanto, o algoritmo proposto foi mais rápido. Na média, a redução nos tempos computacionais entre o AGCB-PL e a OAS foi de 98,36 %.

**Tabela 6.37:** Comparativo entre os resultados do sistema de 8 barras.

Técnica	Autores	Tempo (s)	FO (s)
OEP	(ZEINELDIN; EL-SAADANY; SALAMA, 2006)	-	17,3300
AG	(NOGHABI; SADEH; MASHHADI, 2009)	36000	11,0010
AG-PL	(NOGHABI; SADEH; MASHHADI, 2009)	300	10,949
OBB	(ALBASRI; ALROOMI; TALAQ, 2015)	2065,02	10,5495
OBB-PL	(ALBASRI; ALROOMI; TALAQ, 2015)	6,79	8,7556
OAS	(AMRAEE, 2012)	50,45	8,4271
<b>AGCB-PL</b>	<b>O autor</b>	<b>0,8261</b>	<b>8,4271</b>

### 6.5.5 Sistema de 9 Barras

Os valores dos ajustes de *PSs* e *Dials* fornecidos pelo AGCB-PL dos 24 RSDs para o sistema elétrico de 9 barras são apresentados na Tabela 6.38. Todos os ajustes fornecidos pelo algoritmo encontram-se dentro das faixas permitidas pelos RSDs. Os tempos de atuação dos dispositivos de proteção são apresentados na

Tabela 6.39. O sistema encontra-se seletivo pois todos os  $\Delta T$  são superiores a 0,20 segundos. Neste sistema, os RSDs possuem tempos de atuação mínimos quando atuam como proteção primária. Dessa forma, este é o menor valor de FO que pode ser encontrado para este problema. A estimativa do espaço de solução para este sistema é de 1,22E+49 PLs, considerando uma resolução de duas casas decimais após a vírgula nos valores de  $PS$ . Os parâmetros do AGCB para este sistema são  $K_{pi} = 20$  e  $\mu = 5\%$  (vide Apêndice F).

**Tabela 6.38:** Valores ótimos de  $PS$ s e  $Dials$  para o sistema de 9 barras.

Relé	$PS$	$Dial$	Relé	$PS$	$Dial$
$R_1$	1,81	0,0489	$R_{13}$	1,37	0,0489
$R_2$	0,69	0,0451	$R_{14}$	1,39	0,0521
$R_3$	1,49	0,0385	$R_{15}$	1,55	0,0489
$R_4$	1,39	0,0383	$R_{16}$	0,99	0,0585
$R_5$	0,94	0,0385	$R_{17}$	1,36	0,0707
$R_6$	1,63	0,0489	$R_{18}$	1,55	0,0311
$R_7$	1,63	0,0489	$R_{19}$	1,12	0,0758
$R_8$	0,94	0,0385	$R_{20}$	0,76	0,0563
$R_9$	1,39	0,0383	$R_{21}$	1,60	0,0658
$R_{10}$	0,90	0,0533	$R_{22}$	0,21	0,0906
$R_{11}$	0,87	0,0383	$R_{23}$	1,43	0,0704
$R_{12}$	0,81	0,0565	$R_{24}$	1,38	0,0254
Tempo (s)			4,1124		
FO (s)			4,8000		

**Tabela 6.39:** Tempos de atuação dos relés para o sistema de 9 barras.

$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$Icc_{pri.}$ (A)	$Icc_{ret.}$ (A)	$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$Icc_{pri.}$ (A)	$Icc_{ret.}$ (A)
$R_1$	$R_{15}$	0,2	0,5100	0,3100	4863,6	1168,3	$R_{14}$	$R_{16}$	0,2	0,5635	0,3635	4172,5	1031,7
$R_1$	$R_{17}$	0,2	0,7977	0,5977	4863,6	1293,9	$R_{14}$	$R_{19}$	0,2	0,7397	0,5397	4172,5	1264,1
$R_2$	$R_4$	0,2	0,4671	0,2671	1634,4	1044,2	$R_{15}$	$R_{13}$	0,2	0,4540	0,2540	4172,5	1031,7
$R_3$	$R_1$	0,2	0,5477	0,3477	2811,4	1361,6	$R_{15}$	$R_{19}$	0,2	0,7397	0,5397	4172,5	1264,1
$R_4$	$R_6$	0,2	0,4656	0,2656	2610,5	1226,0	$R_{16}$	$R_2$	0,2	0,5601	0,3601	3684,5	653,6
$R_5$	$R_3$	0,2	0,4813	0,2813	1778,0	1124,4	$R_{16}$	$R_{17}$	0,2	0,7977	0,5977	3684,5	1293,9
$R_6$	$R_8$	0,2	0,5164	0,3164	4378,5	711,2	$R_{17}$	-	0,2	-	-	7611,2	-
$R_6$	$R_{23}$	0,2	0,9411	0,7411	4378,5	1345,5	$R_{18}$	$R_2$	0,2	0,5601	0,3601	2271,7	653,6
$R_7$	$R_5$	0,2	0,4080	0,2080	4378,5	711,2	$R_{18}$	$R_{15}$	0,2	0,5100	0,3100	2271,7	1168,3
$R_7$	$R_{23}$	0,2	0,9411	0,7411	4378,5	1345,5	$R_{19}$	-	0,2	-	-	7435,8	-
$R_8$	$R_{10}$	0,2	0,6042	0,4042	1778,0	1124,4	$R_{20}$	$R_{13}$	0,2	0,4540	0,254	2624,2	1031,7
$R_9$	$R_7$	0,2	0,6686	0,4686	2610,5	1226,0	$R_{20}$	$R_{16}$	0,2	0,5635	0,3635	2624,2	1031,7
$R_{10}$	$R_{12}$	0,2	0,4085	0,2085	2811,4	787,2	$R_{21}$	-	0,2	-	-	7611,2	-
$R_{11}$	$R_9$	0,2	0,4187	0,2187	1634,4	1044,2	$R_{22}$	$R_{11}$	0,2	0,4155	0,2155	2271,7	653,6
$R_{12}$	$R_{14}$	0,2	0,6482	0,4482	2811,4	1168,3	$R_{22}$	$R_{14}$	0,2	0,6482	0,4482	2271,7	1168,3
$R_{12}$	$R_{21}$	0,2	0,7908	0,5908	2811,4	1293,9	$R_{23}$	-	0,2	-	-	7914,7	-
$R_{13}$	$R_{11}$	0,2	0,4155	0,2155	3684,5	653,6	$R_{24}$	$R_5$	0,2	0,4080	0,208	1665,5	711,2
$R_{13}$	$R_{21}$	0,2	0,7908	0,5908	3684,5	1293,9	$R_{24}$	$R_8$	0,2	0,5164	0,3164	1665,5	711,2

Na Tabela 6.40, são apresentadas as estatísticas dos valores de FO, PLs solucionados, tempos computacionais e número de iterações demandados pelo algoritmo até encontrar a melhor solução. Os resultados não apresentam desvios padrões nos valores de FO. O número de PLs solucionados, os tempos de execução e o número de iterações apresentam variações elevadas. Ademais, a quantidade média de PLs solucionados pelo algoritmo é significativamente menor que  $PL_{max}$  (1,22E+49), mostrando que a técnica precisou explorar apenas uma parcela muito pequena do espaço de solução.

**Tabela 6.40:** Resultado das simulações para o sistema de 9 barras.

	Mínimo	Média	Máximo	DP
FO (s)	4,8000	4,8000	4,8000	0
PLs solucionados	377	2905,58	6752	1259,11
Tempo (s)	0,7874	4,1124	9,0566	1,6344
Iterações	8	57,58	133	24,69

Embora a estimativa do espaço de solução do sistema de 6 barras (4,15E+46) seja menor que a sistema de 9 barras (1,22E+49), o AGCB-PL demandou menos tempo computacional para solucionar este problema. Isso porque o algoritmo converge de forma relativamente rápida para um platô, onde os tempos de atuação dos relés para faltas dentro da sua zona de proteção primária são iguais a  $T_{min}$ . Dessa forma, não é possível encontrar uma solução de melhor qualidade, pois implicaria na violação da restrição de  $T_{min}$ .

Na Tabela 6.41, é apresentado um comparativo entre os resultados obtidos com os publicados na literatura. Verifica-se que o AGCB-PL encontrou uma solução com a mesma qualidade (FO de 4,8000 segundos) que o OBB-PL (ALBASRI; ALROOMI; TALAQ, 2015), que é a melhor FO encontrada para este problema.

**Tabela 6.41:** Comparativo entre os resultados do sistema de 9 barras.

Técnica	Autores	Tempo (s)	FO (s)
AG	(BEDEKAR; Bhide, 2011b)	-	32,6058
OBB	(ALBASRI; ALROOMI; TALAQ, 2015)	-	28,8348
PQS	(BEDEKAR; Bhide, 2011b)	-	19,4041
AG-PNL	(BEDEKAR; Bhide, 2011b)	-	6,1786
OBB-PL	(ALBASRI; ALROOMI; TALAQ, 2015)	-	4,8000
<b>AGCB-PL</b>	<b>O autor</b>	<b>4,1124</b>	<b>4,8000</b>

### 6.5.6 Sistema de 15 Barras

Os resultados referentes às parametrizações dos relés fornecidos pelo AGCB-PL são apresentados na Tabela 6.42. O tempo computacional apresentado é referente a média das 100 execuções do algoritmo. Na Tabela E.19, são apresentados os tempos de atuação dos relés para as falhas consideradas. Verifica-se que  $R_{21}$  possui um tempo de atuação elevado (12,9383s), quando este age como proteção de retaguarda de  $R_{24}$ . Isso porque a corrente vista por  $R_{21}$  (175 A) é da mesma ordem de grandeza de  $PS_{21} \cdot RTC_{21}$  ( $0,5 \cdot 320 = 160A$ ), e  $PS_{21}$  encontra-se ajustado com o valor mínimo aceito pelo relé. O sistema encontra-se seletivo pois todos os  $\Delta T$  são superiores a 0,20 segundos. A estimativa do espaço de solução para este sistema é de  $4,55E+28$  PLs. Os parâmetros do AGCB considerados foram  $K_{pi} = 20$  e  $\mu = 5\%$  (vide Apêndice F).

**Tabela 6.42:** Valores de  $PS$ s e  $Dials$  para o sistema de 15 barras.

Relé	$PS$ (A)	$Dial$	Relé	$PS$ (A)	$Dial$	Relé	$PS$ (A)	$Dial$
$R_1$	1,50	0,1000	$R_{15}$	1,00	0,1035	$R_{29}$	1,50	0,1042
$R_2$	1,00	0,1008	$R_{16}$	1,50	0,1000	$R_{30}$	2,00	0,1011
$R_3$	2,00	0,1047	$R_{17}$	2,00	0,1000	$R_{31}$	2,00	0,1000
$R_4$	1,00	0,1153	$R_{18}$	1,00	0,1051	$R_{32}$	1,50	0,1055
$R_5$	2,00	0,1086	$R_{19}$	2,00	0,1016	$R_{33}$	2,50	0,1003
$R_6$	2,00	0,1072	$R_{20}$	1,50	0,1000	$R_{34}$	2,50	0,1073
$R_7$	2,00	0,1055	$R_{21}$	0,50	0,1658	$R_{35}$	2,00	0,1031
$R_8$	1,50	0,1068	$R_{22}$	1,50	0,1092	$R_{36}$	2,00	0,1000
$R_9$	2,00	0,1062	$R_{23}$	1,00	0,1094	$R_{37}$	2,50	0,1030
$R_{10}$	1,50	0,1122	$R_{24}$	1,50	0,1000	$R_{38}$	2,50	0,1062
$R_{11}$	1,50	0,1000	$R_{25}$	2,00	0,1027	$R_{39}$	2,50	0,1025
$R_{12}$	1,50	0,1000	$R_{26}$	1,50	0,1120	$R_{40}$	2,50	0,1043
$R_{13}$	2,00	0,1073	$R_{27}$	2,00	0,1041	$R_{41}$	2,50	0,1041
$R_{14}$	1,00	0,1114	$R_{28}$	2,50	0,1051	$R_{42}$	1,50	0,1043
Tempo (s)				5,1147				
FO (s)				12,2149				

Na Tabela 6.43, são apresentados os resultados estatísticos das 100 execuções do AGCB-PL para o sistema de 15 barras. Em todas as execuções o algoritmo convergiu para a mesma solução ( $FO = 12,2149$  segundos). O número de PLs solucionados, os tempos computacionais e o número de iterações demandados apresentaram uma variação significativa. Na média, a quantidade de PLs solucionados pelo algoritmo (2049) é muito inferior ao número de PLs do espaço de solução completo.

**Tabela 6.43:** Resultado das simulações para o sistema de 15 barras.

	Mínimo	Média	Máximo	DP
FO (s)	12,2149	12,2149	12,2149	0
PL solucionados	834	2048,56	5182	714,46
Tempo (s)	2,0323	5,1147	12,0608	1,7096
Iterações	12	27,91	68	9,17

O comparativo entre os resultados obtidos com o AGCB-PL com os reportados na literatura é apresentado na Tabela 6.44. O valor de FO encontrado pela metodologia proposta ( $FO = 12,2149$  segundos) é melhor do que os reportados em Amraee (2012) e Darji et al. (2015). Os *PSs* e *Dials* apresentados na Tabela 6.42 fornecem um esquema de proteção mais rápido do que os encontrados pelas técnicas apresentadas nesta tabela. Adicionalmente, o tempo computacional médio demandado pelo AGCB-PL é menor do que os encontrados em Amraee (2012).

**Tabela 6.44:** Comparativo entre os resultados do sistema de 15 barras.

Técnica	Autores	Tempo (s)	FO (s)
AG	(DARJI et al., 2015)	-	35,8812
AG-PNL	(DARJI et al., 2015)	-	19,5843
ABC	(DARJI et al., 2015)	-	19,5521
SBB	(AMRAEE, 2012)	-	15,3350
OEP-PL	(AMRAEE, 2012)	60,7	15,0020
OAS	(AMRAEE, 2012)	406,3	12,2270
<b>AGCB-PL</b>	<b>O autor</b>	<b>5,1147</b>	<b>12,2149</b>

### 6.5.7 Sistema de 15 Barras (Considerando Tipos de Curvas e Relés como Variáveis de Decisão)

No sistema de 15 barras da subsecção anterior, não foram considerados os tipos de curvas e os tipos dos relés no problema de otimização para uma comparação justa com os resultados publicados na literatura. Entretanto, a metodologia proposta pode lidar com essas variáveis de decisão. Sendo assim, é apresentado a seguir o resultado para o sistema de 15 barras, considerando tipos de curvas e tipos de relés como variáveis de decisão. Adicionalmente, foram considerados  $Dial_{max} = 10$  e  $T^{min} = 0,2$  segundos. Ao considerar os tipos dos relés e de curvas como variáveis de decisão, a estimativa do espaço de solução passa de  $4,55E+28$  para  $1,70E+79$ .

Os resultados referentes aos ajustes dos relés são apresentados na Tabela 6.45. A adição dos tipos de curvas e de relés no problema de otimização reduziu o valor da  $FO$  de 12,2149 (Tabela 6.42) para 8,4000 (Tabela 6.45) segundos, e o



tempo médio de execução se elevou de 5,1131 para 8,7892 segundos. Os tempos de atuação dos RSDs foram os mínimos possíveis, sendo limitados por  $T^{min}$  conforme é apresentado na Tabela E.20. Os tempos de atuação das proteções primárias são iguais a  $T^{min}$ , assim este é o menor valor de FO que pode ser encontrado para esse problema. O sistema encontra-se seletivo, pois os  $\Delta T$  são todos superiores a 0,2 segundos.

**Tabela 6.45:** Valores de *PSs* e *Dials* para o sistema de 15 barras, considerando a adição das características dos relés como variáveis de decisão.

Relé	<i>PS</i> (A)	<i>Dial</i>	Tipo	Curva	Relé	<i>PS</i> (A)	<i>Dial</i>	Tipo	Curva
$R_1$	2,5	0,6524	IAC	I	$R_{22}$	2,5	0,1296	IEC	M.I
$R_2$	2,5	0,7331	US	I.M	$R_{23}$	2,5	1,6508	US	E.I
$R_3$	2,5	0,1327	IEC	M.I	$R_{24}$	2,5	0,2405	IEEE	M.I
$R_4$	2,5	0,7170	US	I.M	$R_{25}$	2,5	0,2399	IEEE	M.I
$R_5$	2,5	0,2564	IEEE	M.I	$R_{26}$	2,5	1,0471	IAC	M.I
$R_6$	2,5	0,1159	IEC	M.I	$R_{27}$	2,5	0,9590	IAC	M.I
$R_7$	2,5	1,3061	US	M.I	$R_{28}$	2,5	1,3170	US	M.I
$R_8$	2,5	0,1011	IEC	M.I	$R_{29}$	2,5	1,2335	IAC	M.I
$R_9$	2,5	0,2870	IEEE	M.I	$R_{30}$	2,5	1,3469	US	M.I
$R_{10}$	2,5	0,1173	IEC	M.I	$R_{31}$	2,5	1,1826	IAC	M.I
$R_{11}$	2,0	0,1192	IEC	M.I	$R_{32}$	2,5	0,1164	IEC	E.I
$R_{12}$	2,5	0,9871	IAC	M.I	$R_{33}$	2,5	0,1451	IEC	E.I
$R_{13}$	2,5	0,1112	IEC	M.I	$R_{34}$	2,5	0,1813	IEC	E.I
$R_{14}$	1,0	0,2695	IEC	M.I	$R_{35}$	2,5	0,2218	IEEE	M.I
$R_{15}$	2,5	3,9018	IAC	I.C	$R_{36}$	0,5	0,1543	IEC	I
$R_{16}$	2,5	0,1456	IEEE	I.M	$R_{37}$	2,5	0,7444	US	I
$R_{17}$	2,5	0,2791	IEEE	M.I	$R_{38}$	2,5	0,2909	IEEE	E.I
$R_{18}$	2,5	4,0853	IAC	I.C	$R_{39}$	2,5	0,1260	IEC	E.I
$R_{19}$	2,5	1,2088	IAC	M.I	$R_{40}$	2,5	0,7190	US	I
$R_{20}$	2,5	0,6645	IAC	I	$R_{41}$	2,5	0,2878	IEEE	M.I
$R_{21}$	2,5	1,2361	IAC	M.I	$R_{42}$	2,5	0,1072	IEC	M.I
Tempo (s)					8,7897				
FO (s)					8,4000				

### 6.5.8 Discussões

O AGCB-PL mostrou-se um algoritmo rápido e eficaz para a solucionar o problema da coordenação em sistemas radiais e malhados. Este algoritmo elimina a restrição de radialidade do AGCB-ABE. A qualidade da solução apresentada pela metodologia proposta foi melhor que outras meta-heurísticas apresentadas na literatura, como o AG (BEDEKAR; Bhide, 2011b), AG - Programação Não Linear (AG-PNL) (BEDEKAR; Bhide, 2011b; DARJI et al., 2015), Algoritmo de Busca *Cuckoo* (ABC) (DARJI et al., 2015), ADE (CHELLIAH et al., 2014), ADEA (DASH et al., 2013), ADECBO 2 (CHELLIAH et al., 2014), OAS (AMRAEE, 2012), OBB (ALBASRI; ALROOMI; TALAQ, 2015), OBB-PL (ALBASRI; ALROOMI; TALAQ, 2015)

e OEP (ZEINELDIN; EL-SAADANY; SALAMA, 2006). Os tempos médios de execução do algoritmo proposto são compatíveis com os publicados na literatura.

A desvantagem dessa metodologia é que, devido à PL, sua aplicação é restrita a relés cujos passos de *Dial* são muito pequenos.

## 6.6 Algoritmo Genético de Chu-Beasley - Programação Linear Inteira

O Algoritmo Genético de Chu-Beasley - Programação Linear Inteira (AGCB-PLI), apresentado na Secção 4.6, é aplicado nos sistemas radiais I e II, e nos malhados de 6 e 8 barras (considerando passos de *Dial* de 0,01). Da mesma forma que na Secção 6.4, são considerados passos de *Dial* de 0,05 e 0,01 para os sistemas I e II, respectivamente. Para o sistema de 6 barras, é considerado que os valores de *PSs* possuem passos de 0,01 A. Os resultados para os sistemas de 6 e 8 barras são comparados com os reportados em Corrêa et al. (2015), que também utilizou os mesmos sistemas elétricos e fez as mesmas considerações dos passos de *Dial* e *PS*. O AGCB-PLI é executado 100 vezes, e os parâmetros do AGCB são apresentados no Apêndice F. Adicionalmente, a técnica PLI é aplicada de forma isolada nos sistemas I e II para comparar com o ABE e a PLIM.

### 6.6.1 Sistemas I e II

Os resultados referentes aos parâmetros dos relés para os sistemas I e II são apresentados nas Tabelas 6.46 e 6.47, respectivamente. Novamente, o valor da FO reduziu-se a cada variável de decisão considerada no problema. Ao comparar os resultados das Tabelas 6.46 e 6.47 com os das Tabelas 6.15 e 6.16, verifica-se que o AGCB-PLI e o AGCB-ABE convergiram para as mesmas soluções (exceto para o caso III, do sistema II). Os parâmetros do AGCB-PLI são os mesmos que os apresentados na Tabela 6.14, utilizados para o AGCB-ABE.

**Tabela 6.46:** Resultados do AGCB-PLI para o sistema I.

Caso I				Caso II				Caso III			
<i>PS(A)</i>	<i>Dial</i>	Relé	Curva	<i>PS(A)</i>	<i>Dial</i>	Relé	Curva	<i>PS(A)</i>	<i>Dial</i>	Relé	Curva
7,00	0,25	IEC	M.I	7,75	0,20	IEC	M.I	6,25	3,15	IAC	E.I
4,00	0,15	IEC	I	5,50	0,15	IEC	M.I	4,00	2,50	US	E.I
5,50	0,15	IEC	I	8,50	0,15	IEC	E.I	6,25	3,05	IAC	E.I
4,00	0,10	IEC	M.I	4,00	0,10	IEC	M.I	4,00	1,05	IAC	I.C
4,00	0,10	IEC	E.I	4,00	0,10	IEC	E.I	4,00	1,05	IAC	I.C
FO (s)	4,9511			4,6313			3,0712				

**Tabela 6.47:** Resultados do AGCB-PLI para o sistema II.

Caso I				Caso II				Caso III			
<i>PS(A)</i>	<i>Dial</i>	Relé	Curva	<i>PS(A)</i>	<i>Dial</i>	Relé	Curva	<i>PS(A)</i>	<i>Dial</i>	Relé	Curva
8,50	0,20	IEC	I	4,75	0,28	IEC	E.I	5,50	0,48	IEEE	E.I
9,25	0,13	IEC	I	4,00	0,53	IEC	E.I	7,00	2,07	IAC	E.I
9,25	0,21	IEC	I	9,25	0,14	IEC	M.I	5,50	0,73	IEEE	E.I
4,00	0,10	IEC	I	4,00	0,10	IEC	M.I	4,00	1,09	IAC	I.C
4,00	0,10	IEC	I	4,00	0,10	IEC	M.I	4,00	1,09	IAC	I.C
3,25	0,10	IEC	I	3,25	0,10	IEC	M.I	3,25	1,09	IAC	I.C
6,25	0,19	IEC	I	6,25	0,12	IEC	E.I	10,00	0,55	US	E.I
7,00	0,10	IEC	I	3,25	0,20	IEC	E.I	10,00	0,33	IAC	M.I
3,25	0,10	IEC	I	3,25	0,10	IEC	E.I	3,25	0,72	US	I.C
3,25	0,10	IEC	I	3,25	0,10	IEC	E.I	3,25	1,04	IAC	I.C
FO (s)	12,2149			7,6076				6,501			

Para o sistema I, os tempos de atuação das proteções são apresentados nas Tabelas E.13, E.14 e E.15, para os casos I, II e III, respectivamente. Para o sistema II, os tempos são apresentados nas Tabelas E.16, E.17 e E.18, para os casos I, II e III, respectivamente. Ao analisar as Tabelas E.13 a E.18, verifica-se que os esquemas de proteção são seletivos, pois as diferenças entre os tempos de atuação das proteções primária e retaguarda são todas superiores a 0,4 segundo.

Os resultados estatísticos referentes aos valores mínimos, médios, máximos e os desvios padrões dos valores de FO, número de PLs, iterações e tempos computacionais demandados durante as 100 execuções do AGCB-PLI para os casos I, II e III são apresentados nas Tabelas 6.48, 6.49 e 6.50, respectivamente. Os tempos computacionais médios do AGCB-PLI mostrados nessas tabelas são significativamente maiores que os demandados pelo AGCB-ABE (apresentados nas Tabelas Tabela 6.17, 6.18 e 6.19).

**Tabela 6.48:** Resultado das simulações para o caso I, utilizando o AGCB-PLI.

	Sistema I				Sistema II			
	Mínimo	Média	Máximo	DP	Mínimo	Média	Máximo	DP
FO (s)	4,9511	4,9511	4,9511	0,00	12,2149	12,2175	12,2301	0,0056
PLIs calculados	93	520,7500	2536,00	515,28	2039	5677,6	10028	2146,432
Tempo (s)	0,231	0,909	5,2126	0,9033	4,352	12,3709	20,424	4,6185
Iterações	2	35,02	190	39,6765	87	246,1	437	93,6634

**Tabela 6.49:** Resultado das simulações para o caso II, utilizando o AGCB-PLI.

	Sistema I				Sistema II			
	Mínimo	Média	Máximo	DP	Mínimo	Média	Máximo	DP
FO (s)	4,6313	4,6853	4,8508	0,0766	7,6076	7,6643	7,892	0,0727
PLIs calculados	277	2794,5	7008	1992,49	976	11368,05	38199	11298,58
Tempo (s)	10,1294	167,44	455,4405	127,1435	3,0613	36,1294	240,0335	52,7021
Iterações	6	94,1	281	73,25	15	167,35	534	145,99

**Tabela 6.50:** Resultado das simulações para o caso III, utilizando o AGCB-PLI.

	Sistema I				Sistema II			
	Mínimo	Média	Máximo	DP	Mínimo	Média	Máximo	DP
FO (s)	3,0712	3,0872	3,1491	0,0224	6,501	6,5479	6,6991	0,044
PLIs calculados	1745	8226,9	18773	4987,58	13728	61996,6	117637	33693,09
Tempo (s)	3,2112	14,6911	33,4052	8,4038	44,576	253,9087	985,4334	217,5571
Iterações	64	329,25	770	207,10	321	1434,8	2773	781,025

## 6.6.2 Sistema de 6 Barras

Os resultados referentes aos valores de *Dial* e FO fornecidos pelo AGCB-PLI são apresentados na Tabela 6.51. Devido aos ajustes discretos de *Dial*, a FO (10,3659 segundos) é maior do que a encontrada pelo AGCB-PL (10,1512 segundos, Tabela 6.29). A estimativa  $PL_{max}$  para este sistema é de  $7,44E+18$ .

**Tabela 6.51:** Valores de *PSs* e *Dials* para o sistema de 6 barras.

Relé	<i>PS</i> (A)	<i>Dial</i>	Relé	<i>PS</i> (A)	<i>Dial</i>
$R_1$	1,38	0,11	$R_8$	1,25	0,05
$R_2$	1,46	0,19	$R_9$	1,25	0,05
$R_3$	1,25	0,10	$R_{10}$	1,42	0,05
$R_4$	1,31	0,11	$R_{11}$	1,44	0,07
$R_5$	1,25	0,05	$R_{12}$	1,29	0,06
$R_6$	1,41	0,05	$R_{13}$	1,44	0,05
$R_7$	1,25	0,05	$R_{14}$	1,38	0,08
Tempo (s)	22,0762				
FO (s)	10,3659				

Os tempos de atuação dos relés para falhas no início e no fim das linhas de transmissão são apresentados na Tabela 6.52. Verifica-se que o sistema encontra-se coordenado de forma seletiva, pois os  $\Delta T$  são superiores a 0,20 segundos. O elevado tempo de atuação da proteção de retaguarda de  $R_2 - R_3$  (32,0373 segundos) é devido ao valor corrente vista por  $R_3$  ( $I_{cc_{ret.}}/RTC = 1,278$  A, da Tabela 5.5) ser próximo do menor ajuste de *PS* disponível (1,2 A). A insensibilidade da proteção de retaguarda de  $R_3 - R_{10}$  é devido à corrente vista por  $R_{10}$  ( $I_{cc_{ret.}}/RTC = 0,088$  A, da Tabela 5.5) ser inferior ao menor valor de *PS* dis-

ponível (1,2 A). Os tempos de atuação das proteções primárias são apresentados na Tabela 6.53 e estes estão dentro dos limites impostos pelo problema (0,05 a 1 segundo).

**Tabela 6.52:** Tempos de atuação dos relés para o sistema de 6 barras.

$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$\frac{I_{cc_{pri.}}}{RTC}$ (A)	$\frac{I_{cc_{ret.}}}{RTC}$ (A)	$R_{prim.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$\frac{I_{cc_{pri.}}}{RTC}$ (A)	$\frac{I_{cc_{ret.}}}{RTC}$ (A)
Faltas no início da linha							Faltas no fim da linha						
$R_1$	$R_8$	0,2762	0,5536	0,2773	20,79	2,34	$R_{14}$	$R_{10}$	0,2912	0,5523	0,2611	9,11	2,67
$R_1$	$R_{11}$	0,2762	3,3394	3,0631	20,79	1,67	$R_1$	$R_8$	0,3853	1,1817	0,7964	9,79	1,68
$R_2$	$R_3$	0,6580	32,0373	31,3793	10,59	1,28	$R_2$	$R_3$	0,4691	0,6874	0,2183	23,02	3,43
$R_3$	$R_{10}$	0,4341	0,6349	0,2009	6,11	2,46	$R_4$	$R_1$	0,3203	0,5225	0,2022	13,70	5,90
$R_3$	$R_{10}$	0,3393	-	-	9,44	0,09	$R_5$	$R_{12}$	0,4429	1,1072	0,6644	2,74	1,88
$R_3$	$R_{13}$	0,3393	0,6087	0,2694	9,44	2,55	$R_6$	$R_3$	0,1884	1,1333	0,9449	8,73	2,31
$R_4$	$R_1$	0,4034	0,8378	0,4344	8,53	3,43	$R_7$	$R_2$	0,6153	0,8173	0,2020	2,20	7,24
$R_5$	$R_{12}$	0,2205	0,4441	0,2236	5,96	3,29	$R_7$	$R_{11}$	0,6153	0,8523	0,2370	2,20	2,55
$R_5$	$R_{14}$	0,2205	0,7430	0,5225	5,96	2,92	$R_9$	$R_4$	0,2470	0,4491	0,2021	5,06	7,07
$R_6$	$R_3$	0,1884	0,7883	0,5999	8,73	3,01	$R_9$	$R_{13}$	0,2470	0,4499	0,2029	5,06	3,12
$R_7$	$R_2$	0,5354	0,7760	0,2406	2,39	7,87	$R_{11}$	$R_6$	0,3858	0,5907	0,2049	5,05	2,54
$R_7$	$R_{11}$	0,5354	0,7427	0,2073	2,39	2,77	$R_{11}$	$R_{14}$	0,3858	0,5871	0,2012	5,05	3,55
$R_9$	$R_4$	0,2715	0,4854	0,2139	4,46	6,24	$R_{12}$	$R_2$	0,3097	5,8559	5,5462	4,92	1,83
$R_9$	$R_{13}$	0,2715	0,5368	0,2654	4,46	2,75	$R_{12}$	$R_8$	0,3097	0,8257	0,5160	4,92	1,91
$R_{11}$	$R_6$	0,5769	3,5740	2,9972	3,34	1,55	$R_{13}$	$R_{12}$	0,2108	0,4133	0,2024	7,37	3,53
$R_{11}$	$R_{14}$	0,5769	0,9319	0,3550	3,34	2,51	$R_{14}$	$R_4$	0,4339	2,4124	1,9785	4,93	1,80
$R_{12}$	$R_2$	0,2274	0,9312	0,7038	7,91	5,97	$R_{14}$	$R_{10}$	0,4339	1,1116	0,6777	4,93	1,94
$R_{12}$	$R_8$	0,2274	0,4696	0,2422	7,91	2,62							
$R_{13}$	$R_6$	0,2108	0,7430	0,5322	7,37	2,25							
$R_{13}$	$R_{12}$	0,3305	0,6837	0,3532	4,11	2,38							
$R_{14}$	$R_4$	0,2912	0,5425	0,2513	9,11	5,31							

**Tabela 6.53:** Tempos de atuação das proteções primárias para o sistema de seis barras (AGCB-PLI).

Faltas no início da linha		Faltas no fim da linha	
$R_{pri.}$	$T_{pri.}$ (s)	$R_{pri.}$	$T_{pri.}$ (s)
$R_1$	0,3853	$R_2$	0,4691
$R_2$	0,6580	$R_1$	0,2762
$R_3$	0,4341	$R_4$	0,3203
$R_4$	0,4034	$R_3$	0,3393
$R_5$	0,4429	$R_6$	0,1884
$R_6$	0,3425	$R_5$	0,2205
$R_7$	0,6153	$R_8$	0,3233
$R_8$	0,3667	$R_7$	0,5354
$R_9$	0,2715	$R_{10}$	0,3607
$R_{10}$	0,3997	$R_9$	0,2470
$R_{11}$	0,5769	$R_{12}$	0,2274
$R_{12}$	0,3097	$R_{11}$	0,3858
$R_{13}$	0,3305	$R_{14}$	0,4339
$R_{14}$	0,2912	$R_{13}$	0,2108

Na Tabela 6.54, são apresentados os resultados estatísticos referentes aos valores de FO, quantidade de PLs solucionados, tempos de execução e número

de iterações do AGCB-PLI para o sistema de 6 barras. Os valores de FO oscilam entre 10,3659 a 10,3695 segundos. O número de PLs solucionados, os tempos computacionais e o número de iterações demandados apresentaram uma variação significativa.

**Tabela 6.54:** Resultado das simulações para o sistema de 6 barras, AGCB-PLI.

	Mínimo	Média	Máximo	DP
FO (s)	10,3659	10,3660	10,3695	0,0004
PL solucionados	2782	5409,89	20876	2499,00
Tempo (s)	8,3761	22,0762	82,1601	13,4345
Iterações	101	202,97	807	97,95

Na Tabela 6.55, é realizado um comparativo entre as respostas da AGCB-PLI e a Programação Inteira Binária (PIB) (CORRÊA et al., 2015). A FO fornecida pela metodologia proposta é melhor do que a encontrada pela PIB. Entretanto, o tempo computacional médio demandado pelo AGCB-PLI foi 68,78 % maior do que a PIB.

**Tabela 6.55:** Comparativo entre os resultados do sistema de 6 barras.

Técnica	Autores	Tempo (s)	FO (s)
PIB	(CORRÊA et al., 2015)	13,08	10,5300
<b>AGCB-PLI</b>	<b>O autor</b>	<b>22,0762</b>	<b>10,3659</b>

### 6.6.3 Sistema de 8 Barras

Os ajustes de *PS* e *Dial* fornecidos pelo algoritmo são apresentados na Tabela 6.56. Os tempos de atuação dos relés são apresentados na Tabela 6.57. O sistema encontra-se coordenado de forma seletiva, pois todos os valores de  $\Delta T$  são superiores a 0,30 segundos. A FO foi maior do que a encontrada pelo AGCB-PL ( $FO = 8,4271$  segundos, Tabela 6.34) devido à consideração dos passos discretos de *Dial* no problema.

Na Tabela 6.58, são apresentados os resultados estatísticos referentes às 100 execuções do algoritmo para o sistema de 8 barras. Os valores de FO não apresentaram variações. O número de PLs solucionados, os tempos computacionais e o número de iterações demandados pela BL-PL apresentaram uma baixa variação.

**Tabela 6.56:** Valores ótimos de *PSs* e *Dials* para o sistema de 8 barras.

Relé	<i>PS</i> (A)	<i>Dial</i>	Relé	<i>PS</i> (A)	<i>Dial</i>
$R_1$	2,50	0,10	$R_8$	2,50	0,17
$R_2$	2,50	0,28	$R_9$	2,50	0,15
$R_3$	2,50	0,24	$R_{10}$	2,50	0,18
$R_4$	2,00	0,19	$R_{11}$	2,50	0,19
$R_5$	2,50	0,10	$R_{12}$	2,50	0,27
$R_6$	2,50	0,18	$R_{13}$	2,50	0,10
$R_7$	2,50	0,26	$R_{14}$	2,50	0,25
Tempo (s)	8,4352				
FO (s)	8,6944				

**Tabela 6.57:** Tempos de atuação dos relés para o sistema de 8 barras.

$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$I_{cc_{pri.}}$ (A)	$I_{cc_{ret.}}$ (A)
$R_1$	$R_6$	0,4087	0,7357	0,3270	3232	3232
$R_2$	$R_1$	0,8365	1,3742	0,5377	5924	996
$R_2$	$R_7$	0,8365	1,1539	0,3174	5924	1890
$R_3$	$R_2$	0,7522	1,0820	0,3297	3556	3556
$R_4$	$R_3$	0,6310	0,9575	0,3264	3783	2244
$R_5$	$R_4$	0,4978	0,8129	0,3151	2401	2401
$R_6$	$R_5$	0,5305	1,0066	0,4761	6109	1197
$R_6$	$R_{14}$	0,5305	1,1157	0,5853	6109	1874
$R_7$	$R_5$	0,6903	1,0066	0,3163	5223	1197
$R_7$	$R_{13}$	0,6903	1,3994	0,7091	5223	987
$R_8$	$R_7$	0,5016	1,1539	0,6523	6093	1890
$R_8$	$R_9$	0,5016	0,9718	0,4702	6093	1165
$R_9$	$R_{10}$	0,5645	0,8743	0,3098	2484	2484
$R_{10}$	$R_{11}$	0,6622	0,9628	0,3006	3883	2344
$R_{11}$	$R_{12}$	0,7171	1,0191	0,3019	3707	3707
$R_{12}$	$R_{13}$	0,8082	1,3994	0,5912	5899	987
$R_{12}$	$R_{14}$	0,8082	1,1157	0,3076	5899	1874
$R_{13}$	$R_8$	0,4288	0,7289	0,3001	2991	2991
$R_{14}$	$R_1$	0,6650	1,3742	0,7092	5199	996
$R_{14}$	$R_9$	0,6650	0,9718	0,3068	5199	1165

Na Tabela 6.59, é apresentado o comparativo entre os resultados obtidos com a PIB (CORRÊA et al., 2015). A metodologia proposta encontrou a mesma solução ( $FO = 8,6944$  segundos), sendo 75,27 % mais rápida do que a PIB.

#### 6.6.4 Sistemas I e II – Apenas *Dials* como Variáveis de Decisão

Nesta subsecção, é aplicada a metodologia PLI de forma isolada para solucionar o problema da coordenação nos sistemas de distribuição radiais (sistemas I e II). Sendo assim, apenas os *Dials* são considerados como variáveis de decisão. Ao aplicar a PLI nos sistemas I e II, foram encontrados os mesmos valores de

**Tabela 6.58:** Resultado das simulações para o sistema de 8 barras, AGCB-PLI.

	Mínimo	Média	Máximo	DP
FO (s)	8,6944	8,6944	8,6944	0
PL solucionados	409	774,88	1123	150,12
Tempo (s)	1,6994	3,4073	5,4499	0,6439
Iterações	16	32,65	50	6,95

**Tabela 6.59:** Comparativo entre os resultados do sistema de 8 barras.

Técnica	Autores	Tempo (s)	FO (s)
PIB	(CORRÊA et al., 2015)	34,11s	8,6944
<b>AGCB-PLI</b>	<b>O autor</b>	<b>8,4352</b>	<b>8,6944</b>

*Dial* e FO que as técnicas PLIM e ABE. Os tempos computacionais demandados pelas técnicas PLI, PLIM e ABE são apresentadas na Tabela 6.60. Em ambos os sistemas, a PLI foi mais rápida que a PLIM e mais lenta que o ABE. A técnica PLI mostrou-se mais interessante que a PLIM devido a sua velocidade e a capacidade de solucionar o problema da coordenação em sistemas malhados.

**Tabela 6.60:** Comparativo entre os tempos computacionais demandados pelas técnicas PLI, PLIM e ABE para os sistemas I e II.

	Sistema I			Sistema II		
	PLI	PLIM	ABE	PLI	PLIM	ABE
Tempo (ms)	<b>1,3090</b>	3,8792	0,1967	<b>1,5280</b>	38,7320	0,4230

### 6.6.5 Discussões

O AGCB-PLI solucionou o problema da coordenação em sistemas radiais e malhados, considerando os passos de *Dials* discretos na sua formulação. Para os sistemas radiais, os resultados encontrados possuem qualidade equiparada ao AGCB-ABE. Entretanto, o AGCB-ABE mostrou-se mais rápido que o AGCB-PLI, sendo mais interessante para a coordenação de RS não-direcionais. Para os sistemas malhados, o resultados obtidos são compatíveis com os encontrados na literatura. Sendo que, no sistema de 6 barras o AGCB-PLI encontrou uma solução melhor que a PIB reportada em Corrêa et al. (2015).

A técnica de PLI obteve sucesso em encontrar os valores de *Dial* do problema da coordenação. Para sistemas radiais, a PLI mostrou-se ser mais rápida e mais generalista (pois não possui a restrição de radialidade) do que a técnica de PLIM proposta neste trabalho.

A principal desvantagem do AGCB-PLI é que a etapa de PLI demanda maior



esforço computacional do que a técnica de PL.

## 6.7 Busca Local - Programação Linear

A metodologia de Busca Local - Programação Linear (BL-PL), apresentada na Seção 4.7, é aplicada nos sistemas radiais I e II e nos malhados de 3, 6, 8, 9 e 15 barras. A BL-PL forneceu os mesmos resultados (*PSs*, *Dials* e FO) que o AGCB-PL. Da mesma forma que o AGCB-PL, ela foi executada 100 vezes com propósito de verificar sua convergência. A seguir, são apresentados os resultados obtidos com a metodologia proposta.

### 6.7.1 Sistemas I e II

Os ajustes de *PSs* e *Dials* fornecidos pela BL-PL são os mesmos que os encontrados pelo AGCB-PL apresentados nas Tabelas 6.20 e 6.21, para o caso I (*PSs* e *Dials* são variáveis de decisão). Para o sistema I, a média do número de PLs calculados e do tempo de execução são 68,74 e 82,61 %, respectivamente, menores do que encontrados pelo AGCB-PL. Para o sistema II, a média do número de PLs calculados e do tempo de execução são 94,65 e 96,83 %, respectivamente, menores do que encontrados pelo AGCB-PL.

**Tabela 6.61:** Resultado das simulações utilizando a BL-PL, para os sistemas I e II.

	Sistema I				Sistema II			
	Mínimo	Média	Máximo	DP	Mínimo	Média	Máximo	DP
FO (s)	4,8168	4,8168	4,8168	0,00	11,8579	11,8579	11,8579	0
PLs calculados	37	45,33	51	12,57	60	90,94	148	14,1363
Tempo (s)	0,019	0,0224	0,0252	0,0031	0,0319	0,0509	0,2167	0,0184

### 6.7.2 Sistema de 3 Barras

Os ajustes de *PSs* e *Dials* fornecidos pela BL-PL são os mesmos que os encontrados pelo AGCB-PL apresentados na Tabela 6.26. Os resultados estatísticos das 100 execuções da metodologia proposta são apresentados na Tabela 6.62. Da mesma forma que o AGCB-PL, a BL-PL não apresentou variações nos valores de FO, sendo que as 100 execuções convergiram para a mesma solução. A quantidade de PLs solucionados e os tempos computacionais médios demandados pela BL-PL são 68,61 e 82,32%, respectivamente, menores que os demandados pelo AGCB-PL.

**Tabela 6.62:** Resultado das simulações para o sistema de 3 barras.

	Mínimo	Média	Máximo	DP
FO (s)	1,5987	1,5987	1,5987	0
PLs solucionados	56	85,56	127	18,45
Tempo (s)	0,0235	0,0362	0,1956	0,0176

O comparativo entre resultados obtidos com os reportados na literatura e com o AGCB-PL é apresentado na Tabela 6.63. A BL-PL encontrou a mesma solução que o AGCB-PL e a OBB-PL (ALBASRI; ALROOMI; TALAQ, 2015). Entretanto, o tempo computacional médio demandado pela BL-PL é 83,32 e 98,79 % menor do que os demandados pelo AGCB-PL e a OBB-PL, respectivamente.

**Tabela 6.63:** Comparativo entre os resultados do sistema de 3 barras.

Técnica	Autores	Tempo (s)	FO (s)
OEP	(MANSOUR; MEKHAMER; EL-KHARBAWE, 2007)	0,5129	1,9258
OBB	(ALBASRI; ALROOMI; TALAQ, 2015)	16,23	1,6837
OAS	(AMRAEE, 2012)	10,45	1,5990
OBB-PL	(ALBASRI; ALROOMI; TALAQ, 2015)	2,99	1,5987
AGCB-PL	O autor	0,2047	1,5987
<b>BL-PL</b>	<b>O autor</b>	<b>0,0362</b>	<b>1,5987</b>

### 6.7.3 Sistema de 6 Barras

A BL-PL foi aplicada no sistema de 6 barras. Os ajustes de *PSs* e *Dials* são os mesmos que os encontrados com a na Tabela 6.29. Na Tabela 6.64, são apresentados os resultados estatísticos em relação as 100 execuções da BL-PL. Em todas as simulações os valores de FO foram os mesmos. As médias de PLs solucionados e dos tempos computacionais demandados pela BL-PL são 98,85 e 99,54%, respectivamente, menores que os encontrados com o AGCB-PL.

**Tabela 6.64:** Resultado das simulações para o sistema de 6 barras.

	Mínimo	Média	Máximo	DP
FO (s)	10,1512	10,1512	10,1512	0
PLs solucionados	255	836,49	1891	382,84
Tempo (s)	0,1303	0,4079	0,8963	0,1801

Os resultados referentes ao comparativo da BL-PL com os reportados na literatura e com o AGCB-PL são apresentados na Tabela 6.65. A metodologia proposta obteve a mesma resposta que o AGCB-PL ( $FO = 10,1512$  segundos), que é melhor do que o AG (SWIEF; ABDELAZIZ; NAGY, 2014), ADE (CHELLIAH et al., 2014), ADE 5 (THANGARAJ; PANT; DEEP, 2010), ADECBO 2 (CHELLIAH et

al., 2014) e ADEA (DASH et al., 2013). Neste caso, foi requerido um esforço computacional 99,54% menor do que o AGCB-PL. Adicionalmente, o tempo médio de processamento da BL-PL foi significativamente inferior aos tempos reportados na literatura.

**Tabela 6.65:** Comparativo entre os resultados do sistema de 6 barras.

Técnica	Autores	Tempo (s)	FO (s)
AG	(SWIEF; ABDELAZIZ; NAGY, 2014)	-	10,7345
ADE	(CHELLIAH et al., 2014)	129,8	10,6272
ADE 5	(THANGARAJ; PANT; DEEP, 2010)	-	10,3514
ADECBO 2	(CHELLIAH et al., 2014)	10,14	10,3286
ADEA	(DASH et al., 2013)	-	10,2664
AGCB-PL	O autor	89,0916	10,1512
<b>BL-PL</b>	<b>O autor</b>	<b>0,4079</b>	<b>10,1512</b>

#### 6.7.4 Sistema de 8 Barras

Para o sistema de 8 barras, os valores de *PSs* e *Dials* encontrados pela BL-PL são os mesmos que os encontrados pelo AGCB-PL, apresentados na Tabela 6.34. Sendo assim, os valores de *PSs* encontram-se dentro dos ajustes aceitos pelos relés, e o sistema encontra-se coordenado de forma seletiva.

Na Tabela 6.66, verifica-se que não houve variações nos valores de FO. Os valores médios de PLs solucionados e de tempos computacionais são 85,29 e 92,71%, respectivamente, menores do que os encontrados com o AGCB-PL. Ademais, seus desvios padrões são baixos, conferindo boa robustez à metodologia proposta.

**Tabela 6.66:** Resultado das simulações para o sistema de 8 barras.

	Mínimo	Média	Máximo	DP
FO (s)	8,4271	8,4271	8,4271	0
PLs solucionados	96	113,71	148	14,55
Tempo (s)	0,0507	0,0602	0,0842	0,0078

Na Tabela 6.67, é apresentado o comparativo entre os resultados obtidos com a BL-PL, os reportados na literatura e o AGCB-PL. A BL-PL encontrou a mesma solução ( $FO = 8,4271$  segundos) que o AGCB-PL e a OAS (AMRAEE, 2012). Na média, a metodologia proposta foi 92,71 e 99,88 % mais rápida do que o AGCB-PL e OAS, respectivamente.

**Tabela 6.67:** Comparativo entre os resultados do sistema de 8 barras.

Técnica	Autores	Tempo (s)	FO (s)
OEP	(ZEINELDIN; EL-SAADANY; SALAMA, 2006)	-	17,3300
AG	(NOGHABI; SADEH; MASHHADI, 2009)	36000	11,0010
AG-PL	(NOGHABI; SADEH; MASHHADI, 2009)	300	10,9490
OBB	(ALBASRI; ALROOMI; TALAQ, 2015)	2065,02	10,5495
OBB-PL	(ALBASRI; ALROOMI; TALAQ, 2015)	6,79	8,7556
OAS	(AMRAEE, 2012)	50,45	8,4271
AGCB-PL	O autor	0,8261	8,4271
<b>BL-PL</b>	<b>O autor</b>	<b>0,0602</b>	<b>8,4271</b>

### 6.7.5 Sistema de 9 Barras

Os valores dos ajustes de *PSs* e *Dials* fornecidos pela BL-PL para os 24 RSDs do sistema de 9 barras são os mesmos que os encontrados pelo AGCB-PL, e são apresentados na Tabela 6.38. Sendo assim, o sistema encontra-se seletivo, e as parametrizações fornecidas pelo algoritmo encontram-se dentro das faixas permitidas pelos relés. Para este sistema, os RSDs possuem tempos de atuação mínimos quando atuam como proteção primária. Dessa forma, o valor da FO é o menor que pode ser encontrado para este problema.

Na Tabela 6.68, são apresentadas as estatísticas das 100 execuções da metodologia proposta até encontrar a solução final. Todas as execuções da BL-PL convergiram para a mesma solução (4,8000 segundos). O número médio de PLs solucionados (105) e os tempos computacionais médios (0,0639) da BL-PL são 96,40 e 98,45%, respectivamente, menores que os encontrados com o AGCB-PL.

**Tabela 6.68:** Resultado das simulações para o sistema de 9 barras.

	Mínimo	Média	Máximo	DP
FO (s)	4,8000	4,8000	4,8000	0
PLs solucionados	94	104,49	114	3,87
Tempo (s)	0,0551	0,0639	0,0717	0,0031

Na Tabela 6.69, é realizado um comparativo entre os resultados obtidos com os reportados na literatura e com o AGCB-PL. Verifica-se que a BL-PL encontrou uma solução com a mesma qualidade ( $FO = 4,8000$  segundos) que o OBB-PL (ALBASRI; ALROOMI; TALAQ, 2015) e o AGCB-PL. O tempo computacional médio demandado pela metodologia proposta foi 98,45% menor do que o do AGCB-PL.

**Tabela 6.69:** Comparativo entre os resultados do sistema de 9 barras.

Técnica	Autores	Tempo (s)	FO (s)
AG	(BEDEKAR; Bhide, 2011b)	-	32,6058
OBB	(ALBASRI; ALROOMI; TALAQ, 2015)	-	28,8348
PQS	(BEDEKAR; Bhide, 2011b)	-	19,4041
AG-PNL	(BEDEKAR; Bhide, 2011b)	-	6,1786
OBB-PL	(ALBASRI; ALROOMI; TALAQ, 2015)	-	4,8000
AGCB-PL	O autor	7,2363	4,8000
<b>BL-PL</b>	<b>O autor</b>	<b>0,0639</b>	<b>4,8000</b>

### 6.7.6 Sistema de 15 Barras

Os ajustes de *PSs* e *Dials* encontrados pela BL-PL são os mesmos que os encontrados pelo AGCB-PL, e são apresentados na Tabela 6.29. Sendo assim, o sistema encontra-se seletivo e os ajustes estão dentro dos valores aceitos pelos relés.

Na Tabela 6.70, são apresentados os resultados estatísticos referente as 100 execuções da BL-PL. Os valores de FO não apresentaram variações durante as 100 execuções da metodologia proposta. Os desvios padrões referentes ao número de PLs solucionados e os tempos computacionais foram relativamente baixos. Na média, o número de PLs solucionados (558) e o tempo computacional (0,5050 segundos) da BL-PL são 72,76 e 90,13 %, respectivamente, menores que os encontrados pelo AGCB-PL.

**Tabela 6.70:** Resultado das simulações para o sistema de 15 barras.

	Mínimo	Média	Máximo	DP
FO (s)	12,2149	12,2149	12,2149	0
PLs solucionados	444	558,07	720	71,59
Tempo (s)	0,3794	0,5050	0,7058	0,0799

Um comparativo entre os resultados encontrados pela BL-PL, os reportados na literatura e o AGCB-PL é apresentado na Tabela 6.71. Foi encontrado o mesmo valor de FO que o AGCB-PL ( $FO = 12,2149$  segundos). Porém, foi exigido um tempo computacional 90,13 % menor do que o AGCB-PL. Destaca-se a velocidade da técnica proposta em frente às metodologias apresentadas nessa tabela.

**Tabela 6.71:** Comparativo entre os resultados do sistema de 15 barras.

Técnica	Autores	Tempo (s)	FO (s)
AG	(DARJI et al., 2015)	-	35,8812
AG-PNL	(DARJI et al., 2015)	-	19,5843
ABC	(DARJI et al., 2015)	-	19,5521
SBB	(AMRAEE, 2012)	-	15,3350
OEP-PL	(AMRAEE, 2012)	60,7	15,0020
OAS	(AMRAEE, 2012)	406,3	12,2270
AGCB-PL	O autor	5,1147	12,2149
<b>BL-PL</b>	<b>O autor</b>	<b>0,5050</b>	<b>12,2149</b>

### 6.7.7 Discussões

A BL-PL apresenta grande eficácia na solução do problema da coordenação RSs e RSDs. Para os sistemas radiais, a metodologia encontrou as mesmas respostas que o AGCB-PL, em um tempo computacional significativamente menor. Para sistemas malhados, a mesma encontrou os melhores resultados apresentados na literatura e, em alguns casos, resultados ainda melhores. Os tempos computacionais demandados pela técnica proposta são relativamente baixos, se comparados com os reportados na literatura. Nos sistemas utilizados, os valores de FO não variaram durante 100 execuções, garantindo ao algoritmo uma excelente convergência. Ao contrário das técnicas meta-heurísticas bio-inspiradas, a BL-PL não possui parâmetros a serem ajustados. Nos cinco sistemas utilizados, os tempos computacionais demandados pela metodologia proposta foram menores que 1 segundo. Devido à velocidade do algoritmo, a BL-PL mostra-se interessante para aplicações em tempo real.

Uma das desvantagens da metodologia proposta é que ela lida apenas com as variáveis de decisão *PSs* e *Dials*. Outro ponto negativo, é que a BL-PL é aplicável apenas em relés cujos passos de *Dial* são pequenos o suficiente para que sejam tratados como variáveis contínuas.

## 6.8 Síntese do Capítulo

Neste capítulo, foi demonstrado que problemas de seletividade podem ocorrer quando os *Dials* são arredondados no final do processo de otimização. À medida que mais variáveis de decisão são adicionadas ao problema, o espaço de busca aumenta consideravelmente e os algoritmos demoram mais para convergir para a solução final. Entretanto, a velocidade do esquema de proteção aumenta, pois, os tempos de atuação das proteções são reduzidos.

As metodologias PL, PLIM, ABE, AGCB-ABE, AGCB-PL, AGCB-PLI e BL-PL mostraram ser técnicas eficazes para a solução do problema da coordenação de RSs de tempo inverso. Os resultados fornecidos pelo AGCB-PL, AGCB-PLI e BL-PL foram compatíveis com os reportados na literatura.

## 7 Conclusões

Neste trabalho, foram estudadas e implementadas computacionalmente várias metodologias para solucionar o problema da coordenação de relés de sobrecorrente de tempo inverso, direcionais e não direcionais. Este problema consiste em encontrar os ajustes dos relés de forma a minimizar os seus tempos de atuação, sem prejudicar a seletividade, confiabilidade e a sensibilidade do esquema de proteção. Todas as metodologias foram aplicadas na coordenação dos relés de fase. Entretanto, as mesmas podem ser aplicadas para os relés de neutro. As contribuições mais importantes desse trabalho são os comparativos de diferentes metodologias para solucionar o problema da coordenação de RSs e o AGCB-ABE, AGCB-PL, AGCB-PLI e BL-PL propostos neste trabalho. Dentre as metodologias propostas, a BL-PL merece um destaque devido a sua eficácia e eficiência em relação às metodologias implementadas neste trabalho e as reportadas na literatura.

Para sistemas de distribuição radiais, as metodologias PLIM, ABE e AGCB-ABE possuem aplicação restrita na coordenação de RSs não direcionais. As três metodologias são capazes de lidar com os passos discretos de *Dial*, visto que o simples arredondamento dessas variáveis pode causar perda de seletividade. Na PLIM e no ABE, apenas os *Dials* são considerados como variáveis de decisão. Ao passo que o AGCB-ABE lida com o problema não linear, considerando os *PSs*, *Dials*, tipos de curvas e tipos de relés como variáveis de decisão. A motivação em considerar os tipos de relés como variáveis de decisão no problema de otimização é que alguns fabricantes de relés permitem escolher o padrão da curva característica utilizada. Os resultados mostraram que a velocidade do sistema de proteção e os tempos computacionais demandados aumentam a cada variável de decisão adicionada ao problema da coordenação. O ABE foi utilizado em conjunto com o AGCB devido a sua velocidade, eficácia e a capacidade em lidar com *Dials* discretos. Para os sistemas radiais, o AGCB-ABE mais interessante do que o AGCB-PLI devido a sua maior velocidade de execução por causa do otimizador local utilizado (ABE).



O AGCB-PL, AGCB-PLI e a BL-PL podem ser aplicados para na coordenação de RS não direcionais e RSDs em sistemas de distribuição radiais e de transmissão malhados, respectivamente. As três metodologias híbridas trabalham com o problema não linear. O AGCB-PL e o AGCB-PLI podem considerar os *PSs*, *Dials*, tipos de curvas e tipos de relés como variáveis de decisão, enquanto a BL-PL considera apenas *PSs* e *Dials* como variáveis de decisão. O AGCB-PL e a BL-PL foram aplicados nos sistemas de 3, 6, 8, 9 e 15 barras. Os resultados foram confrontados com outros trabalhos que utilizaram as mesmas condições<sup>1</sup>. Nestes casos, os algoritmos encontraram soluções compatíveis com as reportadas na literatura, sendo que para os sistemas de 6 e 15 barras, foi possível encontrar melhores soluções. Os resultados mostram a eficácia do AGCB-PL e da BL-PL em relação às metodologias: AG (NOGHABI; SADEH; MASHHADI, 2009; BEDEKAR; Bhide, 2011b; DARJI et al., 2015; SWIEF; ABDELAZIZ; NAGY, 2014), AG-PL (NOGHABI; SADEH; MASHHADI, 2009), AG-PNL (BEDEKAR; Bhide, 2011b), PQS (BEDEKAR; Bhide, 2011b), ABC (DARJI et al., 2015), ADE (CHELLIAH et al., 2014; THANGARAJ; PANT; DEEP, 2010), ADEA (DASH et al., 2013), ADEBO (CHELLIAH et al., 2014), OAS (AMRAEE, 2012), SBB (AMRAEE, 2012), OBB (ALBASRI; ALROOMI; TALAQ, 2015), OBB-PL (ALBASRI; ALROOMI; TALAQ, 2015), OEP (MANSOUR; MEKHAMER; EL-KHARBAWE, 2007; ZEINELDIN; EL-SAADANY; SALAMA, 2006) e OEP-PL (PAPASPILIOTOPOULOS; KURASHVILI; KORRES, 2014). Em relação aos tempos computacionais, a BL-PL foi mais rápida do que o AGCB-PL. De forma que a velocidade da técnica de BL-PL mostrou-se adequada para a aplicação em esquemas de proteções adaptativos em tempo real.

Com o AGCB-PLI foi possível coordenar os RSDs, considerando os ajustes discretos de *Dial*, sendo necessário reformular o modelo matemático da coordenação para considerar os *Dials* como variáveis inteiras. O AGCB-PLI foi validado nos sistemas de 6 e 8 barras. A metodologia proposta conseguiu resultados compatíveis com os reportados na literatura, sendo que foi possível encontrar uma melhor solução que a PIB (CORRÊA et al., 2015) para o sistema de 6 barras.

---

<sup>1</sup>Tais como: valores de corrente de falha, topologia, limites dos ajustes, tamanho dos passos dos ajustes, mesmos tipos de curvas características etc.

## 7.1 Trabalhos Futuros

- Considerar as unidades de tempo definido (50) dos RSs na formulação do problema da coordenação;
- Considerar outros tipos de relés na coordenação, como os relés de distância;
- Desenvolver um *software* comercial que realiza os cálculos de fluxo de potência, curtos-circuitos e as parametrizações dos relés com técnicas de otimização;
- Avaliar a adição de dispositivos limitadores de corrente de falha, no problema da coordenação;
- Considerar o efeito da saturação dos TCs;
- Inserir uma etapa de pré-processamento para verificar quais pares de relés são insensíveis antes do processo de otimização iniciar.

## 7.2 Trabalhos Desenvolvidos

1. KIDA, A.A.; GALLEGO, L. A. Programação Linear Inteira Mista Aplicada à Coordenação Ótima de Relés de Sobrecorrente. *In: XLVII SBPO – Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2015, Porto de Galinhas. Anais do XLVII SBPO, 2015.*

Estado: Publicado e apresentado.

2. KIDA, A.A.; ECHAVARRIA, A. F. A.; MACHADO, S. J. M.; GALLEGO, L. A. Algoritmos Heurísticos Aplicados ao Planejamento de Redes de Transmissão. *In: XLVII SBPO – Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2015, Porto de Galinhas. Anais do XLVII SBPO, 2015.*

Estado: Publicado e apresentado.

3. KIDA, A.A.; GALLEGO, L. A. Optimal Coordination of Overcurrent Relays Using Mixed Integer Linear Programming. *In: IEEE Latin America Transactions, v.14, n.3, 2016.*

Estado: Aceito para publicação (29/12/2015).

Qualis (Engenharias IV): B2.

4. KIDA, A.A.; GALLEGO, L. A. A High Performance Hybrid Algorithm to Solve the Optimal Coordination of Overcurrent Relays in Radial Distribution Networks Considering Several Curve Shapes. *In Electric Power Systems Research.*

Estado: Em processo de revisão (24/10/2015).

Qualis (Engenharias IV): A2.

5. KIDA, A.A., GALLEGO, L. A., GOMEZ, O. A Novel Optimization Technique for Coordination of Directional Overcurrent Relays. *In IEEE Transactions on Power Delivery.*

Estado: Em processo de revisão (03/03/2016).

Qualis (Engenharias IV): A1.

## Referências

ALAM, M. N.; DAS, B.; PANT, V. A comparative study of metaheuristic optimization approaches for directional overcurrent relays coordination. *Electric Power Systems Research*, Elsevier B.V., v. 128, p. 39–52, 2015. ISSN 03787796.

ALBASRI, F. A.; ALROOMI, A. R.; TALAQ, J. H. Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays Using Biogeography-Based Optimization Algorithms. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 30, n. 4, p. 1810–1820, aug 2015. ISSN 0885-8977.

ALMEIDA, M. A. D. *Apostila de Proteção de Sistemas Elétricos*. Natal: [s.n.], 2000. 133 p.

AMRAEE, T. Coordination of directional overcurrent relays using seeker algorithm. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 27, n. 3, p. 1415–1422, 2012. ISSN 08858977.

ANDERSON, P. *Power System Protection*. United States of America: The Institute Of Electrical And Electronics Engineers, Inc, 1999. 1307 p. ISBN 3175723993.

ASSOCIATION, A. *Aluminum Electrical Conductor Handbook*. 3rd.. ed. [S.l.]: The Aluminum Association, 1989. 183 p.

BEDEKAR, P.; BHIDE, S.; KALE, V. Coordination of overcurrent relays in distribution system using linear programming technique. In: *Control, Automation, Communication and Energy Conservation, 2009. INCACEC 2009. 2009 International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 4–7. ISBN 978-1-4244-4789-3.

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, 2011. ISSN 08858977.

BEDEKAR, P. P.; BHIDE, S. R. Optimum coordination of overcurrent relay timing using continuous genetic algorithm. *Expert Systems with Applications*, Elsevier Ltd, v. 38, n. 9, p. 11286–11292, set. 2011. ISSN 09574174.

BEDEKAR, P. P.; BHIDE, S. R.; KALE, V. S. Optimum Coordination of Overcurrent Relays in Distribution System Using Dual Simplex Method. *2009 Second International Conference on Emerging Trends in Engineering & Technology*, Ieee, p. 555–559, 2009.

BIRLA, D.; MAHESHWARI, R. P.; GUPTA, H. O.; DEEP, K.; THAKUR, M. Application of Random Search Technique in Directional Overcurrent Relay Coordination. *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, v. 7, n. 1, jan 2006. ISSN 1553-779X.

- BLACKBURN, J. L.; DOMIN, J. T. *Protective Relaying - Principles and Applications*. 3rd. ed. United States of America: CRC Press, 2006. 638 p. ISBN 9781574447163.
- BOTTURA, F. B. *Algoritmo de Otimização Híbrido para a Coordenação de Relés Direcionais de Sobrecorrente em um Sistema Elétrico Malhado*. 256 p. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2014.
- BRADLEY, S. P.; HAX, A. C.; MAGNANTI, T. L. *Applied Mathematical Programming*. [S.l.]: Addison-Wesley, 1977. 716 p. ISBN 978-0201004649.
- CASTILLO, C. A.; CONDE, A.; ELISA, S. Directional overcurrent relay coordination considering non-standardized time curves. v. 122, p. 42–49, 2015.
- CHATTOPADHYAY, B.; SACHDEV, M. S.; SIDHU, T. S. An on-line relay coordination algorithm for adaptive protection using linear programming technique. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 11, n. 1, p. 165–171, 1996. ISSN 08858977.
- CHELLIAH, T. R.; THANGARAJ, R.; ALLAMSETTY, S.; PANT, M. Coordination of directional overcurrent relays using opposition based chaotic differential evolution algorithm. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Elsevier Ltd, v. 55, p. 341–350, 2014. ISSN 01420615.
- CHU, P.; BEASLEY, J. A genetic algorithm for the generalised assignment problem. *Journal of the Operational Research Society*, v. 48, n. 8, p. 804–809, ago. 1997. ISSN 0160-5682.
- CORRÊA, R. *Otimização da Coordenação de Relés de Sobrecorrente Direcionais em Sistemas Elétricos de Potência Utilizando a Programação Inteira Binária*. 92 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, 2012.
- CORRÊA, R.; CARDOSO, G.; ARAÚJO, O. C.; MARIOTTO, L. Online coordination of directional overcurrent relays using binary integer programming. *Electric Power Systems Research*, v. 127, p. 118–125, out. 2015. ISSN 03787796.
- CPFL. *Proteção de Redes Aéreas de Distribuição - Sobrecorrente*. 2006. 1–155 p.
- DARJI, G.; PATEL, M.; RAJPUT, V.; PANDYA, K. A tuned cuckoo search algorithm for optimal coordination of Directional Overcurrent Relays. In: *2015 International Conference on Power and Advanced Control Engineering (ICPACE)*. [S.l.]: IEEE, 2015. p. 162–167. ISBN 978-1-4799-8371-1.
- DASH, S. S.; MOIRANGTHEM, J.; RAMASWAMI, R.; K.R., K. Adaptive differential evolution algorithm for solving non-linear coordination problem of directional overcurrent relays. *IET Generation, Transmission & Distribution*, v. 7, n. 4, p. 329–336, 2013. ISSN 1751-8687.
- DUAILIBE, P. *Subestações: Tipos, Equipamentos e Proteção*. 1999. 1–85 p. Disponível em: <<http://www.uff.br/lev/downloads/apostilas/SE.pdf>>.
- ELETRIC, G. *735/737*. 2009. 735–738 p. Disponível em: <<http://www.gegridsolutions.com/products/brochures/735737.pdf>>.

- ELETROBRAS. *Proteção de Sistemas Aéreos de Distribuição*. V. 2. Rio de Janeiro: [s.n.], 1982. 235 p. ISBN 85-7001-090-7.
- ELRAFIE, H.; IRVING, M. Linear programming for directional overcurrent relay coordination in interconnected power systems with constraint relaxation. *Electric Power Systems Research*, v. 27, n. 3, p. 209–216, 1993. ISSN 03787796.
- ESTRADA, N.; CARMONA, O.; RUIZ, A. Coordinación de relés de sobrecorriente usando el método de optimización de puntos interiores. *Scientia et Technica*, n. 32, p. 25–30, 2006.
- EZZEDDINE, M.; KACZMAREK, R. A novel method for optimal coordination of directional overcurrent relays considering their available discrete settings and several operation characteristics. *Electric Power Systems Research*, v. 81, n. 7, p. 1475–1481, 2011. ISSN 03787796.
- FILHO, J. M.; MAMEDE, D. R. *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*. 1a.. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 605 p. ISBN 9788521618843.
- GLOVER, F.; KOCHENBERGER, G. A. *Handbook of Metaheuristic*. 2nd. ed. New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers, 2003. 648 p. ISBN 1402072635.
- GRIDS, S. TECHNOLOGY ROADMAP. In: *SpringerReference*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. p. 52.
- HOLLAND, J. H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. [S.l.]: The University of Michigan Press, 1975.
- HOROWITZ, S. H.; PHADKE, A. G. *Power System Relaying*. 3rd ed.. ed. West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd., 2008. 348 p. ISBN 978-0-470-75879-3.
- IBM. *ILOG AMPL Version 12.2 Users Guide*. 2010. Disponível em: <<http://ampl.com/BOOKLETS/amplplex122userguide.pdf>>.
- KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B. de; ROBBA, E. J. *Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*. 2a.. ed. São Paulo: [s.n.], 2010. 328 p.
- KARHI, B. D. *Caching in Iterative Hill Climbing*. 63 p. Dissertação (Mestrado) — Texas State University-San Marcos, 2008.
- KAVEHNIA, F.; SEIFI, H.; KEIVANI, H.; ASKARI, M. R. Optimal Coordination of Directional Over Current Relays in Power System Using Genetic Algorithm. In: *Proceedings of the 41st International Universities Power Engineering Conference*. [S.l.]: IEEE, 2006. p. 824–827. ISBN 978-186135-342-9.
- KINDERMANN, G. *Proteção de Sistema Elétricos de Potência*. 2a.. ed. Florianópolis - SC: Edição do Autor, 2005. 148 p. ISBN 8590085317.
- LEDESMA, J. J. G. *Uma Metodologia para Análise da Coordenação e Seletividade da Proteção de Sistemas de Distribuição*. 183 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Juiz de Fora, 2012.
- LIU, A.; YANG, M. T. A new hybrid nelder-mead particle swarm optimization for coordination optimization of directional overcurrent relays. *Mathematical Problems in Engineering*, v. 2012, 2012. ISSN 1024123X.

- MANSOUR, M. M.; MEKHAMER, S. F.; EL-KHARBAWE, N. E. S. A modified particle swarm optimizer for the coordination of directional overcurrent relays. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 22, n. 3, p. 1400–1410, 2007. ISSN 08858977.
- MARCOLINO, M. H.; LEITE, J. B.; MANTOVANI, J. R. S. Optimal Coordination of Overcurrent Directional and Distance Relays in Meshed Networks Using Genetic Algorithm. *IEEE Latin America Transactions*, v. 13, n. 9, p. 2975–2982, sep 2015. ISSN 1548-0992.
- NIYOMPANT, S.; LEETON, U.; KULWORAWANICHPONG, T.; CHOMNAWANG, N. Application of linear programming for optimal coordination of directional over-current relays. *2012 9th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, Ieee, p. 1–4, maio 2012.
- NOGHABI, A. S.; SADEH, J.; MASHHADI, H. R. Considering different network topologies in optimal overcurrent relay coordination using a hybrid GA. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 24, n. 4, p. 1857–1863, 2009. ISSN 08858977.
- PAPASPILIOTOPOULOS, V. A.; KURASHVILI, T. S.; KORRES, G. N. Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays for Distribution Systems with Distributed Generation based on a Hybrid PSO-LP Algorithm. In: *9th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission Distribution and Energy Conversion (MedPower'14)*. Athens, Greece: [s.n.], 2014. p. 1–6.
- PATIDAR, V. *Multi-Objective Optimization for Bridge Management Systems*. Vol. 67. [S.l.: s.n.], 2007.
- PEREIRA, D. R. *Um Sistema de Software para Execução de Estudos de Coordenação e Seletividade em Sistemas de Distribuição*. 222 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Itajubá, 2007.
- RAJPUT, V. N.; PANDYA, K. S.; JOSHI, K. Optimal coordination of Directional Overcurrent Relays using hybrid CSA-FFA method. In: *2015 12th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*. [S.l.]: IEEE, 2015. v. 119, p. 1–6. ISBN 978-1-4799-7961-5. ISSN 03787796.
- RASHTCHI, V.; GHOLINEZHAD, J.; FARHANG, P. Optimal coordination of overcurrent relays using Honey Bee Algorithm. *2010 International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, p. 401–405, 2010.
- RAZA, S. A.; MAHMOOD, T.; BASIT, S.; BUKHARI, A.; NAWAZ, M. K. Application of Optimization Techniques in Overcurrent Relay Coordination-A Review. v. 28, n. 2, p. 259–265, 2013.
- 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, abr. 2008. ISSN 03787796.
- ROMAGNOLE. 2015. Disponível em:  
<<http://www.romagnole.com.br/download.php?file=MTE0>>.

RUSSELL, S. J.; NORVIG, P. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. New Jersey: Alan Apt, 1995. 215–218 p. ISSN 09252312. ISBN 9780131038059.

SADEH, J.; AMINOTOJARI, V.; BASHIR, M. Optimal coordination of overcurrent and distance relays with hybrid genetic algorithm. *2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering, IEEEIC.EU 2011 - Conference Proceedings*, p. 0–4, 2011.

SALAZAR, C. A. C.; ENRIQUEZ, A. C. Coordination of Overcurrent Relays Using Genetic Algorithms and Unconventional Curves. *IEEE Latin America Transactions*, v. 12, n. 8, p. 1449–1455, 2014. ISSN 1548-0992.

SCHNEIDER. *Manual de Utilização SEPAM Série 20*. 2009. Disponível em: <[http://sepam.schneider-electric.com.br/files/download/notices\\_sepam20/Sepam20.pdf](http://sepam.schneider-electric.com.br/files/download/notices_sepam20/Sepam20.pdf)>.

SHIH, M. Y. *Real Time Coordination Of Overcurrent Relays By Means Of Optimization Algorithm*. 148 p. Dissertação (Mestrado) — Facultad De Ingeniería Mecánica Y Eléctrica, 2013.

SHIH, M. Y.; ENRÍQUEZ, A. C.; TORRES, L. M. T. n. On-line coordination of directional overcurrent relays: Performance evaluation among optimization algorithms. *Electric Power Systems Research*, v. 110, p. 122–132, 2014. ISSN 03787796.

SHIRMOHAMMADI, D.; HONG, H. W.; SEMLYEN, A.; LUO, G. X. Compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 3, n. 2, p. 753–762, 1988. ISSN 08858950.

SIEMENS. 2015. Disponível em: <[https://library.e.abb.com/public/aed7a9f817002bac4825776900265388/Vmax Specification EN Rev. B.pdf](https://library.e.abb.com/public/aed7a9f817002bac4825776900265388/Vmax%20Specification%20EN%20Rev.%20B.pdf)>.

SIEMENS. 2015. Disponível em: <[http://www.siemens.com/download?DLA06\\_2169](http://www.siemens.com/download?DLA06_2169)>.

SO, C. Application of genetic algorithm for overcurrent relay coordination. In: *6th International Conference on Developments in Power Systems Protection*. [S.l.]: IEE, 1997. v. 1997, p. 66–69. ISBN 0 85296 672 5.

SOARES, A. H. M. *Metodologia Computacional para Coordenação Automática de Dispositivos de Proteção contra Sobrecorrente em Sistemas Elétricos Industriais*. 237 p. Dissertação (Mestrado) — São Carlos, 2009.

SUEIRO, J. a.; DIAZ-DORADO, E.; MÍGUEZ, E.; CIDRÁS, J. Coordination of directional overcurrent relay using evolutionary algorithm and linear programming. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, v. 42, n. 1, p. 299–305, nov. 2012. ISSN 01420615.

SWIEF, R. A.; ABDELAZIZ, A. Y.; NAGY, A. Optimail strategy for Over Current relay coordination using Genetic Algorithm. In: *2014 International Conference on Engineering and Technology (ICET)*. [S.l.]: IEEE, 2014. p. 1–5. ISBN 978-1-4799-5807-8.



THANGARAJ, R.; PANT, M.; DEEP, K. Optimal coordination of over-current relays using modified differential evolution algorithms. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Elsevier, v. 23, n. 5, p. 820–829, ago. 2010. ISSN 09521976.

URDANETA, A. J.; NADIRA, R.; PEREZ, L. G. Optimal coordination of directional overcurrent relays in interconnected power systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 3 n 3, n. 3, p. 903–911, 1988. ISSN 08858977.

URDANETA, A. J.; RESTREPO, H.; MÁRQUEZ, S.; SÁNCHEZ, J. Coordination of directional overcurrent relay timing using linear programming. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 11, n. 1, p. 122–128, 1996. ISSN 08858977.

ZAPATA, C. J.; MEJÍA, G. E. Coordinación De Relés De Sobrecorriente En Sistemas Radiales Utilizando Programación Lineal. *Scientia Et Technica*, v. 22, 2003.

ZEINELDIN, H. H.; EL-SAADANY, E. F.; SALAMA, M. M. a. Optimal coordination of overcurrent relays using a modified particle swarm optimization. *Electric Power Systems Research*, v. 76, n. 11, p. 988–995, 2006. ISSN 03787796.

# Apêndice A – Transformadores de Instrumentação

## A.1 Transformadores de Instrumentação

Grande parte dos relés destinados à proteção do sistema elétrico atuam quando suas grandezas monitoradas (tensão ou corrente, por exemplo) ultrapassam um limite preestabelecido. Geralmente, essas grandezas são elevadas e devem ser transformadas para níveis apropriados, para que não ofereçam riscos aos indivíduos e equipamentos. Os transformadores de potencial (TPs) e de corrente (TCs) são responsáveis por transformar os níveis elevados de tensão e corrente do circuito primário, respectivamente, em valores proporcionais para o relé. Esses dispositivos são também conhecidos como transformadores de instrumentação. Ademais, os TCs e TPs oferecem isolação do circuito primário com o secundário (ANDERSON, 1999).

Nesta secção o funcionamento, as principais características e os critérios para o dimensionamento dos TCs são apresentados.

### A.1.1 Transformador de Corrente

Os TCs são formados por um transformador com número de espiras no primário muito menor do que no secundário. Desta forma, correntes elevadas no circuito primário são transformadas em correntes de baixa magnitude no secundário. Usualmente, a corrente nominal do secundário dos transformadores é 5A. No entanto, pode-se utilizar 1A, com objetivo de reduzir a queda de tensão no circuito do secundário. Os valores usuais para correntes nominais no circuito primários dos TC são: 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 75, 100, 125, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 800, 1000, 1200, 1500, 2000, 2500, 3000, 4000, 5000, 6000 e 8000. (FILHO; MAMEDE, 2011).

Os TCs podem ser divididos em dois grupos: medição e proteção. Embora

possuam o mesmo princípio de funcionamento, há características de projeto que os diferenciam (ALMEIDA, 2000):

- Os TCs de medição possuem classes de exatidão superiores aos de proteção. Sendo usual encontrar TCs de medição e proteção com classes de exatidão de 0,3 a 1,2%, e 10%, respectivamente. Os TCs de proteção devem garantir um erro máximo de 10% para correntes de até 20 vezes a sua nominal. Adicionalmente, os TCs de medição levam em consideração os erros de fase;
- Devido à maior permeabilidade magnética dos núcleos dos TCs de medição, eles entram em saturação mais rapidamente do que os de proteção. Sendo necessário uma corrente na ordem de quatro vezes a nominal para saturá-los.

Para o dimensionamento da relação dos TCs é necessário que os mesmos atendam os critérios apresentados em (A.1) e (A.2) (ALMEIDA, 2000).

$$I_{TC}^{nom} > \frac{I_{carga}^{max} \cdot FC}{FT} \quad (A.1)$$

$$I_{TC}^{nom} \geq \frac{I_{cc_{max}}}{FS} \quad (A.2)$$

sendo que,  $I_{TC}^{nom}$  – corrente nominal do primário do transformador de corrente;  $I_{carga}^{max}$  – corrente de carga máxima considerada;  $FC$  – fator de crescimento de carga (2.8);  $FT$  – fator térmico do transformador de corrente, considerando sobrecarga ininterrupta;  $I_{cc_{max}}$  – corrente de curto circuito máxima;  $FS$  – fator de sobrecorrente dos transformadores de corrente destinados à proteção;

A corrente nominal do primário do TC ( $I_{TC}^{nom}$ ) possui um dos limitantes inferiores relacionado com a máxima corrente de carga prevista ( $I_{carga}^{max}$ ), multiplicada pelo fator de crescimento de carga ( $FC$ ), ponderada pelo fator térmico ( $FT$ ). O  $FC$  pode ser calculado utilizando (2.8). Este fator leva em conta a previsão do crescimento da carga, durante um certo intervalo de tempo (ALMEIDA, 2000). O  $FT$  está relacionado com a capacidade de sobrecarga que o TC pode suportar, de forma contínua. Sendo que, normalmente é adotado  $FT = 1,2$ , ou seja, o TC pode suportar uma sobrecarga permanente de até 20% da sua corrente nominal.

O outro limitante está relacionado com a corrente de curto-circuito máxima ( $I_{cc_{max}}$ ) admissível no TC sem que este sature. O fator de sobrecorrente ( $FS$ ) relaciona-se com o múltiplo da corrente nominal que o TC consegue conduzir, durante um curto período de tempo, sem saturar. Usualmente, é adotado  $FS =$

20. Ou seja, o TC pode suportar sem saturar, durante um curto período de tempo, uma corrente de 20 vezes a nominal (CPFL, 2006). Na saturação dos TCs, a corrente refletida no secundário não é proporcional à que flui no primário. Assim, a corrente no secundário do TC saturado pode atingir valores nulos, durante longos períodos, inibindo a atuação do relé (CPFL, 2006).

## Apêndice B - Exemplo da Coordenação entre Dois Relés de Sobrecorrente

O sistema elétrico apresentado na Figura B.1 possui dois relés em série, onde  $R_2$  é o dispositivo protetor e  $R_1$ , protegido. Os níveis de curto-circuito e os valores das correntes de carga, são apresentados nessa figura. A coordenação entre eles foi obtida considerando  $Dial_1 = 0,27$  e  $Dial_2 = 0,10$ , que são referentes aos  $Dial$  de  $R_1$  e  $R_2$ , respectivamente. Pelo coordenograma da Figura B.2, verifica-se que para os níveis de falta considerados as diferenças entre os tempos de atuação das proteções de retaguarda e primária são maiores que  $\Delta T_{rele-rele}$ .

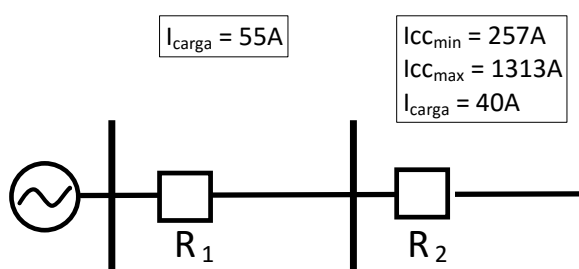


Figura B.1: Exemplo coordenação relé – relé.

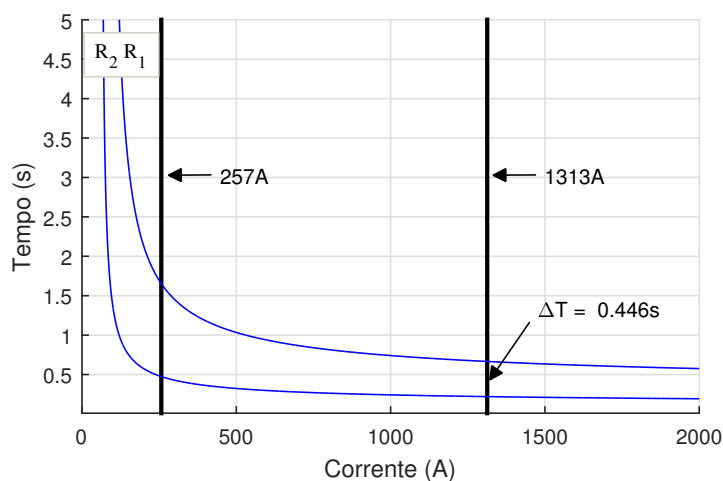


Figura B.2: Coordenograma do exemplo da coordenação relé – relé.

## Apêndice C – Equações do Problema de Programação Linear

Neste apêndice são apresentados os equacionamentos necessários para realizar a coordenação ótima dos relés de sobrecorrente do sistema I. Os valores das constantes  $K(i, j)^k$  são computados utilizando (3.2) e apresentados em (C.1) (C.2), considerando os relés do tipo IEC e os dados apresentados na Tabela 5.1.

$$\mathbf{K}^1 = \begin{bmatrix} 2,810 & 4,010 & 8,791 & - & - \\ - & 3,754 & - & 7,994 & - \\ - & - & 3,465 & - & 6,124 \\ - & - & 3,5958 & 6,347 & - \\ - & - & - & - & 5,157 \end{bmatrix} \quad (\text{C.1})$$

$$\mathbf{K}^2 = \begin{bmatrix} 1,438 & 2,368 & 2,368 & - & - \\ - & 3,029 & - & 3,476 & - \\ - & - & 2,302 & - & 3,225 \\ - & - & 1,167 & 1,597 & - \\ - & - & - & - & 0,669 \end{bmatrix} \quad (\text{C.2})$$

sendo que,  $\mathbf{K}^1$  e  $\mathbf{K}^2$  são valores das constantes  $K_{i,j}^1$  e  $K_{i,j}^2$ , respectivamente.

As restrições de seletividade apresentadas em (3.7) possuem limitantes de maior ou igual ( $\geq$ ). Contudo, o resolvidor utilizado trabalha apenas com desigualdades com limitantes menores ou iguais ( $\leq$ ). Assim, é necessário converter as restrições de maior ou igual em restrições de menor ou igual.

As restrições de seletividade são apresentadas em (C.3) a (C.10). O sistema possui quatro pares de relés protetores-protégidos e são considerados dois níveis de falta para a coordenação. Deste modo, esse problema apresenta oito restrições de seletividade. As restrições apresentadas em (C.11) a (C.20) estão relacionadas com os tempos mínimos de atuação dos relés, para faltas dentro da sua zona de proteção primária. Sendo que, o problema possui 10 restrições deste tipo.

As restrições apresentadas em (C.21) a (C.30) estão relacionadas com os tempos máximos de atuação dos relés, para faltas dentro da sua zona de proteção primária. Sendo que, o problema possui 10 restrições deste tipo. As restrições apresentadas em (C.31) a (C.35) são referentes aos limites de *Dial* aceitos pelos relés. Sendo assim, há uma restrição deste tipo para cada relé, totalizando cinco restrições.

$$T_{1,2}^1 - T_{2,2}^1 \geq \Delta t_{rele-rele} \longrightarrow -Dial_1 \cdot 4,010 + Dial_2 \cdot 3,754 \leq -0,4 \quad (C.3)$$

$$T_{1,2}^2 - T_{2,2}^2 \geq \Delta t_{rele-rele} \longrightarrow -Dial_1 \cdot 2,368 + Dial_2 \cdot 3,029 \leq -0,4 \quad (C.4)$$

$$T_{1,3}^1 - T_{3,3}^1 \geq \Delta t_{rele-rele} \longrightarrow -Dial_1 \cdot 8,791 + Dial_3 \cdot 3,465 \leq -0,4 \quad (C.5)$$

$$T_{1,3}^2 - T_{3,3}^2 \geq \Delta t_{rele-rele} \longrightarrow -Dial_1 \cdot 2,368 + Dial_3 \cdot 2,302 \leq -0,4 \quad (C.6)$$

$$T_{2,4}^1 - T_{4,4}^1 \geq \Delta t_{rele-rele} \longrightarrow -Dial_2 \cdot 7,994 + Dial_4 \cdot 6,347 \leq -0,4 \quad (C.7)$$

$$T_{2,4}^2 - T_{4,4}^2 \geq \Delta t_{rele-rele} \longrightarrow -Dial_2 \cdot 3,476 + Dial_4 \cdot 1,597 \leq -0,4 \quad (C.8)$$

$$T_{3,5}^1 - T_{5,5}^1 \geq \Delta t_{rele-rele} \longrightarrow -Dial_3 \cdot 6,124 + Dial_5 \cdot 5,157 \leq -0,4 \quad (C.9)$$

$$T_{3,5}^2 - T_{5,5}^2 \geq \Delta t_{rele-rele} \longrightarrow -Dial_3 \cdot 3,225 + Dial_5 \cdot 0,669 \leq -0,4 \quad (C.10)$$

$$T_{1,1}^1 \geq T^{min} \longrightarrow -Dial_1 \cdot 2,810 \leq -0,05 \quad (C.11)$$

$$T_{1,1}^2 \geq T^{min} \longrightarrow -Dial_1 \cdot 1,438 \leq -0,05 \quad (C.12)$$

$$T_{2,2}^1 \geq T^{min} \longrightarrow -Dial_2 \cdot 3,754 \leq -0,05 \quad (C.13)$$

$$T_{2,2}^2 \geq T^{min} \longrightarrow -Dial_2 \cdot 3,029 \leq -0,05 \quad (C.14)$$

$$T_{3,3}^1 \geq T^{min} \longrightarrow -Dial_3 \cdot 3,465 \leq -0,05 \quad (C.15)$$

$$T_{3,3}^2 \geq T^{min} \longrightarrow -Dial_3 \cdot 2,302 \leq -0,05 \quad (C.16)$$

$$T_{4,4}^1 \geq T^{min} \longrightarrow -Dial_4 \cdot 6,347 \leq -0,05 \quad (C.17)$$

$$T_{4,4}^2 \geq T^{min} \longrightarrow -Dial_4 \cdot 1,597 \leq -0,05 \quad (C.18)$$

$$T_{5,5}^1 \geq T^{min} \longrightarrow -Dial_5 \cdot 5,157 \leq -0,05 \quad (C.19)$$

$$T_{5,5}^2 \geq T^{min} \longrightarrow -Dial_5 \cdot 0,669 \leq -0,05 \quad (C.20)$$

$$T_{1,1}^1 \leq T^{max} \longrightarrow Dial_1 \cdot 2,810 \leq 2 \quad (C.21)$$

$$T_{1,1}^2 \leq T^{max} \longrightarrow Dial_1 \cdot 1,438 \leq 2 \quad (C.22)$$

$$T_{2,2}^1 \leq T^{max} \longrightarrow Dial_2 \cdot 3,754 \leq 2 \quad (C.23)$$

$$T_{2,2}^2 \leq T^{max} \longrightarrow Dial_2 \cdot 3,029 \leq 2 \quad (C.24)$$

$$T_{3,3}^1 \leq T^{max} \longrightarrow Dial_3 \cdot 3,465 \leq 2 \quad (C.25)$$

$$T_{3,3}^2 \leq T^{max} \longrightarrow Dial_3 \cdot 2,302 \leq 2 \quad (C.26)$$

$$T_{4,4}^1 \leq T^{max} \longrightarrow Dial_4 \cdot 6,347 \leq 2 \quad (C.27)$$

$$T_{4,4}^2 \leq T^{max} \longrightarrow Dial_4 \cdot 1,597 \leq 2 \quad (C.28)$$

$$T_{5,5}^1 \leq T^{max} \longrightarrow Dial_5 \cdot 5,157 \leq 2 \quad (C.29)$$

$$T_{5,5}^2 \leq T^{max} \longrightarrow Dial_5 \cdot 0,669 \leq 2 \quad (C.30)$$

$$Dial_{min} \leq Dial_1 \leq Dial_{max} \longrightarrow 0,1 \leq Dial_1 \leq 10 \quad (C.31)$$

$$Dial_{min} \leq Dial_2 \leq Dial_{max} \longrightarrow 0,1 \leq Dial_2 \leq 10 \quad (C.32)$$

$$Dial_{min} \leq Dial_3 \leq Dial_{max} \longrightarrow 0,1 \leq Dial_3 \leq 10 \quad (C.33)$$

$$Dial_{min} \leq Dial_4 \leq Dial_{max} \longrightarrow 0,1 \leq Dial_4 \leq 10 \quad (C.34)$$

$$Dial_{min} \leq Dial_5 \leq Dial_{max} \longrightarrow 0,1 \leq Dial_5 \leq 10 \quad (C.35)$$

Conforme definido em (3.6), a FO minimiza os tempos de atuação das proteções primárias, como é apresentado em (C.36) e (C.37).

$$\begin{aligned} Min. (K_{1,1}^1 + K_{1,1}^2) \cdot Dial_1 + (K_{2,2}^1 + K_{2,2}^2) \cdot Dial_2 + (K_{3,3}^1 + K_{3,3}^2) \cdot Dial_3 + \\ (K_{4,4}^1 + K_{4,4}^2) \cdot Dial_4 + (K_{5,5}^1 + K_{5,5}^2) \cdot Dial_5 \quad (C.36) \end{aligned}$$

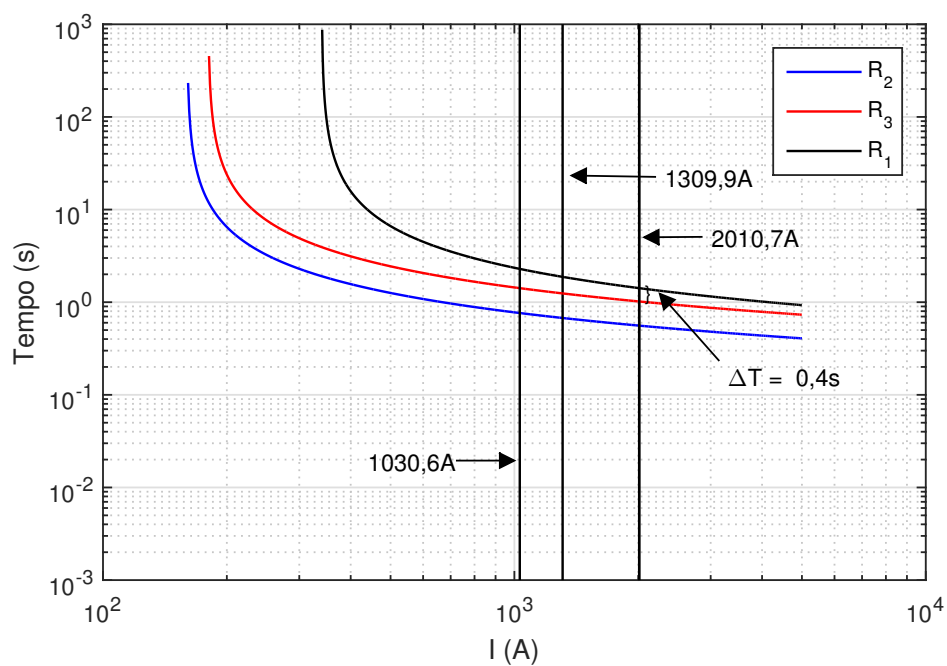
$$\begin{aligned} Min. 4,249 \cdot Dial_1 + 6,783 \cdot Dial_2 + 5,767 \cdot Dial_3 + 7,944 \cdot Dial_4 + 5,826 \cdot Dial_5 \\ (C.37) \end{aligned}$$



## Apêndice D – Coordenogramas

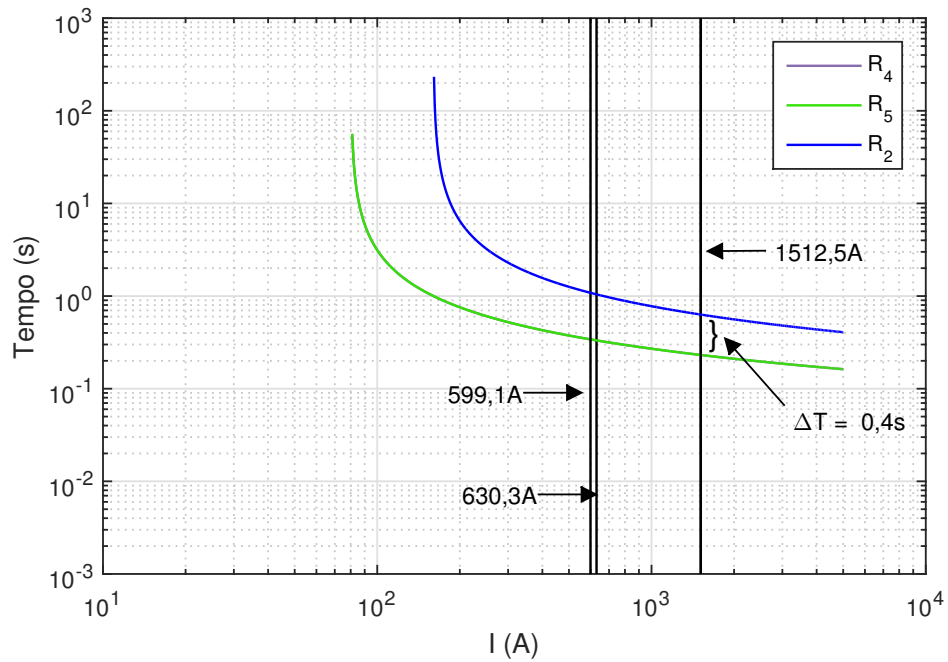
Neste apêndice são apresentados os coordenogramas das proteções utilizadas neste trabalho.

**Figura D.1:** Coordenograma para o  $R_1$  (retaguarda) referente ao sistema II, utilizando PL.

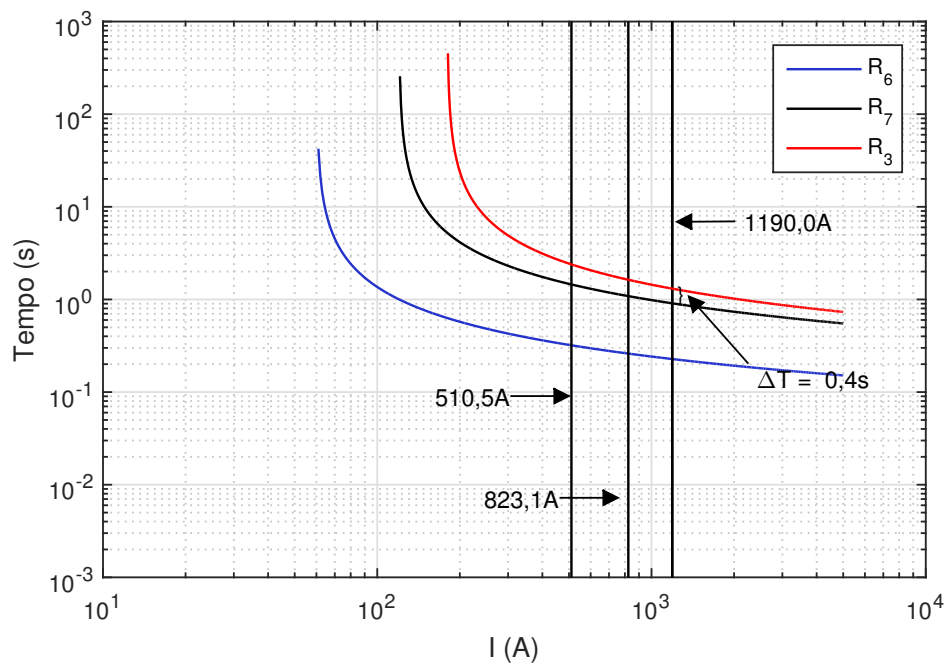


Fonte: O próprio autor.

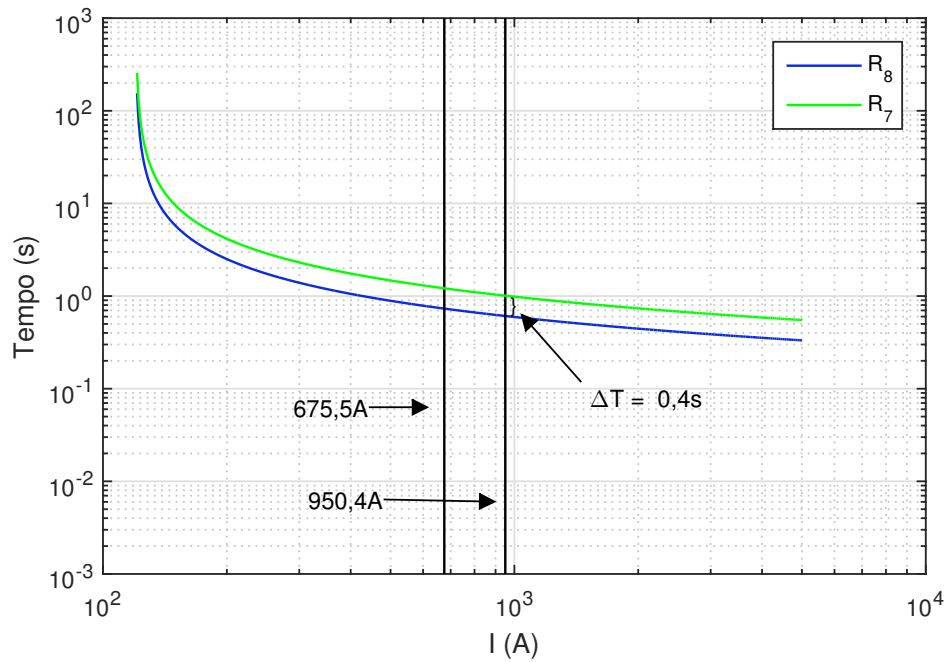
**Figura D.2:** Coordenograma para o  $R_2$  (retaguarda) referente ao sistema II, utilizando PL.



**Figura D.3:** Coordenograma para o  $R_3$  (retaguarda) referente ao sistema II, utilizando PL.

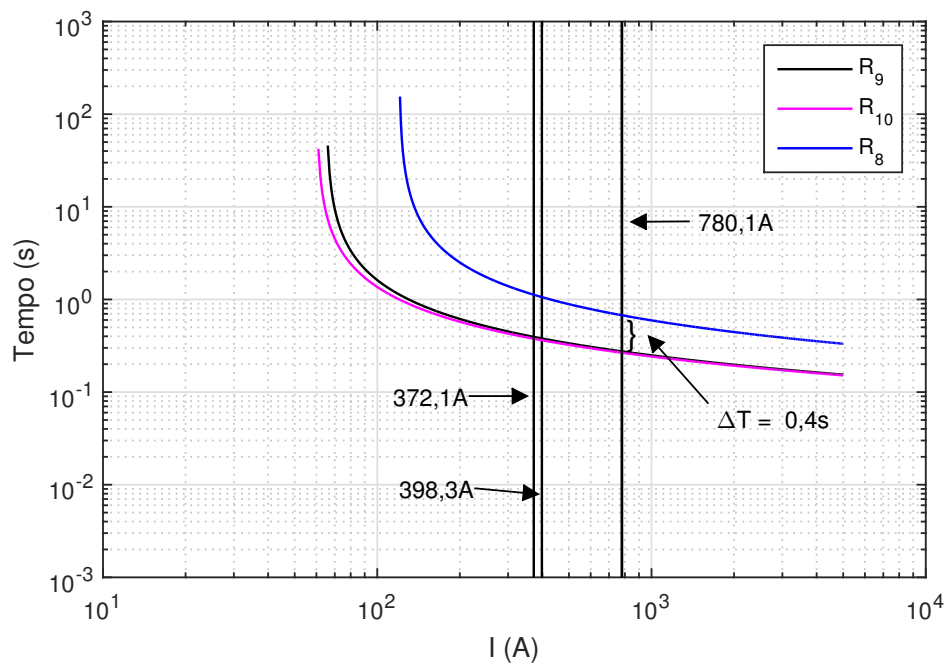


**Figura D.4:** Coordenograma para o  $R_7$  (retaguarda) referente ao sistema II, utilizando PL.



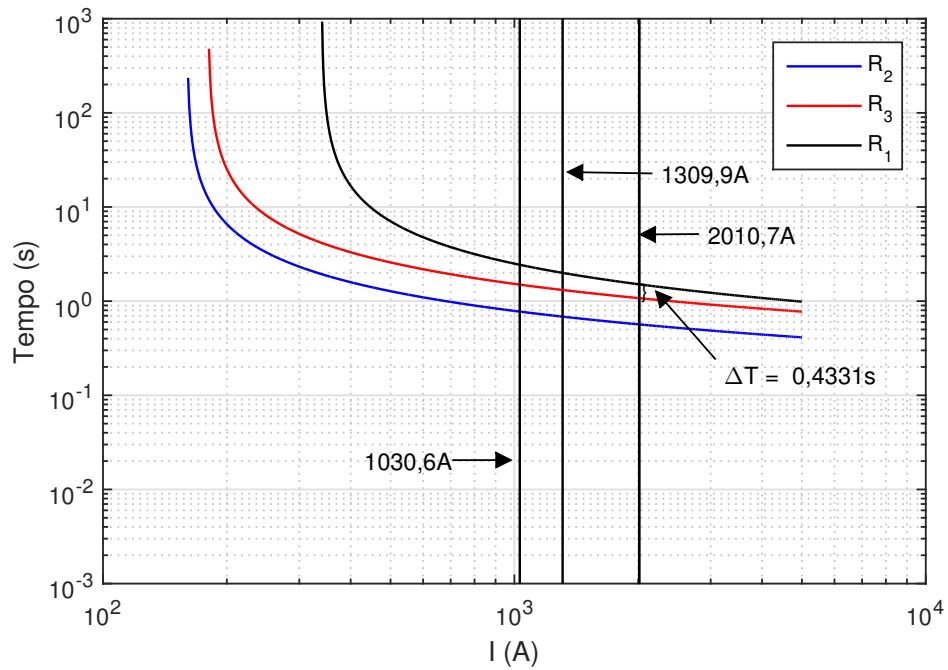
Fonte: O próprio autor.

**Figura D.5:** Coordenograma para o  $R_8$  (retaguarda) referente ao sistema II, utilizando PL.



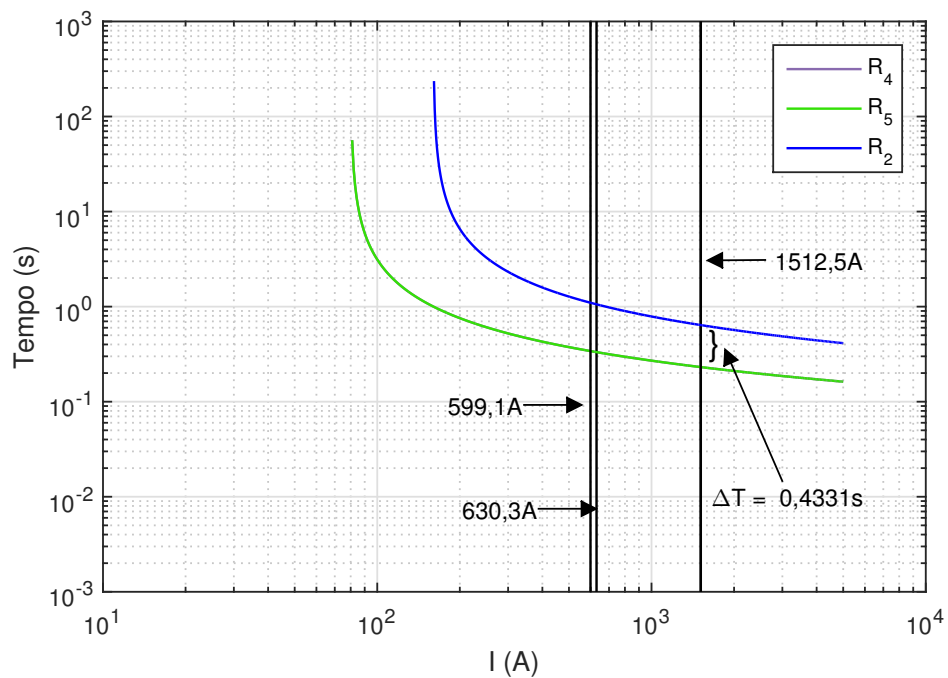
Fonte: O próprio autor.

**Figura D.6:** Coordenograma para o  $R_1$  (retaguarda) referente ao sistema II, utilizando PLIM.



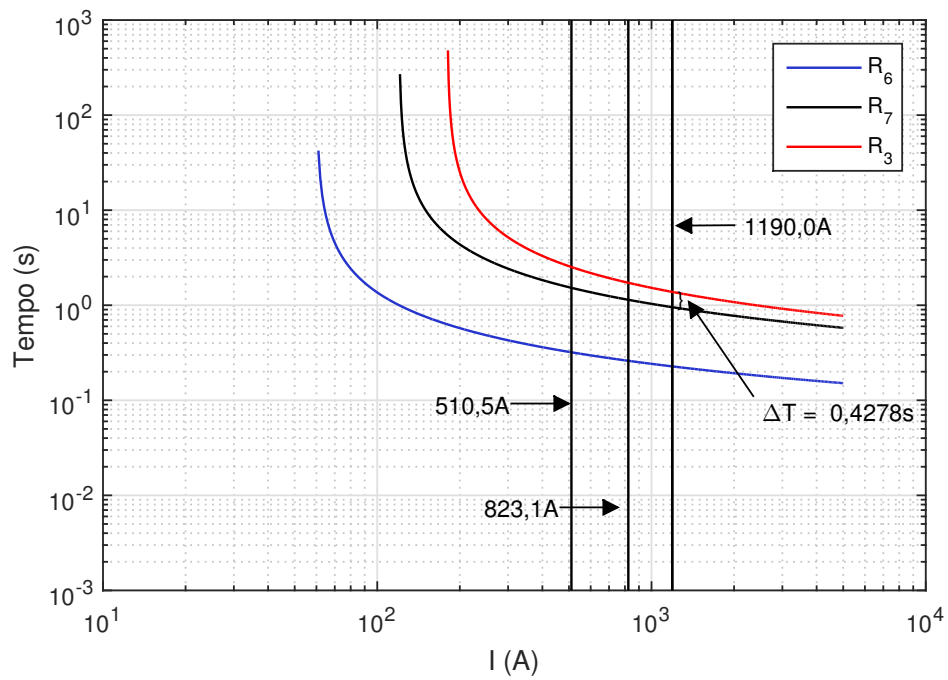
Fonte: O próprio autor.

**Figura D.7:** Coordenograma para o  $R_2$  (retaguarda) referente ao sistema II, utilizando PLIM.

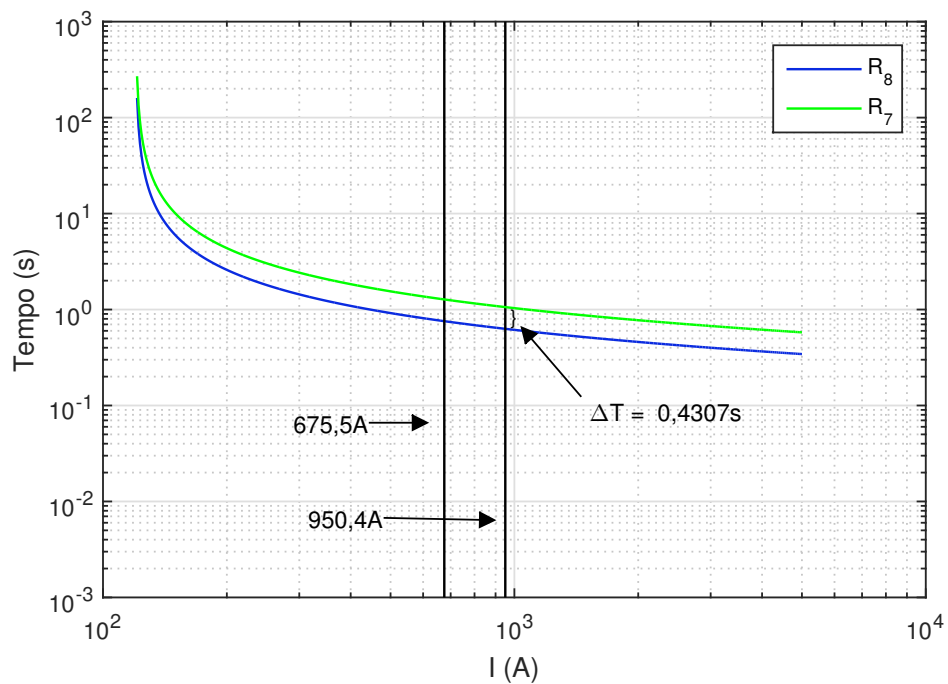


Fonte: O próprio autor.

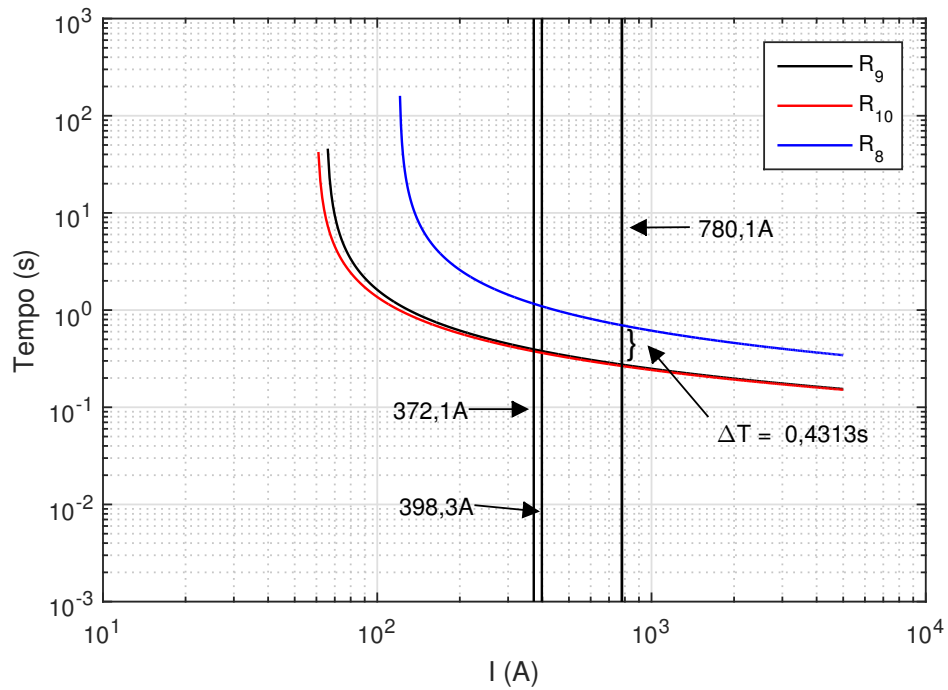
**Figura D.8:** Coordenograma para o  $R_3$  (retaguarda) referente ao sistema II, utilizando PLIM.



**Figura D.9:** Coordenograma para o  $R_7$  (retaguarda) referente ao sistema II, utilizando PLIM.

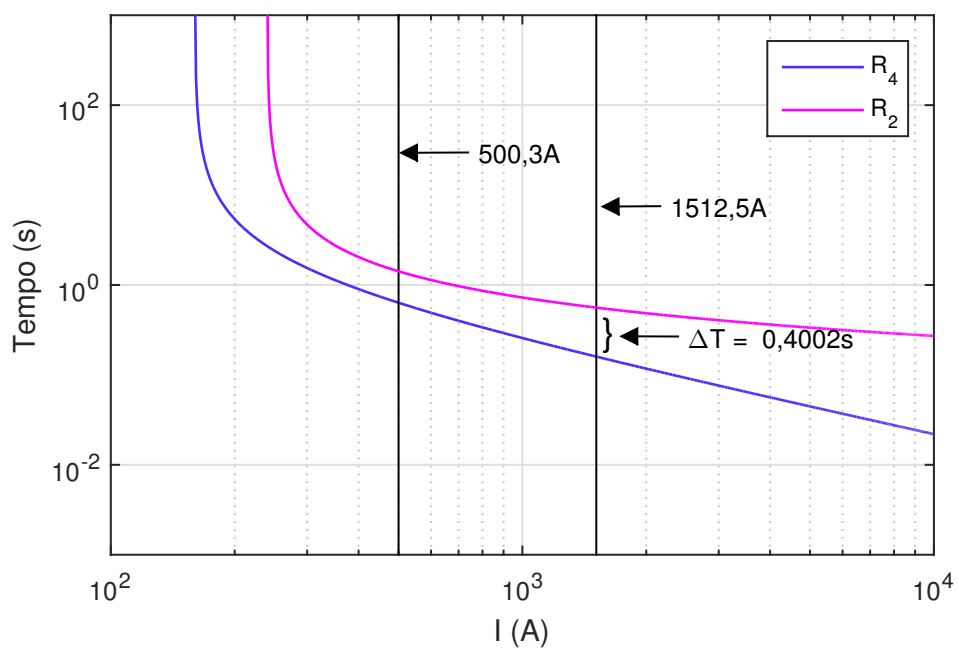


**Figura D.10:** Coordenograma para o  $R_8$  (retaguarda) referente ao sistema II, utilizando PLIM.



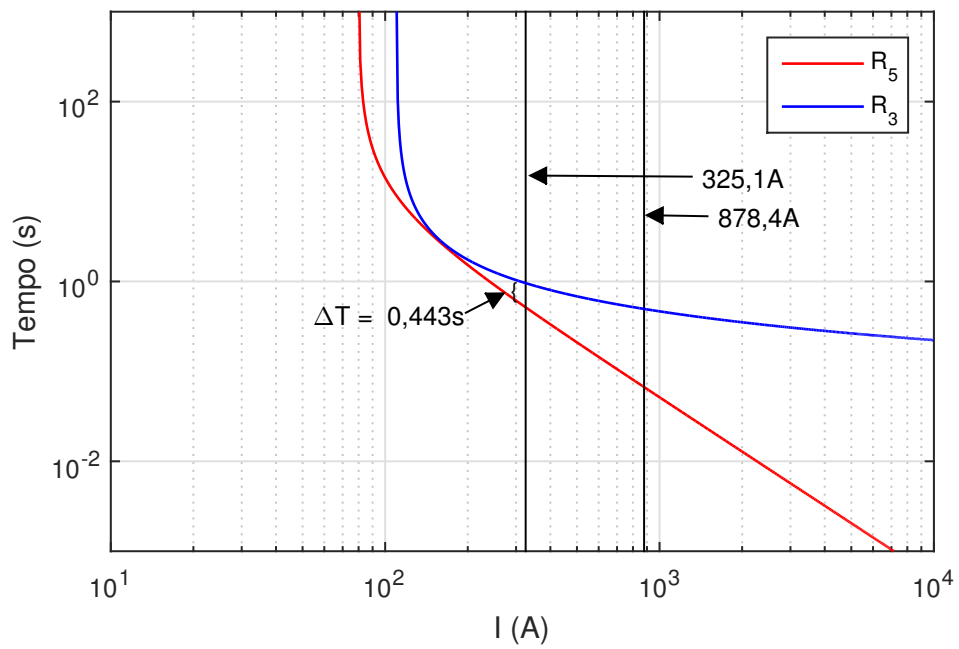
Fonte: O próprio autor.

**Figura D.11:** Coordenograma para o  $R_2$  (retaguarda) referente ao sistema I, caso I.



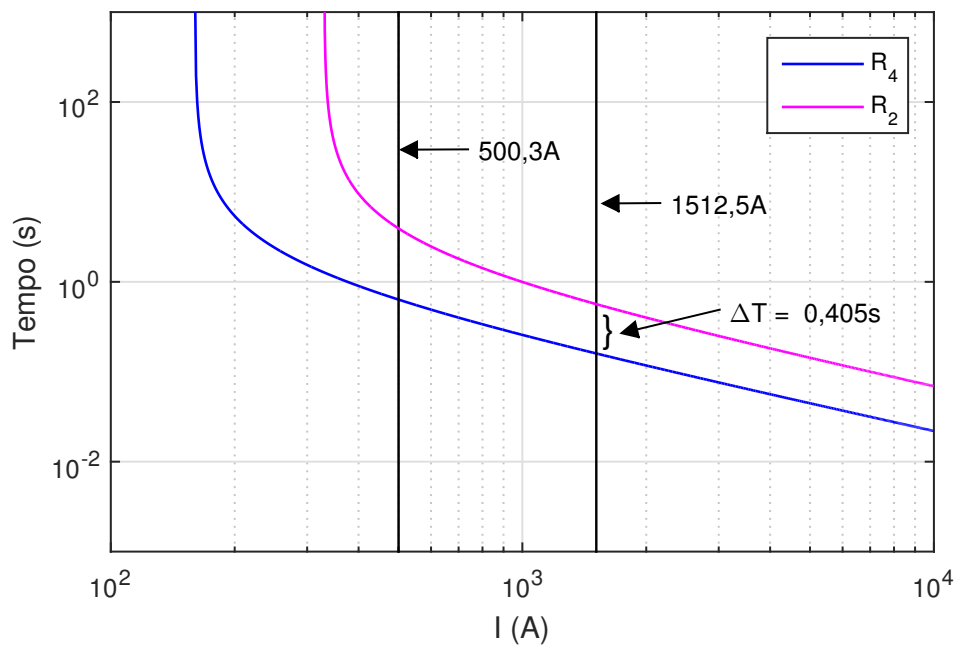
Fonte: O próprio autor.

**Figura D.12:** Coordenograma para o  $R_3$  (retaguarda) referente ao sistema I, caso I.



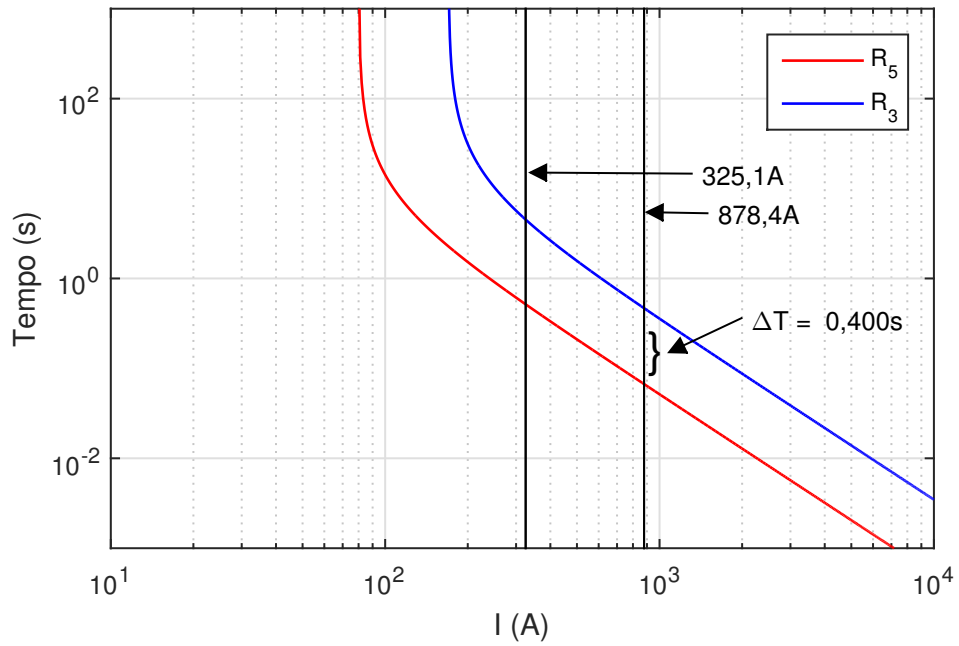
Fonte: O próprio autor.

**Figura D.13:** Coordenograma para o  $R_2$  (retaguarda) referente ao sistema I, caso II.



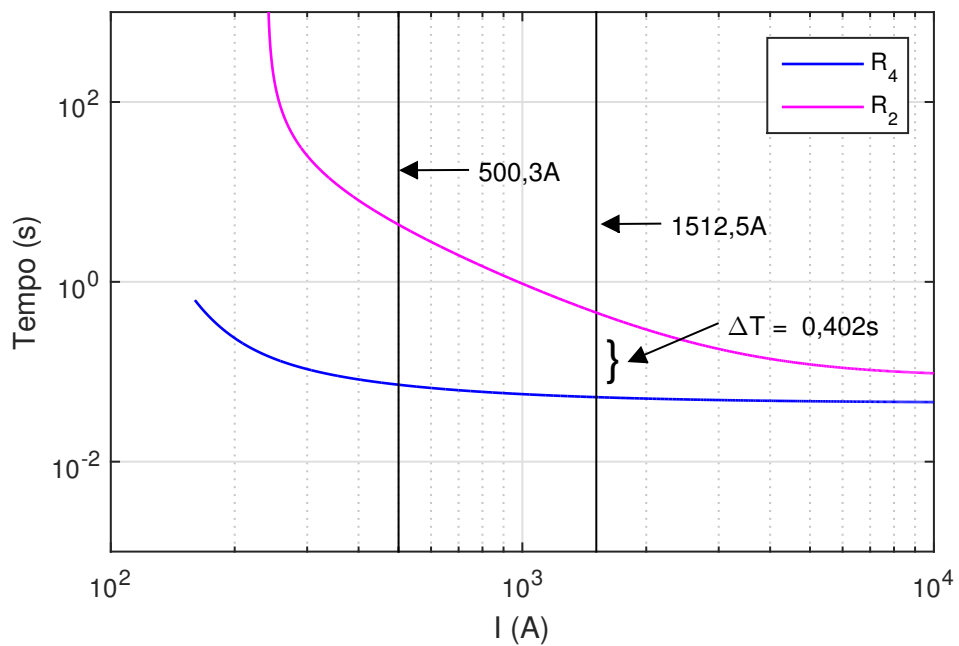
Fonte: O próprio autor.

**Figura D.14:** Coordenograma para o  $R_3$  (retaguarda) referente ao sistema I, caso II.



Fonte: O próprio autor.

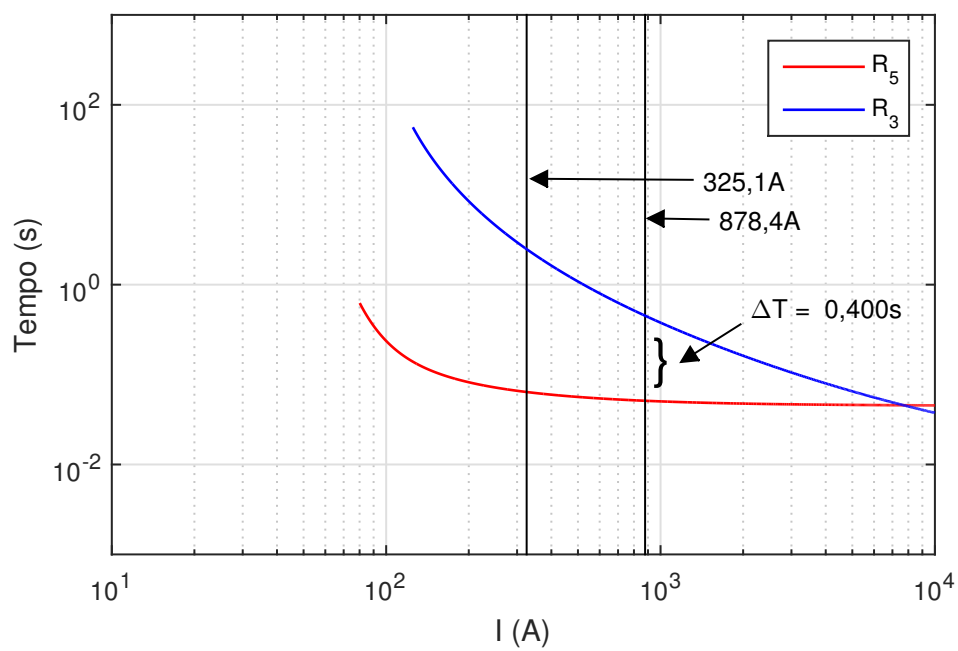
**Figura D.15:** Coordenograma para o  $R_2$  (retaguarda) referente ao sistema I, caso III.



Fonte: O próprio autor.



**Figura D.16:** Coordenograma para o  $R_3$  (retaguarda) referente ao sistema I, caso III.



Fonte: O próprio autor.

## Apêndice E – Tempos de Atuação dos Relés

Neste apêndice são apresentados os tempos de atuação dos relés utilizando os algoritmos AGCB-ABE e AGCB-PL. Nas Tabelas E.1, E.2 e E.3, são apresentados os tempos de atuação dos relés para os casos I, II e III, respectivamente, para o sistema I, utilizando o AGCB-ABE. Nas Tabelas E.4, E.5 e E.6, são apresentados os tempos de atuação dos relés para os casos I, II e III, respectivamente, para o sistema II, utilizando o AGCB-ABE. Nas Tabelas E.7, E.8 e E.9, são apresentados os tempos de atuação dos relés para os casos I, II e III, respectivamente, para o sistema I, utilizando o AGCB-PL. Nas Tabelas E.10, E.11 e E.12, são apresentados os tempos de atuação dos relés para os casos I, II e III, respectivamente, para o sistema II, utilizando o AGCB-PL. Nas Tabelas E.13, E.14 e E.15, são apresentados os tempos de atuação dos relés para os casos I, II e III, respectivamente, para o sistema I, utilizando o AGCB-PLI. Nas Tabelas E.16, E.17 e E.18, são apresentados os tempos de atuação dos relés para os casos I, II e III, respectivamente, para o sistema II, utilizando o AGCB-PLI. Na Tabela E.19, são apresentados os tempos de atuação dos relés para o sistema de 15 barras, considerando *PSs* e *Dials* como variáveis de decisão. Na Tabela E.20, são apresentados os tempos de atuação dos relés para o sistema de 15 barras, considerando *PSs*, *Dials*, tipos de curvas e tipos de relés como variáveis de decisão.

**Tabela E.1:** Tempos de atuação dos relés para o sistema I, caso I, utilizando AGCB-ABE.

$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$I_{cc_{pri.}}$ (A)	$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$I_{cc_{pri.}}$ (A)
$R_1$	-	1,0728	-	-	1741,3	$R_1$	-	0,526	-	-	3115,0
$R_2$	$R_1$	0,6083	1,5929	0,9846	1309,9	$R_2$	$R_1$	0,484	0,8911	0,4076	2010,7
$R_3$	$R_1$	0,5326	4,1606	3,6280	760,7	$R_3$	$R_1$	0,351	0,8911	0,5402	2010,7
$R_4$	$R_2$	0,6347	1,4189	0,7842	500,3	$R_4$	$R_2$	0,160	0,5599	0,4002	1512,5
$R_5$	$R_3$	0,5157	0,9585	0,4428	325,1	$R_5$	$R_3$	0,067	0,4950	0,4280	878,4

**Tabela E.2:** Tempos de atuação dos relés para o sistema I, caso II, utilizando AGCB-ABE.

$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$I_{cc_{pri.}}$ (A)	$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$I_{cc_{pri.}}$ (A)
$R_1$	-	0,9837	-	-	1741,3	$R_1$	-	0,4738	-	-	3115
$R_2$	$R_1$	0,6820	1,4860	0,8040	1309,9	$R_2$	$R_1$	0,3976	0,8123	0,4147	2010,7
$R_3$	$R_1$	0,6308	4,2459	3,6150	760,7	$R_3$	$R_1$	0,0864	0,8123	0,7259	2010,7
$R_4$	$R_2$	0,6347	3,9240	3,2892	500,3	$R_4$	$R_2$	0,1597	0,5651	0,4054	1512,5
$R_5$	$R_3$	0,5157	4,5162	4,0006	325,1	$R_5$	$R_3$	0,0669	0,4670	0,4000	878,4

**Tabela E.3:** Tempos de atuação dos relés para o sistema I, caso III, utilizando AGCB-ABE.

$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$I_{cc_{pri.}}$ (A)	$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$I_{cc_{pri.}}$ (A)
$R_1$	-	0,8717	-	-	1741,3	$R_1$	-	0,3710	-	-	3115,0
$R_2$	$R_1$	0,5804	1,4267	0,8463	1309,9	$R_2$	$R_1$	0,2929	0,6940	0,4011	2010,7
$R_3$	$R_1$	0,5552	4,5542	3,9989	760,7	$R_3$	$R_1$	0,1610	0,6940	0,5330	2010,7
$R_4$	$R_2$	0,0718	4,3251	4,2533	500,3	$R_4$	$R_2$	0,0522	0,4541	0,4019	1512,5
$R_5$	$R_3$	0,0640	2,4803	2,4163	325,1	$R_5$	$R_3$	0,0511	0,4515	0,4004	878,4

**Tabela E.4:** Tempos de atuação dos relés para o sistema II, caso I, utilizando AGCB-ABE.

$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$I_{cc_{pri.}}$ (A)	$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$I_{cc_{pri.}}$ (A)
$R_1$	-	1,4749	-	-	1741,3	$R_1$	-	0,9060	-	-	3115,0
$R_2$	$R_1$	0,7108	2,1214	1,4107	1309,9	$R_2$	$R_1$	0,5285	1,2774	0,7488	2010,7
$R_3$	$R_1$	1,4203	3,353	1,9326	1030,6	$R_3$	$R_1$	0,8538	1,2774	0,4236	2010,7
$R_4$	$R_2$	0,3322	1,6992	1,367	630,3	$R_4$	$R_2$	0,2312	0,6372	0,406	1512,5
$R_5$	$R_2$	0,3407	1,8792	1,5385	599,1	$R_5$	$R_2$	0,2312	0,6372	0,406	1512,5
$R_6$	$R_3$	0,3327	4,5521	4,2194	510,5	$R_6$	$R_3$	0,2338	1,2437	1,0099	1190,0
$R_7$	$R_3$	1,1029	1,8238	0,7209	823,1	$R_7$	$R_3$	0,8392	1,2437	0,4045	1190,0
$R_8$	$R_7$	0,7879	1,3248	0,5369	675,5	$R_8$	$R_7$	0,5658	0,9827	0,4169	950,4
$R_9$	$R_8$	0,3792	1,9793	1,6001	398,3	$R_9$	$R_8$	0,2747	0,6762	0,4015	780,1
$R_{10}$	$R_8$	0,3942	2,4546	2,0603	372,1	$R_{10}$	$R_8$	0,2747	0,6762	0,4015	780,1

**Tabela E.5:** Tempos de atuação dos relés para o sistema II, caso II, utilizando AGCB-ABE.

$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$I_{cc_{pri.}}$ (A)	$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$I_{cc_{pri.}}$ (A)
$R_1$	-	1,1201	-	-	1741,3	$R_1$	-	0,3384	-	-	3115,0
$R_2$	$R_1$	0,6422	2,0583	1,4162	1309,9	$R_2$	$R_1$	0,2702	0,8297	0,5595	2010,7
$R_3$	$R_1$	1,0586	3,5245	2,4659	1030,6	$R_3$	$R_1$	0,4262	0,8297	0,4035	2010,7
$R_4$	$R_2$	0,1963	2,9204	2,7241	630,3	$R_4$	$R_2$	0,0754	0,4798	0,4045	1512,5
$R_5$	$R_2$	0,2081	3,2564	3,0484	599,1	$R_5$	$R_2$	0,0754	0,4798	0,4045	1512,5
$R_6$	$R_3$	0,1970	4,9772	4,7803	510,5	$R_6$	$R_3$	0,0780	0,8528	0,7748	1190,0
$R_7$	$R_3$	0,9756	1,5434	0,5677	823,1	$R_7$	$R_3$	0,4433	0,8528	0,4095	1190,0
$R_8$	$R_7$	0,6154	1,5236	0,9082	675,5	$R_8$	$R_7$	0,3051	0,7136	0,4086	950,4
$R_9$	$R_8$	0,2189	1,9077	1,6888	398,3	$R_9$	$R_8$	0,0559	0,4570	0,4011	780,1
$R_{10}$	$R_8$	0,2518	2,2244	1,9726	372,1	$R_{10}$	$R_8$	0,0559	0,4570	0,4011	780,1

**Tabela E.6:** Tempos de atuação dos relés para o sistema II, caso III, utilizando AGCB-ABE.

$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$I_{cc_{pri.}}$ (A)	$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$I_{cc_{pri.}}$ (A)
$R_1$	-	1,0124	-	-	1741,3	$R_1$	-	0,3191	-	-	3115,0
$R_2$	$R_1$	0,5441	1,9285	1,3844	1309,9	$R_2$	$R_1$	0,3199	0,7479	0,428	2010,7
$R_3$	$R_1$	1,1011	3,5808	2,4798	1030,6	$R_3$	$R_1$	0,3475	0,7479	0,4004	2010,7
$R_4$	$R_2$	0,0558	1,6986	1,6427	630,3	$R_4$	$R_2$	0,0503	0,4524	0,4021	1512,5
$R_5$	$R_2$	0,0564	1,8819	1,8255	599,1	$R_5$	$R_2$	0,0503	0,4524	0,4021	1512,5
$R_6$	$R_3$	0,0559	4,9151	4,8592	510,5	$R_6$	$R_3$	0,0504	0,8397	0,7893	1190,0
$R_7$	$R_3$	0,9456	1,7185	0,7729	823,1	$R_7$	$R_3$	0,4395	0,8397	0,4003	1190,0
$R_8$	$R_7$	0,6300	1,4433	0,8133	675,5	$R_8$	$R_7$	0,2985	0,6994	0,4008	950,4
$R_9$	$R_8$	0,0561	2,8990	2,8429	398,3	$R_9$	$R_8$	0,0501	0,4543	0,4042	780,1
$R_{10}$	$R_8$	0,0571	3,8671	3,8101	372,1	$R_{10}$	$R_8$	0,0501	0,4543	0,4042	780,1

**Tabela E.7:** Tempos de atuação dos relés para o sistema I, caso I, utilizando AGCB-PL.

$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$I_{cc_{pri.}}$ (A)	$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$I_{cc_{pri.}}$ (A)
$R_1$	-	0,5056	-	-	3115,0	$R_1$	-	1,0313	-	-	1741,3
$R_2$	$R_1$	0,4566	0,8566	0,4000	2010,7	$R_2$	$R_1$	0,6314	1,5312	0,8999	1309,9
$R_3$	$R_1$	0,2969	0,8566	0,5597	2010,7	$R_3$	$R_1$	0,5179	3,9996	3,4816	760,7
$R_4$	$R_2$	0,1597	0,5597	0,4000	1512,5	$R_4$	$R_2$	0,6347	4,1447	3,5100	500,3
$R_5$	$R_3$	0,0669	0,4669	0,4000	878,4	$R_5$	$R_3$	0,5157	1,4365	0,9208	325,1

**Tabela E.8:** Tempos de atuação dos relés para o sistema I, caso II, utilizando AGCB-PL.

$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$I_{cc_{pri.}}$ (A)	$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$I_{cc_{pri.}}$ (A)
$R_1$	-	0,4374	-	-	3115,0	$R_1$	-	0,8922	-	-	1741,3
$R_2$	$R_1$	0,3411	0,7411	0,4000	2010,7	$R_2$	$R_1$	0,5968	1,3248	0,7279	1309,9
$R_3$	$R_1$	0,088	0,7411	0,6532	2010,7	$R_3$	$R_1$	0,6259	3,4603	2,8344	760,7
$R_4$	$R_2$	0,0905	0,4905	0,4000	1512,5	$R_4$	$R_2$	0,9114	4,4532	3,5418	500,3
$R_5$	$R_3$	0,0669	0,4669	0,4000	878,4	$R_5$	$R_3$	0,5157	3,7890	3,2733	325,1

**Tabela E.9:** Tempos de atuação dos relés para o sistema I, caso III, utilizando AGCB-PL.

$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$I_{cc_{pri.}}$ (A)	$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$I_{cc_{pri.}}$ (A)
$R_1$	-	0,3636	-	-	3115,0	$R_1$	-	0,8543	-	-	1741,3
$R_2$	$R_1$	0,2802	0,6802	0,4000	2010,7	$R_2$	$R_1$	0,5830	1,3983	0,8153	1309,9
$R_3$	$R_1$	0,0848	0,6802	0,5954	2010,7	$R_3$	$R_1$	0,6032	4,4635	3,8603	760,7
$R_4$	$R_2$	0,0500	0,4500	0,4000	1512,5	$R_4$	$R_2$	0,0687	4,5266	4,4578	500,3
$R_5$	$R_3$	0,0500	0,4500	0,4000	878,4	$R_5$	$R_3$	0,0626	3,6518	3,5892	325,1

**Tabela E.10:** Tempos de atuação dos relés para o sistema II, caso I, utilizando AGCB-PL.

$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$I_{cc_{pri.}}$ (A)	$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$I_{cc_{pri.}}$ (A)
$R_1$	-	0,8098	-	-	3115,0	$R_1$	-	1,4237	-	-	1741,3
$R_2$	$R_1$	0,5184	1,1997	0,6813	2010,7	$R_2$	$R_1$	0,7088	2,2520	1,5433	1309,9
$R_3$	$R_1$	0,7997	1,1997	0,4000	2010,7	$R_3$	$R_1$	1,3304	4,3948	3,0644	1030,6
$R_4$	$R_2$	0,2312	0,6312	0,4000	1512,5	$R_4$	$R_2$	0,3322	1,8625	1,5303	630,3
$R_5$	$R_2$	0,2312	0,6312	0,4000	1512,5	$R_5$	$R_2$	0,3407	2,0976	1,7569	599,1
$R_6$	$R_3$	0,2338	1,1649	0,9311	1190,0	$R_6$	$R_3$	0,3327	4,2638	3,9311	510,5
$R_7$	$R_3$	0,7649	1,1649	0,4000	1190,0	$R_7$	$R_3$	1,1600	1,7083	0,5483	823,1
$R_8$	$R_7$	0,5658	0,9658	0,4000	950,4	$R_8$	$R_7$	0,7879	1,6006	0,8127	675,5
$R_9$	$R_8$	0,2747	0,6762	0,4015	780,1	$R_9$	$R_8$	0,3792	1,9793	1,6001	398,3
$R_{10}$	$R_8$	0,2747	0,6762	0,4015	780,1	$R_{10}$	$R_8$	0,3942	2,4546	2,0603	372,1

**Tabela E.11:** Tempos de atuação dos relés para o sistema II, caso II, utilizando AGCB-PL.

$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$I_{cc_{pri.}}$ (A)	$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$I_{cc_{pri.}}$ (A)
$R_1$	-	0,3337	-	-	3115,0	$R_1$	-	1,1045	-	-	1741,3
$R_2$	$R_1$	0,2677	0,8181	0,5504	2010,7	$R_2$	$R_1$	0,6362	2,0296	1,3934	1309,9
$R_3$	$R_1$	0,4181	0,8181	0,4000	2010,7	$R_3$	$R_1$	1,0384	3,4753	2,4368	1030,6
$R_4$	$R_2$	0,0754	0,4754	0,4000	1512,5	$R_4$	$R_2$	0,1963	2,8933	2,6970	630,3
$R_5$	$R_2$	0,0754	0,4754	0,4000	1512,5	$R_5$	$R_2$	0,2081	3,2262	3,0182	599,1
$R_6$	$R_3$	0,0780	0,8366	0,7586	1190	$R_6$	$R_3$	0,1970	4,8824	4,6854	510,5
$R_7$	$R_3$	0,4366	0,8366	0,4000	1190	$R_7$	$R_3$	0,9608	1,5140	0,5531	823,1
$R_8$	$R_7$	0,3028	0,7028	0,4000	950,4	$R_8$	$R_7$	0,6171	1,5005	0,8834	675,5
$R_9$	$R_8$	0,0559	0,4559	0,4000	780,1	$R_9$	$R_8$	0,2189	1,9978	1,7789	398,3
$R_{10}$	$R_8$	0,0559	0,4559	0,4000	780,1	$R_{10}$	$R_8$	0,2518	2,3550	2,1032	372,1

**Tabela E.12:** Tempos de atuação dos relés para o sistema II, caso III, utilizando AGCB-PL.

$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$I_{cc_{pri.}}$ (A)	$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$I_{cc_{pri.}}$ (A)
$R_1$	-	0,2768	-	-	3115,0	$R_1$	-	0,9162	-	-	1741,3
$R_2$	$R_1$	0,2678	0,6787	0,4109	2010,7	$R_2$	$R_1$	0,5946	1,6837	1,0891	1309,9
$R_3$	$R_1$	0,2787	0,6787	0,4000	2010,7	$R_3$	$R_1$	1,0883	2,883	1,7947	1030,6
$R_4$	$R_2$	0,0500	0,4500	0,4000	1512,5	$R_4$	$R_2$	0,0555	3,0214	2,9659	630,3
$R_5$	$R_2$	0,0500	0,4500	0,4000	1512,5	$R_5$	$R_2$	0,0709	3,4565	3,3855	599,1
$R_6$	$R_3$	0,0500	0,8091	0,7591	1190	$R_6$	$R_3$	0,0554	4,9734	4,918	510,5
$R_7$	$R_3$	0,4091	0,8091	0,4000	1190	$R_7$	$R_3$	0,9659	1,7409	0,7750	823,1
$R_8$	$R_7$	0,2783	0,6783	0,4000	950,4	$R_8$	$R_7$	0,6637	1,6728	1,0091	675,5
$R_9$	$R_8$	0,0500	0,4500	0,4000	780,1	$R_9$	$R_8$	0,056	3,3574	3,3014	398,3
$R_{10}$	$R_8$	0,0500	0,4500	0,4000	780,1	$R_{10}$	$R_8$	0,057	4,2059	4,1489	372,1

**Tabela E.13:** Tempos de atuação dos relés para o sistema I, caso I, utilizando AGCB-PLI.

$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$I_{cc_{pri.}}$ (A)	$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$I_{cc_{pri.}}$ (A)
$R_1$	-	0,5260	-	-	3115,0	$R_1$	-	1,0728	-	-	1741,3
$R_2$	$R_1$	0,4836	0,8911	0,4076	2010,7	$R_2$	$R_1$	0,6083	1,5929	0,9846	1309,9
$R_3$	$R_1$	0,3510	0,8911	0,5402	2010,7	$R_3$	$R_1$	0,5326	4,1606	3,628	760,7
$R_4$	$R_2$	0,1597	0,5599	0,4002	1512,5	$R_4$	$R_2$	0,6347	1,4189	0,7842	500,3
$R_5$	$R_3$	0,0669	0,4950	0,4280	878,4	$R_5$	$R_3$	0,5157	0,9585	0,4428	325,1

**Tabela E.14:** Tempos de atuação dos relés para o sistema I, caso II, utilizando AGCB-PLI.

$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$I_{cc_{pri.}}$ (A)	$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$I_{cc_{pri.}}$ (A)
$R_1$	-	0,4738	-	-	3115,0	$R_1$	-	0,9837	-	-	1741,3
$R_2$	$R_1$	0,3976	0,8123	0,4147	2010,7	$R_2$	$R_1$	0,6820	1,4860	0,8040	1309,9
$R_3$	$R_1$	0,0864	0,8123	0,7259	2010,7	$R_3$	$R_1$	0,6308	4,2459	3,6150	760,7
$R_4$	$R_2$	0,1597	0,5651	0,4054	1512,5	$R_4$	$R_2$	0,6347	3,9240	3,2892	500,3
$R_5$	$R_3$	0,0669	0,4670	0,4000	878,4	$R_5$	$R_3$	0,5157	4,5162	4,0006	325,1

**Tabela E.15:** Tempos de atuação dos relés para o sistema I, caso III, utilizando AGCB-PLI.

$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$I_{cc_{pri.}}$ (A)	$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$I_{cc_{pri.}}$ (A)
$R_1$	-	0,3710	-	-	3115,0	$R_1$	-	0,8717	-	-	1741,3
$R_2$	$R_1$	0,2929	0,6940	0,4011	2010,7	$R_2$	$R_1$	0,5804	1,4267	0,8463	1309,9
$R_3$	$R_1$	0,1610	0,6940	0,5330	2010,7	$R_3$	$R_1$	0,5552	4,5542	3,9989	760,7
$R_4$	$R_2$	0,0522	0,4541	0,4019	1512,5	$R_4$	$R_2$	0,0718	4,3251	4,2533	500,3
$R_5$	$R_3$	0,0511	0,4515	0,4004	878,4	$R_5$	$R_3$	0,0640	2,4803	2,4163	325,1

**Tabela E.16:** Tempos de atuação dos relés para o sistema II, caso I, utilizando AGCB-PLI.

$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$I_{cc_{pri.}}$ (A)	$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$I_{cc_{pri.}}$ (A)
$R_1$	-	0,906	-	-	3115	$R_1$	-	1,4749	-	-	1741,3
$R_2$	$R_1$	0,5285	1,2774	0,7488	2010,7	$R_2$	$R_1$	0,7108	2,1214	1,4107	1309,9
$R_3$	$R_1$	0,8538	1,2774	0,4236	2010,7	$R_3$	$R_1$	1,4203	3,353	1,9326	1030,6
$R_4$	$R_2$	0,2312	0,6372	0,406	1512,5	$R_4$	$R_2$	0,3322	1,6992	1,367	630,3
$R_5$	$R_2$	0,2312	0,6372	0,406	1512,5	$R_5$	$R_2$	0,3407	1,8792	1,5385	599,1
$R_6$	$R_3$	0,2338	1,2437	1,0099	1190	$R_6$	$R_3$	0,3327	4,5521	4,2194	510,5
$R_7$	$R_3$	0,8392	1,2437	0,4045	1190	$R_7$	$R_3$	1,1029	1,8238	0,7209	823,1
$R_8$	$R_7$	0,5658	0,9827	0,4169	950,4	$R_8$	$R_7$	0,7879	1,3248	0,5369	675,5
$R_9$	$R_8$	0,2747	0,6762	0,4015	780,1	$R_9$	$R_8$	0,3792	1,9793	1,6001	398,3
$R_{10}$	$R_8$	0,2747	0,6762	0,4015	780,1	$R_{10}$	$R_8$	0,3942	2,4546	2,0603	372,1



**Tabela E.17:** Tempos de atuação dos relés para o sistema II, caso II, utilizando AGCB-PLI.

$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$I_{cc_{pri.}}$ (A)	$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$I_{cc_{pri.}}$ (A)
$R_1$	-	0,3384	-	-	3115	$R_1$	-	1,1201	-	-	1741,3
$R_2$	$R_1$	0,2702	0,8297	0,5595	2010,7	$R_2$	$R_1$	0,6422	2,0583	1,4162	1309,9
$R_3$	$R_1$	0,4262	0,8297	0,4035	2010,7	$R_3$	$R_1$	1,0586	3,5245	2,4659	1030,6
$R_4$	$R_2$	0,0754	0,4798	0,4045	1512,5	$R_4$	$R_2$	0,1963	2,9204	2,7241	630,3
$R_5$	$R_2$	0,0754	0,4798	0,4045	1512,5	$R_5$	$R_2$	0,2081	3,2564	3,0484	599,1
$R_6$	$R_3$	0,0780	0,8528	0,7748	1190	$R_6$	$R_3$	0,1970	4,9772	4,7803	510,5
$R_7$	$R_3$	0,4433	0,8528	0,4095	1190	$R_7$	$R_3$	0,9756	1,5434	0,5677	823,1
$R_8$	$R_7$	0,3051	0,7136	0,4086	950,4	$R_8$	$R_7$	0,6154	1,5236	0,9082	675,5
$R_9$	$R_8$	0,0559	0,4570	0,4011	780,1	$R_9$	$R_8$	0,2189	1,9077	1,6888	398,3
$R_{10}$	$R_8$	0,0559	0,4570	0,4011	780,1	$R_{10}$	$R_8$	0,2518	2,2244	1,9726	372,1

**Tabela E.18:** Tempos de atuação dos relés para o sistema II, caso III, utilizando AGCB-PLI.

$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$I_{cc_{pri.}}$ (A)	$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$I_{cc_{pri.}}$ (A)
$R_1$	-	0,3340	-	-	3115,0	$R_1$	-	0,9816	-	-	1741,3
$R_2$	$R_1$	0,2973	0,7392	0,4419	2010,7	$R_2$	$R_1$	0,5659	1,7799	1,2140	1309,9
$R_3$	$R_1$	0,3383	0,7392	0,4009	2010,7	$R_3$	$R_1$	1,0717	3,0756	2,0039	1030,6
$R_4$	$R_2$	0,0503	0,4509	0,4006	1512,5	$R_4$	$R_2$	0,0558	2,3258	2,2700	630,3
$R_5$	$R_2$	0,0503	0,4509	0,4006	1512,5	$R_5$	$R_2$	0,0564	2,6244	2,5680	599,1
$R_6$	$R_3$	0,0504	0,8173	0,7669	1190,0	$R_6$	$R_3$	0,0559	4,7840	4,7281	510,5
$R_7$	$R_3$	0,4166	0,8173	0,4007	1190,0	$R_7$	$R_3$	0,9835	1,6726	0,6891	823,1
$R_8$	$R_7$	0,2857	0,6907	0,4050	950,4	$R_8$	$R_7$	0,6814	1,7033	1,0219	675,5
$R_9$	$R_8$	0,0502	0,4620	0,4118	780,1	$R_9$	$R_8$	0,0686	3,4470	3,3784	398,3
$R_{10}$	$R_8$	0,0501	0,4620	0,4119	780,1	$R_{10}$	$R_8$	0,0571	4,3181	4,2610	372,1

**Tabela E.19:** Tempos de atuação dos relés para o sistema de 15 barras.

$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$I_{cc_{pri.}}$ (A)	$I_{cc_{ret.}}$ (A)	$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$I_{cc_{pri.}}$ (A)	$I_{cc_{ret.}}$ (A)
$R_1$	$R_6$	0,2510	0,4510	0,2000	3621	1233	$R_{20}$	$R_{30}$	0,2458	0,4817	0,2359	7662	681
$R_2$	$R_4$	0,2320	0,4361	0,2040	4597	1477	$R_{21}$	$R_{17}$	0,2817	0,5233	0,2416	8384	599
$R_2$	$R_{16}$	0,2320	0,4868	0,2547	4597	743	$R_{21}$	$R_{19}$	0,2817	0,4817	0,2000	8384	1372
$R_3$	$R_1$	0,2834	0,5450	0,2616	3984	853	$R_{21}$	$R_{30}$	0,2817	0,4817	0,2000	8384	681
$R_3$	$R_{16}$	0,2834	0,4868	0,2034	3984	743	$R_{22}$	$R_{23}$	0,2665	0,5372	0,2707	1950	979
$R_4$	$R_7$	0,2698	0,4747	0,2049	4382	1111	$R_{22}$	$R_{34}$	0,2665	0,4680	0,2015	1950	970
$R_4$	$R_{12}$	0,2698	0,4923	0,2224	4382	1463	$R_{23}$	$R_{11}$	0,2462	0,4894	0,2432	4910	1475
$R_4$	$R_{20}$	0,2698	0,5209	0,2510	4382	1808	$R_{23}$	$R_{13}$	0,2462	0,6232	0,3770	4910	1053
$R_5$	$R_2$	0,3173	0,5173	0,2000	3319	922	$R_{24}$	$R_{21}$	0,2680	12,9383	12,6703	2296	175
$R_6$	$R_8$	0,3051	0,5051	0,2000	2647	1548	$R_{24}$	$R_{34}$	0,2680	0,4680	0,2000	2296	970
$R_6$	$R_{10}$	0,3051	0,5080	0,2029	2647	1100	$R_{25}$	$R_{15}$	0,3117	0,5117	0,2000	2289	969
$R_7$	$R_5$	0,3080	0,5080	0,2000	2497	1397	$R_{25}$	$R_{18}$	0,3117	0,5117	0,2000	2289	1320
$R_7$	$R_{10}$	0,3080	0,5080	0,2000	2497	1100	$R_{26}$	$R_{28}$	0,2998	0,5259	0,2261	2300	1192
$R_8$	$R_3$	0,2837	0,4837	0,2000	4695	1424	$R_{26}$	$R_{36}$	0,2998	0,5562	0,2564	2300	1109
$R_8$	$R_{12}$	0,2837	0,4923	0,2086	4695	1463	$R_{27}$	$R_{25}$	0,3355	0,5355	0,2000	2011	903
$R_8$	$R_{20}$	0,2837	0,5209	0,2372	4695	1808	$R_{27}$	$R_{36}$	0,3355	0,5562	0,2208	2011	1109
$R_9$	$R_5$	0,2892	0,5080	0,2188	2943	1397	$R_{28}$	$R_{29}$	0,3380	0,5380	0,2000	2525	1828
$R_9$	$R_8$	0,2892	0,5051	0,2159	2943	1548	$R_{28}$	$R_{32}$	0,3380	0,5380	0,2000	2525	697
$R_{10}$	$R_{14}$	0,2832	0,4832	0,2000	3568	1175	$R_{29}$	$R_{17}$	0,2481	0,5233	0,2752	8346	599
$R_{11}$	$R_3$	0,2742	0,4837	0,2095	4342	1424	$R_{29}$	$R_{19}$	0,2481	0,4817	0,2336	8346	1372
$R_{11}$	$R_7$	0,2742	0,4747	0,2005	4342	1111	$R_{29}$	$R_{22}$	0,2481	0,4481	0,2000	8346	642
$R_{11}$	$R_{20}$	0,2742	0,5209	0,2467	4342	1808	$R_{30}$	$R_{27}$	0,2899	0,4899	0,2000	1736	1039
$R_{12}$	$R_{13}$	0,2781	0,4781	0,2000	4195	1503	$R_{30}$	$R_{32}$	0,2899	0,5380	0,2482	1736	697
$R_{12}$	$R_{24}$	0,2781	0,4822	0,2040	4195	753	$R_{31}$	$R_{27}$	0,2753	0,4899	0,2146	2867	1039
$R_{13}$	$R_9$	0,3103	0,5103	0,2000	3402	1009	$R_{31}$	$R_{29}$	0,2753	0,5380	0,2628	2867	1828
$R_{14}$	$R_{11}$	0,2562	0,4894	0,2332	4606	1475	$R_{32}$	$R_{33}$	0,2951	0,5113	0,2163	2069	1162
$R_{14}$	$R_{24}$	0,2562	0,4822	0,2259	4606	753	$R_{32}$	$R_{42}$	0,2951	0,5419	0,2469	2069	907
$R_{15}$	$R_1$	0,2361	0,5450	0,3090	4712	853	$R_{33}$	$R_{21}$	0,3372	0,5372	0,2000	2305	1326
$R_{15}$	$R_4$	0,2361	0,4361	0,2000	4712	1477	$R_{33}$	$R_{23}$	0,3372	0,5372	0,2000	2305	979
$R_{16}$	$R_{18}$	0,2714	0,5117	0,2402	2225	1320	$R_{34}$	$R_{31}$	0,3419	0,5691	0,2272	1715	809
$R_{16}$	$R_{26}$	0,2714	0,4775	0,2060	2225	905	$R_{34}$	$R_{42}$	0,3419	0,5419	0,2000	1715	907
$R_{17}$	$R_{15}$	0,2775	0,5117	0,2342	1875	969	$R_{35}$	$R_{25}$	0,3259	0,5355	0,2095	2095	903
$R_{17}$	$R_{26}$	0,2775	0,4775	0,2000	1875	905	$R_{35}$	$R_{28}$	0,3259	0,5259	0,2000	2095	1192
$R_{18}$	$R_{19}$	0,2176	0,4817	0,2641	8426	1372	$R_{36}$	$R_{38}$	0,2937	0,4937	0,2000	3283	882
$R_{18}$	$R_{22}$	0,2176	0,4481	0,2305	8426	642	$R_{37}$	$R_{35}$	0,3343	0,5343	0,2000	3301	910
$R_{18}$	$R_{30}$	0,2176	0,4817	0,2641	8426	681	$R_{38}$	$R_{40}$	0,3743	0,5743	0,2000	1403	1403
$R_{19}$	$R_3$	0,2747	0,4837	0,2090	3998	1424	$R_{39}$	$R_{37}$	0,3572	0,5572	0,2000	1434	1434
$R_{19}$	$R_7$	0,2747	0,4747	0,2000	3998	1111	$R_{40}$	$R_{41}$	0,3470	0,5470	0,2000	3140	745
$R_{19}$	$R_{12}$	0,2747	0,4923	0,2176	3998	1463	$R_{41}$	$R_{31}$	0,3113	0,5691	0,2578	1971	809
$R_{20}$	$R_{17}$	0,2458	0,5233	0,2775	7662	599	$R_{41}$	$R_{33}$	0,3113	0,5113	0,2000	1971	1162
$R_{20}$	$R_{22}$	0,2458	0,4481	0,2024	7662	642	$R_{42}$	$R_{39}$	0,2715	0,4715	0,2000	3295	896

**Tabela E.20:** Tempos de atuação dos relés para o sistema de 15 barras, considerando as características dos relés como variáveis de decisão.

$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$I_{cc_{pri.}}$ (A)	$I_{cc_{ret.}}$ (A)	$R_{pri.}$	$R_{ret.}$	$T_{pri.}$ (s)	$T_{ret.}$ (s)	$\Delta T$ (s)	$I_{cc_{pri.}}$ (A)	$I_{cc_{ret.}}$ (A)
$R_1$	$R_6$	0,2	0,4623	0,2623	3621	1233	$R_{20}$	$R_{30}$	0,2	0,6387	0,4387	7662	681
$R_2$	$R_4$	0,2	0,7827	0,5827	4597	1477	$R_{21}$	$R_{17}$	0,2	0,8236	0,6236	8384	599
$R_2$	$R_{16}$	0,2	0,4263	0,2263	4597	743	$R_{21}$	$R_{19}$	0,2	0,5176	0,3176	8384	1372
$R_3$	$R_1$	0,2	3,1041	2,9041	3984	853	$R_{21}$	$R_{30}$	0,2	0,6387	0,4387	8384	681
$R_3$	$R_{16}$	0,2	0,4263	0,2263	3984	743	$R_{22}$	$R_{23}$	0,2	5,6888	5,4888	1950	979
$R_4$	$R_7$	0,2	0,5418	0,3418	4382	1111	$R_{22}$	$R_{34}$	0,2	0,4569	0,2569	1950	970
$R_4$	$R_{12}$	0,2	0,9935	0,7935	4382	1463	$R_{23}$	$R_{11}$	0,2	1,0075	0,8075	4910	1475
$R_4$	$R_{20}$	0,2	0,4421	0,2421	4382	1808	$R_{23}$	$R_{13}$	0,2	0,9917	0,7917	4910	1053
$R_5$	$R_2$	0,2	0,5311	0,3311	3319	922	$R_{24}$	$R_{21}$	0,2	5770,3	5770,1	2296	175
$R_6$	$R_8$	0,2	0,4315	0,2315	2647	1548	$R_{24}$	$R_{34}$	0,2	0,4569	0,2569	2296	970
$R_6$	$R_{10}$	0,2	0,9051	0,7051	2647	1100	$R_{25}$	$R_{15}$	0,2	0,4894	0,2894	2289	969
$R_7$	$R_5$	0,2	0,4568	0,2568	2497	1397	$R_{25}$	$R_{18}$	0,2	0,4952	0,2952	2289	1320
$R_7$	$R_{10}$	0,2	0,9051	0,7051	2497	1100	$R_{26}$	$R_{28}$	0,2	0,4724	0,2724	2300	1192
$R_8$	$R_3$	0,2	0,6286	0,4286	4695	1424	$R_{26}$	$R_{36}$	0,2	0,8133	0,6133	2300	1109
$R_8$	$R_{12}$	0,2	0,9935	0,7935	4695	1463	$R_{27}$	$R_{25}$	0,2	0,7014	0,5014	2011	903
$R_8$	$R_{20}$	0,2	0,4421	0,2421	4695	1808	$R_{27}$	$R_{36}$	0,2	0,8133	0,6133	2011	1109
$R_9$	$R_5$	0,2	0,4568	0,2568	2943	1397	$R_{28}$	$R_{29}$	0,2	1,3518	1,1518	2525	1828
$R_9$	$R_8$	0,2	0,4315	0,2315	2943	1548	$R_{28}$	$R_{32}$	0,2	0,8004	0,6004	2525	697
$R_{10}$	$R_{14}$	0,2	0,9339	0,7339	3568	1175	$R_{29}$	$R_{17}$	0,2	0,8236	0,6236	8346	599
$R_{11}$	$R_3$	0,2	0,6286	0,4286	4342	1424	$R_{29}$	$R_{19}$	0,2	0,5176	0,3176	8346	1372
$R_{11}$	$R_7$	0,2	0,5418	0,3418	4342	1111	$R_{29}$	$R_{22}$	0,2	0,7919	0,5919	8346	642
$R_{11}$	$R_{20}$	0,2	0,4421	0,2421	4342	1808	$R_{30}$	$R_{27}$	0,2	0,4045	0,2045	1736	1039
$R_{12}$	$R_{13}$	0,2	0,5186	0,3186	4195	1503	$R_{30}$	$R_{32}$	0,2	0,8004	0,6004	1736	697
$R_{12}$	$R_{24}$	0,2	1,0079	0,8079	4195	753	$R_{31}$	$R_{27}$	0,2	0,4045	0,2045	2867	1039
$R_{13}$	$R_9$	0,2	0,5292	0,3292	3402	1009	$R_{31}$	$R_{29}$	0,2	1,3518	1,1518	2867	1828
$R_{14}$	$R_{11}$	0,2	1,0075	0,8075	4606	1475	$R_{32}$	$R_{33}$	0,2	0,4282	0,2282	2069	1162
$R_{14}$	$R_{24}$	0,2	1,0079	0,8079	4606	753	$R_{32}$	$R_{42}$	0,2	1,3388	1,1388	2069	907
$R_{15}$	$R_1$	0,2	3,1041	2,9041	4712	853	$R_{33}$	$R_{21}$	0,2	2,6899	2,4899	2305	1326
$R_{15}$	$R_4$	0,2	0,7827	0,5827	4712	1477	$R_{33}$	$R_{23}$	0,2	5,6888	5,4888	2305	979
$R_{16}$	$R_{18}$	0,2	0,4952	0,2952	2225	1320	$R_{34}$	$R_{31}$	0,2	0,7803	0,5803	1715	809
$R_{16}$	$R_{26}$	0,2	0,5571	0,3571	2225	905	$R_{34}$	$R_{42}$	0,2	1,3388	1,1388	1715	907
$R_{17}$	$R_{15}$	0,2	0,4894	0,2894	1875	969	$R_{35}$	$R_{25}$	0,2	0,7014	0,5014	2095	903
$R_{17}$	$R_{26}$	0,2	0,5571	0,3571	1875	905	$R_{35}$	$R_{28}$	0,2	0,4724	0,2724	2095	1192
$R_{18}$	$R_{19}$	0,2	0,5176	0,3176	8426	1372	$R_{36}$	$R_{38}$	0,2	0,4483	0,2483	3283	882
$R_{18}$	$R_{22}$	0,2	0,7919	0,5919	8426	642	$R_{37}$	$R_{35}$	0,2	0,5196	0,3196	3301	910
$R_{18}$	$R_{30}$	0,2	0,6387	0,4387	8426	681	$R_{38}$	$R_{40}$	0,2	0,5466	0,3466	1403	1403
$R_{19}$	$R_3$	0,2	0,6286	0,4286	3998	1424	$R_{39}$	$R_{37}$	0,2	0,5498	0,3498	1434	1434
$R_{19}$	$R_7$	0,2	0,5418	0,3418	3998	1111	$R_{40}$	$R_{41}$	0,2	0,5796	0,3796	3140	745
$R_{19}$	$R_{12}$	0,2	0,9935	0,7935	3998	1463	$R_{41}$	$R_{31}$	0,2	0,7803	0,5803	1971	809
$R_{20}$	$R_{17}$	0,2	0,8236	0,6236	7662	599	$R_{41}$	$R_{33}$	0,2	0,4282	0,2282	1971	1162
$R_{20}$	$R_{22}$	0,2	0,7919	0,5919	7662	642	$R_{42}$	$R_{39}$	0,2	0,5287	0,3287	3295	896

## Apêndice F – Parâmetros do Algoritmo Genético de Chu-Beasley

O algoritmo genético implementado neste trabalho possui os seguintes parâmetros: taxa de mutação ( $\mu$ ), tamanho da população inicial ( $k_{pi}$ ), e critério de parada relacionado ao número de iterações em que a solução incumbente não varia (*MaxIter*). É utilizado *MaxIter* = 500 devido ao comportamento assintótico observado da solução incumbente. Nos testes realizados, foi possível obter resultados satisfatórios utilizando esse parâmetro.

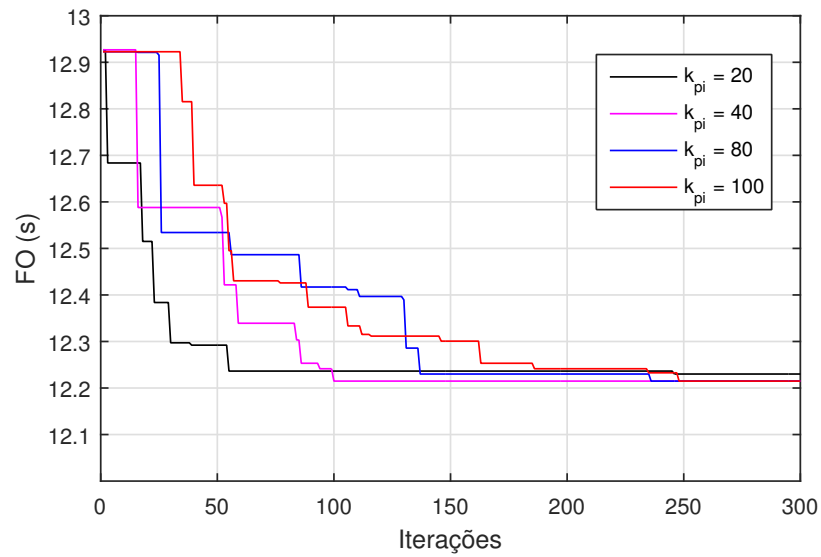
Com objetivo de verificar a convergência do algoritmo em relação aos parâmetros  $\mu$  e  $k_{pi}$ , primeiro é fixado  $\mu = 5\%$  e é variado o valor de  $k_{pi}$  em 20, 40, 80 e 100. A semente do gerador de números aleatórios do MATLAB é fixada, de modo a obter valores mais consistentes, visto que a geração da população inicial possui caráter aleatório. Um exemplo do comportamento do algoritmo em relação à variação de  $k_{pi}$  é apresentado na Figura F.1. Neste caso, uma população inicial de 40 indivíduos apresenta a melhor convergência. Em seguida,  $k_{pi}$  é fixado e  $\mu$  é variado em 5, 10 e 15%, como pode ser verificado na Figura F.2. Nesta,  $\mu = 5\%$  e  $\mu = 10\%$  apresentaram a mesma convergência. Entretanto a convergência piorou para  $\mu = 15\%$ . Neste sistema, é escolhido  $k_{pi} = 40$  e  $\mu^1 = 5\%$ .

A seguir, é apresentado o estudo relacionado à variação dos parâmetros do algoritmo genético nos sistemas elétricos utilizados neste trabalho. Para os sistemas I e II, foram realizados estudos para os casos I, II e III de forma separada. Os resultados são apresentados nas Tabelas F.1 a F.11, sendo que os valores em negrito correspondem aos parâmetros escolhidos para cada sistema. O critério de escolha foi o menor valor de função objetivo (FO), seguido do menor número de iterações.

---

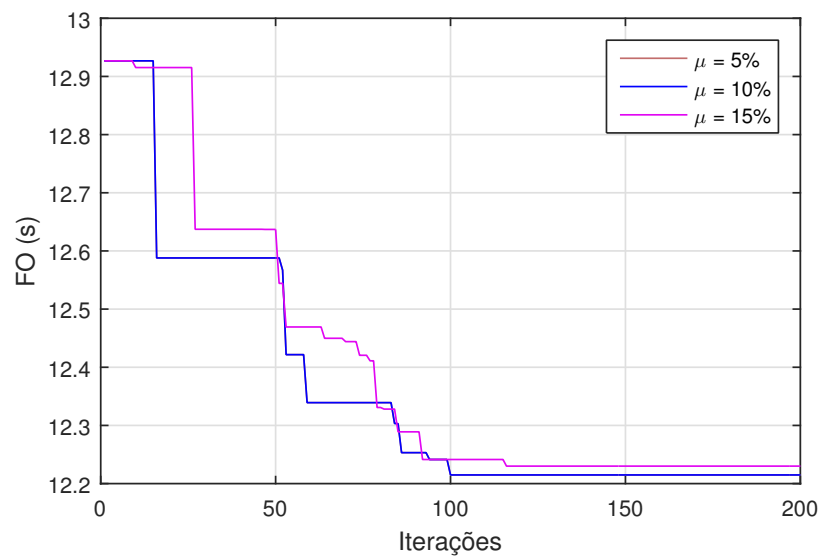
<sup>1</sup>Neste trabalho, quando mais de um parâmetro  $\mu$  fornecer a mesma solução, é escolhido o de menor valor.

**Figura F.1:** Comportamento da FO do sistema II (caso I) em relação à variação do parâmetro  $k_{pi}$ , considerando  $\mu = 5\%$ .



Fonte: O próprio autor.

**Figura F.2:** Comportamento da FO do sistema II (caso I) em relação à variação do parâmetro  $\mu$ , considerando  $k_{pi} = 40$ .



Fonte: O próprio autor.

**Tabela F.1:** Parâmetros do algoritmo genético para o sistema I, caso I.

$k_{pi}$	$\mu$ (%)	Iterações	FO (s)
20	5	32	4,9511
<b>40</b>	<b>5</b>	<b>12</b>	<b>4,9511</b>
80	5	17	4,9511
100	5	52	4,9511
40	10	12	4,9511
40	15	12	4,9511

**Tabela F.2:** Parâmetros do algoritmo genético para o sistema I, caso II.

$k_{pi}$	$\mu$ (%)	Iterações	FO (s)
20	5	9	4,8804
40	5	53	4,6313
80	5	89	4,6313
100	5	198	4,6313
<b>40</b>	<b>10</b>	<b>19</b>	<b>4,6313</b>
40	15	32	4,6313

**Tabela F.3:** Parâmetros do algoritmo genético para o sistema I, caso III.

$k_{pi}$	$\mu$ (%)	Iterações	FO (s)
20	5	27	3,1665
40	5	210	3,1076
80	5	383	3,0712
100	5	406	3,0712
<b>80</b>	<b>10</b>	<b>176</b>	<b>3,0712</b>
80	15	763	3,0712

**Tabela F.4:** Parâmetros do algoritmo genético para o sistema II, caso I.

$k_{pi}$	$\mu$ (%)	Iterações	FO (s)
20	5	246	12,2301
<b>40</b>	<b>5</b>	<b>100</b>	<b>12,2149</b>
80	5	236	12,2149
100	5	248	12,2149
40	10	100	12,2149
40	15	116	12,2301

**Tabela F.5:** Parâmetros do algoritmo genético para o sistema II, caso II.

$k_{pi}$	$\mu$ (%)	Iterações	FO (s)
20	5	77	7,6377
40	5	100	7,6377
<b>80</b>	<b>5</b>	<b>59</b>	<b>7,6076</b>
100	5	184	7,7201
80	10	106	7,6377
80	15	71	7,6076

**Tabela F.6:** Parâmetros do algoritmo genético para o sistema II, caso III.

$k_{pi}$	$\mu$ (%)	Iterações	FO (s)
20	5	103	6,7480
40	5	277	6,7093
80	5	497	6,6778
100	5	806	6,5651
<b>100</b>	<b>10</b>	<b>1805</b>	<b>6,5005</b>
100	15	1300	6,5308

**Tabela F.7:** Parâmetros do algoritmo genético para o sistema de 3 barras.

$k_{pi}$	$\mu$ (%)	Iterações	FO (s)
<b>20</b>	<b>5</b>	<b>7</b>	<b>1,5987</b>
40	5	16	1,5987
80	5	33	1,5987
100	5	60	1,5987
80	10	7	1,5987
80	15	7	1,5987

**Tabela F.8:** Parâmetros do algoritmo genético para o sistema de 6 barras.

$k_{pi}$	$\mu$ (%)	Iterações	FO (s)
20	5	1729	10,1551
<b>40</b>	<b>5</b>	<b>5632</b>	<b>10,1515</b>
80	5	5704	10,1543
100	5	4559	10,1520
40	10	5114	10,1526
40	15	7572	10,1515

**Tabela F.9:** Parâmetros do algoritmo genético para o sistema de 8 barras.

$k_{pi}$	$\mu$ (%)	Iterações	FO (s)
<b>20</b>	<b>5</b>	<b>32</b>	<b>8,4271</b>
40	5	72	8,4271
80	5	86	8,4271
100	5	101	8,4271
80	10	38	8,4271
80	15	33	8,4271

**Tabela F.10:** Parâmetros do algoritmo genético para o sistema de 9 barras.

$k_{pi}$	$\mu$ (%)	Iterações	FO (s)
<b>20</b>	<b>5</b>	<b>16</b>	<b>4,8000</b>
40	5	73	4,8000
80	5	157	4,8000
100	5	182	4,8000
80	10	55	4,8000
80	15	34	4,8000

**Tabela F.11:** Parâmetros do algoritmo genético para o sistema de 15 barras.

$k_{pi}$	$\mu$ (%)	Iterações	FO (s)
<b>20</b>	<b>5</b>	<b>21</b>	<b>12,2149</b>
40	5	55	12,2149
80	5	67	12,2149
100	5	79	12,2149
80	10	27	12,2149
80	15	44	12,2149

## Apêndice G – Publicações

Título: Optimal Coordination of Overcurrent Relays Using Mixed Integer Linear Programming;

Autores: Alexandre Akira Kida e Luis Alfonso Gallego Pareja;

Submissão: Maio de 2015;

Aceitação: Março de 2016;

Revista: IEEE Latin America Transactions;

Qualis (Engenharias IV): B2.

Título: Programação Linear Inteira Mista Aplicada à Coordenação Ótima de Relés de Sobrecorrente;

Autores: Alexandre Akira Kida e Luis Alfonso Gallego Pareja;

Submissão: Maio de 2015;

Aceitação: Junho de 2015;

Congresso: XLVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional.

Título: Algoritmos Heurísticos Aplicados ao Planejamento de Redes de Transmissão;

Autores: Alexandre Akira Kida, Andres Felipe Alvarez Echavarria, Sebastian Manrique Machado de Jesus e Luis Alfonso Gallego Pareja;

Submissão: Maio de 2015;

Aceitação: Junho de 2015;

Congresso: XLVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional.



# Optimal Coordination of Overcurrent Relays Using Mixed Integer Linear Programming

A. A. Kida and L. A. Gallego, *Member, IEEE*

**Abstract**— In distribution systems, the coordination and selectivity of protection devices are essential for improving reliability and security indicators. In these systems, the overcurrent relays are widely used. During a fault, the heat dissipation is high. Therefore, it is important that the relays act quickly. The problem of coordination is linear when the pickup currents are previously known. In this paper, a methodology for an optimal coordination of non-directional overcurrent relays in radial systems using Mixed-Integer Linear Programming (MILP) is proposed. The main objective is to compute the Time Dial Settings (TDSs) that minimize the relay operational times, without any loss of sensitivity, selectivity and reliability. The TDSs are considered as discrete variables, so the problem becomes discrete and is solved through MILP. The selectivity is guaranteed for a range of possible fault currents levels. The proposed methodology is successfully applied in a radial test system containing five overcurrent relays.

**Keywords**— Mixed-integer linear programming, Feeder protection, Overcurrent relay coordination.

## I. INTRODUÇÃO

NENHUM sistema elétrico está imune à falhas, e sua proteção apresenta um papel fundamental na preservação de equipamentos (geradores, chaves seccionadoras, condutores, capacitores, transformadores, etc.) e indivíduos. Adicionalmente, é necessário garantir a máxima continuidade de fornecimento de energia elétrica para os consumidores. As interrupções causam prejuízos tanto para os usuários como para as concessionárias de energia elétrica. Para estas, as interrupções podem significar perdas de faturamento, prejuízo de sua imagem junto aos clientes e multas aplicadas pela ANEEL [1].

Afim de reduzir o impacto das faltas no sistema, é necessário que as proteções estejam coordenadas de forma seletiva. Permitindo que os dispositivos de proteção atuem – ante uma falta – em uma sequência de operação específica, minimizando o número de usuários afetados pela desconexão. Ademais, é desejável que os esquemas de proteção apresentem os seguintes requisitos [2]:

- Sensibilidade: os dispositivos de proteção devem ser sensibilizados pelas menores correntes de falha presumidas;
- Confiabilidade: os dispositivos de proteção devem apresentar uma alta confiabilidade, sendo esperado que os mesmos atuem corretamente. Para elevar a confiabilidade do sistema de proteção, utiliza-se a

proteção de retaguarda, cuja função consiste em eliminar a falta na casualidade da proteção primária falhar em eliminá-la;

- Velocidade: as atuações das proteções devem ser as mais rápidas possíveis, para prevenir danos aos equipamentos.

Durante uma falta, uma das principais consequências ao sistema elétrico é a elevação da magnitude da corrente elétrica. Desta forma, é natural que esta grandeza seja utilizada como parâmetro para determinar se o sistema sofre um curto-circuito. Os dispositivos mais comuns desta categoria são os relés de sobrecorrente, fusíveis e disjuntores termomagnéticos [3]. A proteção via relé de sobrecorrente é normalmente utilizada como proteção de retaguarda, mas em alguns casos pode ser a única proteção disponível [4]. Estes relés possuem dois ajustes: corrente de partida ( $I_p$ ) e *Time Dial Setting* (TDS). É comum encontrar os valores de  $I_p$  e TDS variarem de 0.25 a 16 A x Relação de transformação do Transformador de Corrente (RTC) e 0.10 a 2, respectivamente, com passos de 0.01 [1].

Técnicas determinísticas para a coordenação ótima de relés de sobrecorrente vêm sendo estudadas desde 1988. No trabalho pioneiro de [2], a coordenação foi formulada como um problema de otimização. Foi demonstrado que, caso as correntes de partida sejam previamente conhecidas, o problema da coordenação passa a ser linear e os valores ótimos de TDSs podem ser computados utilizando Programação Linear (PL). Os autores solucionaram o problema linearizado utilizando a técnica Simplex. Em [5], o problema foi solucionado com o Simplex de duas fases. Os autores demonstraram como identificar as restrições infactíveis e isolá-las na fase final do algoritmo. Em [6], foi formulado o problema considerando os relés de impedância e sobrecorrente (temporizados e instantâneos). No trabalho de [3], foi resolvido o problema para sistemas radiais, utilizando relés de sobrecorrente não direcionais. Demais trabalhos, como os apresentados em [4], [7], [8] e [9] solucionaram o problema da coordenação utilizando técnicas de PL.

Em PL, as variáveis são tratadas como contínuas. Nos trabalhos citados acima, os TDSs foram considerados contínuos. Desta forma, as soluções encontradas ficam restritas aos relés que possuem passos de TDS pequenos o suficiente para que sejam tratados como variáveis contínuas. Caso os TDSs fornecidos pela PL sejam simplesmente arredondados para os valores aceitos pelos relés, não é mais possível garantir a factibilidade desta nova configuração [10]. Deste modo, deve-se tratar o problema como discreto. Neste artigo, este problema é solucionado por meio de uma técnica de Programação Linear Inteira Mista (PLIM).

---

A. A. Kida, Universidade Estadual de Londrina (UEL), Paraná, Brasil, alexandre.kida@gmail.com

L. A. Gallego, Universidade Estadual de Londrina (UEL), Paraná, Brasil, gallegopareja@gmail.com

Assim, é proposto uma metodologia com objetivo de solucionar o problema da coordenação ótima de relés de sobrecorrente, considerando os passos discretos de TDS. Adicionalmente, é proposta uma alteração na função objetivo (F.O) para garantir a coordenação para uma faixa de correntes de falta.

O trabalho está dividido em oito secções. Na Secção II, são apresentadas as principais características dos relés de sobrecorrente. Na Secção III, é apresentada a formulação matemática do problema da coordenação ótima dos relés de sobrecorrente. Na Secção IV, é apresentada a metodologia proposta para incluir as restrições dos valores discretos de TDSs. A Secção V apresenta os métodos e o sistema elétrico utilizado para validar o algoritmo proposto. Na Secção VI, são apresentados os TDSs ótimos fornecidos pelo algoritmo, bem como todo os equacionamentos necessários. Na Secção VII, são realizadas as discussões sobre os resultados obtidos. Na Secção VIII, são apresentadas as conclusões finais deste artigo.

## II. RELÉS DE SOBRECORRENTE

O foco desta secção é no relé de sobrecorrente temporizado de tempo inverso. Este opera quando a corrente monitorada excede um valor pré-determinado ( $I_p$ ), enviando um sinal para o disjuntor para interromper o circuito. Seu tempo de atuação é inversamente proporcional à intensidade da corrente percorrida. Estes relés podem ser classificados como direcionais ou não direcionais. Estes não consideram o sentido do fluxo da corrente para atuar. Uma de suas principais aplicações é em sistemas radiais de distribuição, nos quais os sentidos dos fluxos das correntes são sempre conhecidos [11].

O relé de sobrecorrente possui basicamente dois parâmetros: TDS e  $I_p$ . Sua atuação é determinada por equações padronizadas por normas internacionais. As normas mais utilizadas são a IEC, IAC, US e IEEE. Neste trabalho, os relés utilizados seguem as normas IEC 60255-151:2009. As equações que regem os tempos de atuação são mostradas em (1) a (4). As constantes que regem cada tipo de curva são mostradas na Tabela I. Neste trabalho, é utilizado o seguinte critério para escolher os valores de  $I_p$ : o primeiro valor aceito pelo relé que satisfaça a restrição apresentada em (3) [2].

$$t = \frac{a \cdot TDS}{M^n - 1} \quad (1)$$

$$M = \frac{I_{cc}}{I_p} \quad (2)$$

$$I_p \geq Fc \cdot I_{carga} \quad (3)$$

$$I_p \leq I_{cc}^{min} \quad (4)$$

sendo que,  $t$  – tempo de operação do relé;  $TDS$  – ajuste de tempo do relé;  $a$  e  $n$  – constantes da curva IEC, dadas pela Tabela I;  $M$  – múltiplo da corrente de atuação do relé;  $I_{cc}$  – módulo da corrente de curto-circuito analisada;  $Fc$  – fator de crescimento de carga;  $I_p$  – corrente de partida do relé;  $I_{carga}$  – corrente de carga;  $I_{cc}^{min}$  – corrente de curto-circuito mínima dentro do trecho protegido pelo relé.

TABELA I. CONSTANTES DAS CURVAS DO RELÉ, SEGUNDO A IEC 60255-151:2009.

Tipo de curva	$a$	$n$
Inversa (I)	0.14	0.02
Muito Inversa (M.I)	13.5	1
Extremamente Inversa (E.I)	80	2
Inversa Longa (I.L)	1200	1

## III. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

### A. Coordenação de Relés de Sobrecorrente em Sistemas Radiais

Seja o sistema radial apresentado na Fig. 1.  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$  referem-se aos relés de sobrecorrente 1, 2 e 3, respectivamente.  $F_1$ ,  $F_2$  e  $F_3$  correspondem às três faltas no sistema. O relé mais próximo da falta  $F_3$  é  $R_3$ , sendo que este atua como proteção primária para uma falta em  $F_3$ . Sua proteção de retaguarda é realizada por  $R_2$ . Para uma falta em  $F_2$ , a proteção primária é feita por  $R_2$  e a de retaguarda por  $R_1$ . Por fim, para a falta em  $F_1$ , a única proteção disponível é realizada por  $R_1$  e esta é proteção primária e não há proteção de retaguarda. As proteções primária e retaguarda também são conhecidas como dispositivos protetores e protegidos, respectivamente. As áreas delimitadas por traços pontilhados demonstram as zonas de proteção primária de cada relé.

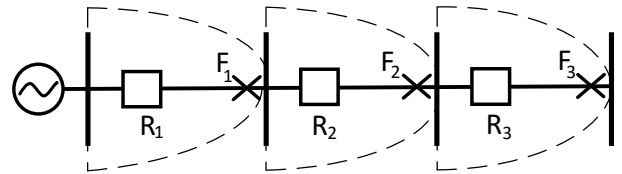


Figura 1. Sistema radial genérico.

Com objetivo de obter a seletividade, as diferenças entre os tempos de atuação dos relés protegidos e protetores devem ser maiores que o intervalo de coordenação entre relés ( $\Delta T_{relé}$ ). O valor normalmente adotado é de 0.4s, devido ao tempo de operação do disjuntor, a tolerância do fabricante e o tempo de segurança de projeto ser de aproximadamente 0.13, 0.10 e 0.17s, respectivamente [1].

### B. Formulação Matemática do Problema de Otimização

Os autores em [2] foram os pioneiros em formular o problema da coordenação de relés de sobrecorrente como um problema de otimização matemática. A seguir, o problema da coordenação de relés de sobrecorrente é formulado como um problema de otimização: contendo uma função objetivo (F.O) e um conjunto de restrições.

1) *Função Objetivo*: O tempo de atuação do relé para uma falta dentro da sua zona de proteção primária é conhecido como tempo próprio do relé. Este tempo ocorre na parte mais baixa da curva inversa, portanto, pode-se utilizá-lo como F.O a ser minimizada. Sendo assim, a F.O passa a ser minimizar a somatória dos tempos próprios de todos os relés [3], [4], [7] e [10].

Diferentemente dos trabalhos supracitados, neste trabalho a seletividade é garantida para uma faixa de correntes de falta dentro de cada zona de proteção. Assim, a F.O passa a ser

descrita por (5). Os tempos próprios dos relés, para cada nível de falta considerado, são mostrados em (6) a (8). O intervalo de coordenação é dividido em  $p$  níveis, apresentados em (8). Desta forma, são analisados  $p$  valores de correntes de falta dentro de cada zona de proteção primária, e a seletividade é garantida para estes valores. Quanto maior o valor de  $p$ , maior o nível de discretização do intervalo de coordenação e, conseqüentemente, a seletividade é garantida para mais níveis de falta. Entretanto, deve-se levar em consideração que a complexidade do problema aumenta com  $p$ , devido ao acréscimo de restrições ao problema de otimização.

$$\min z = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p \sum_{i=1}^m T_{i,i}^k \quad (5)$$

$$T_{i,i}^k = \frac{a \cdot TDS_i}{\left(\frac{Icc_i^k}{Ip_i}\right)^n - 1} \quad (6)$$

$$\Delta Icc_i = \frac{Icc_{max}^i - Icc_{min}^i}{p-1}, \quad p > 1 \quad (7)$$

$$Icc_i^k = Icc_{min}^i + (k-1) \cdot \Delta Icc_i \quad (8)$$

sendo que,  $m$  – número de relés;  $p$  – número de pontos analisados do intervalo de coordenação;  $TDS_i$  – ajuste de tempo do relé  $i$ ;  $T_{i,i}^k$  – tempo próprio do relé  $i$  para o nível  $k$ ;  $Icc_i^k$  – corrente de falta no local onde o relé  $i$  encontra-se instalado, para o nível  $k$ ;  $Ip_i$  – corrente de partida do relé  $i$ .

2) *Restrições*: A restrição apresentada em (9) refere-se ao critério de seletividade, e está relacionada com a diferença mínima necessária entre os tempos de atuação da proteção de retaguarda e primária, para que estejam coordenados de forma seletiva. Esta diferença deve ser superior a  $\Delta T_{rele}$ . A quantidade de restrições deste tipo é  $p(m-1)$ , onde  $m$  é o número de relés. A restrição (10) está relacionada com os limites de excursão de TDS. Neste caso, o problema terá  $m$  restrições deste tipo. A restrição apresentada em (11) refere-se ao tempo de atuação do relé  $i$  para uma falta em  $l$ . Sendo que, esta é responsável pela não linearidade do problema, pois  $TDS_i$  e  $Ip_i$  se relacionam de forma não linear. Neste caso, existem  $p(2m-1)$  restrições deste tipo.

$$T_{i,i}^k = \frac{a \cdot TDS_i}{\left(\frac{Icc_i^k}{Ip_i}\right)^n - 1} \quad (9)$$

$$T_{j,l}^k - T_{i,l}^k \geq \Delta T_{rele} \quad (10)$$

$$TDS_{i,min} \leq TDS_i \leq TDS_{i,max} \quad (11)$$

sendo que,  $T_{j,l}^k$  – tempo de atuação do relé  $j$  de retaguarda do relé  $i$ , para uma falta em  $l$  de nível  $k$  [s];  $T_{i,l}^k$  tempo de atuação do relé de proteção primária  $i$ , para uma falta em  $l$  de nível  $k$  [s];  $\Delta T_{rele}$  – intervalo mínimo de coordenação entre relés [s];  $TDS_{i,min}$  – ajuste de tempo mínimo do relé  $i$ ;  $TDS_{i,max}$  – ajuste de tempo máximo do relé  $i$ .

3) *Linearização do Problema*: O problema apresentado até

o momento é não linear. Visto que, as variáveis  $Ip$  e  $Dial$  se relacionam de forma não linear. Caso as correntes de partida sejam previamente conhecidas, a equação (11) pode ser reescrita como (12) e (13). Sendo assim, o problema passa a ser linear e pode ser resolvido utilizando técnicas de PL. O uso destas técnicas é interessante devido a sua robustez, velocidade e a alta dimensionalidade dos problemas que a mesma consegue trabalhar [12].

$$T_{i,l}^k = K_{i,l}^k \cdot TDS_i \quad (12)$$

$$K_{i,l}^k = \frac{a}{\left(\frac{Icc_i^k}{Ip_i}\right)^n - 1} \quad (13)$$

#### IV. COORDENAÇÃO DE RELÉS DE SOBRECORRENTE UTILIZANDO PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA MISTA

Em alguns relés, os passos de TDSs não são pequenos o suficiente para que os TDSs sejam tratados como variáveis contínuas. Sendo assim, este trabalho propõe estabelecer uma metodologia capaz de tratar o problema da coordenação entre relés como discreto, resolvendo-o via PLIM. O algoritmo proposto consiste em dois passos: renumeração e processo iterativo. Sua ideia principal é adicionar restrições referentes aos valores discretos de TDS, durante o processo iterativo, em uma ordem estabelecida pela rotina de renumeração. A seguir, o algoritmo proposto é detalhado.

1) *Renumeração*: o objetivo deste passo consiste em estabelecer uma metodologia sistemática para analisar os relés filhos (protetores) antes dos seus pais (protegidos). Em [13], foi proposta uma metodologia de renumeração de ramos, baseada em camadas para solucionar o fluxo de potência de varredura. Esta metodologia é adaptada para o caso de relés. O algoritmo funciona da seguinte forma: a renumeração dos relés da camada superior só começa quando os relés da camada anterior forem renumerados. Na Fig. 2, é apresentado um exemplo de um sistema contendo dez relés renumerados. Verifica-se que caso os relés  $R_{10}, R_9, \dots, R_1$  sejam analisados nesta ordem, os relés filhos sempre são analisados antes dos pais.

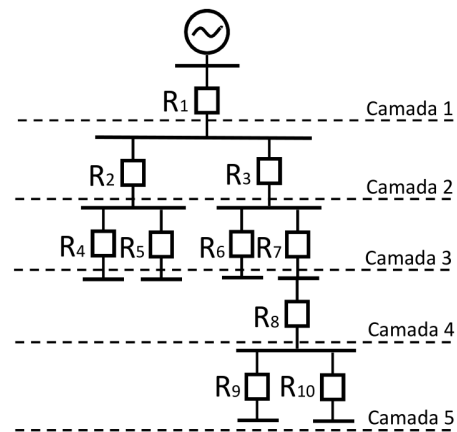


Figura 2. Exemplo da renumeração dos relés em camadas.

2) *Processo Iterativo*: O fluxograma deste passo é apresentado na Fig. 3. Primeiramente, deve-se solucionar o problema relaxado utilizando PL. Este é dito relaxado pois não foram incluídas as restrições dos passos discretos de TDSs. Caso o problema seja factível, a solução do PL fornecerá, como dados de saída, os valores ótimos de TDSs. Pelo fato do sistema estar reenumerado, o contador  $i$  é iniciado com o número de relés. Desta forma, a análise começa pelos relés filhos (protetores). Os passos para acrescentar as restrições referentes aos valores discretos de TDS ao problema são:

- 1) Para o relé  $i$ , é verificado se  $TDS_i$  encontra-se dentro da faixa discreta do permitida. Caso  $TDS_i$  esteja nesta faixa, vá para o passo 4, caso contrário vá para o passo 2;
- 2) Adicione a restrição de igualdade apresentada em (14) ao problema. Sua função é garantir que  $TDS_i$  esteja dentro da faixa de valores permitidos de TDS. Vá para o passo 3;
- 3) O problema da coordenação é solucionado novamente, via PL, considerando a adição na nova apresentada no passo 2. Vá para o passo 4;
- 4) Decremente o contador  $i$  e volte ao passo 1, até que todos os relés tenham sido analisados.

A restrição (14) funciona da seguinte forma: considere que o passo de TDS igual a 0.01 e o valor de  $TDS_i$  de 0.5137. Caso  $TDS_{novo}$  seja arredondado para o valor factível anterior, no caso 0.51, ocasionaria perda de seletividade dos relés (infactibilidade). Portanto,  $TDS_{novo}$  deve ser arredondado para o próximo valor factível de TDS, no caso 0.52. Sendo assim, a nova restrição a ser adicionada ao problema é  $TDS_i = 0.52$ .

$$TDS_i = TDS_{novo} \quad (14)$$

sendo que  $TDS_{novo}$  – valor de  $TDS_i$  arredondado para o próximo valor discreto permitido pelo relé.

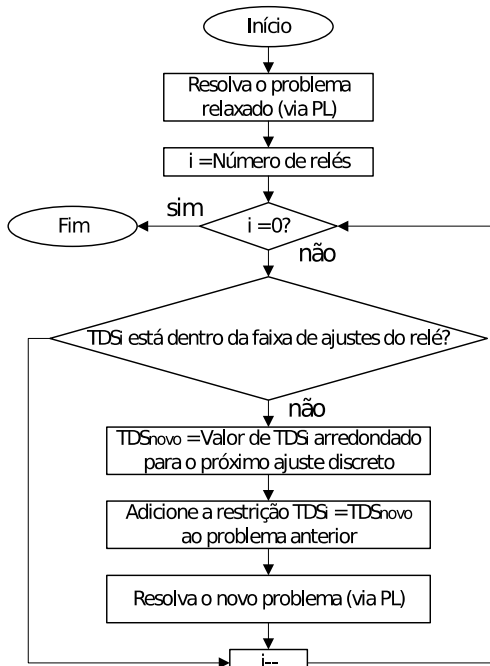


Figura 3. Fluxograma do 2º passo do algoritmo proposto.

## V. MÉTODOS

A coordenação de relés via PL foi solucionado analiticamente com o Simplex [2], Simplex de duas fases [12], pontos interiores [7] e dual Simplex [8]. O foco deste trabalho não está na solução analítica do PL, mas na metodologia para realizar a coordenação. Para a solucionar o problema de PL, é utilizado o *solver* de PL do software MATLAB (*MATrix LABORatory*), a função *linprog*. Este *solver* é baseado na técnica de pontos interiores. Para utilizá-lo é necessário que o problema de otimização esteja formulado de acordo com (15) a (17).

$$\text{Min. } \mathbf{f}^T \cdot \mathbf{x} \quad (15)$$

sujeito à

$$\mathbf{A}_{eq} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b}_{eq} \quad (16)$$

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} \leq \mathbf{b} \quad (17)$$

sendo que,  $\mathbf{f}$  – vetor linha com os coeficientes da função objetivo;  $\mathbf{x}$  – vetor linha de incógnitas dos problemas;  $\mathbf{A}$  – matriz com os coeficientes que representam o lado esquerdo das restrições de desigualdade;  $\mathbf{b}$  – vetor coluna com os valores que representam o lado direito das restrições de desigualdade;  $\mathbf{A}_{eq}$  – matriz com os coeficientes que representam o lado esquerdo das restrições de igualdade;  $\mathbf{b}_{eq}$  – vetor coluna com os valores que representam o lado direito das restrições de igualdade.

A metodologia proposta é aplicada em um sistema elétrico radial contendo cinco relés de sobrecorrente, apresentado na Fig. 4. Os valores adotados para  $F_c$ ,  $p$ ,  $\Delta T_{rele}$  são de 1.5, 2 e 0.4s, respectivamente. Os relés possuem TDS mínimo de 0.1 e passos de TDS de 0.05. Para simplificar o problema, não é considerado um limite máximo para TDS.  $I_p$  pode variar de 50 a 200% do valor da corrente nominal no primário do transformador de corrente, em passos de 5%. Os relés seguem a norma IEC 60255-151:2009. Na Tabela II, é apresentado os valores de RTC,  $I_{carga}$ ,  $I_p$  e tipo de curva de cada relé. A Tabela III contém os valores das correntes de curto-circuito máximas e mínimas em cada barra do sistema.

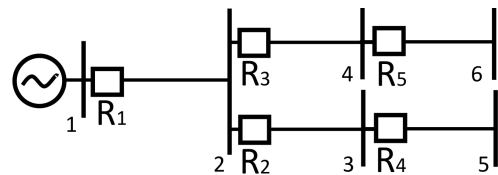


Figura 4. Sistema elétrico utilizado, contendo cinco relés de sobrecorrente.

TABELA II. DADOS DE RTC,  $I_{carga}$ ,  $I_p$  E TIPO DE CURVA PARA CADA RELÉ DO SISTEMA ELÉTRICO UTILIZADO.

	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	R <sub>5</sub>
RTC [A/A]	300/5	300/5	100/5	200/5	100/5
$I_{carga}$ [A]	199.5	130.8	68.7	100.7	50.0
$I_p$ [A]	300	210	105	160	80
Tipo de curva	M.I	I	I	M.I	E.I

TABELA III. DADOS DAS CORRENTES DE FALTA MÍNIMAS E MÁXIMAS NAS BARRAS DO SISTEMA ELÉTRICO UTILIZADO.

	Barra					
	1	2	3	4	5	6
$I_{cc_{max}}$ [A]	3115.0	2010.7	1512.5	878.4	980.9	690.4
$I_{cc_{min}}$ [A]	2100.2	1510.5	1046.3	975.1	500.3	325.1

## VI. RESULTADOS

Nesta secção, é apresentado o passo a passo de como realizar a coordenação ótima dos relés de sobrecorrente do sistema elétrico apresentado na Fig. 4.

### A. Restrições do Problema Relaxado

O *solver* utilizado trabalha com restrições de igualdade (=) e desigualdade com limitante superior ( $\leq$ ), conforme (16) e (17), respectivamente. Porém, as restrições de desigualdade mostradas em (9) e (10) possuem limitantes inferiores ( $\geq$ ). Deste modo, é necessário converter as restrições de  $\geq$  em  $\leq$ . Para cada par de relés protetor-protégido, é criada uma restrição conforme (9), como apresentado em (18) a (25). As restrições (26) a (30) são referentes aos TDSs mínimos, conforme (10). As restrições apresentadas em (31) a (48) são referentes ao critério de seletividade apresentado em (12).

$$T_{1,2}^1 - T_{2,2}^1 \geq \Delta T_{rele} \rightarrow -T_{1,2}^1 + T_{2,2}^1 \leq -0.4 \quad (18)$$

$$T_{1,2}^2 - T_{2,2}^2 \geq \Delta T_{rele} \rightarrow -T_{1,2}^2 + T_{2,2}^2 \leq -0.4 \quad (19)$$

$$T_{1,3}^1 - T_{3,3}^1 \geq \Delta T_{rele} \rightarrow -T_{1,3}^1 + T_{3,3}^1 \leq -0.4 \quad (20)$$

$$T_{1,3}^2 - T_{3,3}^2 \geq \Delta T_{rele} \rightarrow -T_{1,3}^2 + T_{3,3}^2 \leq -0.4 \quad (21)$$

$$T_{2,3}^1 - T_{3,3}^1 \geq \Delta T_{rele} \rightarrow -T_{2,3}^1 + T_{3,3}^1 \leq -0.4 \quad (22)$$

$$T_{2,3}^2 - T_{3,3}^2 \geq \Delta T_{rele} \rightarrow -T_{2,3}^2 + T_{3,3}^2 \leq -0.4 \quad (23)$$

$$T_{3,4}^1 - T_{4,4}^1 \geq \Delta T_{rele} \rightarrow -T_{3,4}^1 + T_{4,4}^1 \leq -0.4 \quad (24)$$

$$T_{3,4}^2 - T_{4,4}^2 \geq \Delta T_{rele} \rightarrow -T_{3,4}^2 + T_{4,4}^2 \leq -0.4 \quad (25)$$

$$TDS_1 \geq TDS_{min} \rightarrow TDS_1 \leq -0.1 \quad (26)$$

$$TDS_2 \geq TDS_{min} \rightarrow TDS_2 \leq -0.1 \quad (27)$$

$$TDS_3 \geq TDS_{min} \rightarrow TDS_3 \leq -0.1 \quad (28)$$

$$TDS_4 \geq TDS_{min} \rightarrow TDS_4 \leq -0.1 \quad (29)$$

$$TDS_5 \geq TDS_{min} \rightarrow TDS_5 \leq -0.1 \quad (30)$$

$$T_{1,1}^1 = TDS_1 K_{1,1} \rightarrow T_{1,1}^1 - 3.3457 TDS_1 = 0 \quad (31)$$

$$T_{1,1}^2 = TDS_1 K_{1,1} \rightarrow T_{1,1}^2 - 1.4387 TDS_1 = 0 \quad (32)$$

$$T_{2,2}^1 = TDS_2 K_{2,2} \rightarrow T_{2,2}^1 - 4.2893 TDS_2 = 0 \quad (33)$$

$$T_{2,2}^2 = TDS_2 K_{2,2} \rightarrow T_{2,2}^2 - 3.0291 TDS_2 = 0 \quad (34)$$

$$T_{3,3}^1 = TDS_3 K_{3,3} \rightarrow T_{3,3}^1 - 3.0715 TDS_3 = 0 \quad (35)$$

$$T_{3,3}^2 = TDS_3 K_{3,3} \rightarrow T_{3,3}^2 - 2.3017 TDS_3 = 0 \quad (36)$$

$$T_{4,4}^1 = TDS_4 K_{4,4} \rightarrow T_{4,4}^1 - 6.3473 TDS_4 = 0 \quad (37)$$

$$T_{4,4}^2 = TDS_4 K_{4,4} \rightarrow T_{4,4}^2 - 1.5970 TDS_4 = 0 \quad (38)$$

$$T_{5,5}^1 = TDS_5 K_{5,5} \rightarrow T_{5,5}^1 - 5.1566 TDS_5 = 0 \quad (39)$$

$$T_{5,5}^2 = TDS_5 K_{5,5} \rightarrow T_{5,5}^2 - 0.6691 TDS_5 = 0 \quad (40)$$

$$T_{1,2}^1 = TDS_1 K_{1,2} \rightarrow T_{1,2}^1 - 5.4268 TDS_1 = 0 \quad (41)$$

$$T_{1,2}^2 = TDS_1 K_{1,2} \rightarrow T_{1,2}^2 - 2.3675 TDS_1 = 0 \quad (42)$$

$$T_{1,3}^1 = TDS_1 K_{1,3} \rightarrow T_{1,3}^1 - 5.9991 TDS_1 = 0 \quad (43)$$

$$T_{1,3}^2 = TDS_1 K_{1,3} \rightarrow T_{1,3}^2 - 2.3675 TDS_1 = 0 \quad (44)$$

$$T_{2,4}^1 = TDS_2 K_{2,4} \rightarrow T_{2,4}^1 - 7.9938 TDS_2 = 0 \quad (45)$$

$$T_{2,4}^2 = TDS_2 K_{2,4} \rightarrow T_{2,4}^2 - 3.4758 TDS_2 = 0 \quad (46)$$

$$T_{3,5}^1 = TDS_3 K_{3,5} \rightarrow T_{3,5}^1 - 6.1240 TDS_3 = 0 \quad (47)$$

$$T_{3,5}^2 = TDS_3 K_{3,5} \rightarrow T_{3,5}^2 - 3.2259 TDS_3 = 0 \quad (48)$$

### B. Função Objetivo

Conforme definido em (5), a F.O minimiza os tempos próprios dos relés, como é apresentado em (49).

$$\min \frac{1}{p} (T_{1,1}^1 + T_{1,1}^2 + T_{2,2}^1 + T_{2,2}^2 + T_{3,3}^1 + T_{3,3}^2 + T_{4,4}^1 + T_{4,4}^2 + T_{5,5}^1 + T_{5,5}^2) \quad (49)$$

### C. Solução do Problema Relaxado

Com posse das restrições (18) a (48) e da função objetivo (49), é solucionado o problema relaxado. Como saída, são fornecidos os valores ótimos de TDS, apresentados na Tabela IV.

TABELA IV. VALORES DE TDSs ÓTIMOS DO PROBLEMA RELAXADO.

$TDS_1$	$TDS_2$	$TDS_3$	$TDS_4$	$TDS_5$
0.3750	0.1610	0.1495	0.1000	0.1000

### D. Solução do Problema Considerando os Passos Discretos de TDS

A análise começa pelo m-ésimo relé. Contudo,  $TDS_4$  e  $TDS_5$  encontram-se dentro da faixa permitida (TDS mínimo de 0.1, com passos de 0.05). Sendo assim, é analisado  $TDS_3$  (0.1495). Os ajustes analisados a cada iteração estão sublinhados na Tabela V. Os valores mais próximos aceitos por  $R_3$  são 0.10 e 0.15. Deve ser escolhido o valor imediatamente superior, no caso 0.15. Visto que o menor valor, 0.10, leva à infactibilidade (perda de seletividade), conforme apresentado na Fig. 5. Assim, é adicionada a restrição de igualdade  $TDS_3 = 0.15$  no problema relaxado (PL<sub>1</sub>). Desta forma, é criado um novo problema (PL<sub>2</sub>). Sua solução é apresentada na Tabela V. Esta fornece novos valores de TDSs, os quais apenas  $TDS_1$  e  $TDS_2$  estão fora da faixa. No próximo passo, é analisado  $TDS_2$  (0.1610). É escolhido o próximo valor permitido, no caso 0.20. É adicionada a restrição de igualdade  $TDS_2 = 0.20$  em PL<sub>2</sub>, formando PL<sub>3</sub>. Verifica-se que na solução deste problema apenas  $TDS_1$  está fora da faixa. Por fim,  $TDS_1$  (0.4249) é analisado. O próximo valor factível é 0.45. Assim, é adicionada a restrição de igualdade  $TDS_1 = 0.45$  ao PL<sub>3</sub>, formando PL<sub>4</sub>. Ao solucionar o PL<sub>4</sub>, todos os TDSs encontram-se dentro da faixa permitida. Nesta etapa final, todos os relés foram analisados.

TABELA V. VALORES DE ÓTIMOS DE TDS E F.O A CADA ITERAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA.

	PL <sub>1</sub>	PL <sub>2</sub>	PL <sub>3</sub>	PL <sub>4</sub>
$TDS_1$	0.3750	0.3750	<u>0.4249</u>	0.4500
$TDS_2$	0.1610	<u>0.1610</u>	0.2000	0.2000
$TDS_3$	<u>0.1495</u>	0.1500	0.1500	0.1500
$TDS_4$	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000
$TDS_5$	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000
F.O [s]	2.5765	2.5778	2.8397	2.8998

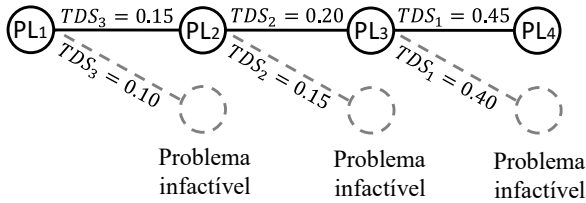


Figura 5. Adição das restrições e comportamento iterativo.

Com os TDSs fornecidos pelo algoritmo proposto, são realizados os coordenogramas dos relés apresentados nas Figs. 6 a 8. Nestas, são evidenciados os intervalos mínimos de coordenação e os níveis de falta dentro das zonas de proteção para cada relé protetor.

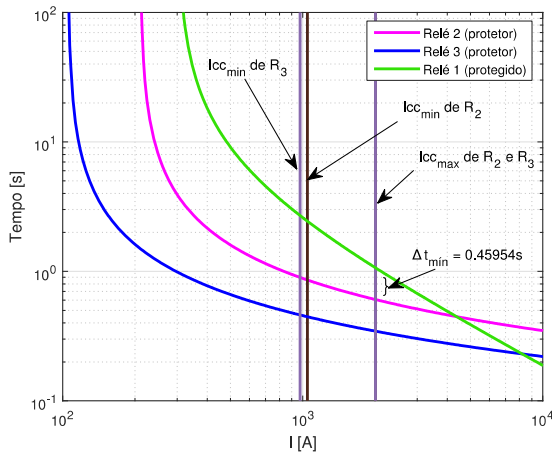


Figura 6. Coordenograma de  $R_1$  com  $R_2$  e  $R_3$ .

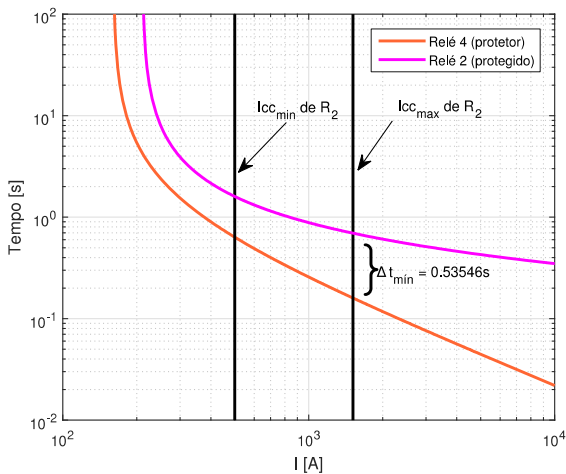


Figura 7. Coordenograma de  $R_2$  com  $R_4$ .

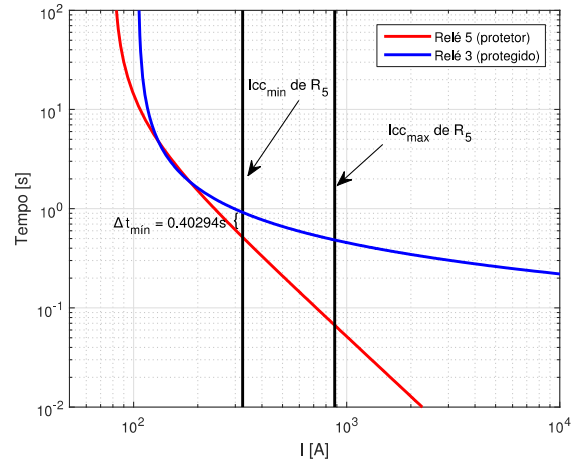


Figura 8. Coordenograma de  $R_3$  com  $R_5$ .

## VII. DISCUSSÕES

Para este sistema, a restrição do limite superior de TDS é uma restrição fraca. Sua remoção simplificou o problema sem impactar no resultado final. A metodologia apresentada, assemelha-se ao *Branch and Bound* [14], com a particularidade de apenas uma das ramificações ser factível. Visto que, a técnica de PL fornece os valores mínimos de TDSs, que satisfazem a restrição de seletividade, e qualquer valor inferior resultará na perda da seletividade. Como consequência, a cada restrição incluída no problema ocasionou aumento (piora) na F.O, conforme é verificado na Tabela V.

Devido ao valor de  $p = 2$ , para cada par de relés protetor-protegido, a seletividade é garantida para dois níveis de correntes de falta. Pela equação (8), verifica-se que os valores nos quais a coordenação é garantida correspondem aos níveis máximos e mínimos das correntes de falta dentro das zonas de proteção primária. Ao analisar as Figs. 6 a 8, observa-se que intervalos de coordenação são maiores que  $\Delta T_{rele}$  (0.4s), garantindo que o sistema se encontra coordenado de forma seletiva. Nas Figs. 6 e 7, verifica-se que os intervalos críticos de coordenação aconteceram para as correntes máximas de curtos-circuitos. De maneira oposta, na Fig. 8, este intervalo aconteceu para a corrente mínima de curto-circuito.

O uso de relés renumerados fornece uma ordem sistemática para a análise dos relés, de forma que cada um foi analisado apenas uma única vez durante o processo iterativo. Caso o problema fosse tratado como contínuo, os valores de TDSs do problema relaxado seriam arredondados para os próximos valores permitidos. Desta forma, os TDSs seriam:  $TDS_1 = 0.40$ ,  $TDS_2 = 0.20$ ,  $TDS_3 = 0.15$ ,  $TDS_4 = 0.10$  e  $TDS_5 = 0.10$ . Porém, ao analisar os valores de  $PL_3$ , verifica-se que  $TDS_2 = 0.20$  implicaria em  $TDS_1 \geq 0.45$ , para manter a seletividade. Caso este problema fosse tratado como contínuo,  $TDS_1$  não estaria coordenado de forma seletiva com  $TDS_2$ . Logo, para relés cujos passos de TDS não são pequenos o suficiente para serem tratados como contínuos, é necessário tratar o problema de forma discreta.

## VIII. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi apresentada uma metodologia baseada em Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para a coordenação ótima relés de sobrecorrente não direcionais em sistemas radiais. Na coordenação ótima de relés, o objetivo é encontrar os parâmetros dos relés que minimizam seus tempos de atuação, sem sacrificar a seletividade e sensibilidade. Caso as correntes de partida sejam previamente conhecidas, o problema da coordenação é linearizado. Assim, suas incógnitas são os *Time Dial Settings* (TDSs). No entanto, foi evidenciado que sua solução, via Programação Linear (PL), é restrita a relés que aceitam TDSs contínuos.

A metodologia proposta trata o problema da coordenação como discreto, adicionando restrições referentes aos valores discretos de TDS, a cada iteração, no problema original. A ordem nas quais as restrições são adicionadas são fornecidas pela etapa de renumeração dos relés. Esta é responsável por estabelecer uma ordem sistemática para a análise dos relés. Assim, os relés protetores são analisados antes dos protegidos, de forma a analisar uma única vez cada relé. Deste modo, foi possível contornar o problema da perda de coordenação ao arredondar os valores de TDSs.

O problema da coordenação foi adaptado para considerar uma faixa de valores de correntes de falta. Para diminuir o esforço computacional, esta é dividida em  $p$  valores de correntes de falta e a seletividade é garantida para estes. Há uma relação de custo-benefício entre desempenho e exatidão desejados. No sistema elétrico utilizado,  $p = 2$  foi suficiente para que o sistema estivesse coordenado de forma seletiva. A metodologia proposta foi testada com sucesso em um sistema elétrico radial composto por cinco relés de sobrecorrente.

## AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à CAPES/CNPq pelo apoio financeiro.

## REFERÊNCIAS

- [1] J. M. Filho and D. R. Mamede, *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência. Rio de Janeiro: LTC, 1a. ed., 2011.*
- [2] A. J. Urdaneta, R. Nadira, and L. G. Perez Jimenez, "Optimal coordination of directional overcurrent relays in interconnected power systems.," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 3 n 3, no. 3, pp. 903–911, 1988.
- [3] C. J. Zapata and G. E. Mejía, "Coordinación De Relés De Sobrecorrente En Sistemas Radiales Utilizando Programación Lineal," *Scientia Et Technica*, vol. 22, 2003.
- [4] P. P. Bedekar, S. R. Bhide, and V. S. Kale, "Optimum Coordination of Overcurrent Relays in Distribution System Using Dual Simplex Method," *2009 Second International Conference on Emerging Trends in Engineering & Technology*, pp. 555–559, 2009.
- [5] B. Chattopadhyay, M. S. Sachdev, and T. S. Sidhu, "An on-line relay coordination algorithm for adaptive protection using linear programming technique," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 1, pp. 165–171, 1996.
- [6] L. G. Pérez and A. J. Urdaneta, "Optimal coordination of directional overcurrent relays considering definite time backup relaying," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no. 4, pp. 1276–1281, 1999.
- [7] N. Estrada, O. Carmona, and A. Ruiz, "Coordinación de relés de sobrecorrente usando el método de optimización de puntos interiores," *Scientia et Technica*, no. 32, pp. 25–30, 2006.
- [8] P. Bedekar, S. Bhide, and V. Kale, "Coordination of overcurrent relays in distribution system using linear programming technique," in *Control, Automation, Communication and Energy Conservation, 2009. INCACEC 2009. 2009 International Conference on*, no. June, pp. 4–7, 2009.
- [9] S. Niyomphant, U. Leeton, T. Kulworawanichpong, and N. Chomnawang, "Application of linear programming for optimal coordination of directional over-current relays," *2012 9th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, pp. 1–4, May 2012.
- [10] A. Koochaki, M. R. Asadi, M. Mahmoodan, and R. A. Naghizadeh, "Optimal overcurrent relays coordination using genetic algorithm," in *11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, OPTIM 2008*, pp. 197–202, IEEE, May 2008.
- [11] P. Anderson, *Power System Protection*. United States of America: The Institute Of Electrical And Electronics Engineers, Inc, 1999.
- [12] A. J. Urdaneta, H. Restrepo, S. Márquez, and J. Sánchez, "Coordination of directional overcurrent relay timing using linear programming," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 1, pp. 122–128, 1996.
- [13] D. Shirmohammadi, H. W. Hong, A. Semlyen, and G. X. Luo, "Compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 3, no. 2, pp. 753–762, 1988.
- [14] A. H. Land and A. G. Doig, "An automatic method for solving discrete programming problems," *Econometrica*, vol. 28, no. 3, pp. 497–520, 1960.



**Alexandre Akira Kida** é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Londrina (UEL), Londrina, Paraná, Brasil, em 2013. Atualmente é aluno de Mestrado em Engenharia Elétrica pela UEL e suas pesquisas se concentram na área de otimização das proteções em sistemas elétricos de potência e no planejamento da transmissão de energia elétrica. Possui experiência em instalações elétricas e com projetos de geração fotovoltaica de energia elétrica.



**Luis Alfonso Gallego Pareja** possui graduação em engenharia Elétrica (2001) e mestrado em engenharia elétrica (2003) pela Universidad Tecnológica de Pereira - Colômbia, doutorado em Engenharia Elétrica pela UNESP-FEIS (2009). Atualmente desempenha-se como professor no departamento de engenharia elétrica da Universidade Estadual de Londrina Paraná - Brasil. Tem experiência nas áreas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: otimização de sistemas elétricos, fluxo de cargas AC e DC, fluxo de carga probabilístico, fluxo de potência ótimo, método de pontos interiores e Redes Neurais.

# PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA MISTA APLICADA À COORDENAÇÃO ÓTIMA DE RELÉS DE SOBRECORRENTE

**Alexandre Akira Kida**

Universidade Estadual de Londrina  
Rodovia Celso Garcia Cid (PR 445), km 380, Londrina - PR, 86051-980  
alexandrekida@gmail.com

**Luis Alfonso Gallego Pareja**

Universidade Estadual de Londrina  
Rodovia Celso Garcia Cid (PR 445), km 380, Londrina - PR, 86051-980  
luispareja@uel.br

## RESUMO

Em sistemas de distribuição, a coordenação e seletividade das proteções são fundamentais para a melhoria dos indicadores de confiabilidade e segurança. Nestes sistemas, os relés de sobrecorrente são amplamente utilizados. Durante uma falta, a dissipação de energia térmica é elevada. Logo, é importante que os relés atuem rapidamente. O problema da coordenação é linear, desde que sejam conhecidas suas correntes de partida. Neste trabalho é proposta uma metodologia para a coordenação ótima de relés de sobrecorrente, em sistemas radiais, utilizando PLIM (Programação Linear Inteira Mista). Seu principal objetivo é obter os TDSs (*Time Dial Setting*), de forma a minimizar os tempos de operação dos relés, mantendo a seletividade. Foram considerados valores discretos de TDS. Desta forma, o problema passa a ser discreto e pode ser solucionado via PLIM. A metodologia proposta é aplicada com sucesso em um sistema-teste radial contendo cinco relés.

**PALAVRAS CHAVE.** Programação Linear Inteira Mista, Coordenação de Relés de Sobrecorrente, Sistemas de Distribuição.

**Área Principal:** EN - PO na área de Energia.

## ABSTRACT

In distribution systems, the coordination and selectivity of protections are essential for improving reliability and security indicators. In these systems, the overcurrent relays are widely used. During a fault, the heat dissipation is high. Therefore, it is important that the relays act quickly. The problem of coordination is linear, since their pickup currents are known. In this paper, a methodology for the optimal coordination of overcurrent relays, in radial systems using MILP (Mixed-Integer Linear Programming) is proposed. Its main objective is getting the TDSs (Time Dial Setting) to minimize the operating times of relays, keeping the selectivity. Discrete values of TDS were considered. Thus, the problem becomes discrete and can be solved through MILP. The proposed methodology was applied successfully in a radial test-system containing five relays.

**KEYWORDS.** Mixed-Integer Linear Programming, Overcurrent Relay Coordination, Distribution Feeders.

**Main area:** EN - OR in Energy.



## 1. Introdução

Nenhum sistema elétrico está imune à falha. Sua proteção apresenta um papel fundamental na preservação de equipamentos (geradores, chaves seccionadoras, condutores, capacitores, transformadores, etc.) e indivíduos que tem contato com este. Adicionalmente, é necessário garantir o máximo de continuidade do fornecimento de energia elétrica para os consumidores. Interrupções causam prejuízos, tanto para os usuários como para as concessionárias de energia elétrica. Para estas, as interrupções podem significar perdas de faturamento, prejuízo de sua imagem junto aos clientes e até multas fornecidas pela ANEEL (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2011).

Para a reduzir o impacto das faltas no sistema, é necessária que as proteções estejam coordenadas, de forma que dispositivos de proteção instalados em série atuem – ante uma falta – em uma específica sequência de operação. Desta forma, é fundamental que as proteções atendam os seguintes requisitos (URDANETA; NADIRA; PEREZ JIMENEZ, 1988):

- Sensibilidade – o defeito deve ser detectado pelos dispositivos apropriados;
- Seletividade – dispositivos próximos do defeito devem agir primeiro;
- Confiabilidade – a proteção de retaguarda deve agir caso a primária falhe;
- Velocidade – a operação do dispositivo deve ser a mais rápida possível, de modo a prevenir danos no equipamento.

Durante uma falta, uma das principais consequências ao sistema elétrico é a elevação da magnitude da corrente elétrica. Desta forma, é natural que esta grandeza seja um parâmetro para determinar se o sistema sofre um curto-circuito. Os dispositivos mais comuns desta categoria são os relés de sobrecorrente, fusíveis e disjuntores termomagnéticos (ZAPATA; MEJÍA, 2003). A proteção via relés de sobrecorrente é normalmente utilizada como proteção de retaguarda, mas em alguns casos pode ser a única proteção disponível (BEDEKAR; Bhide; KALE, 2009b). Estes relés possuem dois ajustes:  $I_{partida}$  (corrente de partida) e TDS (*Time Dial Setting*). É comum encontrar os valores de  $I_{partida}$  e TDS variarem de 0.25–16.00 A x RTC (Relação de Transformação do transformador de Corrente) e 0.10–2.00, respectivamente, com passos de 0.01 (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2011).

Desde 1988, técnicas determinísticas para a coordenação ótima de relés de sobrecorrente, vem sendo estudadas. No trabalho pioneiro de Urdaneta (1988), o autor formulou a coordenação como um problema de otimização. Também foi demonstrado que, caso as correntes de partida dos relés sejam conhecidas, os valores ótimos de TDS podem ser encontrados utilizando programação linear (PL). O problema foi solucionado com o método Simplex. Chattopadhyay, Sachdev e Sidhu (1996) resolveram o problema utilizando o método Simplex de Duas Fases (PL). Os autores demonstraram como identificar as restrições infactíveis e isolá-las na fase final do algoritmo. Luis e Urdaneta (1998) formularam o problema considerando relés de impedância e sobrecorrente (temporizados e instantâneos). Zapata e Mejía (2003) resolveram o problema para sistemas radiais. Demais trabalhos como os apresentados em (ESTRADA; CARMONA; RUIZ, 2006), (BEDEKAR; Bhide; KALE, 2009a), (BEDEKAR; Bhide; KALE, 2009b) e (NIYOMPHANT et al., 2012) solucionaram o problema de coordenação utilizando técnicas de PL.

Em PL, as variáveis são tratadas como contínuas. Nos trabalhos citados acima, os TDSs foram considerados contínuos. Porém, alguns relés não possuem passos de TDSs pequenos o suficiente para que sejam tratados como contínuos. Caso estes sejam simplesmente arredondados para os valores aceitos pelos relés, não é mais possível garantir que esta nova configuração é factível (KOOCHAKI et al., 2008). Deste modo, deve-se tratar o problema como discreto e solucioná-lo via PLIM (Programação Linear Inteira Mista). Este trabalho propõe uma metodologia para resolver o problema da coordenação de relés de sobrecorrente, em sistemas de radiais, considerando os passos discretos de TDS.

O trabalho está dividido em sete seções. A seção 2 expõe uma introdução sobre o funcionamento, parâmetros e equações relativos aos relés de sobrecorrente. A seção 3 apresenta a formulação matemática do problema da coordenação dos relés de sobrecorrente como um problema de otimização (função objetivo e restrições). Esta seção também apresenta a metodologia utilizada

para incluir as restrições dos valores discretos de TDSs ao problema. A seção 4 apresenta os métodos utilizados, bem como os dados do sistema-teste utilizado. A seção 5 apresenta os equacionamentos bem como os resultados alcançados com o uso da metodologia proposta. A seção 6 realiza as discussões sobre os resultados obtidos. A seção 7 é apresentada as conclusões finais sobre o trabalho.

## 2. Relés de Sobrecorrente

Nesta seção, o foco será dado para o relé de sobrecorrente temporizado de tempo inverso. Este opera quando a corrente excede um valor pré-determinado, enviando um sinal para o disjuntor para interromper o circuito. Seu tempo de atuação é inversamente proporcional à intensidade da corrente. Os relés de sobrecorrente podem ser classificados em direcionais e não-direcionais. Estes não levam em consideração o sentido do fluxo da corrente. Uma de suas aplicações é em sistemas radiais de distribuição, nos quais os sentidos dos fluxos das correntes são sempre conhecidos (ANDERSON, 1999).

O relé de sobrecorrente possui dois parâmetros: TDS e  $I_{partida}$ . Sua operação é determinada por equações padronizadas por normas internacionais. As normas mais utilizadas são: IEC, IAC, US e IEEE. Neste trabalho, os relés utilizados seguem as normas IEC 60255-151:2009. As constantes que regem cada tipo de curva são mostradas na Tabela 1. As equações que regem os tempos de atuação são mostradas em (1), (2), (3) e (4). Os ajustes de  $I_{partida}$  escolhidos por (3) poderão ser arredondadas para o próximo valor discreto aceito pelo relé (URDANETA; NADIRA; PEREZ JIMENEZ, 1988).

Tabela 1 - Constantes das curvas exponencial do relé, segundo a norma IEC.

Tipo de curva	a	n
Inversa	0.14	0.02
Muito Inversa	13.50	1.00
Extremamente Inversa	80.00	2.00
Inversa Longa	120.00	1.00

$$t = \frac{a \cdot TDS}{(M^n - 1)} \quad (1)$$

$$M = \frac{I_{cc}}{I_{partida}} \quad (2)$$

$$I_{partida} = FC \cdot I_{carga} \quad (3)$$

$$I_{partida} \leq I_{cc}^{\min} \quad (4)$$

sendo que,

$t$  – tempo de operação do relé;  $TDS$  – ajuste de tempo do relé;  $a$  e  $n$  – constantes da curva IEC, dadas pela Tabela 1;  $M$  – múltiplo da corrente de atuação do relé;  $I_{cc}$  – módulo da corrente de curto-circuito;  $FC$  – fator de crescimento de carga;  $I_{partida}$  – corrente de partida do relé;  $I_{carga}$  – corrente de carga;  $I_{cc}^{\min}$  – corrente de curto-circuito mínima dentro da zona de proteção do relé.

## 3. Formulação do Problema

### Coordenação de Relés de Sobrecorrente Não-direcionais em Sistemas Radiais

Seja o sistema radial mostrado na Figura 1. Onde  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$  referem-se aos relés de sobrecorrente 1, 2 e 3, respectivamente.  $F_1$ ,  $F_2$  e  $F_3$ , correspondem aos locais das faltas no sistema. O relé mais próximo de  $F_3$  é  $R_3$ , sendo que este atua como proteção primária. A proteção de retaguarda é realizada por  $R_2$ . Para a uma falta em  $F_2$ , a proteção primária é feita por  $R_2$  e a de retaguarda, por  $R_1$ . Por fim, em  $F_1$  a única proteção disponível é feita por  $R_1$  e não há proteção de

retaguarda.

Com objetivo de obter a seletividade, para cada falta, a diferença temporal entre as atuações dos relés proteção de retaguarda e primária deve ser maior que o intervalo mínimo de coordenação entre relés ( $\Delta t_{relé}$ ). Normalmente é adotado 0.4s, devido ao tempo de operação do disjuntor, a tolerância do fabricante e o tempo de segurança de projeto ser de aproximadamente 0.13, 0.10 e 0.17s, respectivamente (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2011).

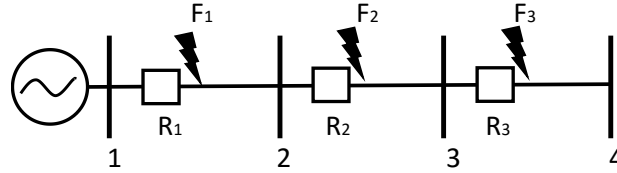


Figura 1 – Sistema radial genérico.

### 3.1 Formulação do Problema Utilizando Programação Linear

Urdaneta e Perez, em 1988, foram os pioneiros em formular o problema da coordenação como um problema de otimização e solucioná-lo via PL. O uso de técnicas de PL mostrou-se interessante devido a sua robustez, velocidade e a alta dimensionalidade dos problemas que a mesma pode trabalhar (URDANETA et al., 1996). A seguir, a coordenação será apresentada como um problema de otimização, contendo uma função objetivo e um conjunto de restrições.

#### Função Objetivo

O tempo no qual o relé leva para atuar em uma falta onde encontra-se instalado, é conhecido como tempo próprio do relé (5). Este sempre ocorre na parte mais baixa da curva inversa, portanto, pode-se utilizá-lo como função objetivo (F.O) a ser minimizada (ZAPATA; MEJÍA, 2003). Assim sendo, a F.O passa a ser minimizar a somatória dos tempos próprios de todos os relés (6). Essa F.O foi utilizada com êxito nos trabalhos de (ZAPATA; MEJÍA, 2003) e (ESTRADA; CARMONA; RUIZ, 2006). Como consequência da minimização dos tempos próprios dos relés, haverá uma minimização da energia térmica dissipada durante uma falta.

$$T_{i,i} = \frac{a \cdot TDS_i}{\left( \frac{Icc_i}{Ipartida_i} \right)^n - 1} \quad (5)$$

$$\min z = \sum_{i=1}^m T_{i,i} \quad (6)$$

sendo que,

$m$  – número de relés;  $TDS_i$  – ajuste de tempo do relé  $i$ ;  $T_{i,i}$  – tempo próprio do relé  $i$ ;  $Icc_i$  – nível de curto-circuito no local onde o relé  $i$  encontra-se instalado;  $Ipartida_i$  – corrente de partida do relé  $i$ .

#### Restrições

A restrição mostrada em (7) refere-se a diferença mínima necessária entre os tempos de atuação dos relés de retaguarda e primária, de modo que estejam coordenados ante uma falta em  $k$ . Esta diferença deve ser superior a  $\Delta t_{relé}$ . Sendo assim, o número de restrições deste tipo é  $m - 1$ , onde  $m$  corresponde ao número de relés. A restrição (8) está relacionada com os limites de excursão de TDS. Neste caso, o problema terá  $m$  restrições deste tipo. A restrição mostrada em (9) refere-se ao tempo de atuação do relé  $i$  para uma falta em  $k$ . Sendo que esta é responsável pela não-linearidade do problema, pois  $TDS_i$  e  $Ipartida_i$  são variáveis desconhecidas. Neste caso, existem

$2m - 1$  restrições deste tipo.

$$T_{j,k} - T_{i,k} \geq \Delta t_{rele} \quad (7)$$

$$TDS_{i,mín} \leq TDS_i \leq TDS_{i,máx} \quad (8)$$

$$T_{i,k} = \frac{a \cdot TDS_i}{\left(\frac{Icc_k}{Ipartida_i}\right)^n - 1} \quad (9)$$

sendo que,

$T_{j,k}$  – tempo de atuação do relé de retaguarda  $j$  do relé  $i$ , para uma falta em  $k$  [s];  $T_{i,k}$  – tempo de atuação do relé de proteção primária  $i$ , para uma falta em  $k$  [s];  $TDS_{i,mín}$  – ajuste de tempo mínimo do relé  $i$ ;  $TDS_{i,máx}$  – ajuste de tempo máximo do relé  $i$ .

### Linearização do Problema

O problema apresentado até o momento é não-linear. Porém, caso as correntes de partida sejam previamente conhecidas, a equação (9) pode ser reescrita como é mostrado em (10) e (11). Desta forma,  $K_{i,k}$  passa a ser uma constante para cada relé  $i$  em cada falta  $k$  e o problema passa a ser linear e pode ser resolvido via técnicas de PL.

$$T_{i,k} = K_{i,k} \cdot TDS_i \quad (10)$$

$$K_{i,k} = \frac{a}{\left(\frac{Icc_k}{Ipartida_i}\right)^n - 1} \quad (11)$$

## 3.2 Coordenação de Relés de Sobrecorrente Considerando Valores Discretos dos TDSs

Nem todos os relés possuem passos de TDS pequenos os suficientes para que possam ser tratados como contínuos. Desta forma, este trabalho propõe estabelecer uma metodologia capaz de tratar o problema da coordenação como discreto, resolvendo-o via PLIM. O algoritmo proposto consiste em dois passos: renumeração e processo iterativo. Sua ideia principal consiste em adicionar restrições de valores discretos de TDS, durante o processo iterativo, numa ordem pré-estabelecida. A seguir a metodologia proposta será detalhada.

### 1º Passo: Renumeração

Este passo consiste em estabelecer uma metodologia sistemática para a análise dos relés, de forma que a proteção primária (“filhos”) possam ser analisados antes da retaguarda (“pais”). Shirmohammadi et al. (1988) propôs uma metodologia para a renumeração de ramos, baseada em camadas, utilizada para a solução do fluxo de potência. Esta metodologia, foi adaptada para a renumeração dos relés. O algoritmo funciona da seguinte forma: a numeração dos relés em uma camada só começa quando os relés da camada anterior já forem numerados. Na Figura 2 é mostrado um exemplo de um sistema com 10 relés renumerados. Pode-se verificar que caso fosse analisados os relés  $R_{10}$ ,  $R_9$ ,  $R_8$ ... $R_1$ , nesta ordem, os relés “filhos” sempre seriam analisados antes os “pais”.

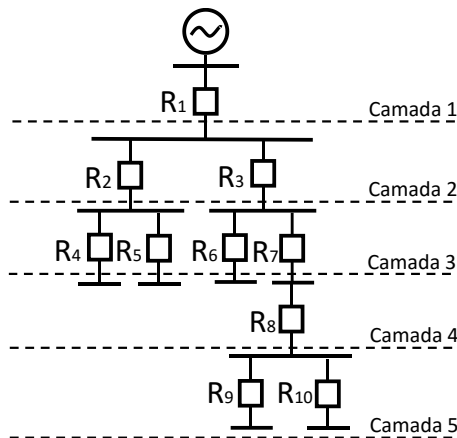


Figura 2 – Renumeração dos relés em camadas.

### 2º Passo: Processo iterativo

Para uma melhor compreensão desta etapa, foi realizado o fluxograma mostrado na Figura 3. Primeiramente, deve-se revolver o problema relaxado via PL, formulado na seção 3.1. O problema é dito relaxado, pois não foram incluídas as restrições dos passos discretos de TDS. Caso o problema seja factível o mesmo pode ser solucionado via PL. Como saída, será fornecido os valores ótimos dos TDSs contínuos. Pelo fato do sistema estar renumerado, o contador  $i$  será iniciado com o número de relés ( $m$ ). Desta forma, os relés “filhos” serão analisados antes dos seus respectivos “pais”. Os passos para acrescentar as restrições de TDSs discretos ao problema são:

- 1) Para o relé  $i$ , é verificado se  $TDS_i$  encontra-se dentro da faixa discreta do permitida pelo mesmo. Caso verdadeiro, vá para o passo 4;
- 2) Adicione a restrição (12) ao problema. Sua função é garantir que  $TDS_i$  esteja dentro da faixa de valores permitidos de TDS;
- 3) O problema da coordenação é resolvido novamente, via PL, considerando a adição da restrição apresentada no passo 2;
- 4) Decrementemente o contador  $i$  e volte ao passo 1, até que todos os relés tenham sido analisados.

A restrição (12) funciona da seguinte forma: seja o passo de TDS igual a 0.01 e o valor de  $TDS_i$  de 0.5137. Caso  $TDS_{novo}$  fosse arredondado para o valor factível anterior, no caso 0.51, ocasionaria a descoordenação dos relés. Portanto,  $TDS_{novo}$  deve ser arredondado para o próximo valor factível de TDS, no caso 0.52. Sendo assim, a nova restrição a ser adicionada ao problema de programação linear (PPL) é  $TDS_i = 0.52$ .

$$TDS_i = TDS_{novo} \quad (12)$$

sendo que,

$TDS_{novo}$  – valor de  $TDS_i$  arredondado para o próximo valor discreto permitido pelo relé.

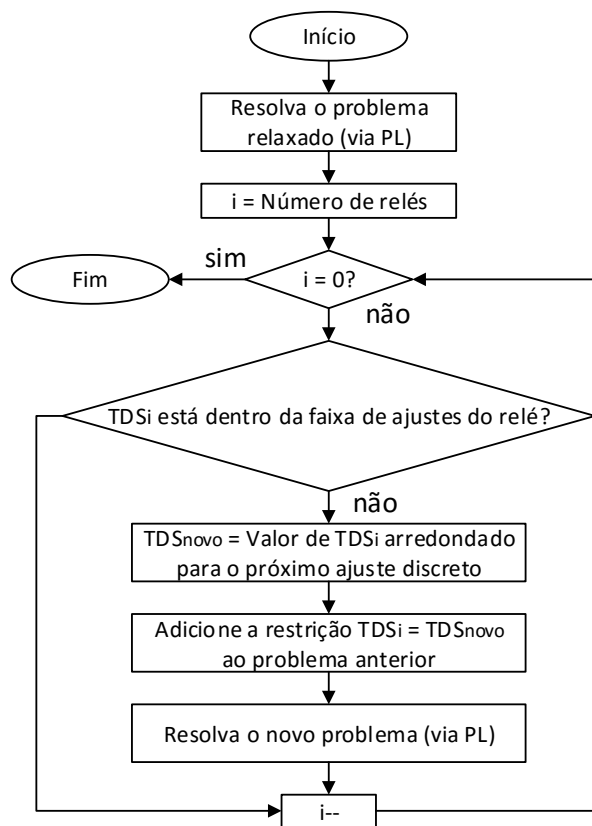


Figura 3 – Fluxograma do 2º passo do algoritmo proposto.

#### 4. Métodos

A coordenação de relés já foi solucionado analiticamente com o Simplex (URDANETA; NADIRA; PEREZ JIMENEZ, 1988), Simplex de Duas Fases (URDANETA et al., 1996), Pontos Interiores (ESTRADA; CARMONA; RUIZ, 2006) e Dual Simplex (BEDEKAR; BHIDE; KALE, 2009b). O foco deste trabalho não está na solução analítica do PPL, pois esta já foi bem explorada em trabalhos anteriores. Desta forma, para a solução PPL, foi utilizado o *solver* interno do *software* MATLAB® (MATrix LABORatory), a função *linprog*. Para utilizar esta função é necessário que o problema de otimização esteja formulado de acordo com (13) a (15).

$$\min f \cdot x \quad (13)$$

s.a

$$A \cdot x \leq b \quad (14)$$

$$A_{eq} \cdot x = b_{eq} \quad (15)$$

sendo que,

$f$  – vetor coluna com os coeficientes da função objetivo;  $x$  – vetor linha de incógnitas dos problema;  $A$  e  $A_{eq}$  – matrizes com coeficientes que representam o lado esquerdo das restrições de desigualdade e igualdade, respectivamente;  $b$  e  $b_{eq}$  – vetores coluna com os valores que representam o lado direito das restrições de desigualdade e igualdade, respectivamente.

Com objetivo de demonstrar a metodologia, foi utilizado um sistema-teste de pequeno porte, didático, mostrado na Figura 4. Os valores adotados para FC e  $\Delta t_{relé}$  foram de 1.5 e 0.4s, respectivamente. Os relés utilizados possuem valor mínimo e máximo de TDS de 0.1 e 2, respectivamente, passos de 0.05 e curva IEC muito inversa. O ajuste de  $I_{partida}$  pode variar de 50 a 200% do valor da corrente nominal do transformador de corrente, em passos de 5%. A Tabela 2

mostra os valores de RTC ,  $I_{carga}$  e  $I_{partida}$  de cada relé. A Tabela 3 contém os valores das correntes de curto-circuito em cada barra do sistema-teste.

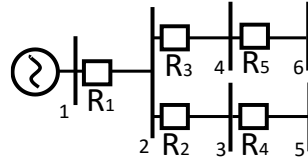


Figura 4 - Sistema-teste radial com cinco relés.

Tabela 2 – Dados de RTC,  $I_{carga}$  e  $I_{partida}$  de cada relé do sistema-teste.

	<b>R<sub>1</sub></b>	<b>R<sub>2</sub></b>	<b>R<sub>3</sub></b>	<b>R<sub>4</sub></b>	<b>R<sub>5</sub></b>
<b>RTC</b>	300/5	300/5	100/5	200/5	100/5
<b><math>I_{carga}</math> [A]</b>	199.5	130.8	68.7	100.7	50.0
<b><math>I_{partida}</math> [A]</b>	300	210	105	160	80

Tabela 3 – Dados dos níveis de curto-circuito nas barras do sistema-teste.

	<b>Barra</b>					
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b><math>I_{cc}</math> [A]</b>	1510	1046	500	395	437	292

## 5. Resultados

Nesta secção, será apresentado o passo a passo de como realizar a coordenação ótima dos relés de sobrecorrente, do sistema-teste da Figura 4, considerando passos discretos de TDS.

### Restrições do Problema Relaxado

O *solver* utilizado trabalha com restrições de igualdade (14) e desigualdade com limitante superior (15). Porém, as restrições de desigualdade mostradas em (7) e (8) possuem limitantes inferiores. Sendo necessário converter as restrições de  $\geq$  em  $\leq$ . Para cada par de relés de proteção primária e retaguarda, foi atribuída uma restrição conforme (7), como é mostrado em (16) a (19). As restrições mostradas em (20) a (24) são referentes ao menor TDS aceito pelos relés, conforme (8). Os tempos de atuação dos relés, para faltas dentro da sua zona de proteção, são mostrados em (25) a (33), segundo (10). Para simplificar o problema, não foi considerado o limite máximo de TDS.

$$T_{1,2} - T_{2,2} \geq \Delta t_{relé} \longrightarrow -T_{1,2} + T_{2,2} \leq -0.4 \quad (16)$$

$$T_{1,3} - T_{3,3} \geq \Delta t_{relé} \longrightarrow -T_{1,3} + T_{3,3} \leq -0.4 \quad (17)$$

$$T_{2,3} - T_{3,3} \geq \Delta t_{relé} \longrightarrow -T_{2,3} + T_{3,3} \leq -0.4 \quad (18)$$

$$T_{3,4} - T_{4,4} \geq \Delta t_{relé} \longrightarrow -T_{3,4} + T_{4,4} \leq -0.4 \quad (19)$$

$$TDS_1 \geq TDS_{min} \longrightarrow -TDS_1 \leq -0.1 \quad (20)$$

$$TDS_2 \geq TDS_{min} \longrightarrow -TDS_2 \leq -0.1 \quad (21)$$

$$TDS_3 \geq TDS_{min} \longrightarrow -TDS_3 \leq -0.1 \quad (22)$$

$$TDS_4 \geq TDS_{min} \longrightarrow -TDS_4 \leq -0.1 \quad (23)$$

$$TDS_5 \geq TDS_{min} \longrightarrow -TDS_5 \leq -0.1 \quad (24)$$

$$T_{1,1} = TDS_1 K_{1,1} \longrightarrow T_{1,1} - TDS_1 3.3471 = 0 \quad (25)$$

$$T_{2,2} = TDS_2 K_{2,2} \longrightarrow T_{2,2} - TDS_2 3.3911 = 0 \quad (26)$$

$$T_{3,3} = TDS_3 K_{3,3} \longrightarrow T_{3,3} - TDS_3 1.5064 = 0 \quad (27)$$

$$T_{4,4} = TDS_4 K_{4,4} \longrightarrow T_{4,4} - TDS_4 6.3529 = 0 \quad (28)$$

$$T_{5,5} = TDS_5 K_{5,5} \longrightarrow T_{5,5} - TDS_5 3.4286 = 0 \quad (29)$$

$$T_{1,2} = TDS_1 K_{1,2} \longrightarrow T_{1,2} - TDS_1 5.4290 = 0 \quad (30)$$

$$T_{1,3} = TDS_1 K_{1,3} \longrightarrow T_{1,3} - TDS_1 5.4290 = 0 \quad (31)$$

$$T_{2,4} = TDS_2 K_{2,4} \longrightarrow T_{2,4} - TDS_2 9.7759 = 0 \quad (32)$$

$$T_{3,5} = TDS_3 K_{3,5} \longrightarrow T_{3,5} - TDS_3 4.8879 = 0 \quad (33)$$

### Função Objetivo

Conforme definido em (6), a função objetivo minimiza os tempos próprios dos relés (5), como é apresentado em (34).

$$\text{mín } T_{1,1} + T_{2,2} + T_{3,3} + T_{4,4} + T_{5,5} \quad (34)$$

### Solução do Problema Relaxado

As restrições mostradas em (13), (14) e (15) estão formuladas como matrizes e vetores. Desta forma, o vetor das incógnitas é dado por (35). Já o relacionado com a F.O (34) é mostrado em (36).  $A$  e  $b$ , mostrados em (37) e (38), contém os coeficientes que representam o lado esquerdo e direito, respectivamente, das restrições de desigualdade mostrados em (16) a (24).  $A_{eq}$  e  $b_{eq}$ , mostrados em (40) e (39) contém os coeficientes que representam o lado esquerdo e direito, respectivamente, das restrições de igualdade mostrados em (25) e (33).

Com posse das variáveis de entrada do *solver*, o problema relaxado pode ser solucionado. Na Tabela 4 tem-se os valores de saída deste, os TDSs ótimos contínuos.

Tabela 4 – Valores de TDS do problema relaxado.

TDS <sub>1</sub>	TDS <sub>2</sub>	TDS <sub>3</sub>	TDS <sub>4</sub>	TDS <sub>5</sub>
0.1398	0.1059	0.1520	0.1000	0.1000

$$x = [T_{1,1} \quad T_{2,2} \quad T_{3,3} \quad T_{4,4} \quad T_{5,5} \quad T_{1,2} \quad T_{1,3} \quad T_{2,4} \quad T_{3,5} \quad TDS_1 \quad TDS_2 \quad TDS_3 \quad TDS_4 \quad TDS_5] \quad (35)$$

$$f = [1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \quad (36)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (37)$$

$$b = [-0.4 \quad -0.4 \quad -0.4 \quad -0.4 \quad -0.1 \quad -0.1 \quad -0.1 \quad -0.1 \quad -0.1]^T \quad (38)$$

$$b_{eq} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \quad (39)$$



$$A_{eq} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -3.3471 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -3.3911 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1.5064 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -6.3529 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3.4286 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -5.4290 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -5.4290 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -9.7759 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -4.8879 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (40)$$

### Método Proposto

A análise começa pelo m-ésimo relé. Contudo, TDS<sub>5</sub> e TDS<sub>4</sub> (ambos iguais a 0.10) já estão dentro da faixa permitida. Sendo assim, foi analisado TDS<sub>3</sub> (0.1520). Os ajustes analisados a cada iteração estão sublinhados na Tabela 5. Os valores mais próximos aceitos por R<sub>3</sub> são 0.15 e 0.20. Deve ser utilizado o valor imediatamente superior, no caso 0.20. Uma vez que, 0.15 ocasionaria infactibilidade, conforme pode ser verificado na Figura 5. Sendo assim, é adicionada ao problema relaxado (PL<sub>1</sub>), a restrição TDS<sub>3</sub> = 0.20. Desta forma, é criado um novo problema (PL<sub>2</sub>) e sua solução é apresentada na Tabela 5. Agora, apenas TDS<sub>1</sub> e TDS<sub>2</sub> estão fora da faixa permitida.

No próximo passo, é analisado TDS<sub>2</sub> (0.1059). Da mesma forma que TDS<sub>3</sub>, deverá ser escolhido o próximo valor permitido, no caso 0.15. A restrição TDS<sub>2</sub> = 0.15 é adicionada ao PL<sub>2</sub>, formando PL<sub>3</sub>. Verificou-se que na solução deste apenas TDS<sub>1</sub> encontra-se fora da faixa.

Por fim, TDS<sub>1</sub> (0.1674) é analisado. O próximo valor factível é 0.2. É adicionada a restrição TDS<sub>1</sub> = 0.20 ao PL<sub>3</sub>, formando o PL<sub>4</sub>. Ao solucioná-lo, todos TDS encontram-se dentro da faixa permitida e o algoritmo é finalizado.

Tabela 5 – Valores dos TDS e F.O para cada solução do problema.

	PL <sub>1</sub>	PL <sub>2</sub>	PL <sub>3</sub>	PL <sub>4</sub>
TDS <sub>1</sub>	0.1398	0.1398	<u>0.1674</u>	0.2000
TDS <sub>2</sub>	0.1059	<u>0.1059</u>	0.1500	0.1500
TDS <sub>3</sub>	<u>0.1520</u>	0.2000	0.2000	0.2000
TDS <sub>4</sub>	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000
TDS <sub>5</sub>	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000
F.O [s]	2.0342	2.1066	2.3483	2.4575

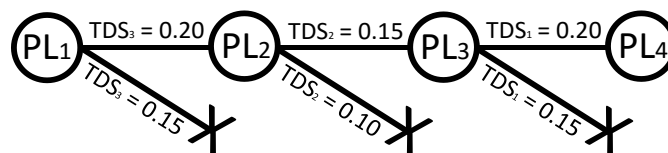


Figura 5 – Adição das restrições e comportamento do processo iterativo.

## 6. Discussões

Para este sistema, a restrição do limite superior de TDS é uma restrição fraca. Sua remoção simplificou o problema sem impactar no resultado final. A metodologia apresentada, assemelha-se ao *Branch and Bound* (Land e Doig, 1960). Porém, com a particularidade de apenas uma das ramificações ser factível (relacionada ao arredondamento para cima). Devido ao PPL fornecer os valores mínimos de TDS, mantendo a seletividade, qualquer valor inferior resultará na perda da seletividade. Como consequência, cada restrição incluída no problema acarretou na piora

da F.O, conforme pode ser verificado na Tabela 5. O uso de relés renumerados forneceu uma ordem sistemática para a análise dos relés, de forma que cada um foi analisado apenas uma única vez.

Caso o problema fosse tratado como contínuo, os valores de TDS do problema relaxado seriam todos arredondados para os próximos valores permitidos. Desta forma os valores de TDS seriam:  $TDS_1 = 0.15$ ,  $TDS_2 = 0.15$ ,  $TDS_3 = 0.20$ ,  $TDS_4 = 0.1$  e  $TDS_5 = 0.1$ . Porém, ao analisar os valores de  $PL_3$ , verificou-se que se  $TDS_2$  é igual a 0.15,  $TDS_1$  deve ser maior ou igual a 0.1674, para manter a seletividade. Sendo assim, para relés cujos passos de TDS não possam ser tratados como contínuos, é necessário tratar o problema de forma discreta para evitar problemas de descoordenação.

## 7. Conclusões

Neste trabalho foi apresentada uma metodologia para a coordenação ótima relés de sobrecorrente, em sistemas radiais, utilizando técnicas de programação linear inteira mista (PLIM). A coordenação ótima é aquela que minimiza os tempos de atuação dos relés, sem perder a seletividade. No caso das correntes de partida serem previamente conhecidas, o problema passa a ser linear e pode ser solucionado via programação linear (PL). Assim, as incógnitas do problema são os TDSs (*Time Dial Setting*). Foi evidenciado que a solução via PL está restrita a TDSs contínuos. Sendo assim, foi proposta uma metodologia que considera os passos discretos de TDS.

Foi proposto um algoritmo iterativo que adiciona restrições referentes aos passos discretos de TDSs ao problema de PL. Desta forma, foi possível contornar os problemas de descoordenação causados pelo arredondamento dos TDSs, quando os mesmos são tratados como contínuos. Assim sendo, foi possível obter os valores ótimos discretos de TDS. A metodologia proposta foi aplicada com sucesso em um sistema-teste radial, composto por cinco relés de sobrecorrente.

## Agradecimentos

A CAPES/CNPq pelo apoio financeiro.

## Referências

- Anderson, P. M.** *Power System Protection*. Wiley-IEEE Press. United States of America. 1999.
- Koochaki, A., Asadi, M.R., Askarian Abyaneh, H., Mahmoodan, M. e Naghizadeh, R.A.** (2008). Optimal Overcurrent relays coordination using genetic algorithm, *Optimization of Electrical and Electronic Equipment, 2008. OPTIM 2008. 11th International Conference on*, vol., no., pp.197,202, 22-24.
- Bedekar, P., Bhide, S. e Kale, V.** (2009a). Coordination of overcurrent relays in distribution system using linear programming technique, *Control, Automation, Communication and Energy Conservation, 2009. INCACEC 2009. 2009 International Conference on*, vol., no., pp.1,4, 4-6.
- Bedekar, P. P., Bhide, S. R. e Kale, V. S.** (2009b). Optimum Coordination of Overcurrent Relays in Distribution System Using Dual Simplex Method. *2009 Second International Conference on Emerging Trends in Engineering & Technology*, p. 555–559.
- Estrada, N., Carmona, O. e Ruiz, A.** (2006). Coordinación de relés de sobrecorriente usando el Método de Optimización de Puntos Interiores. *Scientia et Technica*, n. 32, p. 25–30.
- Land, A. H. e Doig, A. G.** (1960). An automatic method for solving discrete programming problems. *Econometrica*, v. 28, n. 3, p. 497–520.
- Luis, G. P. e Urdaneta, A. J.** (1998). Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 14, n. 4, p. 1276–1284.
- Mamede Filho, J. e Mamede, D. R.** (2011). *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*. 1a. ed. Rio de Janeiro: LTC.
- Niyomphant, S., Kulworawanichpong, T., Leeton, U. e Chomnawang, N.** (2012). Application of linear programming for optimal coordination of directional over-current relays. *2012 9th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications*

*and Information Technology*, p. 1–4.

**Chattopadhyay, B., Sachdev, M. S., Sidhu, T. S.** (1996). An online relay coordination algorithm for adaptive protection using linear programming technique. v. 11, n. 1, p. 165–173.

**Shirmohammadi, D., Hong, H.W., Semlyen, A. e Luo, G.X.** (1988). Compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 3, n. 2, p. 753–762.

**Urdaneta, A.J., Restrepo, H., Marquez, S. e Sanchez, J.** (1996). Coordination of directional overcurrent relay timing using linear programming. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 11, n. 1, p. 122–128, 1996.

**Urdaneta, A. J., Nadira, R. e Perez Jimenez, L. G.** (1988). Optimal coordination of directional overcurrent relays in interconnected power systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 3 n 3, n. 3, p. 903–911.

**Zapata, C. J. e Mejía, G. E.** (2003). Coordinación de Relés de Sobrecorriente en Sistemas Radiales Utilizando Programación Lineal. *Scientia Et Technica*, v. 22.

# ALGORITMOS HEURÍSTICOS APLICADOS AO PLANEJAMENTO DE REDES DE TRANSMISSÃO

**Alexandre Akira Kida**

Universidade Estadual de Londrina  
alexandrekida@gmail.com

**Andrés Felipe Alvarez Echavarría**

Universidade Estadual de Londrina  
andresalvarez215@gmail.com

**Sebastián de Jesús Manrique Machado**

Universidade Estadual de Londrina  
sebajmanrique747@gmail.com

**Luis Alfonso Gallego Pareja**

Universidade Estadual de Londrina  
luispareja@uel.br

## RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo comparativo entre heurísticas utilizadas no planejamento da expansão de sistemas de transmissão. Serão utilizadas heurísticas construtivas baseadas em índices de sensibilidade, como: Mínimo Esforço, Mínimo Corte de Carga, Villasana-Garver e de Levi-Calovic. Estas fornecem a topologia da rede e são baseadas em fluxo de potência. Desta forma, os modelos, originalmente não lineares, passam a serem lineares e o podem ser solucionados via técnicas de programação linear. O comportamento dos algoritmos será avaliado em sistemas de pequeno, médio e grande porte. Assim sendo, serão utilizados os sistemas-teste de Garver de 6 barras, IEEE 24 barras e o colombiano de 93 barras. Os algoritmos serão avaliados em função do número de iterações e valor de investimento.

**PALAVRAS CHAVE.** Planejamento do Sistema da Transmissão, Algoritmos Heurísticos Programação Linear.

**Área Principal:** EN - PO na área de Energia.

## ABSTRACT

This work presents a comparative study of heuristics used in the planning of the expansion of transmission systems. The construct heuristics based sensibility index will be used, such as Minimum Effort, Minimum Load Cut, Villasana-Garver and Levi-Calovic. These heuristics provide the network topology and are based on power flow. Thus, the models, originally non-linear, become linear and they can be solved using linear programming techniques. The behavior of the algorithms will be evaluated in small, medium and large systems. Therefore, in this work will be used the following test-systems: Garver 6 bus, IEEE 24 bus and Colombian 93 bus. The algorithms will be evaluated according to the number of iterations and investment value.

**KEYWORDS.** Transmission System Planning, Heuristic Algorithms, Linear Programming.

**Main area:** EN - OR in Energy.

## 1. Introdução

No planejamento da expansão dos sistemas de transmissão de energia elétrica a longo prazo, são determinadas a quantidade e localização de novas linhas, adições de novas subestações, o reforço de subestações existentes, além dos transformadores que precisam ser adicionados para o correto funcionamento do sistema, dado um cenário de geração e demanda. O problema de planejamento encontra-se na categoria dos problemas não-lineares inteiros mistos, de difícil solução. Em sistemas de grande porte, técnicas exatas levariam tempos de solução e quantidades de memória proibitivos. Para reduzir sua complexidade, o problema pode ser modelado linearmente. Desta forma, pode-se resolvê-lo com o uso de técnicas de programação linear (PL) sucessivas ou de programação linear inteira (PLI). No caso das técnicas sucessivas, o processo é guiado por heurísticas. Sendo assim, pode-se encontrar a solução ótima utilizando técnicas heurísticas, metaheurísticas, exatas e combinações de todas as anteriores. Garver (1970) foi o primeiro a propor um modelo baseado no conceito de fluxo de carga. Também foi o primeiro em sugerir o uso de conceitos de otimização para resolver o problema.

Na literatura especializada diferentes metodologias foram propostas para solucionar o problema. Grande parte, utilizam técnicas de otimização clássicas como PL (Garver, 1970) (Kim, Park e Lee, 1994) (Villasana e Garver, 1985) (Kaltenbatch, Peshon e Gehrig, 1970), programação dinâmica (Dusonchet e El-Abiad, 1973), programação não-linear (PNL) (Youssef e Hackam, 1989), e programação inteira mista (Bahense et. al, 2001) (Seifu, Salon e List, 1989) (Santos, França, Said, 1989) (Sharifnia Aashtiani, 1985) (Meliopoulos et. al, 1982) (Lee, Hocks e Hnyiliczka, 1974).

Além das técnicas exatas, o problema tem sido solucionado com o uso de heurísticas construtivas. Nestas, a cada passo, são geradas, avaliadas e selecionadas diferentes opções de expansão. Também são desenvolvidas buscas locais baseadas em índices de sensibilidade lógicos ou empíricos. Desta forma, as opções são classificadas durante a busca. O processo continua até que o algoritmo não seja capaz de encontrar uma melhor resposta com os critérios estabelecidos. O critério mais comum é adicionar novos circuitos mediante análises de sensibilidade (Pereira e Pinto, 1985) (Ekwue e Cory, 1984) (Ekwue, 1984) (Monticelli et. al, 1982) (Bennon, Juves e Meliopoulos, 1982) (Dechamps e Jamouille, 1980) (Serna, Durán e Camargo, 1978). Na atualidade, tem sido implementadas metodologias que procuram reduzir o espaço de busca (Duque et. al, 2013) (Melchor et. al, 2014), mediante a seleção de variáveis principais.

Neste trabalho, serão utilizados algoritmos heurísticos construtivos baseados em índices de sensibilidade, para o planejamento da expansão do sistema de transmissão. As heurísticas utilizadas serão: Mínimo Esforço (Monticelli et. al, 1982); Mínimo Corte de Carga (Pereira e Pinto, 1985); Villasana-Garver (Villasana e Garver, 1985) e Rede Marginal de Levi-Calovic (Levi e Calovic, 1991). Serão utilizados os sistemas-testes: Garver de 6 barras; IEEE 24 barras e colombiano de 93 barras. Para resolver o problema de PL, será utilizado a função *linprog*, do software MATLAB.

## 2. Modelos Teóricos

Quatro algoritmos heurísticos e seus modelos teóricos serão apresentados: Mínimo Esforço, Mínimo Corte de Carga, Villasana-Garver e Levi-Calovic. Estes são baseado nos trabalhos de Rubén e Monticelli (2000) e Romero et al. (2002), os quais correspondem aos algoritmos heurísticos clássicos para o planejamento de sistemas de transmissão. Outras heurísticas têm sido propostas, como é mostrado em (Zeinaddini-Maymand et. al, 2011) e (Pareja, Romero e Lezama, 2009), porém não serão tratadas neste trabalho.

Os algoritmos mostrados neste trabalho são divididos em duas fases: construção (fase I) e poda (fase II). A Fase I é responsável por adicionar linhas a cada iteração e varia para cada algoritmo. Já a fase II, tem como objetivo retirar linhas redundantes que foram inseridas na fase I. Esta é comum a todos os algoritmos e será citada no final desta seção.

### Mínimo Esforço

Monticelli et al. (1982) propuseram um algoritmo construtivo utilizado para o planejamento de redes de transmissão. Sua principal vantagem é o seu baixo custo computacional e sua boa resposta. Trata-se de um algoritmo baseado em índices de sensibilidades, chamados de critério de Mínimo Esforço. A cada iteração, é solucionado o fluxo de corrente contínua (CC), mostrado em (1) a (5). Com posse da solução do fluxo, mais precisamente  $\theta_i$  e  $\theta_j$ , calcula-se os índices de sensibilidade (6) para todos caminhos possíveis do sistema. O algoritmo adiciona uma linha ( $n_{ij}$ ), por iteração, no caminho que possui o maior índice de sensibilidade. O processo (fase I) repete-se até que o sistema não apresente corte de carga. Para contornar o problema das redes não-conexas ao sistema inicial, são adicionadas redes fictícias com  $n_{ij}$  pequeno ( $\leq 10^{-4}$ ), com capacidade de fluxo ilimitado, na rede atual.

$$\min w = \alpha \sum r_i \quad (1)$$

s.a

$$B\theta + g + r = d \quad (2)$$

$$0 \leq g \leq \bar{g} \quad (3)$$

$$0 \leq r \leq d \quad (4)$$

$$\theta_j \text{ irrestrito} \quad (5)$$

$$Sens_{ij} = -\frac{1}{2}(\theta_i - \theta_j)^2 \frac{\gamma_{ij}}{c_{ij}} \quad (6)$$

sendo que,

$\alpha$  – constante de penalização;  $r$  – vetor de geradores artificiais;  $B$  – Matriz de susceptâncias;  $g$  – vetor de geração nas barras;  $d$  – vetor de demanda nas barras;  $\bar{g}$  – vetor de geração máxima nodal;  $\theta$  – vetor de ângulo das tensões nodais;  $\gamma_{ij}$  – susceptância entre as barras  $i$  e  $j$ ;  $c_{ij}$  – custo para instalar uma linha entre as barras  $i$  e  $j$ .

### Mínimo Corte de Carga

Formulado Pereira e Pinto (1985), o algoritmo de Mínimo Corte de Carga assemelha-se com o Mínimo Esforço, porém com índice de sensibilidade diferente. Este algoritmo também acrescenta apenas um circuito por iteração, com base no índice de sensibilidade mais atrativo. A cada iteração é resolvido o PL dado por (1) a (5), com a adição da restrição (7). Esta restrição limita a abertura angular entre as barras. O índice de sensibilidade (8) está relacionado com o caminho que fornecerá a maior redução do corte de carga, ponderado pelo seu custo. Sendo assim, o algoritmo escolhe, entre os candidatos, o caminho que possui o maior índice de sensibilidade.

Da mesma forma que o Mínimo Esforço, com objetivo de contornar os problemas das redes não-conexas, é adicionado pequenos  $n_{ij}$  – referentes às barras desconexas – ao circuito atual. Além disso, as restrições de abertura angular associadas a estes caminhos, devem permitir uma abertura dez vezes maior. Desta forma, evita-se que as aberturas angulares nos laços fictícios modifiquem a resposta.

$$|\theta_i - \theta_j| \leq \bar{\phi}_{ij} \quad (7)$$

$$SI_{ij}^{mcc} = \frac{\partial Z}{\partial \gamma_{ij}} \cdot \frac{1}{c_{ij}} = -(\theta_i - \theta_j)(\pi_i - \pi_j) \frac{1}{c_{ij}} \quad (8)$$

sendo que,

$\bar{\phi}_{ij}$  – abertura angular máxima entre as barras  $i$  e  $j$ ;  $\pi$  – multiplicadores de Lagrange associados as restrições  $B\theta + g + r = d$ .

### Villasana - Garver

Em 1985, Villasana, Garver e Salon propuseram uma heurística construtiva, baseada no modelo híbrido linear. Diferentemente dos algoritmos apresentados, este não utiliza geradores artificiais. Sendo assim, sua função objetivo não é mais minimizar o corte de carga, mas o custo de instalação das linhas, como é mostrado em (9). Neste modelo são solucionadas duas redes: atual e artificial. A rede atual contém os circuitos já adicionados, durante o processo iterativo, juntamente com a configuração inicial. Já a rede artificial consiste em todos os circuitos que podem ser adicionados.

Nesta formulação, ambas redes devem satisfazer a primeira lei de Kirchhoff, e apenas a rede atual deve satisfazer a segunda lei de Kirchhoff. O sistema elétrico deve resolver o problema da operação utilizando apenas a rede atual. Deve-se recorrer à rede artificial apenas quando a atual é insuficiente. Da mesma forma que o algoritmo de Garver (1970), a cada iteração é adicionada uma linha ao circuito artificial que transporta a maior quantidade de fluxo de potência. O processo iterativo da fase I encerra-se quando o sistema conseguir resolver o problema da operação, sem o uso de redes artificiais. Ou seja, encerra-se quando os valores  $n_{ij}$ , retornados pelo PL, forem nulos.

$$\min w = \sum_{(i,j) \in \Omega} c_{ij} n_{ij} \quad (9)$$

s.a

$$Sf + S^0 f^0 + g = d \quad (10)$$

$$f_{ij}^0 - \gamma_{ij} n_{ij}^0 (\theta_i - \theta_j) = 0, \forall (i, j) \in \Omega_0 \quad (11)$$

$$|f_{ij}^0| \leq n_{ij}^0 \bar{f}_{ij}, \forall (i, j) \in \Omega_0 \quad (12)$$

$$|f_{ij}^0| \leq n_{ij} \bar{f}_{ij}, \forall (i, j) \in \Omega \quad (13)$$

$$0 \leq g \leq \bar{g} \quad (14)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \quad (15)$$

$$\theta_j \text{ irrestrito} \quad (16)$$

sendo que,

$c_{ij}$  – custo para instalar uma linha entre as barras  $i$  e  $j$ ;  $n_{ij}$  – número de circuitos instalados entre as barras  $i$  e  $j$  no sistema artificial;  $n_{ij}^0$  – número de circuitos instalados entre as barras  $i$  e  $j$  no sistema atual;  $\bar{n}_{ij}$  – número máximo de linhas permitidas entre as barras  $i$  e  $j$ ;  $f_{ij}$  – fluxo de potência ativa, por linha, entre as barras  $i$  e  $j$ ;  $\bar{f}_{ij}$  – fluxo de potência ativa máxima permitida na linha entre as barras  $i$  e  $j$ ;  $\gamma_{ij}$  – susceptância da linha entre as barras  $i$  e  $j$ ;  $g$  – vetor de geração nas barras;  $r$  – vetor de corte de carga nas barras;  $d$  – vetor de demanda nas barras;  $f$  – vetor de fluxos nas linhas do sistema artificial;  $f^0$  – vetor de fluxos nas linhas do sistema atual;  $S$  – matriz incidência nó ramo do sistema artificial;  $S^0$  – matriz incidência nó ramo do sistema atual.

### Levi-Calovic

Foi apresentado pela primeira vez no trabalho de Levi e Calovic (1991). Também conhecido como algoritmo de rede marginal. Este decompõe o problema em dois subproblemas. Um associado à operação e outro associado ao investimento. Assim, são resolvidos dois modelos matemáticos correspondentes a duas redes diferentes, a cada iteração. O primeiro modelo matemático refere-se ao modelo CC para a configuração corrente (17) - (21). Neste é verificado se o sistema opera adequadamente para esta configuração. Caso o sistema não opere adequadamente para a configuração corrente,  $w > 0$ , procede-se a montagem do segundo modelo matemático conhecido como rede marginal, utilizando os resultados obtidos da solução do primeiro modelo matemático. Deve-se estabelecer a quantidade de potência que pode ser transportada pelos circuitos existentes, os quais são conhecidos como circuitos não saturados. Este resultado, é expressado em fração de circuito e não em potência em por unidade (p.u), de acordo com (22).

$$\min w = \alpha \sum r_i \quad (17)$$

s.a

$$B_1 \theta + g + r = d \quad (18)$$

$$|\theta_i + \theta_j| \leq \overline{\phi}_{ij} \quad (19)$$

$$0 \leq g \leq \overline{g} \quad (20)$$

$$0 \leq r \leq d \quad (21)$$

$$\overline{n}_{ij}' = 1 - \frac{f_{ij}'}{f_{ij}} \quad (22)$$

sendo que,

$B_1$  – matriz de susceptâncias dos circuitos existentes;  $\theta_i$  – valor do ângulo na barra  $i$ ;  $\overline{\phi}_{ij} = \frac{f_{ij}^{max}}{\gamma_{ij}}$ ;  $g$  – vetor de geração nas barras;  $r$  – vetor de corte de carga nas barras;  $d$  – vetor de demanda nas barras;  $\theta_j$  irrestrito;  $f_{ij}'$  – vetor de fluxo de potência disponível em cada circuito;  $\overline{n}_{ij}'$  – porção de circuito disponível sem custo na rede marginal.

Na rede marginal, as demandas e gerações estão constituídas pela parcela de demanda não fornecida e pela parcela de capacidade de geração não gerada por insuficiência de circuitos elétricos na configuração existente (23) a (27). Neste modelo, a fração de circuito que ainda está disponível da solução de (17) a (21), é usada na rede marginal sem nenhum custo. Pode-se adicionar um circuito com maior fluxo ou com maior  $n_{ij}'$ . Desta forma, continua-se o processo iterativo até o corte de carga ser nulo ( $r$ ).

$$\min w = \sum c_{ij} n_{ij}'' \quad (23)$$

s.a

$$Sf + g_m = d_m \quad (24)$$

$$|f_{ij}| \leq \overline{f}_{ij} (n_{ij}' + n_{ij}'') \quad (25)$$

$$0 \leq n_{ij}' \leq \overline{n}_{ij}' \quad (26)$$

$$0 \leq g_m \leq \overline{g}_m \quad (27)$$

$$0 \leq n_{ij}'' \quad (28)$$

$$\theta_j \text{ e } F_{ij} \text{ irrestritos} \quad (29)$$

sendo que,

$n_{ij}$  é implementado para todos os caminhos possíveis (existentes e candidatos);  $n_{ij}'$  – número de circuitos instalados entre as barras  $i$  e  $j$  da rede marginal;  $\overline{n}_{ij}'$  – máximo número de circuitos que podem ser adicionados entre as barras  $i$  e  $j$  da rede marginal;  $d_m$  – vetor de demanda marginal nas barras;  $\overline{g}_m$ : vetor de geração marginal nas barras.

### Fase Poda

Após a fase I dos algoritmos terminar, é iniciada a fase II, comum a todos. Esta é responsável por retirar circuitos redundantes, adicionados na fase I. Os circuitos adicionados são ordenados decrescentemente a seu custo. Sendo que os de maior custo são retirados. Após a remoção de um circuito, verifica-se a factibilidade do sistema. Se factível, o circuito é retirado. Caso contrário, não se deve remover o circuito e é analisado o próximo circuito de maior custo. O processo termina quando não há mais circuitos a serem removidos.



### 3. Análise Iterativa

Nesta secção, será demonstrado o comportamento iterativo do algoritmo de Mínimo Corte de Carga, para o sistema-teste Garver de 6 barras (Figura 1). As figuras 2 a 9, demonstram os índices de sensibilidade e os valores do corte de carga para cada iteração. A configuração atual do sistema, composta pela configuração inicial (linhas finas) e linhas adicionadas (linhas espessas), é ilustrada por linhas contínuas. As pontilhadas, correspondem aos circuitos não-existentis. A cada iteração, são avaliados os índices de sensibilidade (8) para todos os caminhos candidatos. Então, é adicionado um circuito ao caminho de maior índice. Nas figuras 2 a 9, o índice escolhido é destacado por uma elipse.

Conforme novas linhas foram adicionadas, os índices de sensibilidade se modificaram. Sendo assim, o algoritmo adota caminhos distintos para a adição uma nova linha. Nas iterações 3, 4 e 5 (figuras 4, 5 e 6), existem, para cada um, dois caminhos com os maiores índices (68.0). Nestes casos, o algoritmo escolhe aleatoriamente um destes para adicionar a linha. Na iteração 8 (Figura 9), o sistema opera sem corte de carga, finalizando a fase I. As iterações 3 e 4 (figuras 3 e 4) apresentaram os mesmos índices de sensibilidade, porém com valores de cortes de cargas distintos. Coincidentemente, nenhum circuito foi retirado durante a fase II, visto que a remoção de qualquer linha resultou em falha na operação do sistema.

Os cortes de carga aconteceram devido aos limites de capacidade de fluxo das linhas. Desta forma, com a adição destas, houve um incremento na capacidade de total de transporte de fluxo, logo menos cortes de cargas foram necessários. Neste sistema, foi verificado que a cada adição de uma nova linha o corte de carga reduziu, chegando a zero na iteração 8 após ter adicionado sete novas linhas. Seu custo é de US\$ 200,000.000.

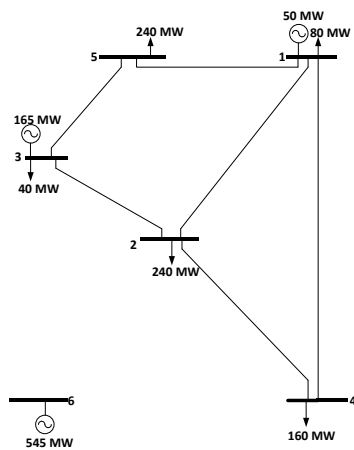


Figura 1 – Sistema 6 barras, configuração inicial.

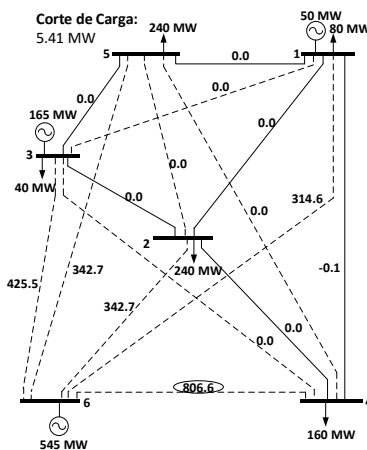


Figura 2 - Sistema 6 barras, iteração 1.

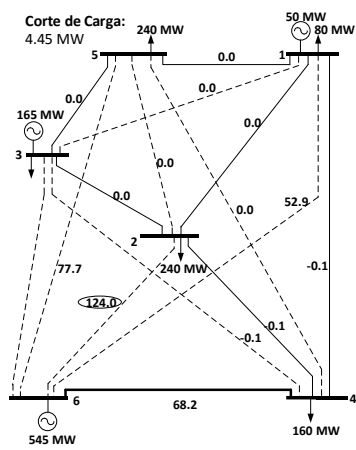


Figura 3 - Sistema 6 barras, iteração 2.

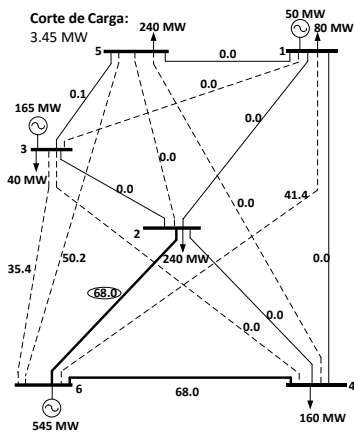


Figura 4 – Sistema 6 barras, iteração 3.

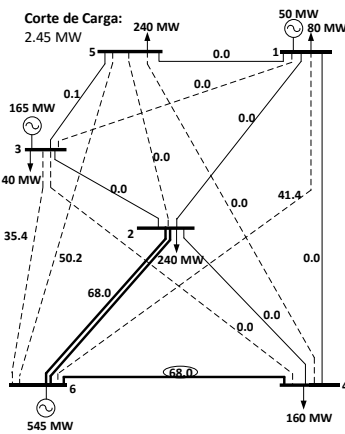


Figura 5 - Sistema 6 barras, iteração 4.

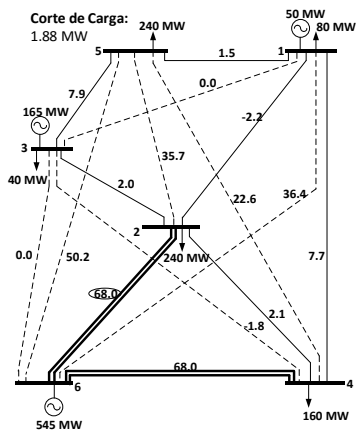


Figura 6 - Sistema 6 barras, iteração 5.

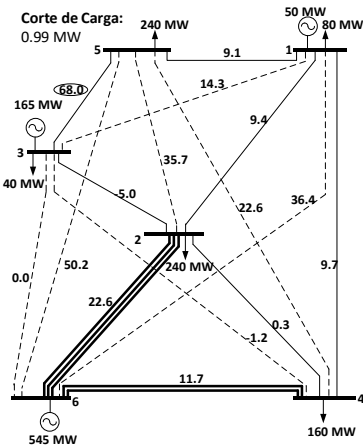


Figura 7 – Sistema 6 barras, iteração 6.

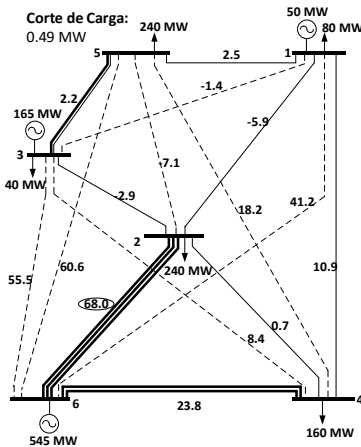


Figura 8 - Sistema 6 barras, iteração 7.

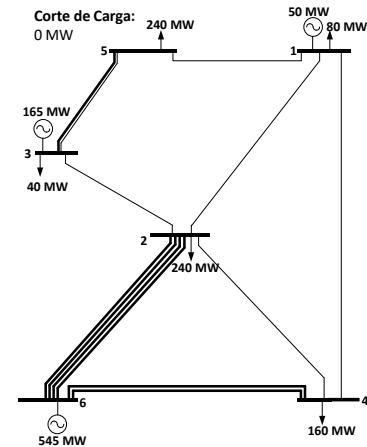


Figura 9 – Iteração 8, sistema 6 barras, fim das fases I e II.

#### 4. Resultados

Os quatro algoritmos foram testados no sistema de Garver, IEEE 24 barras e o Colombiano. O sistema Garver possui 6 barras, 3 geradores, 15 caminhos, demanda e geração total de 760 MW. O sistema IEEE possui 24 barras, 41 caminhos, 10 geradores, capacidade total de geração de 10215 MW e demanda total de 8560 MW. Por fim, o sistema Colombiano possui 93 barras, 49 geradores, 155 caminhos, capacidade total de geração e demanda de 14559 MW.

Os resultados podem ser observados nas Tabelas 1 e 2. Nestas estão contabilizados o número de linhas adicionadas no caminho entre as barras  $i$  e  $j$ . Também é mostrado o custo da instalação das linhas, por pátio, e o custo total do sistema planejado. Coincidentemente, os quatro algoritmos apresentaram a mesma resposta (após a fase II), para o sistema de Garver. Os algoritmos foram comparados em relação ao número de iterações e valor de investimento. Na Figura 11, foi verificado que o número de iterações difere de um caso para outro, principalmente nos sistemas de maior porte. O algoritmo de Mínimo Esforço a maior quantidade de iterações, enquanto o de Villasana-Garver a menor.

Em relação ao valor de investimento, foi verificado na Figura 11 que todos algoritmos encontraram a mesma resposta (US\$ 200,000.000) para o sistema de Garver. Por ser um sistema de pequeno porte, possui espaço de solução reduzido, todos algoritmos encontraram a resposta ótima. Em um sistema maior, como o IEEE e o colombiano, verificou-se que os algoritmos não

convergir para a mesma solução. Para o sistema IEEE, o algoritmo de Levi-Calovic e Mínimo Esforço apresentaram a melhor resposta (US\$ 152,000.000), seguido do Villasana-Garver (US\$ 154,000.000). A diferença entre eles foi de 1.3%. Para o sistema Colombiano de 93 barras, cujo espaço de solução é elevado em relação aos demais, verificou-se que o Villasana-Garver encontrou a melhor resposta (US\$ 650,400.000). A segunda melhor resposta foi encontrada com o Mínimo Corte de Carga (US\$ 735,160.000). Neste caso, a diferença entre as melhores soluções foi mais significativa (11.5%). No geral, o algoritmo de Villasana-Garver obteve o desempenho mais satisfatório. Este algoritmo somente não obteve a melhor resposta no sistema IEEE 24 barras, por uma diferença de apenas 1.3%.

Tabela 1 - Resumo dos resultados obtidos com o algoritmo de Mínimo Esforço e Corte de carga.

Sistema	Mínimo Esforço				Mínimo Corte de Carga			
	Barra i	Barra j	Número	Custo *10 <sup>6</sup> US\$	Barra i	Barra j	Número	Custo *10 <sup>6</sup> US\$
<b>Garver</b>	2	6	4	120	2	6	4	30
	4	6	1	20	3	5	1	20
	5	6	2	60	4	6	2	30
	<b>Total</b>		<b>7</b>	<b>200</b>	<b>Total</b>		<b>7</b>	<b>200</b>
<b>IEEE 24 Barras</b>	3	24	1	50	6	10	1	16
	7	8	2	32	7	8	2	16
	9	12	1	50	10	12	1	50
	14	16	1	54	14	23	1	86
	15	24	1	72				
	1	8	1	35				
	6	7	1	50				
	<b>Total</b>		<b>8</b>	<b>343</b>	<b>Total</b>		<b>4</b>	<b>184</b>
<b>Colombiano de 93 Barras</b>	52	88	1	34.2	43	88	2	39,6
	57	81	2	117.8	57	81	2	58.9
	27	89	1	13.3	27	89	1	13.3
	73	89	1	66.7	74	89	1	14.6
	8	67	1	29.2	15	18	1	7.9
	15	18	1	7.9	57	84	1	26.7
	55	57	1	46.8	55	84	2	26.7
	55	84	1	26.7	59	67	1	16.7
	55	62	2	142.0	59	62	1	71.0
	67	68	2	44.1	66	69	1	17.1
	62	73	1	73.2	9	69	3	15.7
	45	81	1	13.3	27	29	1	5.1
	19	82	1	13.3	19	66	1	9.3
	83	85	1	13.3	73	74	1	58.3
	82	85	1	89.9	62	73	1	73.2
68	86	2	16.5	45	81	1	13.3	
				19	82	1	13.3	
				82	85	1	89.9	
				68	86	1	8,3	
<b>Total</b>		<b>20</b>	<b>748.2</b>	<b>Total</b>		<b>24</b>	<b>735.5</b>	

Tabela 2 - Resumo dos resultados obtidos com o algoritmo de Villasana-Garver e Rede Marginal.

Sistema	Villasana-Garver				Rede Marginal			
	Barra i	Barra j	Número	Custo *10 <sup>6</sup> US\$	Barra i	Barra j	Número	Custo *10 <sup>6</sup> US\$
Garver	2	6	4	120	2	6	4	30
	3	5	1	20	3	5	1	20
	4	6	2	60	4	6	2	30
	<b>Total</b>		<b>7</b>	<b>200</b>	<b>Total</b>		<b>7</b>	<b>200</b>
IEEE 24 Barras	3	24	1	50	6	10	1	16
	14	16	1	54	7	8	2	16
	6	7	1	50	10	12	1	50
	<b>Total</b>		<b>3</b>	<b>154</b>	<b>Total</b>		<b>5</b>	<b>152</b>
Colombiano de 93 Barras	43	88	1	39,6	52	88	1	34.2
	15	18	1	7,9	43	88	2	39.6
	56	81	1	32,9	27	89	1	13.3
	57	84	1	26.7	74	89	1	14.6
	55	84	2	53.3	56	81	1	32.9
	56	57	1	62.6	55	57	1	46.8
	55	62	2	142.0	55	84	1	26.7
	27	64	1	6.8	56	57	1	62.6
	19	66	1	9.3	1	59	1	6.2
	73	74	1	58.3	3	71	2	5.2
	62	73	1	73.2	55	62	2	71.0
	45	81	1	13.3	40	42	1	5.2
	64	74	1	13.3	69	70	1	6.2
	19	82	1	13.3	16	21	1	6.9
	82	85	1	89.9	18	58	1	5.7
	68	86	1	8.28	18	21	1	7.5
					27	29	4	5.1
					19	66	1	9.3
				73	74	1	58.3	
				62	73	1	73.2	
				45	81	1	13.3	
				19	82	1	13.3	
				82	85	1	89.9	
				68	86	1	8.3	
	<b>Total</b>		<b>18</b>	<b>650.4</b>	<b>Total</b>		<b>30</b>	<b>786.4</b>

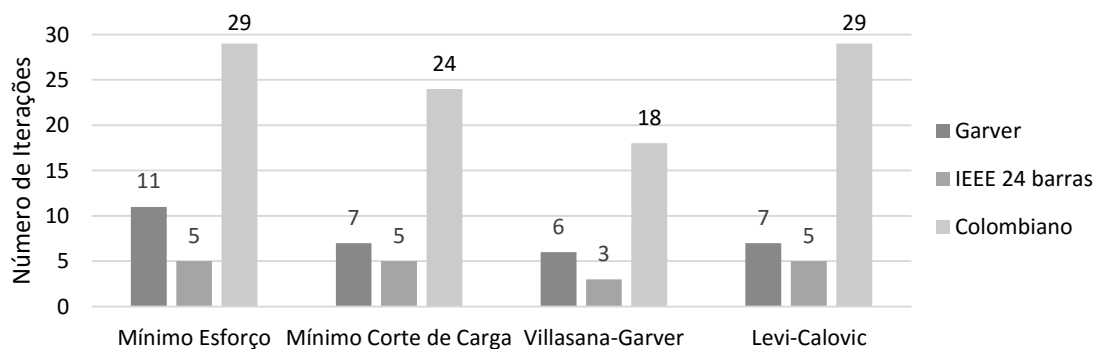


Figura 10 - Comparativo entre as diferentes heurísticas em relação ao número de iterações

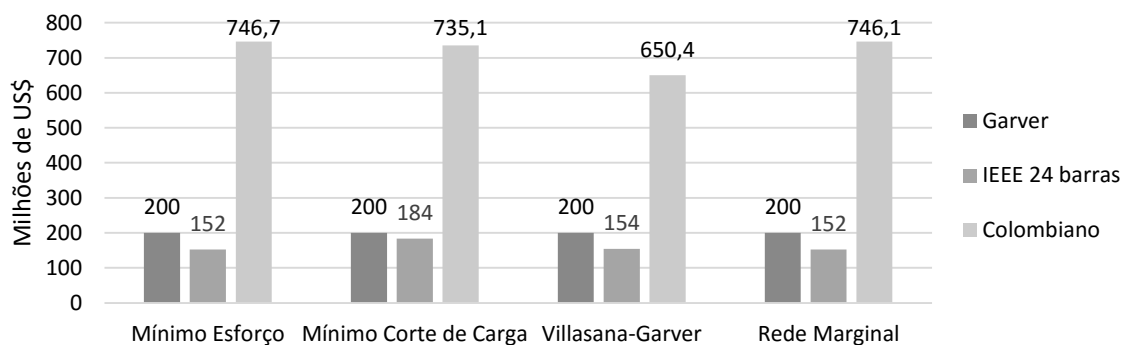


Figura 11 - Comparativo do investimento em relação as diferentes heurísticas.

## 5. Conclusões

Neste trabalho foram apresentados quatro algoritmos heurísticos construtivos: Mínimo Esforço; Mínimo Corte de Carga; Villasana-Garver e Levi-Calovic. Também foi demonstrado o comportamento iterativo do sistema Garver de 6 barras, para o algoritmo de Mínimo Corte de Carga. Neste, foram apresentados os parâmetros que o levaram a escolher quais linhas devem ser adicionadas.

Os algoritmos foram testados em sistemas de pequeno porte (6 barras de Garver), médio (IEEE 24 barras) e grande (Colombiano de 93 barras). Desta forma, verificou-se a versatilidade destes algoritmos. Para o sistema de pequeno porte, os quatro algoritmos encontraram a mesma solução. No geral, o algoritmo de Villasana-Garver apresentou o comportamento mais satisfatório (número de iterações e custo de investimento). Apenas não obteve a melhor resposta para o IEEE 24 barras, com a diferença de apenas 1.3%. Na fase construtiva, foi verificado que os algoritmos podem adicionar circuitos redundantes. Sendo assim, a fase da poda mostrou-se necessária para encontrar uma resposta satisfatória (menor custo de investimento).

Os algoritmos heurísticos construtivos podem ser úteis para obter populações iniciais para outras técnicas de solução, como os algoritmos metaheurísticos. Além disso, os algoritmos heurísticos construtivos têm a vantagem de serem modelos matemáticos lineares, o que facilita sua solução.

## Agradecimentos

A CAPES/CNPq pelo apoio financeiro.

## Referências

- Bahiense, L., Oliveira, G. C., Pereira, M. e Granville, S.** (2001), A mixed integer disjunctive model for transmission network expansion, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 16, pp. 560–565.
- Bennon, R. J. Juves, J. A. e Meliopoulos, A. P.** (1982), Use of sensitivity analysis in automated transmission planning, *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-101, pp. 53–59.
- Dechamps, C. e Jamouille, E.** (1980), Interactive computer program for planning the expansion of meshed transmission networks, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 2, pp. 103–108.
- Duque, A. Escobar, Melchor, L. J. e Escobar, A.** (2013), Identificación de variables principales en el planeamiento de redes de transmisión usando técnicas heurísticas basadas en PLE y PNLE, *Scientia et Technica*, vol. 18, pp. 42-50.
- Dusonchet Y. P. e El-Abiad, A. H.,** (1973), Transmission planning using discrete dynamic optimization, *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-92, pp. 1358–1371.
- Ekwue, A. O. e Cory, B. J.** (1984), Transmission system expansion planning by interactive methods, *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-103, pp. 1583–1591.
- Ekwue, A. O.** (1984), Investigations of the transmission systems expansion problem, *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 6, pp. 139–142.

- Garver, L. L.** (1970), Transmission network estimation using linear programming, *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-89, pp. 1688–1697.
- Kim, K. J., Park Y. M., e Lee, K. Y.** (1988), Optimal long term transmission expansion planning based on maximum principle, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 3, pp. 1494–1501.
- Kaltenbatch, J. C., Peshon, J. e Gehrig, E. H.** (1970), A mathematical optimization technique for the expansion of electrical power transmission systems, *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-89, pp. 113–119.
- Lee, S. T., Hocks, K. L. e Hnyilicza, E.** (1974), Transmission expansion using branch-and-bound integer programming with optimal cost-capacity curves, *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-93, pp. 1390–1400.
- Levi, V.A. e Calovic, M.S.** (1991), A new decomposition based method for optimal expansion planning of large transmission networks, *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol.6, no.3, pp.937,943.
- Melchor, J. N., Escobar, L.M., Duque, A. e Escobar, A. H.** (2014), Planeamiento de la expansión de redes de transmisión usando restricciones especializadas basadas en áreas, *Épsilon* (22), pp. 129-149.
- Meliopoulos, A. P. Webb, R. P. Bennon, R. J. e Juves, J. A.** (1982), Optimal long range transmission planning with AC load flow, *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-101, pp. 4156–4163.
- Monticelli, A., Santos, A., Pereira, M. V. F., Cunha, S. H. F., Parker, B. J. e Praça, J. C. G.** (1982), Interactive transmission network planning using a least-effort criterion, *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-101, pp. 3919–3925.
- Pareja, L. A. G., Romero, R. A. e Lezama, J. M. L.** (2009), Planeamiento de la expansión de sistemas de transmisión considerando contingencias y demanda incierta, *Rev. Fac. Ing.*, pp. 188–200.
- Pereira, M. V. e Pinto, L. M. V. G.** (1985), Application of sensitivity analysis of load supplying capability to interactive transmission expansion planning, *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-104, pp. 381–389.
- Romero, R.; Monticelli, A.; Garcia, A.; Haffner, S.,** (2002). Test systems and mathematical models for transmission network expansion planning, *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings* , vol.149, no.1, pp.27,36.
- Rubén, R. e Monticelli, A.** (2000), Planejamento a Longo Prazo da Expansão de Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica, vol. 8. Campinas.
- Santos, A., França, P. M. e Said, A.** (1989), An optimization model for long range transmission expansion planning, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 4, pp. 94–101.
- Seifu, A., Salon, S. e List, G.** (1989), Optimization of transmission line planning including security constraints, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 4, pp. 1507–1513.
- Serna, C. Durán, J. e Camargo, A.** (1978), A model for expansion planning of transmission systems, a practical application example, *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-97, pp. 610–615.
- Sharifnia A. e Aashtiani, H. Z.** (1985), Transmission network planning: A method for synthesis of minimum-cost secure networks, *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-104, pp. 2026–2034.
- Villasana, R., Garver, L. L. e Salon, S. L.** (1985), Transmission network planning using linear programming, *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-104, pp. 349–356.
- Youssef H. K. e Hackam, R.** (1989), New transmission planning model, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 4, pp. 9–18.
- Zeinadini-Maymand, M., Rashidinejad, M., Mohammadian, M., Mahmoudabadi, A., Khorasani, H. e Rahmani, M.** (2011), An application of a modified constructive heuristic algorithm to transmission expansion planning, *2011 IEEE Trondheim PowerTech*, pp. 1–5.