



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Engenharia

Eduardo Lenz Cesar

**Sistemas inteligentes aplicados à coordenação da proteção de
sistemas elétricos industriais com relés digitais**

Rio de Janeiro
2013

Eduardo Lenz Cesar

**Sistemas inteligentes aplicados à coordenação da proteção de sistemas
elétricos industriais com relés digitais**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Sistemas Inteligentes e Automação.

Orientador: Prof. Dr. José Franco Machado do Amaral

Orientador: Prof. Dr. Luiz Biondi Neto

Rio de Janeiro

2013

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

C421 Cesar, Eduardo Lenz.
Sistemas inteligentes aplicados à coordenação da proteção de sistemas elétricos industriais com relés digitais / Eduardo Lenz Eduardo Lenz. 2013.
180f.

Orientadores: José Franco Machado do Amaral; Luiz Biondi Neto.

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Eletrônica. 2. Sistemas inteligentes - Dissertações. 3. Algoritmos genéticos - Dissertações. I. Amaral, José Franco Machado do. II. Biondi Neto, Luiz. III. Universidade do Estado do Rio. IV. Título.

CDU 004.272.2

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Eduardo Lenz Cesar

**Sistemas inteligentes aplicados à coordenação da proteção de sistemas
elétricos industriais com relés digitais**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Sistemas Inteligentes e Automação.

Aprovado em: 07 de agosto de 2013.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Franco Machado do Amaral (Orientador)
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof. Dr. Luiz Biondi Neto (Orientador)
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof. Dr. Luís Fernando Corrêa Monteiro
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof. Dr. Leandro Ramos de Araújo
Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF

Rio de Janeiro

2013

DEDICATÓRIA

À minha família e à Petrobras.

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, Prof. Doutor José Franco Machado do Amaral e Prof. Doutor Luiz Biondi Neto e ao Prof. Doutor Jorge Luís Machado do Amaral pela amizade, pela orientação, pelos ensinamentos, pela paciência e pela contribuição fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

À Petrobras e, em especial, aos meus gerentes José Francisco de Oliveira, Ronaldo de Magalhães, Rogério Weber e Júlio Cezar Jerônimo dos Santos, por incentivarem a realização deste trabalho e por valorizarem o investimento no capital intelectual de nossa empresa.

Aos colegas da Petrobras, em especial aos colegas Gil Roberto Vieira Pinheiro, Maurílio Faria Morais e Thiago Trezza Borges, que contribuíram diretamente para a realização deste trabalho.

Aos professores Leandro Ramos de Araujo e Luis Fernando Monteiro, pela importante contribuição para a conclusão deste trabalho.

À UERJ e aos seus professores, pelos ensinamentos, dentro e fora da sala de aula.

Aos meus colegas de mestrado, pelo companheirismo e pelo inegável apoio quando necessário.

À minha família, em especial à minha esposa, pelo companheirismo, apoio e dedicação.

A todos aqueles, que embora não citados nominalmente, contribuíram direta e indiretamente para a execução deste trabalho.

“A genialidade é 1% inspiração e 99% transpiração”

Thomas Edison

RESUMO

CESAR, Eduardo Lenz. *Sistemas inteligentes aplicados à coordenação da proteção de sistemas elétricos industriais com relés digitais*. 2013. 180f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

Atualmente existem diferentes ferramentas computacionais para auxílio nos estudos de coordenação da proteção, que permitem traçar as curvas dos relés, de acordo com os parâmetros escolhidos pelos projetistas. Entretanto, o processo de escolha das curvas consideradas aceitáveis, com um elevado número de possibilidades e variáveis envolvidas, além de complexo, requer simplificações e iterações do tipo tentativa e erro. Neste processo, são fatores fundamentais tanto a experiência e o conhecimento do especialista, quanto um árduo trabalho, sendo que a coordenação da proteção é qualificada pela IEEE Std. 242 como sendo “mais uma arte do que uma ciência”. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um algoritmo genético e de um algoritmo inspirado em otimização por colônia de formigas, para automatizar e otimizar a coordenação da função de sobrecorrente de fase de relés digitais microprocessados (IEDs), em subestações industriais. Seis estudos de caso, obtidos a partir de um modelo de banco de dados, baseado em um sistema elétrico industrial real, são avaliados. Os algoritmos desenvolvidos geraram, em todos os estudos de caso, curvas coordenadas, atendendo a todas as restrições previamente estabelecidas e as diferenças temporais de atuação dos relés, no valor de corrente de curto circuito trifásica, apresentaram-se muito próximas do estabelecido como ótimo. As ferramentas desenvolvidas demonstraram potencialidade quando aplicadas nos estudos de coordenação da proteção, tendo resultados positivos na melhoria da segurança das instalações, das pessoas, da continuidade do processo e do impedimento de emissões prejudiciais ao meio ambiente.

Palavras-chave: Algoritmos genéticos; Colônia de formigas; Seletividade e coordenação da proteção; Proteção de sistemas elétricos industriais; Relés digitais.

ABSTRACT

CESAR, Eduardo Lenz. **The application of intelligent systems in industrial power systems protection coordination using digital relays**. 2013. 180f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

Nowadays there are several computational tools applied to the protection coordination studies, which allow observe the curves of the relays, according to the parameters chosen by the designers. However, the process of choosing the curves considered acceptable, with a great number of possibilities and variables involved, is difficult and, moreover, requires simplifications and some trial and error iterations. In this process, the key factors are the expert experience and knowledge as well as a hard work. The protection coordination is described by IEEE Std. 242 as “more of an art than a science”. This paper presents the development of a genetic algorithm and an algorithm based on an ant colony optimization to automate and optimize the coordination of overcurrent curves using intelligent electronic devices (IEDs) in industrial substations. Six case studies, obtained from a database model based on an actual industrial electrical system, were evaluated. The developed algorithms generated, in all case studies, coordinated curves, complying with all previous established restrictions. The temporal differences of the curves, at three-phase short circuit current values, were very close to the set as optimal. The developed tools are a valuable contribution to the protection coordination studies, improving the safety of the equipment and the people, the process reliability and the prevention of harmful emissions to the environment.

Keywords: Genetic algorithm; Ant colony optimization; Overcurrent coordination; Industrial power systems protection; Digital relays.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curva de proteção de sobrecorrente com característica de tempo independente.....	28
Figura 2 – Curva de proteção de sobrecorrente com característica de tempo independente.....	29
Figura 3–Curvas de inclinação muito inversa, com valores de multiplicador de tempo de 0,05 até 12.	30
Figura 4–Variação dos graus de inclinação das curvas: inversa, muito inversa e extremamente inversa.....	31
Figura 5–Característica da curva de sobrecorrente dependentes do tempo.....	32
Figura 6 – Sistema radial contendo três conjuntos de dispositivos de proteção.	34
Figura 7 – Coordenação temporal de três relés em um sistema radial.	34
Figura 8 – Filosofia da sobrecorrente por tempo definido.	36
Figura 9 – Representação binária de cromossomo, genes e alelos.....	39
Figura 10 – Representação da proporcionalidade de 5 indivíduos no método da roleta simples, para o caso exemplo.	43
Figura 11 – Representação da proporcionalidade de 5 indivíduos no método da roleta ponderada, para o caso exemplo.	43
Figura 12–Exemplo de seleção por torneio, para uma população de 8 indivíduos. ..	44
Figura 13 – Exemplo de crossover simples ou crossover em um único ponto.....	46
Figura 14 – Exemplo de crossover de dois pontos.....	46
Figura 15 – Exemplo de crossover uniforme ou aleatório.	47
Figura 16 – Exemplo de mutação em cromossomo.	48
Figura 17–Caminhos trilhados por formigas entre o ninho e uma fonte de comida...51	
Figura 18–Caminhos trilhados por formigas entre seu ninho e uma fonte de comida, antes, durante e depois da inserção de um obstáculo. (BOECHEL, 2003).....	52
Figura 19 – Diagrama esquemático típico de sistema elétrico industrial redundante.	55
Figura 20 – Painel de média ou baixa tensão operando em “L”.....	56
Figura 21 – Painel de média ou baixa tensão operando em “L”.....	57
Figura 22 – Vetor binário que codifica as variáveis.	58
Figura 23 – Representação das variáveis contidas no vetor binário.	59

Figura 24–Coordenação entre três relés digitais, considerando as diferenças temporais nos valores de corrente de 2Gs e de curto circuito trifásica.	62
Figura 25–Ilustração da penalidade do tipo 1: a curva do relé 1 atende à restrição e o indivíduo não é penalizado.....	64
Figura 26– Ilustração da penalidade do tipo 1: a curva do relé 1 não atende à restrição e o indivíduo é penalizado.	64
Figura 27–Ilustração da penalidade do tipo 2: a curva do relé 1 está incorretamente acima da curva do relé 2 e o indivíduo é penalizado.....	65
Figura 28– Ilustração da penalidade do tipo 2: as curvas dos relés 2 e 3 se cruzam, invertendo a coordenação, e o indivíduo é penalizado.	66
Figura 29– A curva do relé 1 atende às restrições de passar 0,2s acima da curva do relé do alimentador (equivalente à penalidade do tipo 4), e 0,2s acima do eixo zero (equivalente à penalidade do tipo 3). O indivíduo não é penalizado.	67
Figura 30– A curva do relé 1 não atende à restrição de passar 0,2s acima da curva do relé do alimentador (equivalente à penalidade do tipo 4). O indivíduo é penalizado.....	67
Figura 31– A curva do relé 1 não atende tanto à restrição de passar 0,2s acima da curva do relé do alimentador (equivalente à penalidade do tipo 4), quanto à de passar 0,2s acima do eixo zero (equivalente à penalidade do tipo 3) . O indivíduo é penalizado duplamente.	68
Figura 32– Limitações do transformador: ponto ANSI e <i>Inrush</i> . A penalidade 5 se aplica caso a curva do relé 3 passe acima do ponto ANSI, o que não ocorreu.	70
Figura 33– Fluxograma do algoritmo genético implementado.....	73
Figura 34– População inicial do algoritmo genético.	74
Figura 35– Atribuição de valor de aptidão ao cromossomo.	74
Figura 36– Evolução da média da população e do melhor indivíduo, nos primeiros ciclos: taxa elevada de variação. Figura obtida a partir do Estudo de Caso 2.	76
Figura 37– Evolução da média da população até o milésimo ciclo: taxa elevada de variação no início e oscilação no restante. Figura obtida a partir do Estudo de Caso 2.	76
Figura 38– Fluxograma do algoritmo de otimização inspirado em colônia de formigas implementado.....	78
Figura 39– População inicial do algoritmo de ACO.	79
Figura 40– Avaliação do local onde está a formiga.....	79

Figura 41– Possíveis passos de uma formiga: mudança de apenas 1 bit.....	80
Figura 42– Avaliação do possível passo.	81
Figura 43– Curvas de sobrecorrente de um sistema industrial real.	84
Figura 44– Sistema elétrico industrial referente ao estudo de caso 1.....	86
Figura 45–Curvas de sobrecorrente obtidas pelos métodos tradicionais de estudos de proteção para o estudo de caso 1, estendidas até o valor de $I_{cc3\phi}$	88
Figura 46–Região de restrição da curva de sobrecorrente anteriormente existente do relé 1, para o estudo de caso 1.....	89
Figura 47–Região de restrição da curva de sobrecorrente anteriormente existente do relé 3, para o estudo de caso 1.....	89
Figura 48–Curvas de sobrecorrente obtidas do GA para o estudo de caso 1.....	91
Figura 49–Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 1, obtida do GA, para o estudo de caso 1.....	92
Figura 50–Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 3, obtida do GA, para o estudo de caso 1.....	92
Figura 51–Gráfico da evolução da média da população ao longo dos ciclos do GA, para o estudo de caso 1.....	93
Figura 52–Gráfico da evolução do melhor indivíduo ao longo dos ciclos do GA, para o estudo de caso 1.....	93
Figura 53–Curvas de sobrecorrente obtidas do ACO para o estudo de caso 1.	95
Figura 54–Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 1, obtida do ACO, para o estudo de caso 1.....	96
Figura 55–Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 3, obtida do ACO, para o estudo de caso 1.....	96
Figura 56–Gráfico da evolução do valor de avaliação médio dos caminhos das formigas, ao longo das iterações do ACO, para o estudo de caso 1.....	97
Figura 57–Gráfico da evolução do valor de avaliação do melhor caminho das formigas, ao longo das iterações do ACO, para o estudo de caso 1.....	97
Figura 58– Sistema elétrico industrial referente ao estudo de caso 2.....	98
Figura 59–Curvas de sobrecorrente obtidas pelos métodos tradicionais de estudos de proteção para o estudo de caso 2, estendidas até o valor de $I_{cc3\phi}$	100
Figura 60–Região de restrição da curva de sobrecorrente anteriormente existente do relé 1, para o estudo de caso 2.....	101

Figura 61–Região de restrição da curva de sobrecorrente anteriormente existente do relé 3, para o estudo de caso 2.....	101
Figura 62–Curvas de sobrecorrente obtidas do GA para o estudo de caso 2.....	103
Figura 63–Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 1, obtida do GA, para o estudo de caso 2.....	104
Figura 64–Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 3, obtida do GA, para o estudo de caso 2.....	104
Figura 65–Gráfico da evolução da média da população ao longo dos ciclos do GA, para o estudo de caso 2.....	105
Figura 66–Gráfico da evolução do melhor indivíduo ao longo dos ciclos do GA, para o estudo de caso 2.....	105
Figura 67–Curvas de sobrecorrente obtidas do ACO para o estudo de caso 2.	107
Figura 68–Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 1, obtida do ACO, para o estudo de caso 2.....	108
Figura 69–Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 3, obtida do ACO, para o estudo de caso 2.....	108
Figura 70–Gráfico da evolução do valor de avaliação médio dos caminhos das formigas, ao longo das iterações do ACO, para o estudo de caso 2.....	109
Figura 71–Gráfico da evolução do valor de avaliação do melhor caminho das formigas, ao longo das iterações do ACO, para o estudo de caso 2.....	109
Figura 72– Sistema elétrico industrial referente ao estudo de caso 3.....	110
Figura 73–Curvas de sobrecorrente obtidas pelos métodos tradicionais de estudos de proteção para o estudo de caso 3, estendidas até o valor de $I_{cc3\phi}$	113
Figura 74–Região de restrição da curva de sobrecorrente anteriormente existente do relé 1, para o estudo de caso 3.....	114
Figura 75–Região de restrição da curva de sobrecorrente anteriormente existente do relé 3, para o estudo de caso 3.....	114
Figura 76–Curvas de sobrecorrente obtidas do GA para o estudo de caso 3.....	116
Figura 77–Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 1, obtida do GA, para o estudo de caso 3.....	117
Figura 78–Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 3, obtida do GA, para o estudo de caso 3.....	117
Figura 79–Gráfico da evolução da média da população ao longo dos ciclos do GA, para o estudo de caso 3.....	118

Figura 80–Gráfico da evolução do melhor indivíduo ao longo dos ciclos do GA, para o estudo de caso 3.....	118
Figura 81–Curvas de sobrecorrente obtidas do ACO para o estudo de caso 3.	120
Figura 82–Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 1, obtida do ACO, para o estudo de caso 3.....	121
Figura 83–Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 3, obtida do ACO, para o estudo de caso 3.....	121
Figura 84–Gráfico da evolução do valor de avaliação médio dos caminhos das formigas, ao longo das iterações do ACO, para o estudo de caso 3.....	122
Figura 85–Gráfico da evolução do valor de avaliação do melhor caminho das formigas, ao longo das iterações do ACO, para o estudo de caso 3.....	122
Figura 86– Sistema elétrico industrial referente ao estudo de caso 4.....	123
Figura 87–Curvas de sobrecorrente obtidas pelos métodos tradicionais de estudos de proteção para o estudo de caso 4, estendidas até o valor de $I_{cc3\phi}$	125
Figura 88–Região de restrição da curva de sobrecorrente anteriormente existente do relé 1, para o estudo de caso 4.....	126
Figura 89–Região de restrição da curva de sobrecorrente anteriormente existente do relé 3, para o estudo de caso 4.....	127
Figura 90–Curvas de sobrecorrente obtidas do GA para o estudo de caso 4.....	129
Figura 91–Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 1, obtida do GA, para o estudo de caso 4.....	129
Figura 92–Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 3, obtida do GA, para o estudo de caso 4.....	130
Figura 93–Gráfico da evolução da média da população ao longo dos ciclos do GA, para o estudo de caso 4.....	131
Figura 94–Gráfico da evolução do melhor indivíduo ao longo dos ciclos do GA, para o estudo de caso 4.....	131
Figura 95–Curvas de sobrecorrente obtidas do ACO para o estudo de caso 4.	133
Figura 96–Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 1, obtida do ACO, para o estudo de caso 4.....	134
Figura 97–Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 3, obtida do ACO, para o estudo de caso 4.....	134
Figura 98–Gráfico da evolução do valor de avaliação médio dos caminhos das formigas, ao longo das iterações do ACO, para o estudo de caso 4.....	135

Figura 99–Gráfico da evolução do valor de avaliação do melhor caminho das formigas, ao longo das iterações do ACO, para o estudo de caso 4.....	135
Figura 100– Sistema elétrico industrial referente ao estudo de caso 5.	136
Figura 101–Curvas de sobrecorrente obtidas pelos métodos tradicionais de estudos de proteção para o estudo de caso 5, estendidas até o valor de $I_{cc3\phi}$	139
Figura 102–Região de restrição da curva de sobrecorrente anteriormente existente do relé 1, para o estudo de caso 5.	140
Figura 103–Região de restrição da curva de sobrecorrente anteriormente existente do relé 3, para o estudo de caso 5.	140
Figura 104–Curvas de sobrecorrente obtidas do GA para o estudo de caso 5.	142
Figura 105–Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 1, obtida do GA, para o estudo de caso 5.	143
Figura 106–Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 3, obtida do GA, para o estudo de caso 5.	143
Figura 107–Gráfico da evolução da média da população ao longo dos ciclos do GA, para o estudo de caso 5.	144
Figura 108–Gráfico da evolução do melhor indivíduo ao longo dos ciclos do GA, para o estudo de caso 5.	144
Figura 109–Curvas de sobrecorrente obtidas do ACO para o estudo de caso 5. ...	146
Figura 110–Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 1, obtida do ACO, para o estudo de caso 5.	147
Figura 111–Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 3, obtida do ACO, para o estudo de caso 5.	147
Figura 112–Gráfico da evolução do valor de avaliação médio dos caminhos das formigas, ao longo das iterações do ACO, para o estudo de caso 5.....	148
Figura 113–Gráfico da evolução do valor de avaliação do melhor caminho das formigas, ao longo das iterações do ACO, para o estudo de caso 5.....	148
Figura 114– Sistema elétrico industrial referente ao estudo de caso 6.	149
Figura 115–Curvas de sobrecorrente obtidas pelos métodos tradicionais de estudos de proteção para o estudo de caso 6, estendidas até o valor de $I_{cc3\phi}$	151
Figura 116–Região de restrição da curva de sobrecorrente anteriormente existente do relé 1, para o estudo de caso 6.	152
Figura 117–Região de restrição da curva de sobrecorrente anteriormente existente do relé 3, para o estudo de caso 6.	152

Figura 118–Curvas de sobrecorrente obtidas do GA para o estudo de caso 6.	154
Figura 119–Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 1, obtida do GA, para o estudo de caso 6.	155
Figura 120–Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 3, obtida do GA, para o estudo de caso 6.	155
Figura 121–Gráfico da evolução da média da população ao longo dos ciclos do GA, para o estudo de caso 6.	156
Figura 122–Gráfico da evolução do melhor indivíduo ao longo dos ciclos do GA, para o estudo de caso 6.	156
Figura 123–Curvas de sobrecorrente obtidas do ACO para o estudo de caso 6. ...	158
Figura 124–Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 1, obtida do ACO, para o estudo de caso 6.	159
Figura 125–Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 3, obtida do ACO, para o estudo de caso 6.	159
Figura 126–Gráfico da evolução do valor de avaliação médio dos caminhos das formigas, ao longo das iterações do ACO, para o estudo de caso 6.	160
Figura 127–Gráfico da evolução do valor de avaliação do melhor caminho das formigas, ao longo das iterações do ACO, para o estudo de caso 6.	160

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de curvas de sobrecorrente temporizadas do tipo inversa	31
Tabela 2 – Tempos mínimos de coordenação entre dispositivos de proteção	35
Tabela 3 – Codificação binária dos ajustes de tempo (TMS)	59
Tabela 4 – Codificação binária dos parâmetros k, alfa e c, que indicam o tipo de curva	60
Tabela 5 – Representação binária das correntes de ajuste dos relés (Gs)	61
Tabela 6 – Determinação do ponto ANSI ($I_{cc_{max}}$ simétrico x tempo admissível) a partir da impedância do transformador (CAMINHA, 1977)	69
Tabela 7 - Configurações dos relés e tempos de atuação das curvas de sobrecorrente do sistema existente.....	87
Tabela 8 - Tempos de coordenação das curvas de sobrecorrente do sistema existente.....	87
Tabela 9 - Configurações dos relés e tempos de atuação das curvas de sobrecorrente obtidas do GA.....	90
Tabela 10 - Tempos de coordenação das curvas de sobrecorrente obtidas do GA..	91
Tabela 11 - Configurações dos relés e tempos de atuação das curvas de sobrecorrente obtidas do ACO.	94
Tabela 12 - Tempos de coordenação das curvas de sobrecorrente obtidas do ACO.	95
Tabela 13 - Configurações dos relés e tempos de atuação das curvas de sobrecorrente do sistema existente.....	99
Tabela 14 - Tempos de coordenação das curvas de sobrecorrente do sistema existente.....	100
Tabela 15 - Configurações dos relés e tempos de atuação das curvas de sobrecorrente obtidas do GA.....	102
Tabela 16 - Tempos de coordenação das curvas de sobrecorrente obtidas do GA.	103
Tabela 17 - Configurações dos relés e tempos de atuação das curvas de sobrecorrente obtidas do ACO.....	106
Tabela 18 - Tempos de coordenação das curvas de sobrecorrente obtidas do ACO.	107

Tabela 19 - Configurações dos relés e tempos de atuação das curvas de sobrecorrente do sistema existente.....	111
Tabela 20 - Tempos de coordenação das curvas de sobrecorrente do sistema existente.....	112
Tabela 21 - Configurações dos relés e tempos de atuação das curvas de sobrecorrente obtidas do GA.....	115
Tabela 22 - Tempos de coordenação das curvas de sobrecorrente obtidas do GA.	116
Tabela 23 - Configurações dos relés e tempos de atuação das curvas de sobrecorrente obtidas do ACO.....	119
Tabela 24 - Tempos de coordenação das curvas de sobrecorrente obtidas do ACO.	120
Tabela 25 - Configurações dos relés e tempos de atuação das curvas de sobrecorrente do sistema existente.....	124
Tabela 26 - Tempos de coordenação das curvas de sobrecorrente do sistema existente.....	125
Tabela 27 - Configurações dos relés e tempos de atuação das curvas de sobrecorrente obtidas do GA.....	128
Tabela 28 - Tempos de coordenação das curvas de sobrecorrente obtidas do GA.	128
Tabela 29 - Configurações dos relés e tempos de atuação das curvas de sobrecorrente obtidas do ACO.....	132
Tabela 30 - Tempos de coordenação das curvas de sobrecorrente obtidas do ACO.	133
Tabela 31 - Configurações dos relés e tempos de atuação das curvas de sobrecorrente do sistema existente.....	137
Tabela 32 - Tempos de coordenação das curvas de sobrecorrente do sistema existente.....	138
Tabela 33 - Configurações dos relés e tempos de atuação das curvas de sobrecorrente obtidas do GA.....	141
Tabela 34 - Tempos de coordenação das curvas de sobrecorrente obtidas do GA.	142
Tabela 35 - Configurações dos relés e tempos de atuação das curvas de sobrecorrente obtidas do ACO.....	145

Tabela 36 - Tempos de coordenação das curvas de sobrecorrente obtidas do ACO.	146
Tabela 37 - Configurações dos relés e tempos de atuação das curvas de sobrecorrente do sistema existente.....	150
Tabela 38 - Tempos de coordenação das curvas de sobrecorrente do sistema existente.....	151
Tabela 39 - Configurações dos relés e tempos de atuação das curvas de sobrecorrente obtidas do GA.....	153
Tabela 40 - Tempos de coordenação das curvas de sobrecorrente obtidas do GA.	154
Tabela 41 - Configurações dos relés e tempos de atuação das curvas de sobrecorrente obtidas do ACO.....	157
Tabela 42 - Tempos de coordenação das curvas de sobrecorrente obtidas do ACO.	158
Tabela 43 - Síntese dos resultados obtidos para o estudo de caso 1.....	161
Tabela 44 - Síntese dos resultados obtidos para o estudo de caso 2.....	162
Tabela 45 - Síntese dos resultados obtidos para o estudo de caso 3.....	163
Tabela 46 - Síntese dos resultados obtidos para o estudo de caso 4.....	164
Tabela 47 - Síntese dos resultados obtidos para o estudo de caso 5.....	165
Tabela 48 - Síntese dos resultados obtidos para o estudo de caso 6.....	166

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACO	Otimização por Colônia de Formigas (<i>Ant Colony Optimization</i>)
IEC	International Electrotechnical Commission
IED	Dispositivo Eletrônico Inteligente (<i>Intelligent Electronic Device</i>)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
G	Valor eficaz da corrente elétrica
GA	Algoritmos Genéticos (<i>Genetic Algorithm</i>)
GAOT	<i>Genetic Algorithm for Function Optimization</i> ®
G_s	Corrente de ajuste do relé. Equivalente a I_{pickup} .
$I_{cc3\phi}$	Corrente de curto circuito trifásica, em valor eficaz (RMS).
I_{ccmax}	Corrente de curto circuito simétrica máxima, em valor eficaz (RMS).
I_{pickup}	Corrente de ajuste do relé ou corrente de <i>pickup</i> . Equivalente a G_s .
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i> ®
PSO	Otimização por Enxame de Partículas (<i>Particle Swarm Optimization</i>)
RMS	Valor eficaz (<i>root mean square</i>)
Std.	Padrão (<i>standard</i>)
TD	Ajuste do multiplicador de tempo (<i>time dial</i>), utilizado na nomenclatura dos padrões ANSI IEEE.
TMS	Ajuste do multiplicador de tempo (<i>time multiplier setting</i>), utilizado na nomenclatura da IEC.
T_{op}	Tempo de operação
Z(%)	Impedância de dispersão do transformador
Δt_c	Intervalo de coordenação

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	21
1	PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE	27
1.1	Características independentes do tempo	27
1.2	Características dependentes do tempo	28
2	COORDENAÇÃO DA PROTEÇÃO E SELETIVIDADE	33
2.1	A coordenação de curvas características dependentes do tempo	36
3	ALGORITMOS GENÉTICOS	38
3.1	Terminologia e elementos dos algoritmos genéticos	38
3.2	Os operadores genéticos	41
3.3	Aplicações, vantagens e desvantagens dos algoritmos genéticos	48
4	OTIMIZAÇÃO POR COLÔNIA DE FORMIGAS	50
4.1	Modelagem e ajustes do ACO	52
4.2	Convergência do ACO	53
4.3	Aplicações do ACO	54
5	METODOLOGIA PROPOSTA	55
5.1	Coordenação da proteção de sobrecorrente dependente do tempo de sistemas elétricos industriais radiais	55
5.2	Formulação do problema	58
5.2.1	<u>Escopo</u>	58
5.2.2	<u>Geração do vetor binário</u>	58
5.2.3	<u>Tabelas de conversão</u>	59
5.2.4	<u>Cálculo das diferenças temporais</u>	61
5.2.5	<u>Penalidades / Restrições</u>	63
5.2.6	<u>Avaliação ou Função Objetivo:</u>	71
5.3	Estrutura e parâmetros do algoritmo genético (GA)	72
5.4	Estrutura e parâmetros do algoritmo inspirado em colônia de formigas (ACO)	77
6	RESULTADOS	83
6.1	Considerações iniciais aos estudos de caso	83
6.2	Estudo de caso 1	85
6.2.1	<u>Sistema existente na unidade industrial</u>	86
6.2.2	<u>Resultados da otimização pelo algoritmo genético</u>	90

6.2.3	<u>Resultados da otimização pelo algoritmo de otimização inspirado em colônia de formigas</u>	94
6.3	Estudo de Caso 2	98
6.3.1	<u>Sistema existente na unidade industrial</u>	99
6.3.2	<u>Resultados da otimização pelo algoritmo genético</u>	102
6.3.3	<u>Resultados da otimização pelo algoritmo de otimização inspirado em colônia de formigas</u>	106
6.4	Estudo de Caso 3	110
6.4.1	<u>Sistema existente na unidade industrial</u>	111
6.4.2	<u>Resultados da otimização pelo algoritmo genético</u>	115
6.4.3	<u>Resultados da otimização pelo algoritmo de otimização inspirado em colônia de formigas</u>	119
6.5	Estudo de Caso 4	123
6.5.1	<u>Sistema existente na unidade industrial</u>	124
6.5.2	<u>Resultados da otimização pelo algoritmo genético</u>	127
6.5.3	<u>Resultados da otimização pelo algoritmo de otimização inspirado em colônia de formigas</u>	132
6.6	Estudo de Caso 5	136
6.6.1	<u>Sistema existente na unidade industrial</u>	137
6.6.2	<u>Resultados da otimização pelo algoritmo genético</u>	141
6.6.3	<u>Resultados da otimização pelo algoritmo de otimização inspirado em colônia de formigas</u>	145
6.7	Estudo de Caso 6	149
6.7.1	<u>Sistema existente na unidade industrial</u>	150
6.7.2	<u>Resultados da otimização pelo algoritmo genético</u>	153
6.7.3	<u>Resultados da otimização pelo algoritmo de otimização inspirado em colônia de formigas</u>	157
6.8	Síntese dos resultados dos estudos de caso	161
6.9	Discussão dos resultados	167
7	CONCLUSÕES	170
7.1	Recomendações de trabalhos futuros	170
	REFERÊNCIAS	172

INTRODUÇÃO

A proteção de sistemas elétricos industriais é importante para a segurança das instalações, das pessoas, da continuidade do processo e do impedimento de emissões prejudiciais ao meio ambiente. Os prejuízos causados pela falha de atuação da proteção ou por sua atuação indevida em um sistema industrial são, geralmente, muito superiores ao custo de sua implementação.

O estudo de seletividade entre os relés do sistema consiste na busca de parametrizações adequadas a cada um deles, de forma que suas curvas de tempo versus corrente não se cruzem ao longo de um intervalo e, ao mesmo tempo, tenham os menores tempos de atuação possíveis.

Neste trabalho, foram desenvolvidos e utilizados algoritmos de sistemas inteligentes para a otimização dos tempos de atuação de sobrecorrente de fase de relés microprocessados em uma subestação industrial.

Motivação

Atualmente, existem diferentes ferramentas computacionais desenvolvidas para os estudos de proteção, tendo sido largamente utilizadas para traçar as curvas dos relés, de acordo com os parâmetros escolhidos pelos projetistas. Entretanto, o processo de escolha das curvas consideradas aceitáveis, com um grande número de possibilidades e variáveis envolvidas, é não apenas difícil, mas também requer muitas iterações do tipo “tentativa e erro”. Para isto, são fatores fundamentais tanto a experiência e o conhecimento do especialista, quanto um árduo trabalho.

Segundo o padrão IEEE Std. 242 (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2001), *“a seleção das características das curvas dos relés é comumente baseada na preferência do projetista. Em outras palavras, a aplicação é mais uma arte do que uma ciência”* e, ainda, *“a coordenação de sobrecorrente é um procedimento de tentativa e erro”*.

Na prática, os especialistas escolhem previamente uma inclinação da curva, utilizada para todos os relés, e um valor de corrente de ajuste, simplificando o seu trabalho. A otimização se restringe, então, à tentativa manual de otimização apenas do intervalo de tempo, para o valor equivalente à corrente de curto circuito trifásica.

Neste trabalho, são desenvolvidos um algoritmo genético e um algoritmo inspirado em colônia de formigas para a otimização dos tempos de atuação de sobrecorrente de fase de uma subestação industrial. O método proposto automatiza a escolha das curvas características, minimiza os tempos de atuação e de seletividade e atende às restrições do sistema. Em complemento, são utilizados estudos de casos reais, aplicando-se o método, cujos resultados demonstram uma melhoria em relação à configuração anteriormente implementada pelo método tradicional, que depende totalmente da experiência do ser humano.

Objetivos

Este trabalho busca desenvolver e utilizar algoritmos baseados em sistemas inteligentes capazes de automatizar e otimizar a coordenação da função de sobrecorrente de fase de relés digitais em sistemas industriais. Especificamente, são utilizadas as técnicas de otimização por algoritmos genéticos (GA – *genetic algorithm*) e por um algoritmo inspirado em colônia de formigas (ACO – *ant colony optimization*). Os algoritmos devem gerar curvas de sobrecorrente de fase coordenadas para três relés digitais em sequência, num sistema radial, atendendo a todas as restrições do sistema e com diferenças temporais o mais próximo possível do valor estabelecido como ótimo.

Revisão Bibliográfica

Atualmente, os estudos de coordenação das curvas de sobrecorrente tem sido realizados em ambientes computacionais que auxiliam na visualização das curvas, de acordo com os ajustes estipulados pelo especialista. O processo de escolha dos parâmetros, entretanto, depende totalmente da experiência do projetista, que, em meio às inúmeras variáveis e possibilidades de valores, precisa adotar uma metodologia simplificada. É prática comum a escolha prévia de apenas uma inclinação de curva para todos os relés e a adoção de valores fixos de ajuste de corrente e a tentativa de otimização apenas para um valor de corrente: a corrente de curto circuito trifásica. Isto resume o processo de coordenação das curvas a uma busca linear de otimização, com apenas uma variável: o ajuste de tempo.

Diversos trabalhos foram desenvolvidos com o intuito de avaliar o uso de técnicas lineares, não lineares e de sistemas inteligentes para a busca da coordenação otimizada de curvas de sobrecorrente. Entretanto, a grande maioria destes trabalhos ainda realiza uma prévia simplificação do problema, conforme apresentado a seguir.

Dos trabalhos que utilizam a técnica de otimização por enxames de partículas (*Particle Swarm Optimization* – PSO):

- o trabalho de (MOSTAFA, HUSSIEN e ELAMARY, 2009) otimiza apenas o ajuste de tempo da coordenação de dois relés, estando as outras variáveis fixas, com valores previamente estabelecidos;
- os de (BASHIR, TAGHIZADEH, *et al.*, 2010) e (DAMCHI, MASHHADI, *et al.*, 2011) utilizam um algoritmo híbrido de PSO e programação não linear, otimizando o ajuste de corrente por PSO e o ajuste de tempo por programação não linear, mantendo as inclinações das curvas fixas;
- os de (VIJAYAKUMAR e NEMA, 2008), (ASADI e KOUHSARI, 2009), (LEITE, BARROS e MIRANDA, 2010), (BANSAL e DEEP, 2008), (SADEH, AMINTOJJAR e BASHIR, 2011), (MANSOUR, MEKHAMER e EL-KHARBAWE, 2007), (ZEINELDIN, EL-SAADANY e SALAMA, 2006), (LIU e YANG, 2012), (GHOLINEZHAD, MAZLUMI e FARHANG, 2011) otimizam o ajuste de tempo e o ajuste de corrente, com algoritmos baseados em PSO, sendo a inclinação das curvas previamente fixadas.

Os trabalhos de (UTHITSUNTHOM, PAO-LA-OR e KULWORAWANICHPONG, 2011) e (RASHTCHI, GHOLINEZHAD e FARHANG, 2010) utilizam o algoritmo de colônia de abelhas para a otimização dos ajustes de corrente e de tempo, sendo mantidas fixas as inclinações das curvas.

A programação evolucionária ou evolutiva foi utilizada por (SO e LI, 2000), (THANGARAJ, PANT e K., 2010), (XU, ZOU, *et al.*, 2008) e (SO e LI, 2000), para a otimização dos ajustes de corrente e de tempo, sendo mantidas inalteradas as inclinações das curvas.

Os algoritmos genéticos (*Genetic Algorithm* - GA) foram a técnica mais utilizada neste tipo de aplicação:

- os trabalhos de (LEE e CHEN, 2007), (SO, LI, *et al.*, 1997), (SO, LI, *et al.*, 1997), (SINGH e GUPTA, 2011), (SINGH e GUPTA, 2012), (KOOCHAKI, ASADI, *et al.*, 2008) utilizaram algoritmos genéticos para a escolha dos

ajustes de tempo e de corrente, tendo os graus de inversibilidade das curvas pré-definidos;

- as referências (OLIVEIRA e SOUZA, 2010) e (SOUZA, OLIVEIRA e LEITE, 2010), (OLIVEIRA, JÚNIOR e SOUZA, 2010) utilizaram GA para otimizar a inclinação das curvas e os ajustes de tempo, mantendo constante o ajuste de corrente. Uma diferença implementada foi a otimização para dois valores de corrente: correntes de curto circuito trifásica e bifásica;
- nos trabalhos de (ABYANEH, KAMANGAR, *et al.*, 2008), (RAZAVI, ABYANEHA, *et al.*, 2008), (CHABANLOO, ABYANEH, *et al.*, 2008), (KAMANGAR, ABYANEH, *et al.*, 2009), (MOUSAVI, ABYANEH e MAHDAVI, 2009), (BEDEKAR e BHIDE, 2011), (BEDEKAR, BHIDE e KALE, 2010), (UTHITSUNTHOM e KULWORAWANICHPONG, 2010), (SINGH, PANIGRAHI e ABHYANKAR, 2011), (KAVEHNIA, SEIFI, *et al.*, 2006), os algoritmos genéticos foram utilizados apenas para o ajuste de tempo;
- já (SADEH, AMINOTOJARI e BASHIR, 2011), (NOGHABI, SADEH e MASHHADI, 2009), (CORRÊA, OBREGON, *et al.*, 2010) e (CORRÊA, OBREGON, *et al.*, 2010) utilizaram um híbrido, em que o ajuste de tempo é escolhido por programação linear e o ajuste de corrente pelo algoritmo genético. A escolha da inclinação das curvas não foi automatizada, sendo previamente definida;
- as referências (JUNIOR, 2008) e (BERMUDEZ, CISNEROS e CHAVEZ, 2010) utilizam algoritmos genéticos para a otimização das três variáveis: ajustes de tempo e corrente e inclinação das curvas. Entretanto, utilizaram apenas as curvas do padrão americano IEEE e apenas para um valor de corrente.

Por fim, as técnicas de programação linear ou híbridos de programação linear e não linear foram exploradas por:

- (NIYOMPANT, KULWORAWANICHPONG, *et al.*, 2012), (BRAGA e SARAIVA, 1996) e (URDANETA, RESTREPO, *et al.*, 1996), que utilizaram programação linear para otimizar apenas o ajuste de tempo;
- (EZZEDDINE e KACZMAREK, 2008), que utilizou programação linear para otimizar apenas o ajuste de corrente;

- (BEDEKAR, Bhide e KALE, 2010) e (URDANETA, NADIRA e JIMENEZ, 1998), cuja combinação de programação linear e não linear foi utilizada para otimizar os ajustes de tempo e de corrente;
- (EZZEDDINE e KACZMAREK, 2011), que utilizou programação linear para otimização das três variáveis: inclinação das curvas e ajustes de tempo e corrente.

Em todos os trabalhos citados neste capítulo, a otimização foi realizada apenas no tempo correspondente à corrente de curto circuito trifásica, à exceção de (OLIVEIRA e SOUZA, 2010) e (SOUZA, OLIVEIRA e LEITE, 2010), (OLIVEIRA, JÚNIOR e SOUZA, 2010), que otimizaram para dois valores de corrente: correntes de curto circuito trifásica e bifásica. Neste trabalho, a metodologia proposta inclui a otimização do tempo inicial do intervalo e do tempo correspondente à corrente de curto circuito, com o intuito de, ao longo de toda a região efetiva de atuação dos dispositivos, as curvas estarem o mais próximas possível, garantidas as restrições e os tempos mínimos de seletividade.

Adicionalmente, neste trabalho, os algoritmos propostos otimizam as três variáveis conjuntamente: os ajustes de tempo e corrente e os tipos de inclinação das curvas.

Este trabalho visa a utilização da técnica de algoritmo genético, que foi a mais utilizada para a otimização dos tempos de coordenação das curvas de sobrecorrente, e de uma técnica desenvolvida, inspirada em colônia de formigas, a qual não se localizou, na literatura, nenhuma utilização para aplicações semelhantes.

E, por fim, o presente trabalho aplica, aos algoritmos, as condições de contorno aplicáveis aos ambientes industriais, como a curva de acionamento de motores, a corrente de carga máxima dos painéis, a corrente de *inrush* (corrente transitória de magnetização) dos transformadores e as curvas de disjuntores de caixa moldada à jusante. Estes aspectos não foram considerados na literatura citada anteriormente, sendo mais uma contribuição deste trabalho.

Publicação relacionada a este trabalho

Relacionado a esta dissertação, o seguinte trabalho foi publicado:

CESAR, E. L.; AMARAL, J. L. M.; AMARAL, J. F. M.; NETO, L. B.; MORAIS, M. F. **Coordenação ótima da Proteção de Sobrecorrente de Relés digitais em Subestações industriais utilizando Algoritmos Genéticos**. IEEE PCIC-BR. 2012.

Estrutura da dissertação

O presente capítulo apresentou a motivação para o desenvolvimento deste trabalho, um breve resumo dos trabalhos que foram realizados ao longo dos anos e uma breve descrição do conteúdo do presente trabalho.

No capítulo um, é apresentada a teoria da proteção de sobrecorrente, sendo diferenciadas as características independentes e dependentes do tempo.

No capítulo dois, é introduzida a coordenação da proteção e seletividade das curvas dependentes do tempo, bem como os ajustes dos relés para atender aos seus requisitos.

No capítulo três, são descritos os algoritmos genéticos, detalhando as suas terminologias e elementos, os operadores genéticos, suas aplicações, vantagens e desvantagens.

O capítulo quatro apresenta a teoria da otimização por colônia de formigas, os aspectos de modelagem, ajustes, aplicações e características de convergência.

No capítulo cinco, é apresentada a metodologia proposta por este trabalho, sendo dividido em quatro etapas: a coordenação da proteção de sobrecorrente dependente do tempo de sistemas elétricos industriais radiais; a formulação do problema; como foi estruturado o algoritmo genético e qual valor atribuído aos seus parâmetros; como o algoritmo inspirado em colônia de formigas foi estruturado e ajustado.

No capítulo seis, são apresentados os resultados obtidos com o algoritmo genético proposto, o algoritmo inspirado em colônia de formigas desenvolvido, bem como é realizada uma comparação com os valores baseados em um sistema industrial real.

O capítulo sete contempla a discussão dos resultados obtidos com os algoritmos genéticos e o inspirado em colônia de formigas.

Finalmente, no capítulo oito, são apresentadas as conclusões obtidas com o desenvolvimento do presente trabalho, além de algumas propostas para trabalhos futuros.

1 PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE

Os relés de proteção são dispositivos com as funções de monitorar determinadas grandezas elétricas e comandar a abertura de disjuntores, quando ocorrem determinadas condições anormais. O padrão IEEE Std. C37.2 (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2008) estabelece diferentes padrões de atuação, denominados "funções", sendo associado um número a cada função. Estes números de funções podem representar dispositivos individuais (como no caso de relés eletromecânicos, possuindo apenas uma função), componentes de um dispositivo ou mesmo uma função pertencente a um dispositivo multifuncional (como no caso de relés microprocessados ou IEDs - *Intelligent Electronic Devices*).

Dentre as funções enumeradas pelo IEEE Std. C37.2, as de sobrecorrente referem-se a uma característica de atuação do dispositivo, com base no valor da corrente elétrica verificada. A relação entre o tempo de atuação e o valor da corrente verificada pode ser expresso por curvas características. Quanto ao tempo de atuação, o padrão IEC60255-151 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2009) especifica dois tipos de curvas características, para as funções de sobrecorrente: independentes do tempo e dependentes do tempo.

1.1 Características independentes do tempo (Função ANSI 50)

Para a função de proteção de sobrecorrente com característica independente do tempo, o relé atua sempre que a corrente superar um valor mínimo pré-estabelecido, num tempo que independe do valor da corrente que superar o mínimo, conforme a Figura 1. Se este tempo for estabelecido intencionalmente, a característica é denominada de tempo definido. Se nenhum atraso intencional de tempo for estabelecido, a característica é denominada instantânea.

O IEEE Std. C37.2 estabelece o número 50 para a função de proteção de sobrecorrente com característica independente do tempo: "*um dispositivo que atua sem um atraso de tempo intencional quando a corrente excede a um valor preestabelecido. O sufixo TD deve ser usado (ex: 50TD) para descrever uma função de sobrecorrente com tempo definido*".



Figura 1 – Curva de proteção de sobrecorrente com característica de tempo independente.

(INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2009)

Na Figura 1, o eixo Y (ordenada) representa o tempo de atuação do dispositivo (t) e o eixo X (abscissa) representa a corrente detectada (G). O termo t_{op} equivale ao tempo de atuação ou de operação, que pode ser definido intencionalmente, através da inserção de um atraso, ou, no caso da atuação denominada instantânea, é determinado pelo atraso no processamento e na inércia do próprio dispositivo. G_s é a corrente acima da qual o dispositivo atua, enviando sinal de abertura (*trip*) para o disjuntor. Para correntes abaixo do valor G_s , o dispositivo não atua.

1.2 Características dependentes do tempo (Função ANSI 51)

Para a função de proteção de sobrecorrente com característica dependente do tempo, o tempo de atuação do relé é inversamente proporcional ao valor da corrente. Ou seja, para correntes maiores do que a corrente mínima de atuação (denominada de corrente de ajuste, corrente de *pickup* ou G_s), um aumento de corrente corresponde a um decréscimo do tempo de operação do relé (vide figura 2).

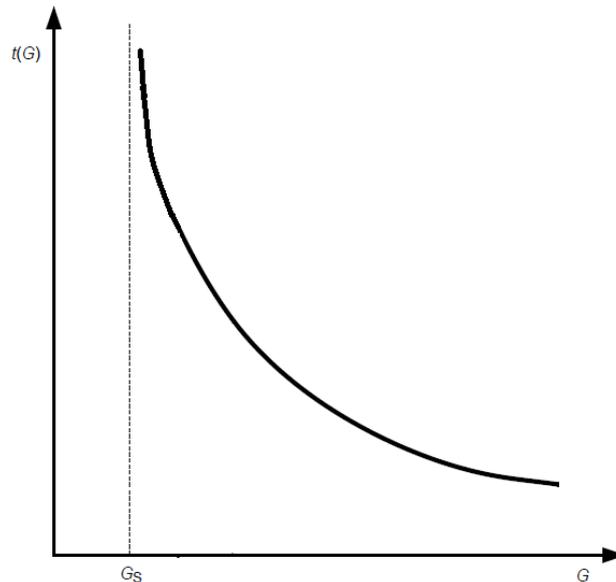


Figura 2 – Curva de proteção de sobrecorrente com característica de tempo independente.

Adaptado de **(INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2009)**

O IEEE Std. C37.2 estabelece o número 51 para a função de proteção de sobrecorrente com característica dependente do tempo: "*Um dispositivo que atua quando a corrente alternada de entrada excede um valor predeterminado (...)*" (que equivale à corrente de *pickup* ou G_S)"(...) e na qual os valores da corrente de entrada e do tempo de operação são inversamente proporcionais".

O padrão IEC 60255-151 define que as curvas dos relés de sobrecorrente dependentes do tempo são obtidas com base na equação (1).

$$t(G) = TMS \left[\frac{k}{\left(\frac{G}{G_S} \right)^\alpha - 1} + c \right] \quad (1)$$

Onde:

t: tempo de atuação do relé, em segundos.

TMS: ajuste do multiplicador de tempo (*time multiplier setting*)

G: valor eficaz da corrente elétrica

G_S : corrente de ajuste do relé ou corrente de *pickup*

k , α e c são constantes que definem os diferentes tipos de curva tempo x corrente. Os valores padronizados pela IEC são apresentados na tabela 1.

A função do parâmetro TMS é permitir um ajuste nos tempos de operação de um determinado tipo de curva. A figura 3 ilustra a variação do parâmetro TMS, resultando num deslocamento vertical da curva.

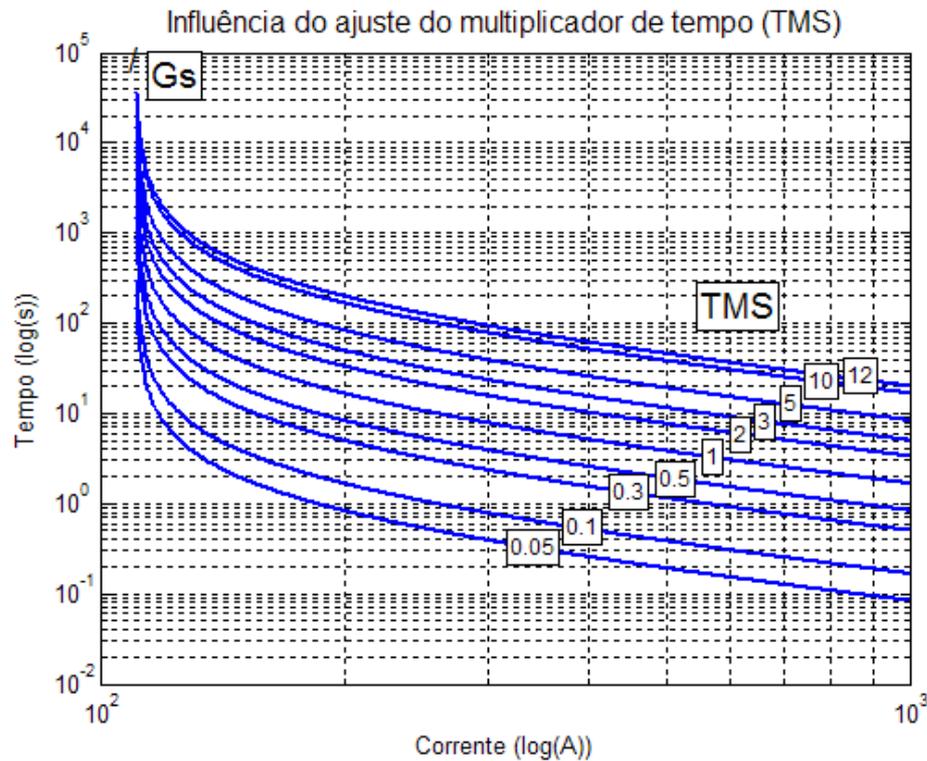


Figura 3—Curvas de inclinação muito inversa, com valores de multiplicador de tempo de 0,05 até 12.

Os padrões IEC ou ANSI não definem limites mínimos ou máximos de TMS para as curvas, tampouco o passo de variação. Segundo (SOARES, 2009), normalmente, o valor de TMS para as curvas do padrão ANSI varia de 0,5 a 15 e, para as curvas do padrão IEC, varia de 0,05 até 1, sendo o passo dessas variações dependentes do modelo do relé. Conforme será descrito mais adiante, neste trabalho, o algoritmo foi configurado para testar a faixa de TMS de 0,05 até 12,8, com passo de 0,05.

Na figura 3, é também representada a corrente de ajuste do relé (G_s): o valor mínimo de atuação do dispositivo, equivalente a um tempo de acionamento tendendo ao infinito. A variação de G_s determina o deslocamento da curva através do eixo da abscissa.

A revisão de 2009 da IEC 60255-151 unificou os tipos de curvas inversas, padronizados pela IEC e IEEE, resultando em 6 tipos de curvas características, conforme tabela 1.

Tabela 1 – Tipos de curvas de sobrecorrente temporizadas do tipo inversa

(INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMISSION, 2009)

Tipo de Curva (Tempo x Corrente)	Parâmetros		
	k	α	c
Inversa	0,14	0,02	0
Muito Inversa	13,5	1	0
Extremamente Inversa	80	2	0
IEEE Moderadamente Inversa	0,052	0,02	0,114
IEEE Muito Inversa	19,61	2	0,491
IEEE Extremamente Inversa	28,2	2	0,122

Os valores das constantes k, alfa e c, padronizados pela IEC e apresentados na tabela 1, determinam a inclinação das curvas de tempo de atuação em relação às correntes medidas. A figura 4 exemplifica esta característica, mostrando o efeito da variação do tipo de curva, mantendo-se os demais fatores (TMS e Gs) inalterados.

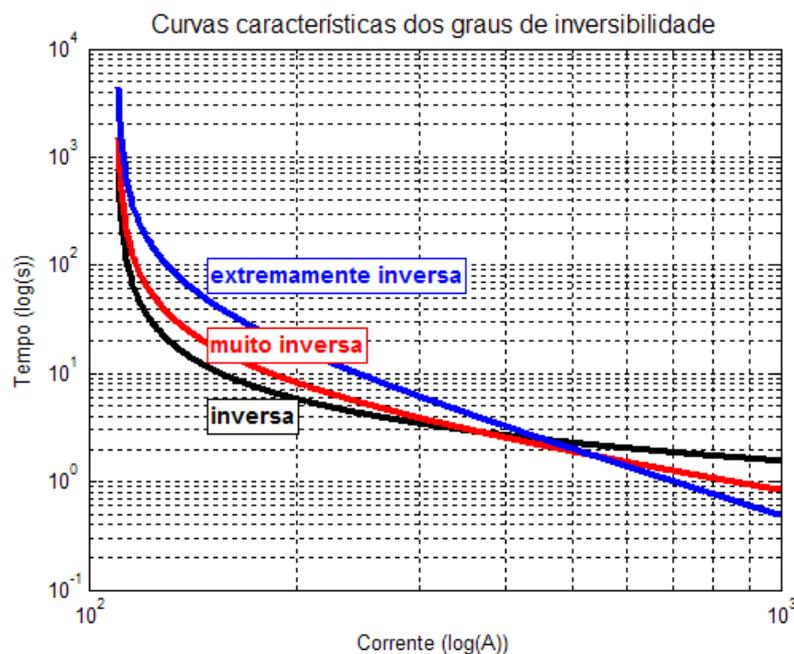


Figura 4–Variação dos graus de inclinação das curvas: inversa, muito inversa e extremamente inversa.

Conforme ilustrado na figura 5, o padrão IEC 60255-151 estabelece que a faixa efetiva de atuação por sobrecorrente dependente do tempo deve situar entre $2xG_s$ e G_D . O valor mínimo de G_D deve ser igual a 20 vezes o valor estabelecido para G_s .

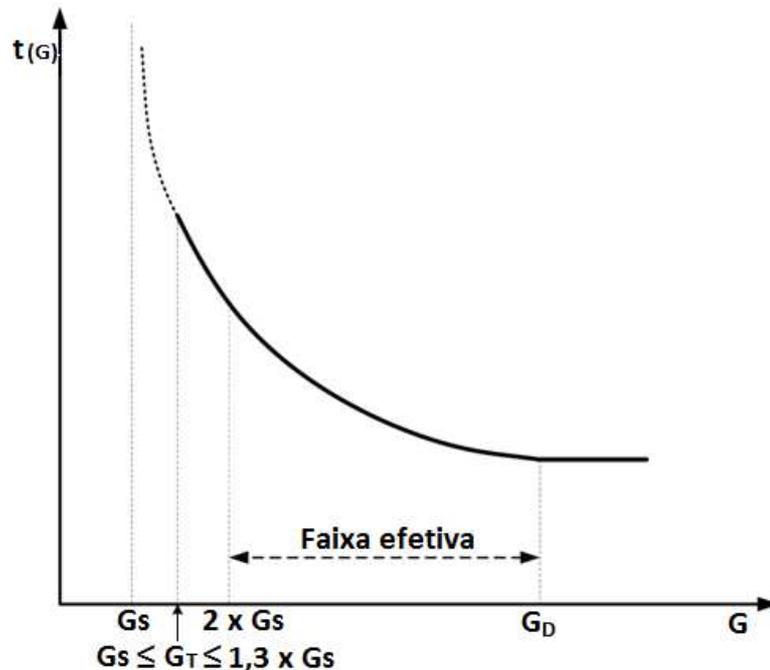


Figura 5—Característica da curva de sobrecorrente dependentes do tempo.

Adaptado de **(INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMISSION, 2009)**

Em continuidade, o padrão IEC 60255-151 determina a existência de um valor mínimo limite G_T , que consiste no menor valor a partir do qual o qual o relé possui garantia de operar. O padrão remete ao fabricante determinar o valor exato de G_T , mas estabelece que deve estar localizado no intervalo de G_s até $1,3 \times G_s$.

Portanto, os valores de tempo de atuação do início da curva, entre G_s e G_T , são puramente teóricos, não havendo garantia de atuação. Neste trabalho, para efeito de avaliação da coordenação e seletividade entre as curvas dos diferentes relés, foi considerada apenas a região denominada como efetiva (entre $2 \times G_s$ e G_D). Para efeito de atendimento às restrições, foi considerado todo o intervalo, iniciando em G_s .

2 COORDENAÇÃO DA PROTEÇÃO E SELETIVIDADE

Segundo (URDANETA , RESTREPO, *et al.*, 1996), (KINDERMANN, 2005) e (ALVES e ROLIM, 2010), um sistema de proteção bem projetado e ajustado deve ter as seguintes características:

- Sensibilidade: capacidade do sistema de proteção em responder às condições anormais.
- Seletividade: capacidade de distinguir situações para as quais sua operação é requerida, permitindo a máxima continuidade de serviço, com a mínima área desligada.
- Rapidez: minimizar o tempo de exposição ao defeito, evitando danos em equipamentos.
- Confiabilidade: probabilidade do equipamento satisfazer a função prevista.
- Simplicidade: mínimo de equipamentos e fiação.

De acordo com o IEEE Std. 242 (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2001), os objetivos da coordenação da proteção são determinar as características, classificação e ajustes dos dispositivos de proteção de sobrecorrente de tal forma a minimizar os danos nos equipamentos, além de interromper curto circuitos tão rapidamente quanto possível. Estes dispositivos são geralmente aplicados de tal forma que, sob condições de falta ou sobrecorrente, apenas uma porção mínima do sistema de potência é interrompida. Um estudo de coordenação de sobrecorrente é a comparação e seleção de tempos de operação de dispositivos de proteção de tal forma a atingir os objetivos do sistema de proteção, sob condições anormais.

Os dispositivos de proteção podem possuir as funções primária ou secundária (*backup*). A proteção primária é a primeira a atuar durante uma operação anormal e seus dispositivos são normalmente ajustados para uma operação mais rápida, de tal forma a desligar uma parte menor do sistema, do que a proteção de backup. A proteção secundária atua quando a primária não conseguir desligar o sistema por ocasião da falta.

Desta forma, os dispositivos de proteção de *backup* e seus ajustes são selecionados de tal forma a operar após um intervalo de tempo predeterminado a partir do tempo de atuação da proteção primária. Isto é denominado de coordenação

por tempo. Por outro lado, na maior parte das aplicações, a operação dos dispositivos *backup* implica no desligamento de uma porção maior do sistema elétrico.

Como exemplo, a figura 6 mostra um sistema radial, cujo fluxo de corrente apresenta-se sempre no sentido do disjuntor 3 para o disjuntor 1, e uma falta ocorrendo à jusante do disjuntor 1. Todos os três relés deste sistema identificam a corrente de falta, ao mesmo tempo. No entanto, a proteção primária, ou seja, o conjunto relé 1 e disjuntor 1, deve atuar de forma mais rápida e, em caso da falha nesta atuação, deve operar a proteção de *backup* representada, nesta ordem, pelos conjuntos de relés e disjuntores 2 e 3.

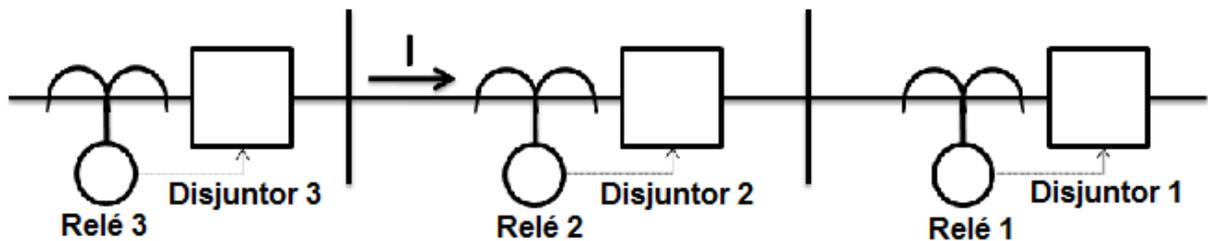


Figura 6 – Sistema radial contendo três conjuntos de dispositivos de proteção.

A figura 7 representa, com base nas curvas tempo x corrente dos relés, a atuação coordenada no tempo dos mesmos no sistema radial. O parâmetro Δt_c representa o tempo de coordenação ou o período que separa duas curvas.

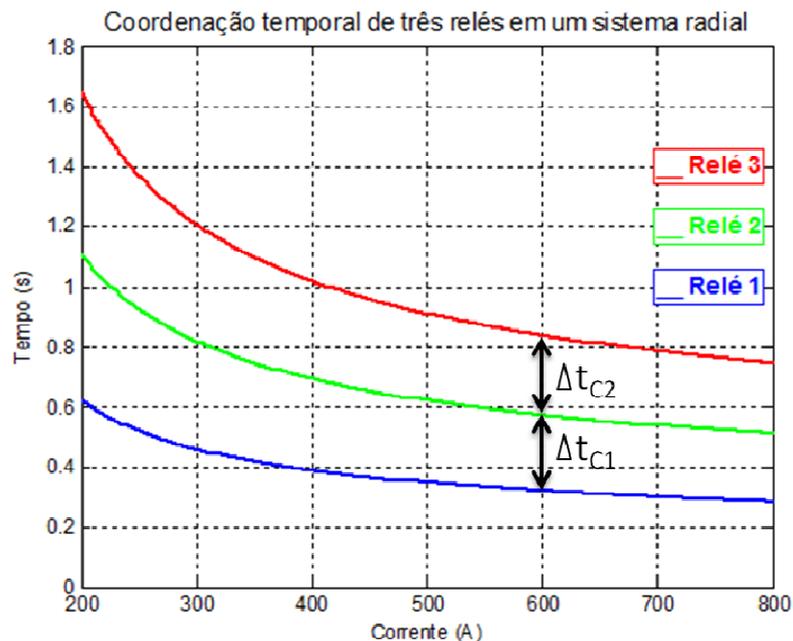


Figura 7 – Coordenação temporal de três relés em um sistema radial.

O tempo de coordenação (Δt_c) entre duas curvas de proteção deve ser o menor possível, para que o sistema atue com rapidez. Contudo, este Δt_c deve ser maior do que a soma do tempo necessário para o processamento e envio de sinal por parte do relé, o tempo de atuação do disjuntor e uma certa margem de segurança. A IEEE Std. 242 apresenta, como referência de tempos mínimos de coordenação, o indicado na tabela 2. Considerando um relé estático à montante, os tempos de coordenação variam conforme o elemento de proteção à jusante. Na tabela 2, são indicados os dispositivos: fusível, disjuntor de baixa tensão que possuem a função de sobrecorrente, relé eletromecânico e relé estático.

Tabela 2 – Tempos mínimos de coordenação entre dispositivos de proteção

Adaptado de **(INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2001)**

Dispositivo à Jusante	Dispositivo à Montante
	Relé Estático
Fusível	0,12 s
Disjuntor de baixa tensão	0,12 s
Relé Eletromecânico	0,2 s
Relé Estático	0,2 s

Conforme resumido na tabela 2, a IEEE Std. 242 estabelece, para a coordenação entre relés estáticos, o valor mínimo de 0,2s. Os responsáveis por este atraso são os fatores:

- Tolerância dos ajustes do relé estático, equivalente a 120ms.
- Tempo de abertura do disjuntor, equivalente a 5 ciclos ou 80ms.

O tempo de tolerância dos ajustes do relé inclui o tempo necessário para que o relé processe a informação de entrada e envie um sinal de saída, seja através de contatos analógicos ou sinais digitais (via rede). Com o advento das novas tecnologias de relés digitais microprocessados (IEDs), estes tempos de atuação sofreram reduções, se comparados aos dos relés estáticos, sendo informados nos manuais dos fabricantes. Entretanto, devido à inexistência de uma padronização de tempos mais reduzidos, o tempo mínimo de coordenação de 0,2s, explícito na atual versão (2001) do padrão IEEE Std. 242, também é utilizado para a coordenação de

IEDs. Neste trabalho, em todos os estudos de caso avaliados, as coordenações ocorreram entre relés digitais microprocessados (IEDs), considerando-se como valor mínimo o tempo de coordenação de 0,2s.

2.1 A coordenação de curvas características dependentes do tempo

Como apresentado no capítulo 1, as proteções de sobrecorrente podem ser dependentes ou independentes de tempo. Os relés da figura 6 poderiam ser configurados com a função de sobrecorrente de tempo definido, atendendo ao ajuste de 0,2s de tempo de coordenação. Conforme (HEWITSON, BROWN e BALAKRISHNAN, 2004), o problema dessa filosofia é: quanto mais próximo o local da falta em relação à fonte, maior a corrente e mais demorado o tempo de abertura – exatamente o oposto do desejável. Este fenômeno está ilustrado na figura 8.

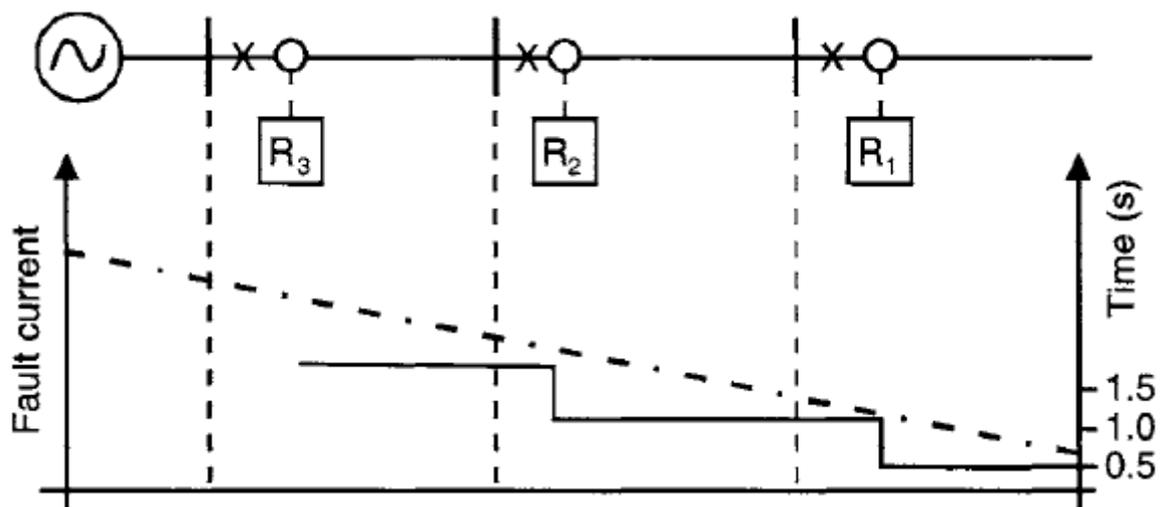


Figura 8 – Filosofia da sobrecorrente por tempo definido.

(HEWITSON, BROWN e BALAKRISHNAN, 2004)

De forma oposta, as curvas inversas ou dependentes do tempo, ilustradas na figura 7, operam mais rapidamente em correntes de faltas maiores e mais lentamente em correntes de falta menores, apresentando as características desejadas. Por este motivo, a filosofia de curvas inversas ou dependentes do tempo se tornou a prática padrão ao longo dos anos (HEWITSON, BROWN e BALAKRISHNAN, 2004).

Entretanto, (HEWITSON, BROWN e BALAKRISHNAN, 2004) prosseguem dizendo que, embora os relés de sobrecorrente dependente do tempo sejam os mais utilizados, estes são, de fato, os mais difíceis de ajustar.

De forma a possibilitar uma automatização dos ajustes dos relés de sobrecorrente dependentes do tempo, em busca dos valores que possibilitam uma coordenação temporal otimizada, foram utilizados, neste trabalho, as técnicas de sistemas inteligentes denominadas algoritmos genéticos e otimização por colônia de formigas.

3 ALGORITMOS GENÉTICOS

Os algoritmos genéticos (GA) foram concebidos e desenvolvidos pela equipe de John Holland, na Universidade de Michigan, na década de 1960. O objetivo inicial de Holland era estudar o fenômeno de adaptação na natureza e desenvolver formas de importá-lo para o ambiente computacional (MITCHELL, 1999).

Os algoritmos genéticos foram constituídos como uma técnica de otimização, com busca global e paralela, inspirada no princípio Darwiniano de seleção natural e reprodução genética. O princípio de seleção natural privilegia os indivíduos mais aptos, com maiores longevidade e probabilidade de reprodução, facilitando a transmissão de suas características às gerações futuras.

As condições ambientais influenciam muito no processo de seleção natural, podendo selecionar determinadas características de um indivíduo, ajudando na reprodução e/ou sobrevivência deste. Os indivíduos que não possuem estas características podem não sobreviver e/ou não se reproduzir. E quanto mais agressivo o ambiente, mais acentuado este processo.

Segundo explicado por (STEARNS, 2003) e (FUTUYAMA, 2003), à medida que as condições ambientais não variam, essas características continuam sendo adaptativas, tornando-se comum na população. Certas características são preservadas devido à vantagem seletiva que conferem, permitindo que o indivíduo se reproduza e, em consequência, deixe mais descendentes. Após diversas gerações, os organismos podem vir a desenvolver características adaptativas muito complexas.

3.1 Terminologia e elementos dos algoritmos genéticos

Os algoritmos genéticos usam uma metáfora, na qual os elementos dos problemas de otimização são comparados aos do meio ambiente. A seguir, são apresentadas as principais terminologias e elementos utilizados nessa técnica.

- **Indivíduos ou cromossomos**

Um cromossomo é uma estrutura de dados, geralmente vetor ou cadeia de bits (cadeia de bits é a estrutura mais tradicional, porém nem sempre é a melhor),

que representa uma possível solução do problema a ser otimizado. Em geral, um cromossomo representa um conjunto de parâmetros da função objetivo, cuja resposta é maximizada ou minimizada. O conjunto de todas as configurações que o cromossomo pode assumir forma o seu espaço de busca. Se o cromossomo representa n parâmetros de uma função, então o espaço de busca é um espaço com n dimensões. (LACERDA e CARVALHO, 2013)

Nos sistemas naturais, um ou mais cromossomos se combinam para formar as características genéticas básicas do indivíduo. Na área dos algoritmos genéticos, os termos cromossomo e indivíduo são intercambiáveis (LINDEN, 2008). Um cromossomo pode ser subdividido em genes.

o Genes

Um gene é a representação de um único fator, pertencente ao cromossomo. É uma característica do indivíduo. Um gene pode ser subdividido em alelos, que são os bits.

A figura 9 ilustra a representação do indivíduo (cromossomo), os genes e alelos. Cada alelo pode assumir o valor 0 ou 1, nesta representação binária.

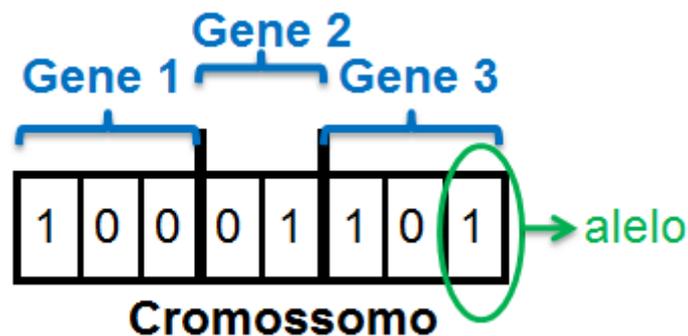


Figura 9 – Representação binária de cromossomo, genes e alelos.

o População

É o conjunto de indivíduos ou cromossomos que são testados em cada geração ou iteração. Os dois principais aspectos usados em algoritmos genéticos são:

- População inicial:

Idealmente, devem ter a maior variedade genética possível, de forma a possibilitar a exploração de todo o espaço de busca. Todos os possíveis valores dos genes devem estar presentes na população inicial. Por esta razão, a população inicial é, na maioria dos casos, escolhida de forma aleatória.(SIVANANDAM e DEEPA, 2008)

- Tamanho da população:

O tamanho da população influi diretamente no desempenho e eficiência do AG.Quando a população é muito pequena, o algoritmo não abrange um espaço de busca satisfatório e como consequência pode resultar em convergência prematura. Para população muito grande, o espaço de busca fica muito bem representado no domínio do problema,mas em compensação o algoritmo consome um elevado tempo computacional. Portanto, o ajuste deste parâmetro é realizado por um operador com bastante experiência para que o algoritmo tenha um funcionamento adequado. (JUNIOR, 2008)

- **Função objetivo ou função de aptidão (*fitness*)**

A função de aptidão atribui um valor de avaliação (*fitness*) ao indivíduo, que indica o quão próximo ele está do valor ótimo. Cada cromossomo é decodificado e avaliado por esta função, que é constituída de parâmetros que se deseja maximizar ou minimizar.

Para problemas nos quais existam restrições, estas podem ser adicionadas na função de aptidão, sendo denominadas penalidades. Se o indivíduo não atender a alguma das restrições, o seu *fitness* será penalizado, o que, na maioria dos casos, o torna inviável.

O processo de construção da função objetivo é de fundamental importância para o desempenho do algoritmo genético. Entretanto, esta não é uma tarefa trivial, além de ser específica para cada tipo de problema.

- **Gerações**

Na terminologia do algoritmo genético, uma iteração do algoritmo equivale a uma geração. Em cada geração, os indivíduos selecionados se reproduzem (e, neste processo, pode haver mutações), gerando descendentes. Para que a população não aumente, devem ser adotados mecanismos como o dos descendentes substituírem os ascendentes, ou seja, os pais morrerem após a reprodução.

- **Meio ambiente**

O meio ambiente é análogo ao problema estruturado no algoritmo genético, ao qual os indivíduos recebem do valor de adaptação.

- **Elitismo**

No algoritmo genético, os cromossomos filhos substituem os pais. Conforme apresentado no item de operadores genéticos, esta característica, aliada a técnicas específicas, normalmente faz com que, a cada geração, a população vá aumentando o valor médio de *fitness*. Por outro lado, numa determinada geração, para o indivíduo mais apto, é desejável tanto que ele se reproduza, pois pode produzir indivíduos ainda mais adaptados no futuro, quanto que seja preservado nas gerações futuras, pois ele pode ser o de melhor *fitness* de todo o conjunto de gerações.

Desta forma, o elitismo, que consiste em se preservar o melhor indivíduo de uma geração, mesmo que sofra reprodução, é um elemento que contribui na convergência do algoritmo e também na melhoria dos resultados.

3.2 Os operadores genéticos

Os operadores genéticos são os responsáveis pelo processo de procriação e são o coração do algoritmo genético. Neste processo, o processo de busca cria indivíduos novos, os quais se espera que tenham um melhor valor de *fitness*. O ciclo de procriação consiste em três passos: seleção dos pais, cruzamento dos pais e

substituição dos pais pelos indivíduos novos (SIVANANDAM e DEEPA, 2008). Este processo é repetido até que um conjunto de soluções satisfatórias seja encontrado.

- **Seleção**

É o processo de escolha dos dois pais, para a procriação, dentre os indivíduos da população. O objetivo da seleção é dar preferência a indivíduos com melhores valores de *fitness*, na expectativa de que os seus sucessores tenham valores de *fitness* ainda melhores. Isto conduz o algoritmo genético a ir melhorando o *fitness* da população, ao longo das sucessivas gerações (SIVANANDAM e DEEPA, 2008).

Os métodos de seleção fazem uma escolha pseudoaleatória dos pais: quanto maior os valores de *fitness* destes, maior a probabilidade de serem selecionados. Alguns métodos de seleção são apresentados a seguir.

- **Roleta (*roulette wheel*):**

Cada indivíduo, após ser avaliado quanto à sua adaptabilidade, recebe um valor percentual de aptidão, em comparação com os demais. A partir de então, cria-se uma roleta, cuja área de cada indivíduo é proporcional a sua porcentagem de aptidão. A escolha dos indivíduos se assemelha a girar essa roleta por N vezes, onde N é o número de indivíduos da população.

Este é um método fácil de ser implementado, porém possui a seguinte desvantagem: se o melhor indivíduo possuir um valor proporcional de *fitness* de 85%, por exemplo, este ocupará 85% da roleta, fazendo com que outros indivíduos tendam a não ser selecionados, ou sejam em pequeno número. Isto prejudica a variedade genética da população e tende a fazer o algoritmo convergir precocemente, em um ponto de máximo ou mínimo relativo.

Para resolver este problema, é possível utilizar a roleta ponderada, onde as diferenças percentuais entre os indivíduos é reduzida, porém mantendo-se uma maior proporção para indivíduos mais adaptados.

Por exemplo, considere uma população de cinco indivíduos, cujos valores de aptidão seriam de {1%, 2%, 4%, 8%, 85%}, para o caso da roleta simples, conforme ilustrado na figura 10. No caso da utilização de roleta ponderada, o menos apto poderia receber valor de adaptação 1, o segundo menos apto receberia valor 2 e, assim, sucessivamente, até o quinto ou mais apto, que receberia valor 5. Em percentuais da roleta, os indivíduos teriam valores de {6,7%; 13,3%; 20%; 26,7%; 33,3%}, conforme a figura 11.

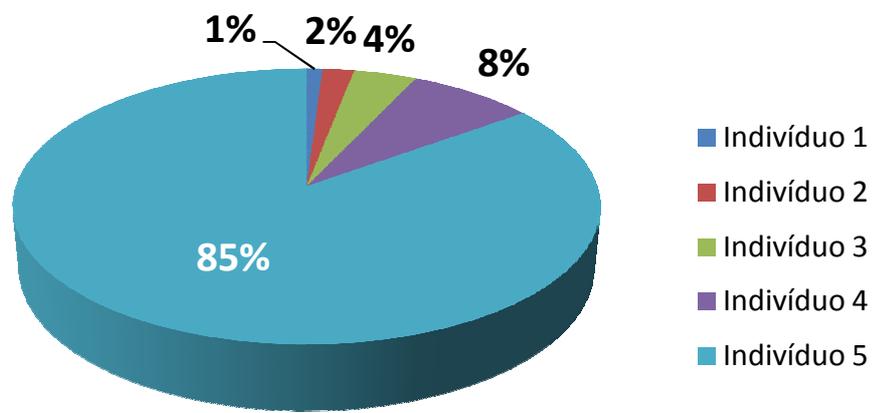


Figura 10 – Representação da proporcionalidade de 5 indivíduos no método da roleta simples, para o caso exemplo.

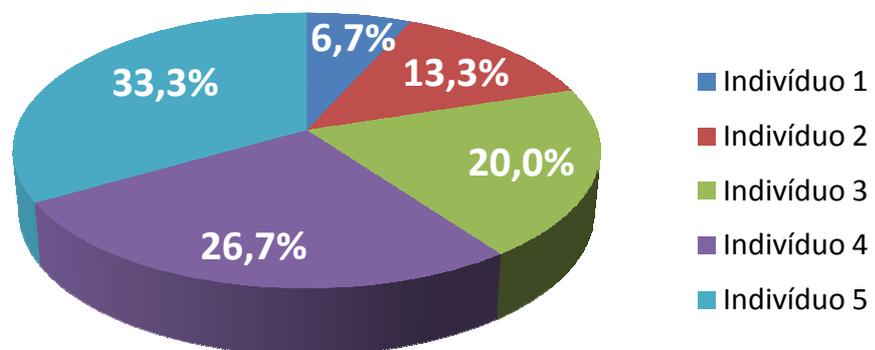


Figura 11 – Representação da proporcionalidade de 5 indivíduos no método da roleta ponderada, para o caso exemplo.

O método da roleta é também conhecido como seleção proporcional.

- Torneio (*tournament*):

Na seleção por torneio, são selecionados aleatoriamente j indivíduos da população de tamanho N . Estes j indivíduos competem entre si e o vencedor é o que tiver o maior valor de aptidão. O vencedor é, então, selecionado para a reprodução (*crossover*). Todos os j indivíduos retornam à população e este processo se repete até que se tenha um número N de indivíduos para a reprodução.

O grupo de selecionados para a reprodução possui um valor médio de *fitness* maior do que o da população, o que tende a fazer com que a próxima geração tenha um valor médio maior do que a anterior.

A figura 12 exemplifica a seleção por torneio, numa população de 8 indivíduos, cujos valores de fitness na geração 1 equivalem a {9, 1, 3, 5, 4, 2, 3, 1}. O valor médio de fitness da geração 2 será maior do que o da geração 1.

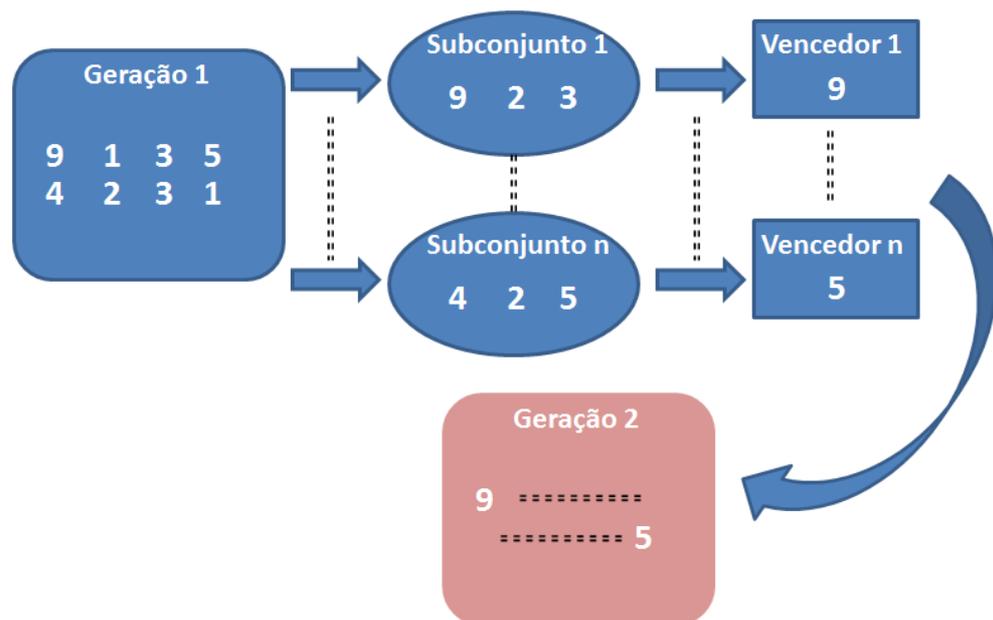


Figura 12—Exemplo de seleção por torneio, para uma população de 8 indivíduos.

- Seleção por normalização geométrica (*normalized geometric ranking*):

Os dois métodos anteriores não são válidos para aplicações em que o valor de fitness dos indivíduos é negativo. Para estes casos, é válida a utilização do método de seleção por normalização geométrica, definido por (HOUCK, JOINES e KAY, 1996), através da equação 2.

$$P_i = q' (1 - q)^{r-1} \quad (2)$$

Onde:

P_i = probabilidade de selecionar o i -ésimo indivíduo

q = probabilidade de seleção do melhor indivíduo

r = o ranking do melhor indivíduo, cujo valor 1 é o melhor

P = tamanho da população

$$q' = \frac{q}{1 - (1 - q)^P}$$

- **Crossover (cruzamento ou recombinação)**

O *crossover* é o cruzamento entre dois indivíduos, de forma a gerar dois novos indivíduos que os substituirão. Seu objetivo é a permutação de material genético, testando novas possibilidades, com cada descendente herdando parte do material genético dos dois progenitores.

Após a formação dos pares, pelo método de seleção, estes podem ou não sofrer cruzamento, de acordo com uma probabilidade de cruzamento predefinida, denominada taxa de cruzamento ou taxa de *crossover*.

Segundo (RAHMAT-SAMII e MICHIELSSEN, 1999), como esse operador é o responsável pela criação de novos indivíduos, a taxa de *crossover* deve ser alta, sendo geralmente utilizados valores entre 70% e 100%.

Existem vários tipos de cruzamento, sendo alguns dos mais comuns apresentados a seguir.

- Cruzamento simples ou em um único ponto:

No cruzamento simples, cada um dos indivíduos pais tem sua cadeia de bits cortada em uma posição aleatória, porém a mesma para os dois, produzindo duas cabeças e duas caudas. Os filhos receberão a cabeça de um dos pais e a cauda do outro, conforme figura 13.



Figura 13 – Exemplo de crossover simples ou crossover em um único ponto.

- Cruzamento de n pontos:

Os indivíduos pais podem ter sua cadeia de bits cortada em 2 ou mais pontos aleatórios, porém o mesmo para os dois indivíduos. A figura 14 ilustra um exemplo em que os pais são cortados em 2 pontos e os filhos recebem a partição central de um e as laterais do outro progenitor.



Figura 14 – Exemplo de crossover de dois pontos.

- Cruzamento uniforme ou em pontos aleatórios:

Nesta recombinação, cada gene dos progenitores é considerado de forma independente. Uma forma comum, segundo (JUNIOR, 2008), é criar, de forma aleatória, uma máscara com o mesmo tamanho dos cromossomos. Conforme figura 15, quando a máscara tiver bit igual a um, o primeiro descendente herda o bit do primeiro progenitor e quando a máscara tiver bit igual a zero, o progenitor herda o bit do segundo progenitor. O segundo filho é gerado pelo mapeamento inverso.

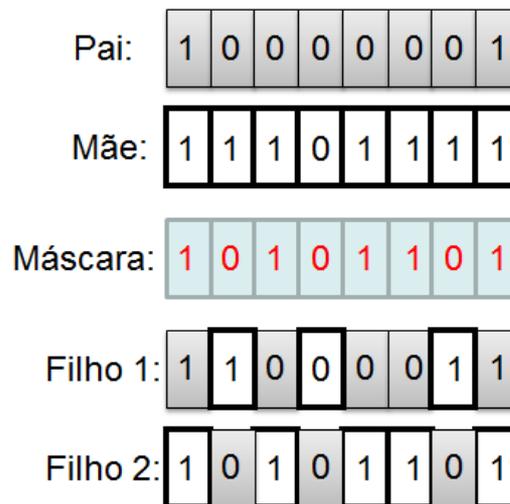


Figura 15 – Exemplo de crossover uniforme ou aleatório.

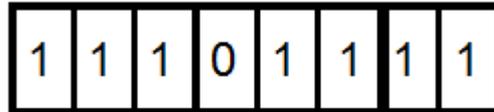
○ **Mutação**

O operador de mutação modifica um ou mais bits (alelos) do cromossomo: se o alelo possui o bit 1, passa a ter o bit 0 e vice-versa. A posição do bit a ser alterado é aleatória e a probabilidade de haver mutação em um bit é denominada taxa de mutação.

O objetivo da mutação é inserir novas características nos descendentes. Entretanto, em geral, são utilizadas pequenas taxas de mutação, com o intuito de não se alterar demasiadamente os cromossomos, o que tornaria o processo de

busca do algoritmo genético muito aleatório. Analogamente, na natureza, esta taxa também é baixa. A figura 16 ilustra o processo de mutação.

Cromossomo antes da mutação:



Cromossomo após a mutação:

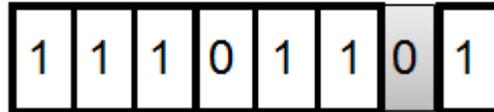


Figura 16 – Exemplo de mutação em cromossomo.

A utilização de operadores de mutação e recombinação equilibra dois objetivos aparentemente conflitantes: o aproveitamento das melhores soluções e a exploração do espaço de busca. O processo de busca é, portanto, multidimensional, preservando soluções candidatas e provocando a troca de informação entre as soluções exploradas (MICHALEWICZ, 1996) e (VON ZUBEN, 2000).

3.3 Aplicações, vantagens e desvantagens dos algoritmos genéticos

Os algoritmos genéticos são eficazes, em comparação com métodos não pertencentes aos sistemas inteligentes, em diversos tipos de aplicações, como:

- problemas com espaços de busca intratavelmente grandes, que não podem ser resolvidos por técnicas tradicionais (LINDEN, 2008);
- funções multimodais, na qual o objetivo é obter um máximo global aproximado;
- problemas mal estruturados, cuja modelagem matemática é difícil;
- problemas complexos, com múltiplos máximos e mínimos, para os quais não existe um algoritmo de otimização eficiente conhecido para resolvê-los (SOARES, 2009);
- Em resumo, a técnica é robusta e aplicável a uma grande diversidade de problemas, além de ser eficaz e eficiente, pois é capaz de encontrar soluções subótimas, inclusive ótimas, em um tempo razoável (AMARAL, PACHECO e TANSCHKEIT, 2010);

Dentre as vantagens dos algoritmos genéticos, podemos citar:

- técnica de busca global, que viabiliza a otimização de problemas mal estruturados e dispensa a formulação matemática precisa do problema (AMARAL, PACHECO e TANSCHKEIT, 2010);
- funcionam tanto com parâmetros contínuos quanto com discretos, ou com a combinação destes (SOUZA, 2008);
- realizam buscas simultâneas em várias regiões do espaço factível, pois trabalham com uma população e não com um único ponto (SOUZA, 2008);
- são flexíveis para trabalhar com restrições arbitrárias e otimizar múltiplas funções com objetivos conflitantes (SOUZA, 2008);
- trabalham com dados gerados experimentalmente e são tolerantes a ruídos e dados incompletos (SOUZA, 2008);
- capaz de lidar com funções discretas e contínuas, sendo possível inclusive misturar as representações sem prejuízo para a sua habilidade de resolver problemas (LINDEN, 2008).

Por outro lado, existem críticas aos algoritmos genéticos, tais como:

- Incerteza da convergência para a solução ótima (MOGNON, 2004) (CHELLAPILLA e HOORFAR, 1998).
- Necessidade de um elevado número de avaliações da função objetivo para obter a solução (MOGNON, 2004) (CHELLAPILLA e HOORFAR, 1998).
- Grandes possibilidades de configurações, podendo complicar a resolução do processo (SOUZA, 2008).

4 OTIMIZAÇÃO POR COLÔNIA DE FORMIGAS

O algoritmo de otimização por colônia de formigas (*Ant Colony Optimization – ACO*) foi introduzido pelo italiano Marco Dorigo, em sua tese de doutorado (DORIGO, 1992).

O ACO é inspirado no comportamento natural das sociedades de formigas, no processo de busca e coleta do alimento, no qual um comportamento simples dos indivíduos (formigas), sem qualquer forma de controle centralizado, resulta numa organização coletiva eficaz. Ou, como escrito por (CAMAZINE, DENEUBOURG, *et al.*, 2003), estruturas complexas resultam da iteração de comportamentos surpreendentemente simples, executados por indivíduos que possuem somente informação local.

O comportamento real das formigas pode ser explicado, sucintamente, da seguinte forma:

- cada formiga, ao longo de seu trajeto em busca de alimento, deposita um hormônio no solo, denominado feromônio.
- outras formigas, que passem pelo mesmo local, detectam a presença desse feromônio e tendem (de forma probabilística) a seguir a trilha que apresenta a maior quantidade desse hormônio.
- a quantidade feromônio numa trilha varia com o tempo, diminuindo por evaporação e aumentando caso uma nova formiga siga por essa trilha.
- ocorre uma tendência das formigas percorrerem uma mesma trilha, pois quanto maior a quantidade de feromônios presente num caminho, mais formigas serão atraídas por ele e, em consequência, haverá mais depósito de feromônio.

Após este processo se estabilizar, o que se observa na natureza, é que, a maioria das formigas decide tomar uma trilha próxima da mais curta possível (talvez, a mais curta) entre o ninho e a fonte de comida. Este processo é ilustrado por (BECCENERI e SILVA NETO, 2009) na figura 17.

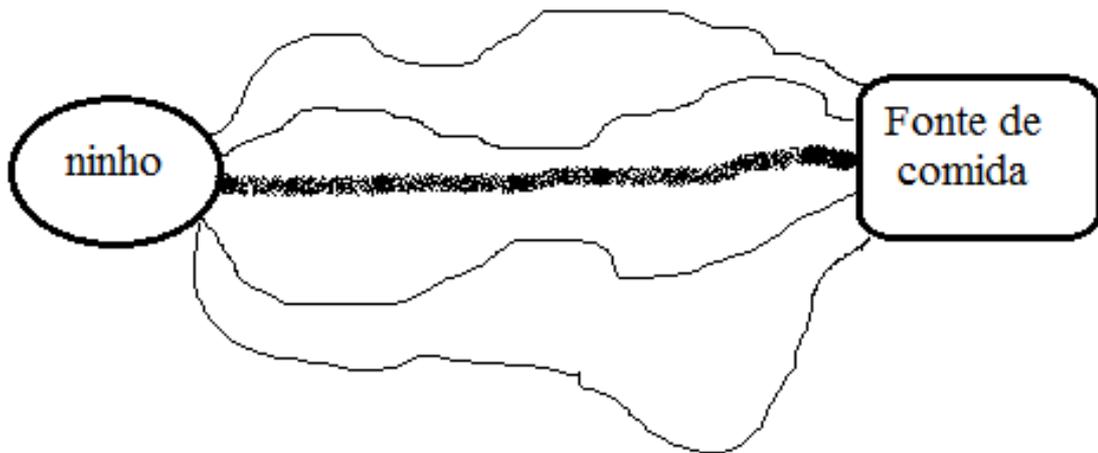
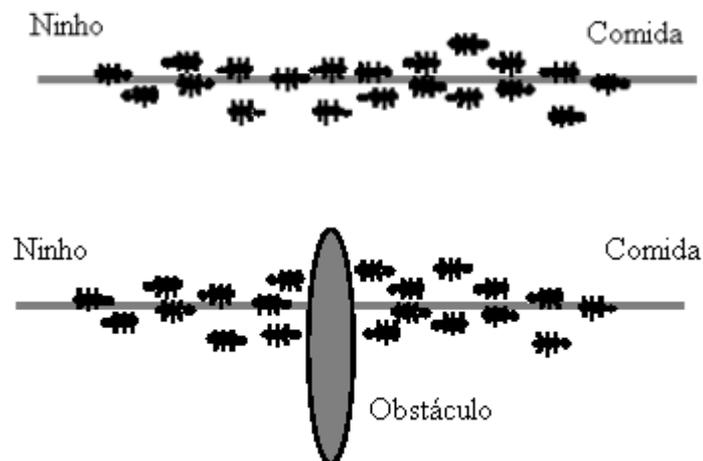


Figura 17–Caminhos trilhados por formigas entre o ninho e uma fonte de comida

Adaptado de: **(BECCENERI e SILVA NETO, 2009)**

Um outro fenômeno observado na natureza é a capacidade desses indivíduos em desviar de obstáculos e, novamente, optarem pelo caminho mais curto. Este fenômeno é justificado e ilustrado (vide figura 18) por (BOECHEL, 2003): *“embora todas as formigas se movam, aproximadamente, a mesma velocidade e depositem a trilha de feromônio, aproximadamente, a mesma taxa, é fato que se leva mais tempo para contornar obstáculos pelo seu lado maior do que pelo seu lado menor, o que faz com que a trilha de feromônio acumule-se mais rápido no lado mais curto. É a preferência das formigas pelas trilhas com altas taxas de feromônio que faz com que a acumulação continue maior no lado mais curto do obstáculo.”*



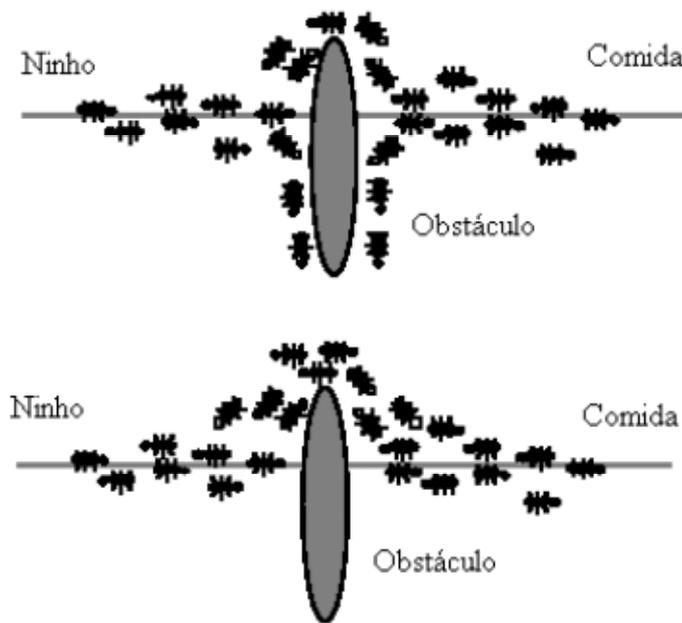


Figura 18–Caminhos trilhados por formigas entre seu ninho e uma fonte de comida, antes, durante e depois da inserção de um obstáculo. (BOECHEL, 2003)

4.1 Modelagem e ajustes do ACO

Para um melhor entendimento, a modelagem matemática do algoritmo ACO proposto, o passo a passo para a sua implementação e os valores assumidos pelos seus parâmetros são apresentados no item 5.3 deste trabalho.

A estipulação dos valores de acréscimo e evaporação dos feromônios é uma etapa importante no ajuste do ACO, de tal forma que evite a rápida convergência de todas as formigas à um caminho subótimo:

- Quanto a escolha dos valores iniciais e de acréscimo de feromônios, (DORIGO e THOMAS, 2004) expõem que “*um decréscimo na intensidade dos feromônios favorece a exploração de diferentes caminhos, ao longo do processo de busca*”.
- Quanto à taxa de evaporação destes, (DORIGO e THOMAS, 2004) dizem que favorecem o esquecimento de erros ou de escolhas pobres, realizadas anteriormente, e permite uma melhoria contínua.

Se, por um lado é necessário a inserção de taxas de acréscimo e evaporação de feromônios, por outro, são prejudiciais quando demasiadamente elevadas.

(DORIGO e THOMAS, 2004) demonstram, em um experimento, que existe um ponto ótimo intermediário neste ajuste.

Como não há um valor fixo das taxas que atenda aos diferentes problemas, o ponto ótimo deste ajuste deve ser encontrado em cada desenvolvimento.

Como conclusão, o equilíbrio dos parâmetros é expresso por (BECCENERI, STEPHAN, *et al.*, 2009): *“a combinação do reforço positivo (depósito de feromônio) com o negativo (evaporação), permite que se evite, na maioria dos casos, uma convergência prematura do algoritmo para soluções, possivelmente não ruins, mas talvez, longe da ótima. O comportamento cooperativo é outro conceito importante aqui: algoritmos de colônia de formigas fazem uso da exploração simultânea de diferentes soluções por meio de diferentes formigas. As melhores formigas influenciam a exploração das demais, através das estratégias empregadas para atualizar o feromônio nos caminhos.”*

4.2 Convergência do ACO

Diversos autores demonstram que o algoritmo de colônia de formigas, se adequadamente ajustado, converge para soluções muito próximas da ótima.

(GUTJAHR, 2000 e 2002) provou que um sistema ACO genérico converge para a solução ótima em certas condições: *“nós não conseguimos demonstrar a convergência à solução ótima com probabilidade igual a 1, mas somente uma convergência com uma probabilidade que pode ser arbitrariamente próxima de 1, através da escolha adequada dos parâmetros da heurística. Em particular, demonstramos que existem duas alternativas possíveis para o aumento da probabilidade de convergência: o aumento do número de agentes ou o decréscimo do fator de evaporação.”*

(STUTZLE e DORIGO, 2002) também demonstraram um outro tipo de prova de convergência do algoritmo ACO: *“nós demonstramos que é garantido que o ACO encontre uma solução ótima, com uma probabilidade que pode ser arbitrariamente próxima de um, caso seja proporcionado um tempo suficiente”.*

Entretanto, (DORIGO e THOMAS, 2004) questionam estas comprovações quanto ao quesito do tempo necessário: *“Entretanto, as comprovações nada dizem a respeito do tempo necessário para que se encontre a solução ótima, o qual pode ser astronomicamente elevado”.*

4.3 Aplicações do ACO

Dentre as diferentes aplicações dos algoritmos ACO, destacam-se as apresentadas em (DORIGO e THOMAS, 2004), (BLUM e LÓPEZ-IBÁÑEZ, 2011) e (SERAPIÃO, 2009): seleção de rotas, atribuição quadrática, agendamento (*scheduling*), horários (*timetabling*), subconjunto (*subset*), aprendizado de máquinas, roteamento de redes, seleção de pacotes, coloração gráfica, processamento de imagens, ordenamento sequencial, mineração de dados, projeto de circuitos, projeto de redes de telecomunicações, redes de sensores sem fio, despacho econômico de carga, bioinformática, problemas industriais (como o ajuste de controladores PID), redes de distribuição de águas, otimização contínua, problemas dinâmicos, problemas multiobjetivos, problemas de manufatura, de linhas de montagem e de layout industrial, dentre outros.

5 METODOLOGIA PROPOSTA

Este capítulo apresenta a metodologia proposta no desenvolvimento de um algoritmo genético e um algoritmo de otimização inspirado em colônia de formigas para a geração coordenada de curvas de sobrecorrente de fase dependentes do tempo, na proteção de sistemas elétricos industriais radiais.

5.1 Coordenação da proteção de sobrecorrente dependente do tempo de sistemas elétricos industriais radiais

As subestações de sistemas industriais apresentam, em muitas aplicações, o diagrama esquemático mostrado na figura 19.

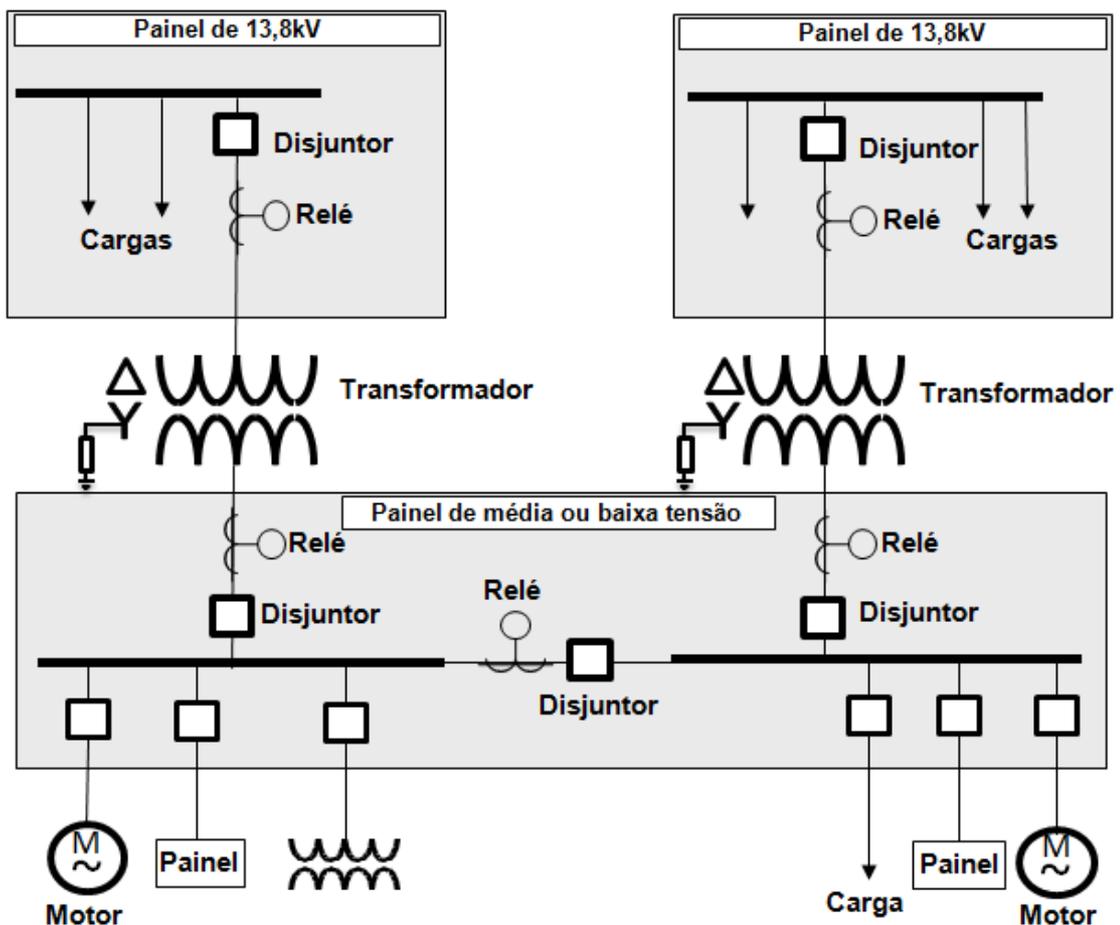


Figura 19 – Diagrama esquemático típico de sistema elétrico industrial redundante.

Esta é uma representação de um sistema redundante ou secundário seletivo, que é muito utilizada em indústrias cujo processo exige um sistema elétrico

confiável. Neste caso, a alimentação do painel de média ou baixa tensão ocorre por dois transformadores, alimentados por dois painéis de 13,8kV. O painel de média ou baixa tensão possui dois barramentos, interligados por um disjuntor de interligação.

Na quase totalidade dos casos, o nível de curto circuito do painel de baixa ou média tensão seria demasiado elevado, caso tanto os dois disjuntores de entrada quanto o de interligação ficassem fechados (energizados) concomitantemente. Por este motivo, se opta pelo intertravamento, ou seja, ou os dois disjuntores de entrada estão fechados, com o de interligação aberto ou este último encontra-se fechado, com apenas um disjuntor de entrada também fechado. Na primeira hipótese, se diz que o painel está operando em “duplo I”. Na segunda hipótese, o painel opera em “L”.

Os estudos de coordenação da proteção destes sistemas devem prever ambos os casos de operação. Entretanto, caso as cargas sejam idênticas nas duas barras do painel de média ou baixa tensão, o estudo mais restritivo refere-se ao caso em que o painel opera em “L”, pois haveria a necessidade de coordenação com mais um conjunto de relé e disjuntor (relé 1 e disjuntor 1). Isto é ilustrado na figura 20.

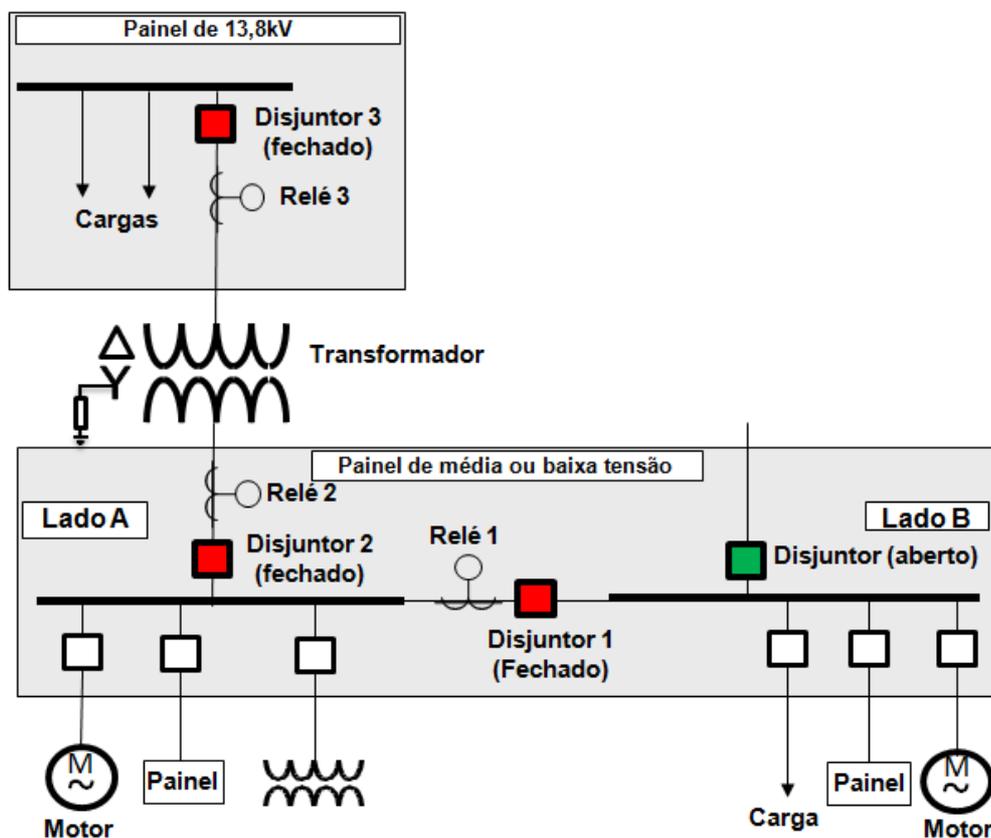


Figura 20 – Painel de média ou baixa tensão operando em “L”.

Para o caso de operação em “L”, o estudo de coordenação de sobrecorrente de fase consiste na coordenação dos tempos de atuação dos relés 1, 2 e 3, conforme figura 21, considerando-se o curto circuito no barramento mais distante (neste caso, no lado B). É desejado que o primeiro relé a enviar sinal para o seu respectivo disjuntor interromper o circuito seja o relé 1, por estar mais próximo da falta, implicando no desligamento de uma menor quantidade de cargas. Os relés 2 e 3 enviariam sinal para seus disjuntores, neste exemplo, caso o disjuntor do relé 1 não secciona o circuito, após o tempo de ajuste. Os relés 2 e 3, desta forma, possuem a função de *backup* ou retaguarda.

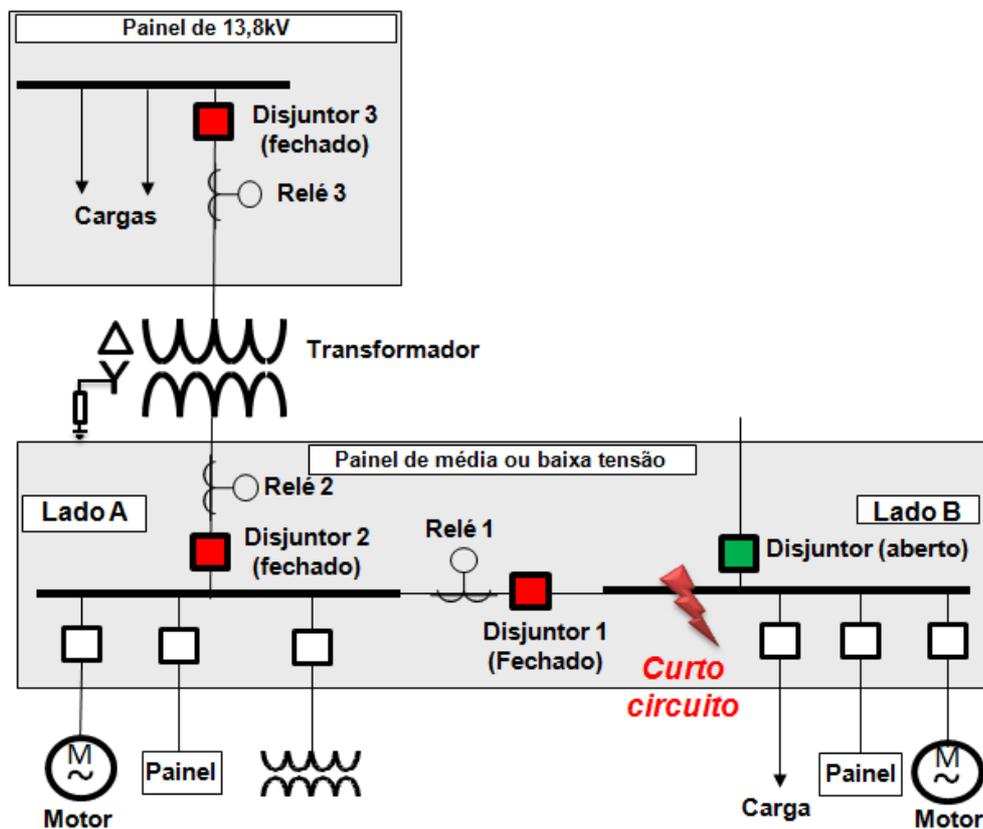


Figura 21 – Painel de média ou baixa tensão operando em “L”.

Este problema se configura na coordenação temporal de três relés em um sistema radial e as suas curvas devem assumir a ordem mostrada da figura 7, do capítulo 2.

Desta forma, para a definição das três curvas de tempo *versus* corrente, é necessário definir os parâmetros da equação 1, do capítulo 1, onde, para cada curva, temos três conjuntos de variáveis:

- Ajuste de tempo (TMS), responsável pelo ajuste vertical da curva.
- Tipo de curva (definida através de alfa, k, c), responsável pela sua inclinação ou grau de inversibilidade.
- Ajuste de corrente inicial (Gs), responsável pelo ajuste horizontal da curva.

5.2 Formulação do problema

A formulação do problema pode ser dividida em seis partes sequenciais, a seguir.

5.2.1 Escopo

O objetivo é coordenar três relés digitais num sistema industrial radial, conforme ilustrado nas figuras 7 e 21.

5.2.2 Geração do vetor binário

Foi concebido um vetor de 42 bits, de acordo com a figura 22.

Vetor de 42 bits

Figura 22 – Vetor binário que codifica as variáveis.

Este vetor é dividido em 9 partes e cada parte representa uma variável pré-definida. As 9 variáveis são:

- Ajuste de tempo ou TMS do relé 1.
- Tipo de curva (definida através de alfa, k, c) do relé 1.
- Ajuste de corrente inicial, Gs ou corrente de *pickup* do relé 1.
- Ajuste de tempo ou TMS do relé 2.
- Tipo de curva (definida através de alfa, k, c) do relé 2.

O valor de TMS de cada relé, portanto, é codificado em 8 bits. Como exemplo, caso o vetor cromossomo apresente seus 8 primeiros bits igual a 0000.0010, a tabela indicará que o valor de TMS a ser considerado no cálculo da curva do relé 1 é equivalente à 0,15.

O intervalo do TMS foi escolhido com base em manual de fabricante (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2007), que indica que os ajustes para curvas IEEE possuem o range de 0,5 até 15, com passo de 0,01 e os ajustes para as curvas IEC possuem o range 0,05 até 1,00, com passo de 0,01. Portanto, o intervalo completo para contemplar todas as curvas seria de 0,05 até 15, com passo de 0,01, o que exigiria uma codificação de 11 bits. Tendo em vista que, na prática dos projetos de sistemas elétricos industriais, dificilmente os ajustes de TMS se aproximam de 10 e tendo em vista que uma codificação menor de bits implica em um menor tempo de processamento, considerou-se razoável utilizar o intervalo de 0,05 até 12,8, com passo de 0,05, implicando numa codificação de 8 bits.

Os parâmetros dos seis possíveis tipos de curva (de acordo com a IEC 60255-151, apresentados na tabela 1 do capítulo 1) e a conversão dos seus possíveis valores por uma representação binária é mostrada na tabela 4.

Tabela 4 – Codificação binária dos parâmetros k, alfa e c, que indicam o tipo de curva

Tipo de Curva (Tempo x Corrente)	Parâmetros			Representação Binária		
	k	α	c			
Inversa	0,14	0,02	0	0	0	0
Muito Inversa	13,5	1	0	0	0	1
Extremamente Inversa	80	2	0	0	1	0
IEEE Moderadamente Inversa	0,052	0,02	0,114	0	1	1
IEEE Muito Inversa	19,61	2	0,491	1	0	0
IEEE Extremamente Inversa	28,2	2	0,122	1	0	1

Como exemplo, caso o vetor binário apresente o nono, décimo e décimo primeiro bits equivalentes à 010, a tabela indicará que a curva a ser considerada é a extremamente inversa e que os valores assumidos pelos parâmetros serão: $k = 80$; $\alpha = 2$ e $c = 0$.

Para codificação dos parâmetros k, alfa e c, foram utilizados 3 bits, totalizando 8 possíveis combinações. Entretanto, apenas 6 tipos de curvas são utilizadas. As combinações binárias adicionais, correspondentes a 110 e 111 podem ser geradas

pelos algoritmos e, neste caso, os vetores são mantidos nos algoritmos, seguindo o fluxo normal. Porém, é considerado que a curva do relé que recebe esses bits adicionais equivale a uma reta no eixo X (abscissa). O vetor, portanto, receberá uma avaliação ruim, sendo submetido à aplicação das penalidades descritas no item 5.2.5.

A tabela 5 mostra a conversão dos valores binários para os valores assumidos pela variável Gs, ou corrente de ajuste.

Tabela 5 – Representação binária das correntes de ajuste dos relés (Gs)

Gs (corrente de ajuste)	Representação Binária		
Corrente de ajuste arbitrada* 0,97	0	0	0
Corrente de ajuste arbitrada* 0,98	0	0	1
Corrente de ajuste arbitrada* 0,99	0	1	0
Corrente de ajuste arbitrada	0	1	1
Corrente de ajuste arbitrada* 1,01	1	0	0
Corrente de ajuste arbitrada* 1,02	1	0	1
Corrente de ajuste arbitrada* 1,03	1	1	0
Corrente de ajuste arbitrada* 1,04	1	1	1

Os valores de corrente de ajuste (Gs) arbitradas, utilizados neste estudo, são os anteriormente configurados pelo estudo de proteção convencional. A partir deste valor, o algoritmo cria uma pequena faixa de ajuste, de tal forma a permitir uma liberdade para a melhoria nos tempos de coordenação entre as curvas, com uma variação não muito significativa no valor de ajuste de corrente. O passo de 1% do valor da corrente de ajuste arbitrada foi escolhido.

5.2.4 Cálculo das diferenças temporais

Uma vez que os algoritmos de otimização geraram os vetores binários, uma sub rotina realiza a transformação de cada vetor em um conjunto de três curvas de sobrecorrente, de acordo com as tabelas de conversão e com a equação 1.

Na sequência, são calculadas as diferenças temporais entre as curvas de sobrecorrente, de acordo com o ilustrado na figura 7, para dois valores de corrente:

a corrente de curto circuito trifásica e a corrente $2 \times G_s$. Estas equivalem aos valores iniciais e finais da região efetiva da figura 5.

A figura 24 consolida o exposto no parágrafo anterior, mostrando o início e o final da região efetiva, considerada no estudo, e as diferenças temporais entre os relés para estes dois valores de corrente. Como os ajustes de corrente (G_s) são diferentes para cada relé, foi considerado o do relé 1 (G_{s1}) como referência e, portanto, o tempo $2 \times G_{s1}$ como inicial.

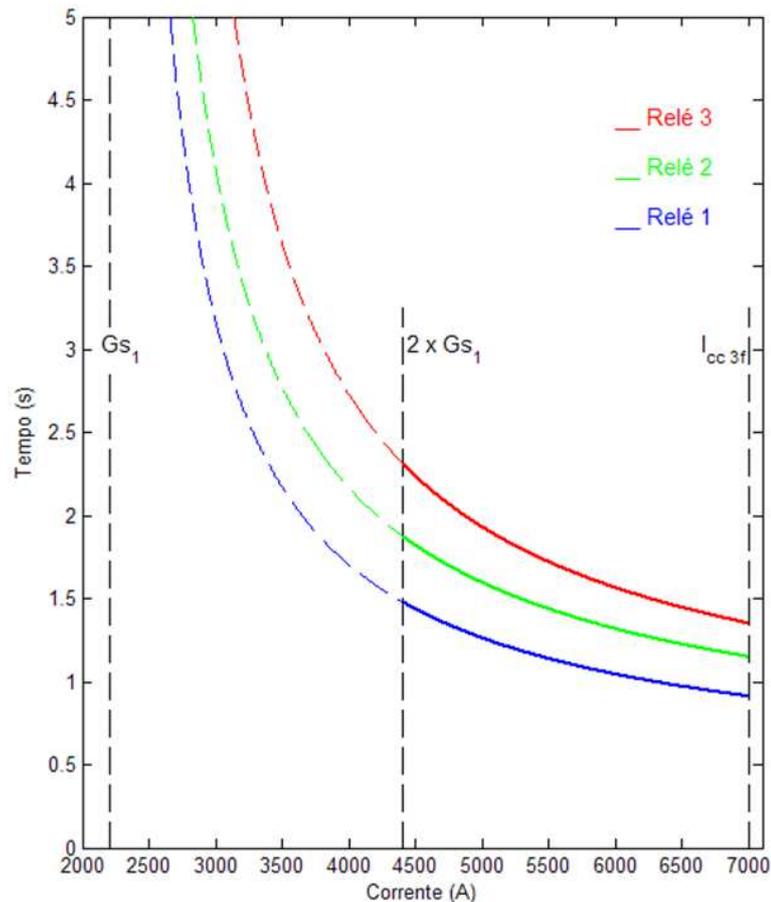


Figura 24—Coordenação entre três relés digitais, considerando as diferenças temporais nos valores de corrente de $2G_s$ e de curto circuito trifásica.

Da figura 24:

$\Delta t_{3\Phi10}$, $\Delta t_{3\Phi21}$ e $\Delta t_{3\Phi32}$ são as diferenças de tempo de atuação, respectivamente, do relé 1 e o tempo zero, dos relés 2 e 1 e dos relés 3 e 2, no valor da corrente de curto circuito trifásica;

Δt_{INI10} , Δt_{INI21} e Δt_{INI32} são as diferenças de tempo de atuação, respectivamente, do relé 1 e o tempo zero, dos relés 2 e 1 e dos relés 3 e 2, no valor da corrente inicial do intervalo (2Gs).

5.2.5 Penalidades / Restrições

Caso o vetor gerado represente curvas que não atendam aos requisitos de coordenação ou às restrições de cada sistema, uma sub rotina gera valores de penalidade, para que aquele vetor fique mal avaliado.

Foram estabelecidos cinco tipos de penalidades a serem somadas com o valor de avaliação do vetor. Cada estudo de caso pode ter um ou mais tipo de penalidade, dependendo de seus limites (restrições) preestabelecidos ou mesmo para que a coordenação não assuma valores indevidos.

O valor de cada penalidade foi estabelecido de forma que a avaliação do indivíduo menos apto, porém que atenda a todas as restrições, seja melhor do que a avaliação de qualquer indivíduo que não atenda a pelo menos uma das restrições.

- o Penalidade 1 – o relé 1 deve passar acima de determinado ponto:

O primeiro tipo de penalidade surge de uma possível restrição do sistema, pré-estabelecida pelo especialista, em que a curva do relé mais a jusante, denominado relé 1, deve passar acima de um determinado ponto do gráfico, conforme ilustrado nas figuras 25 e 26. Este ponto equivale ao joelho da curva de acionamento do maior motor à jusante, adicionado ao valor de corrente de plena carga do barramento. O objetivo da coordenação com este ponto é impedir a atuação do relé 1 na mais restritiva das condições normais de operação, evitando que o relé 1 possa atuar indevidamente. Caso o indivíduo avaliado tenha a curva passando abaixo do ponto especificado, o seu *fitness* ou função de aptidão será acrescido do valor da penalidade 1, equivalente a 10. Caso o sistema não possua esse tipo de restrição pré-estabelecida, este tipo de penalidade é desativado do algoritmo.

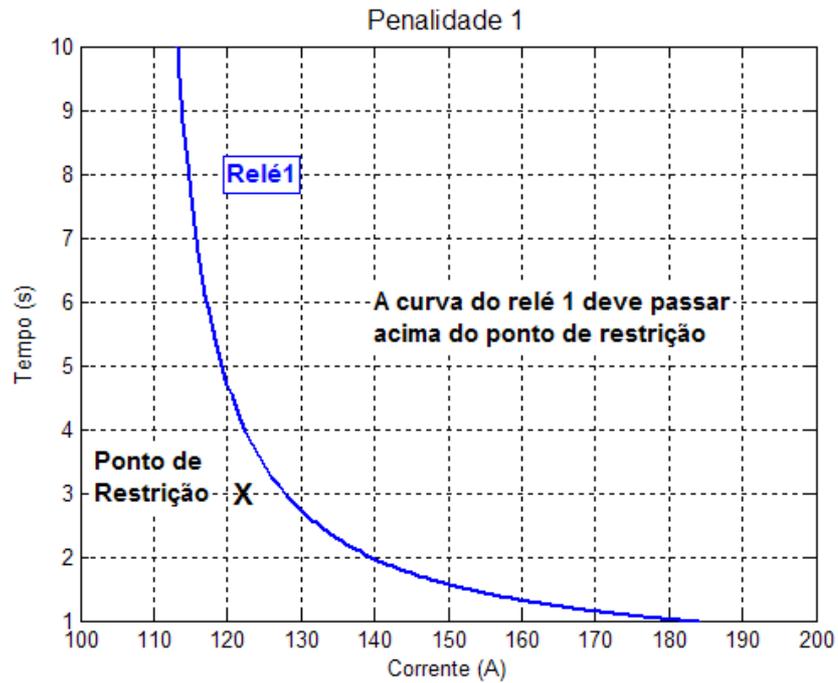


Figura 25—Ilustração da penalidade do tipo 1: a curva do relé 1 atende à restrição e o indivíduo não é penalizado.

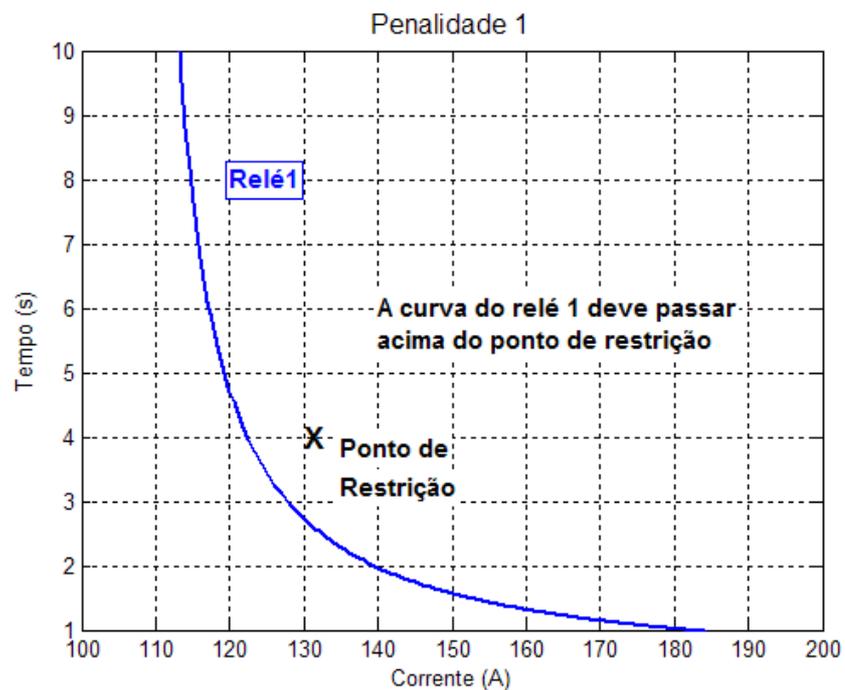


Figura 26— Ilustração da penalidade do tipo 1: a curva do relé 1 não atende à restrição e o indivíduo é penalizado.

- o Penalidade 2 – descoordenação de curvas:

O segundo tipo de penalidade é sempre ativo no algoritmo, pois não depende de uma possível restrição pré-estabelecida. O objetivo consiste em penalizar duas possíveis descoordenações indesejadas, dadas por: duas curvas se cruzarem e/ou duas curvas inverterm a ordem. Isto é ilustrado nas figuras 27 e 28. Caso o indivíduo avaliado tenha uma ou as duas descoordenações supracitadas, o seu *fitness* ou função de aptidão será acrescido do valor da penalidade 2, equivalente a 10, para cada dupla de relés que se descoordenem desta forma. Por exemplo, se esse tipo de descoordenação ocorrer para o par de relés 1 e 2, haverá a penalidade de 10. Se também ocorrer para os relés 2 e 3, haverá a penalidade de 20.

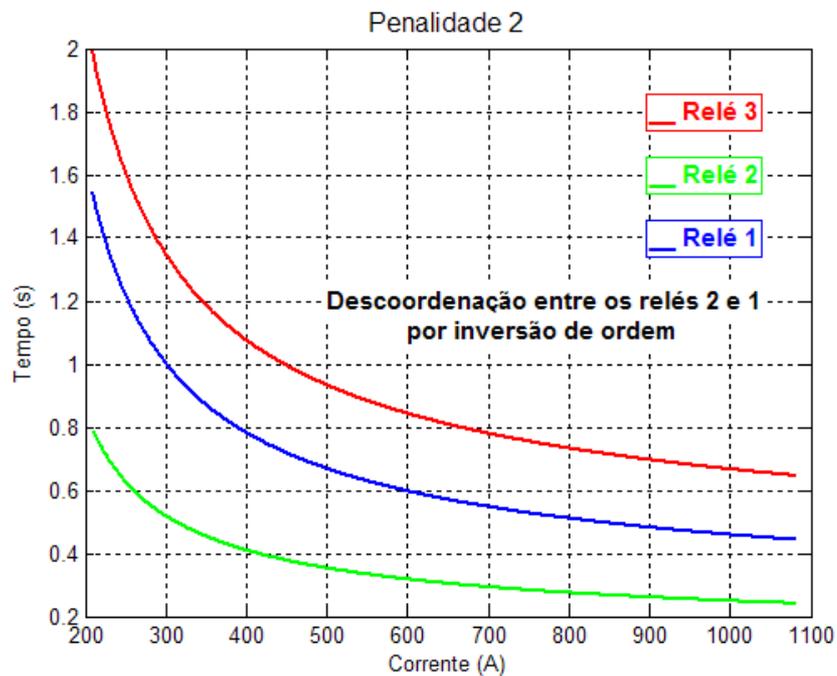


Figura 27–Ilustração da penalidade do tipo 2: a curva do relé 1 está incorretamente acima da curva do relé 2 e o indivíduo é penalizado.

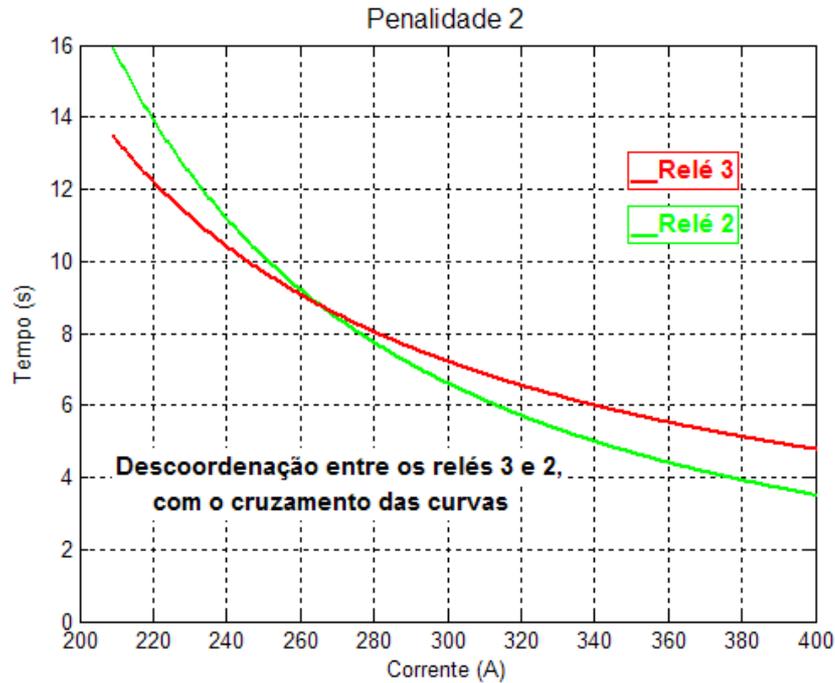


Figura 28– Ilustração da penalidade do tipo 2: as curvas dos relés 2 e 3 se cruzam, invertendo a coordenação, e o indivíduo é penalizado.

- Penalidades 3 e 4 – descoordenação com relés à jusante:

O terceiro e o quarto tipos de penalidade surgem de uma possível restrição do sistema, preestabelecida pelo especialista, em que a curva do relé 1 deve passar acima de uma curva ou de uma reta com tempo definido. Isto é ilustrado nas figuras 29, 30 e 31, onde o relé 1 deve passar 0,2s acima da curva do relé do alimentador e 0,2s acima do eixo zero, na região acima da atuação da função 50 do alimentador, para permitir seletividade com este. Caso o indivíduo avaliado tenha a curva passando abaixo de um valor pré-estabelecido (por exemplo, abaixo de 0,2s, em qualquer ponto), a sua função de aptidão é acrescida do valor da penalidade 3, equivalente a 10. Caso o indivíduo avaliado tenha a curva passando abaixo da curva ou da reta especificada, o seu *fitness* ou função de aptidão será acrescido do valor da penalidade 4, equivalente a 10.

Caso o sistema não possua os tipos de restrição pré-estabelecidas 3 e 4, estas penalidades são desativadas do algoritmo. A penalidade tipo 4 permite que o relé 1 se coordene com a curva do relé de proteção do motor, do alimentador de painel ou qualquer outro dispositivo à sua montante. A penalidade tipo 3

permite que o relé 1 se coordene com a função 50 (sobrecorrente de tempo definido instantânea) destes.

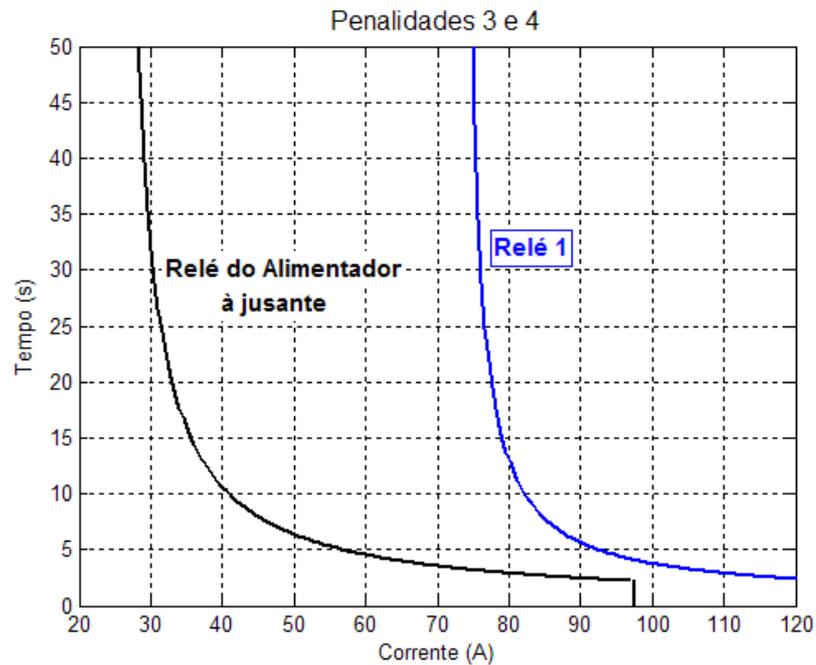


Figura 29– A curva do relé 1 atende às restrições de passar 0,2s acima da curva do relé do alimentador (equivalente à penalidade do tipo 4), e 0,2s acima do eixo zero (equivalente à penalidade do tipo 3). O indivíduo não é penalizado.

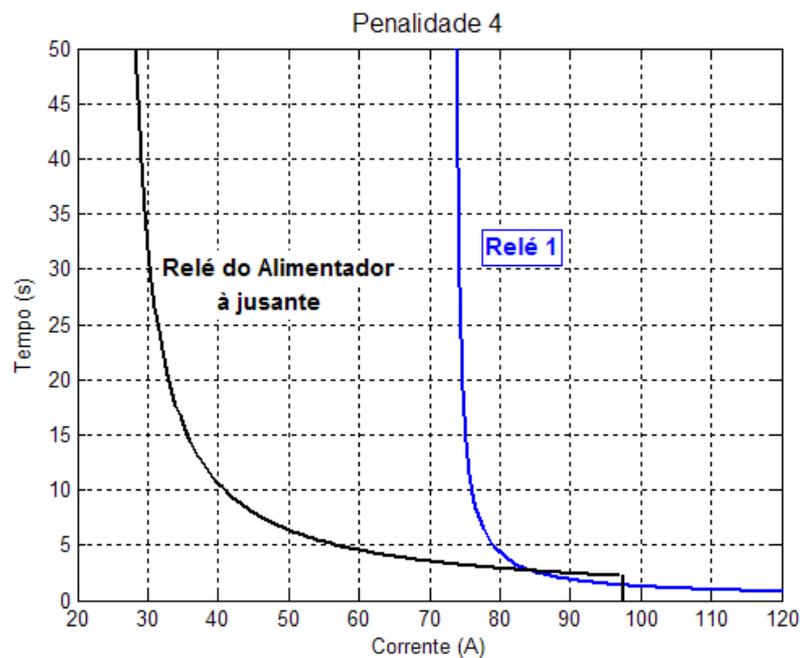


Figura 30– A curva do relé 1 não atende à restrição de passar 0,2s acima da curva do relé do alimentador (equivalente à penalidade do tipo 4). O indivíduo é penalizado.

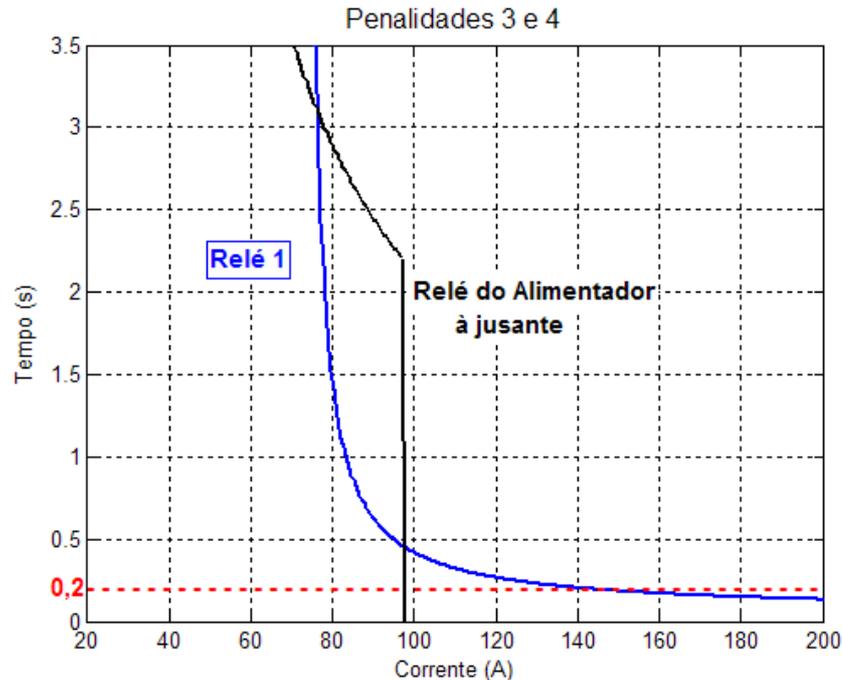


Figura 31– A curva do relé 1 não atende tanto à restrição de passar 0,2s acima da curva do relé do alimentador (equivalente à penalidade do tipo 4), quanto à de passar 0,2s acima do eixo zero (equivalente à penalidade do tipo 3) . O indivíduo é penalizado duplamente.

o Penalidade 5 – Suportabilidade do transformador:

A penalidade 5 refere-se à proteção do transformador quanto a uma corrente de curto circuito, levando-se em conta a sua suportabilidade térmica e mecânica.

Os transformadores, ao serem submetidos a correntes elevadas (curto circuito) podem sofrer danos térmicos e mecânicos, caso os valores de corrente e de tempo excedam suas curvas de suportabilidade. Estas curvas são apresentadas na recomendação IEEE Std C57.12.00 (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2010) e variam conforme a categoria do transformador, sendo divididas nas categorias I (de 5 a 500 kVA monofásico ou de 15 a 500 kVA trifásico), II (de 501 a 1667 kVA monofásico ou de 501 a 5000 kVA trifásico), III (de 1668 a 10000 kVA monofásico ou de 500 a 30000 kVA trifásico) e IV (acima de 10000 kVA monofásico ou de 30000 kVA trifásico). Estas curvas levam em consideração o fato de que os danos nos transformadores são cumulativos e que o número de faltas a que possam ser

submetidos, ao longo da vida útil, é inerentemente diferente para cada tipo de aplicação.

É prática usual, nos estudos de coordenação da proteção, representar, ao invés do traçado total da curva, por simplificação, apenas o ponto inferior da curva de suportabilidade, denominado “Ponto ANSI”. Segundo (CAMINHA, 1977), o Ponto ANSI “*corresponde ao máximo valor de corrente simétrica de curto-circuito que o transformador pode suportar durante certo tempo, determinado pelas normas técnicas ANSI*”. Caminha apresenta como determinar o ponto ANSI, a partir do valor de impedância do transformador (vide tabela 6).

Tabela 6 – Determinação do ponto ANSI ($I_{cc,max}$ simétrico x tempo admissível) a partir da impedância do transformador (CAMINHA, 1977)

Impedância % do transformador	I_{cc} max simétrico, em múltiplo de I_n (A)	Tempo admissível, em segundos
4%	$25 I_n$	2
5	$20 I_n$	3
6	$16,6 I_n$	4
7	$14,3 I_n$	5

Na tabela 6, a corrente de curto circuito máxima se refere a corrente trifásica. O ponto ANSI para uma corrente de curto circuito monofásica no secundário de um transformador delta-estrela aterrado equivale a 0,58 vezes do valor indicado na tabela 6. Este, por ser mais restritivo, é o que foi considerado nas curvas de coordenação.

A curva de atuação do relé à montante (relé 3) deve ficar abaixo do ponto ANSI monofásico do transformador, ou seja, o relé à montante deve atuar antes de um possível dano a este equipamento, por conta de uma elevada corrente. Neste trabalho, caso o indivíduo avaliado tenha esta curva passando acima do ponto ANSI monofásico, o seu *fitness* ou função de aptidão será acrescido do valor da penalidade 5, equivalente a 10.

Ainda sobre a relação entre as curvas e o transformador, a curva do relé 3 deve passar acima do ponto de corrente x tempo de energização do transformador. Na energização, o transformador consome uma corrente

transitória de valor elevado, denominada corrente de magnetização ou *inrush*. Caso a curva do relé 3 esteja abaixo deste ponto, este relé aciona o desligamento do disjuntor toda a vez que se tentar energizar o transformador.

Para os estudos de caso, as correntes de *inrush* duram um décimo de segundo. Portanto, uma vez que, para todos os estudos de caso: o relé 1 deve passar acima de 0,2s em qualquer parte da curva; o relé 2 deve passar acima de 0,2s da curva do relé 1; e o relé 3 deve passar acima de 0,2s da curva do relé 2; não foi necessário inserir penalidade para a curva do relé 3 passando abaixo de 0,1s, na corrente de *inrush*, para este trabalho. Entretanto, esta restrição pode ser habilitada em trabalhos futuros, com configurações diferentes. A figura 32 ilustra as curvas dos relés coordenadas com o ponto ANSI monofásico e com o ponto de *inrush* do transformador.

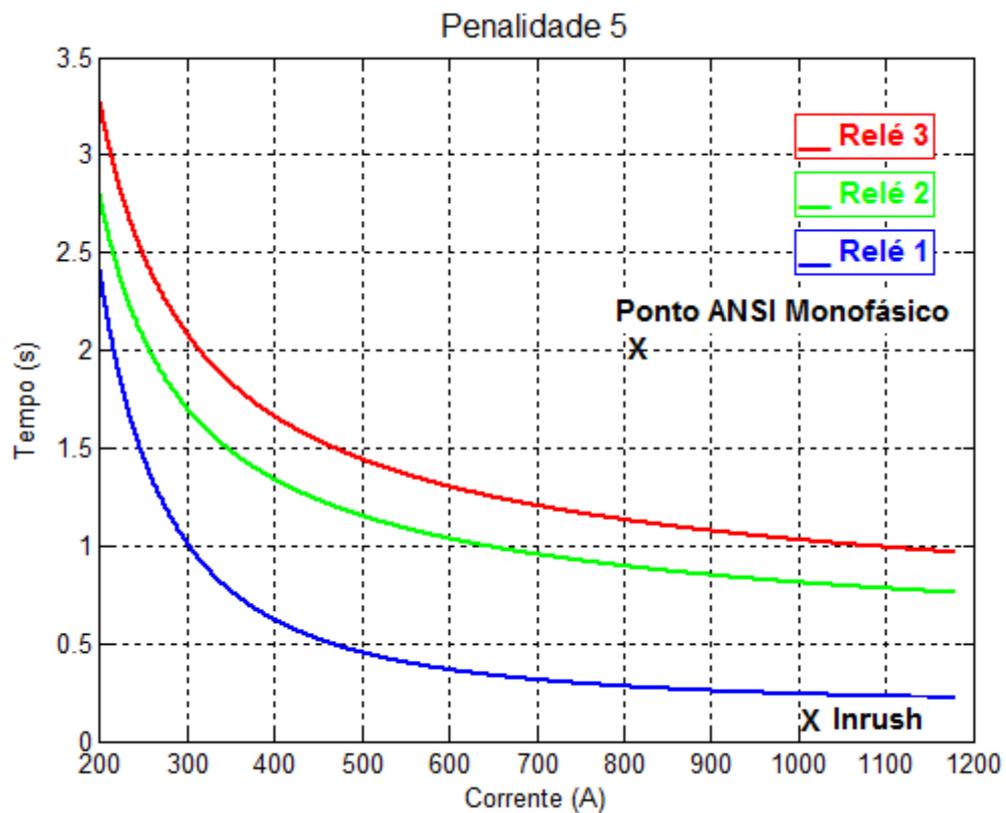


Figura 32– Limitações do transformador: ponto ANSI e *Inrush*. A penalidade 5 se aplica caso a curva do relé 3 passe acima do ponto ANSI, o que não ocorreu.

5.2.6 Avaliação ou Função Objetivo:

Conforme apresentado nos itens 6.2.2 até 6.2.5, os algoritmos de otimização geram os vetores binários, uma sub rotina (com uma tabela de conversão) realiza a transformação de cada vetor em um conjunto de três curvas e, na sequência, são calculadas as diferenças temporais entre as curvas e aplicadas as possíveis penalidades.

Por fim, cada vetor (cromossomo ou localização da formiga) é avaliado quanto à sua aptidão ao meio (no caso do GA) ou recebe um valor de avaliação proporcional à distância até um valor ótimo ideal (no caso do ACO).

As funções desenvolvidas para realizar a avaliação dos vetores são quase idênticas para os casos do GA e do ACO, com exceção do sinal negativo para a primeira aplicação. A justificativa para o sinal negativo na função de aptidão dos cromossomos se deve a uma característica do programa computacional utilizado, o GAOT (*Genetic Algorithm for Function Optimization*), desenvolvido por (HOUCK, JOINES e KAY, 1996) da Universidade de Carolina do Norte, no ambiente MATLAB. Como o GAOT apenas maximiza funções e a aplicação é de minimização, foi necessária a utilização do sinal negativo. A função de aptidão ou função objetivo que avalia os cromossomos do algoritmo genético é explícita na equação 3.

$$Aptidão = -\left[\sum \Delta t_{3\Phi} + 0.2 \sum \Delta t_{INI} + \sum Pn\right] \quad (3)$$

A função de avaliação dos locais de visitação das formigas, no ACO, é representada na equação 4.

$$Avaliação = \left[\sum \Delta t_{3\Phi} + 0.2 \sum \Delta t_{INI} + \sum Pn\right] \quad (4)$$

Onde:

$\sum \Delta t_{3\Phi}$ é o somatório das diferenças temporais de atuação, no valor da corrente de curto circuito trifásico, entre:

- a curva 1 e 0,2s acima do tempo zero (ou da restrição, se houver);
- a curva 2 e 0,2s acima da curva 1;
- a curva 3 e 0,2s acima da curva 2.

$\sum \Delta t_{INI}$ é idêntico a $\sum \Delta t_{3\Phi}$, exceto pelo valor da corrente, que é a do início do intervalo considerado.

$\sum Pn$ é o somatório das penalidades que possam ser inseridas.

A figura 24 ilustra $\Delta t_{3\Phi}$ e Δt_{INI} . Os somatórios, então, equivalem a:

$$\sum \Delta t_{3\Phi} = [(\Delta t_{3\Phi10} - 0,2) + (\Delta t_{3\Phi21} - 0,2) + (\Delta t_{3\Phi32} - 0,2)] \quad (5)$$

$$\sum \Delta t_{INI} = [(\Delta t_{INI10} - 0,2) + (\Delta t_{INI21} - 0,2) + (\Delta t_{INI32} - 0,2)] \quad (6)$$

$$\sum Pn = Pn_1 + Pn_2 + Pn_3 + Pn_4 + Pn_5 \quad (7)$$

Após a otimização, as diferenças temporais de atuação, no valor da corrente de curto circuito trifásico ($\sum \Delta t_{3\Phi}$), estão próximas de dois décimos de segundo. Para o caso do valor da corrente ser a do início do intervalo considerado, (2xGs) as diferenças temporais ($\sum \Delta t_{INI}$) frequentemente estão na ordem de um segundo. Portanto, de forma a ponderar os dois somatórios de tempo da função objetivo, deixando-os na mesma ordem de grandeza, utilizou-se um fator de 0,2 para multiplicar o termo $\sum \Delta t_{INI}$.

5.3 Estrutura e parâmetros do algoritmo genético (GA)

O programa computacional utilizado para o algoritmo genético foi o GAOT (*Genetic Algorithm for Function Optimization*), desenvolvido por (HOUCK, JOINES e KAY, 1996) da Universidade de Carolina do Norte, no ambiente MATLAB.

A estrutura do algoritmo genético utilizado pode ser representada em sete etapas, conforme a figura 33.



Figura 33– Fluxograma do algoritmo genético implementado.

A seguir, são apresentados os passos da implementação do algoritmo genético, para este trabalho.

1. Inicialização da população:

- a. Inicialmente, o algoritmo gera um conjunto de 100 vetores binários (ou seja, o tamanho da população é de 100 indivíduos ou cromossomos), com 42 bits, sendo o valor de cada bit selecionado de forma aleatória. A definição do número de 100 vetores considerou tanto uma faixa mais adotada na literatura resultados de experimentação prática, através dos estudos de caso.

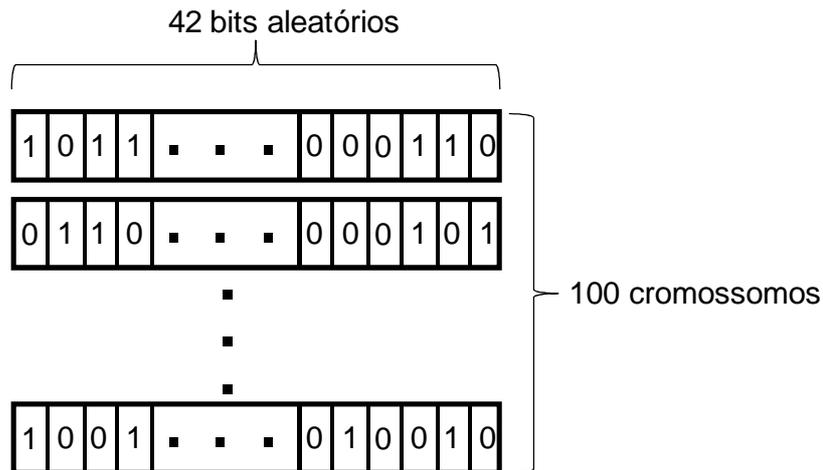


Figura 34– População inicial do algoritmo genético.

2. Aplicação das tabelas de conversão e avaliação da aptidão:

- a. Para cada vetor cromossomo, com seus atuais valores binários, é realizada a conversão em curvas de sobrecorrente, de acordo com as tabelas do item 5.2.3.
- b. São calculadas as diferenças temporais, de acordo com o item 5.2.4.
- c. São calculadas as penalidades, de acordo com o item 5.2.5.
- d. É calculada um valor de aptidão para o indivíduo, de acordo com equação (3).

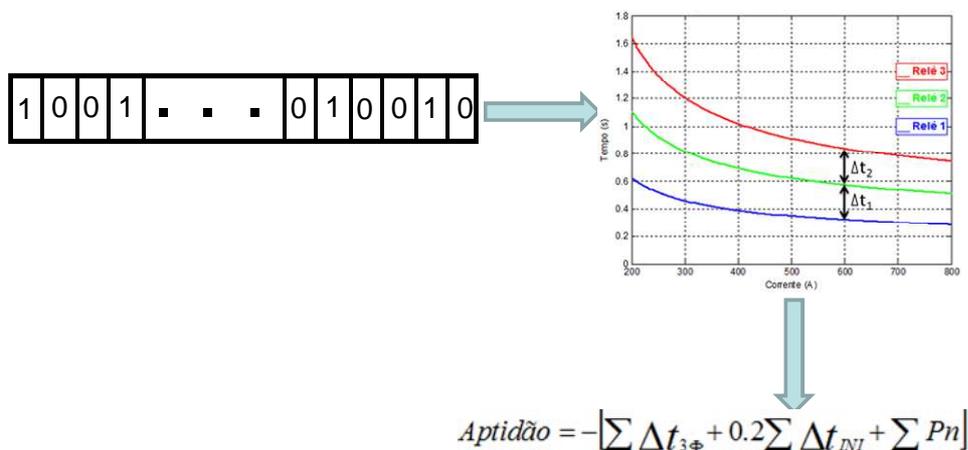


Figura 35– Atribuição de valor de aptidão ao cromossomo.

3. Operadores genéticos e elitismo:

- a. Elitismo: o indivíduo que recebeu o melhor valor de aptidão é mantido no próximo ciclo ou geração. Entretanto, este também participa do processo de seleção para as operações de reprodução (cruzamento) e mutação.
- b. Seleção: utilizou-se o método de seleção por normalização geométrica, conforme apresentado no item 4.2, com fator de 3%. Os valores negativos das avaliações (equação 3) dos cromossomos não permitem que se utilize o método da roleta simples. O método de seleção por normalização geométrica, assim como a roleta ponderada, apresenta a vantagem de normalizar a probabilidade de selecionar os indivíduos, característica importante para evitar que o algoritmo convirja precocemente a valores subótimos. O valor de 3% foi definido, considerando-se tanto uma faixa mais adotada e recomendada na literatura, quanto por experimentação prática, através dos estudos de caso, avaliando o(s) valor(es) que proporcionavam os melhores resultados.
- c. Cruzamento (*crossover*): uma porcentagem de 80% dos pares de indivíduos selecionados são submetidos ao operador *crossover*, que consiste na troca de partes entre os dois, gerando dois novos vetores (duas novas possíveis soluções), que substituem os anteriores. Foi utilizado o cruzamento simples ou em um único ponto, apresentado no item 4.2. O ponto de cruzamento é determinado, pelo algoritmo, de forma aleatória. O valor de 80% foi definido, considerando-se tanto uma faixa mais adotada e recomendada na literatura, quanto por experimentação prática, através dos estudos de caso, avaliando o(s) valor(es) que proporcionavam os melhores resultados.
- d. Mutação: foi utilizada a mutação binária, conforme descrita em no item 4.2 e em (HOUCK, JOINES e KAY, 1996), na qual cada bit de todos os indivíduos podem ser invertidos (de zero para um, ou vice-versa), segundo uma probabilidade, predeterminada, de 4%. Novamente, a definição do valor de 4% considerou tanto uma faixa mais adotada e recomendada na literatura, quanto por experimentação prática, através dos estudos de caso, avaliando o(s) valor(es) que proporcionavam os melhores resultados.

4. Aplicação das tabelas de conversão e avaliação da aptidão:

- a. Novamente, os indivíduos são avaliados quanto à aptidão e o processo continua até que o critério de parada seja atingido.
5. Condição de parada:
- a. O critério de parada definido foi o número máximo de gerações.
- b. Foi observado, nos estudos de caso, que até o número de ciclos na faixa de algumas dezenas (por volta da geração 20), há uma taxa elevada de melhoria da média da população (vide figura 36) Após esta faixa, a variação da média da população oscila, demonstrando que o algoritmo atinge uma faixa em que a aleatoriedade (em encontrar novos indivíduos mais aptos) é mais significativa (vide figura 37).

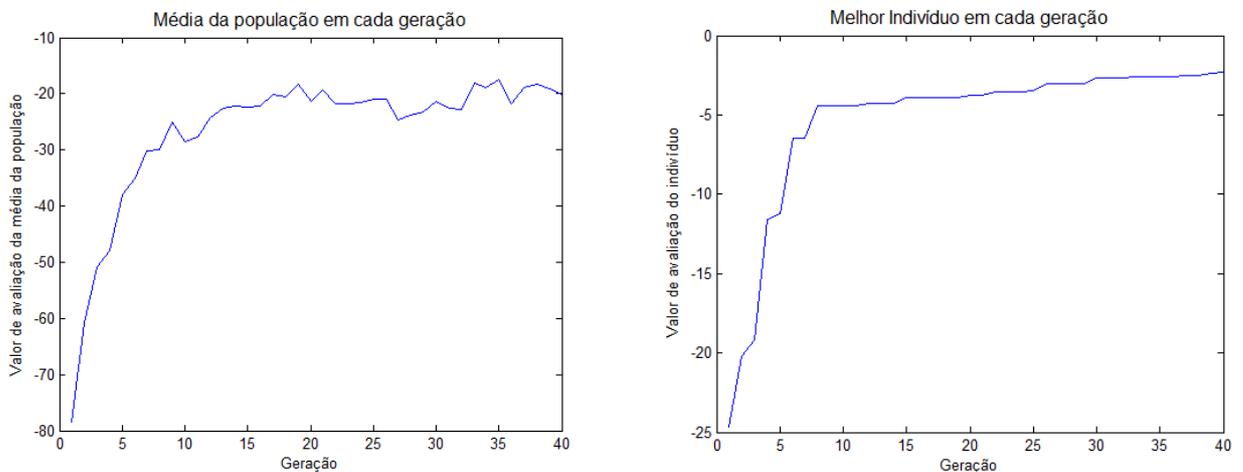


Figura 36– Evolução da média da população e do melhor indivíduo, nos primeiros ciclos: taxa elevada de variação. Figura obtida a partir do Estudo de Caso 2.

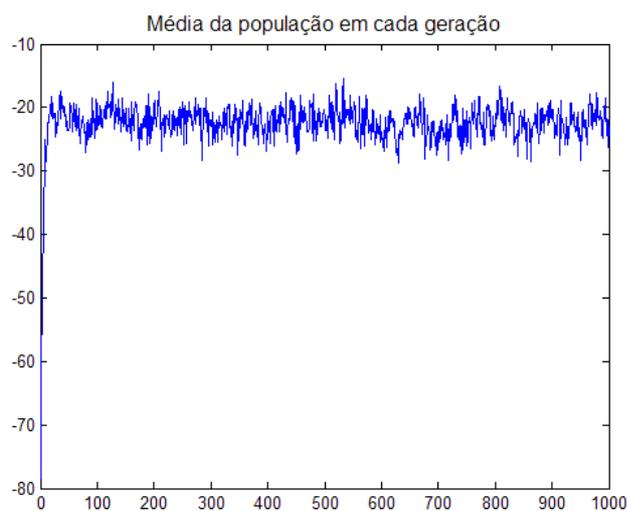


Figura 37– Evolução da média da população até o milésimo ciclo: taxa elevada de variação no início e oscilação no restante. Figura obtida a partir do Estudo de Caso 2.

- c. Não obstante a verificação descrita no item b, determinou-se, como critério de parada o número de 1000 gerações, tendo em vista que:
 - o o tempo para processamento do algoritmo nesta configuração apresentou ser da ordem de 1 minuto;
 - o mesmo um pequeno acréscimo na aptidão do melhor indivíduo é um ganho expressivo para o projeto do sistema de proteção.

5.4 Estrutura e parâmetros do algoritmo inspirado em colônia de formigas (ACO)

A metodologia utilizada para o desenvolvimento do ACO foi baseada no proposto por (BECCENERI, STEPHAN, *et al.*, 2009) e implementada no MATLAB. Entretanto, uma vez que a aplicação deste trabalho é diferente do apresentado por Becceneri, foram realizadas adaptações, que estão descritas neste capítulo.

O fluxograma básico do ACO implementado é representado na figura 38.

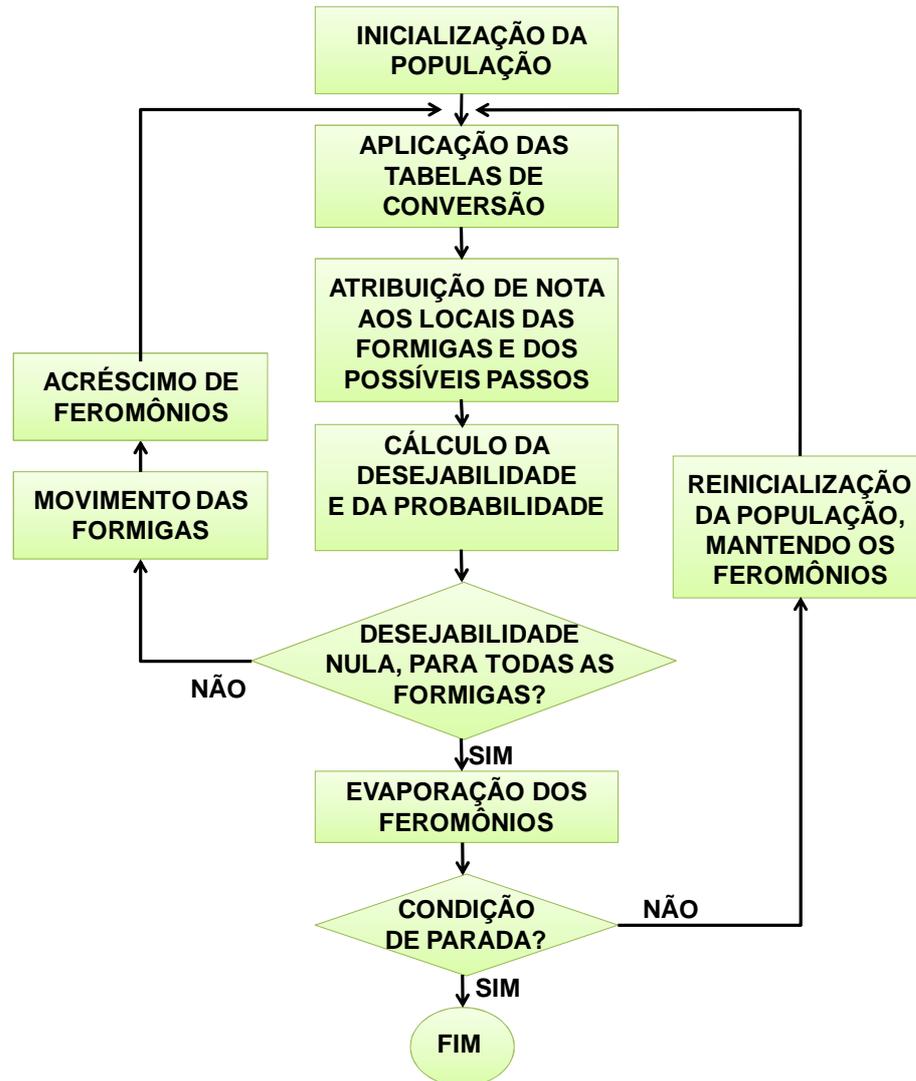


Figura 38– Fluxograma do algoritmo de otimização inspirado em colônia de formigas implementado.

A seguir, são apresentados os passos da implementação do algoritmo inspirado em colônia de formigas, para este trabalho:

1. Inicialização do Sistema:

- a. É criada uma população com 200 formigas ou vetores binários.
- b. Numa analogia com o percurso das formigas na natureza, os vetores binários equivalem às formigas. Os valores assumidos pelos vetores (formigas) equivalem ao local onde cada formiga está.
- c. Todos os vetores, inicialmente, assumiram o valor zero (42 bits zeros), de tal forma que o local inicial (ninho) de todas as formigas fosse o mesmo.

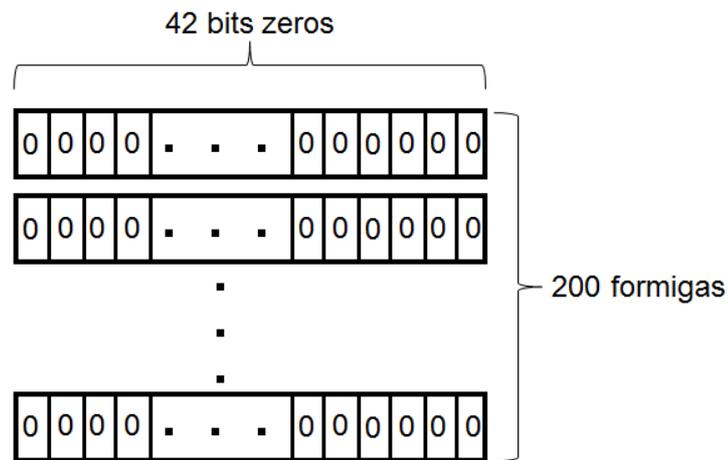


Figura 39– População inicial do algoritmo de ACO.

- d. Definiu-se uma quantidade de feromônio inicial, idêntica para todos os possíveis passos. Feromônio inicial = 0,01.
2. Aplicação das tabelas de conversão e avaliação do local onde estão as formigas:
- Para cada vetor formiga, com seus atuais valores binários, é realizada a conversão em curvas de sobrecorrente, de acordo com as tabelas do item 5.2.3.
 - São calculadas as diferenças temporais, de acordo com o item 5.2.4.
 - São calculadas as penalidades, de acordo com o item 5.2.5.
 - É calculada um valor de avaliação para o local onde está cada formiga, de acordo com equação (4).

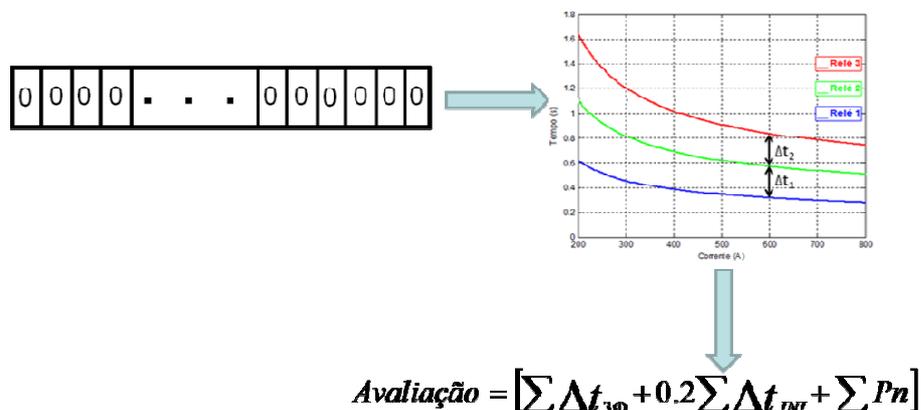


Figura 40– Avaliação do local onde está a formiga.

3. Possíveis passos:

- a. Ao contrário do proposto por (BECCENERI, STEPHAN, *et al.*, 2009), neste trabalho, cada formiga não conhece todos os locais possíveis de serem visitados. Isto, porque o espaço de busca desta aplicação tem a ordem de 2^{42} , o que ultrapassa os limites do Matlab para a geração e armazenamento de matrizes desta ordem. Desta forma, cada formiga conhece apenas os locais vizinhos ao que está, considerando-se local vizinho aquele em que há alteração de apenas um bit, no vetor da formiga.
- b. Cada formiga pode dar apenas um passo de cada vez, equivalente a mudança de apenas um bit de seu vetor. Cada formiga possui 42 possíveis passos, de cada vez.

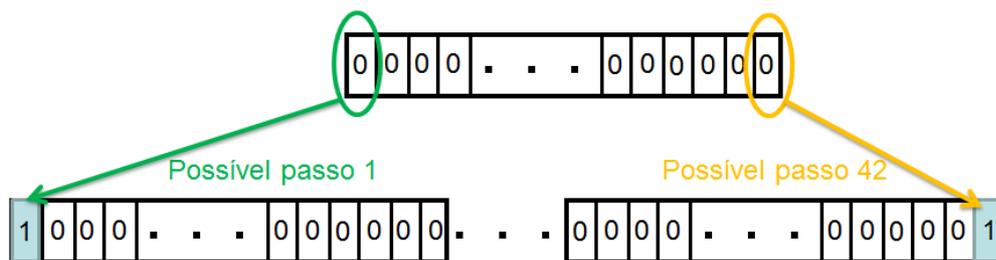


Figura 41– Possíveis passos de uma formiga: mudança de apenas 1 bit.

- c. Avaliação de cada possível passo:
Cada possível passo é avaliado da mesma forma que o descrito no item 2 (Avaliação das formigas).

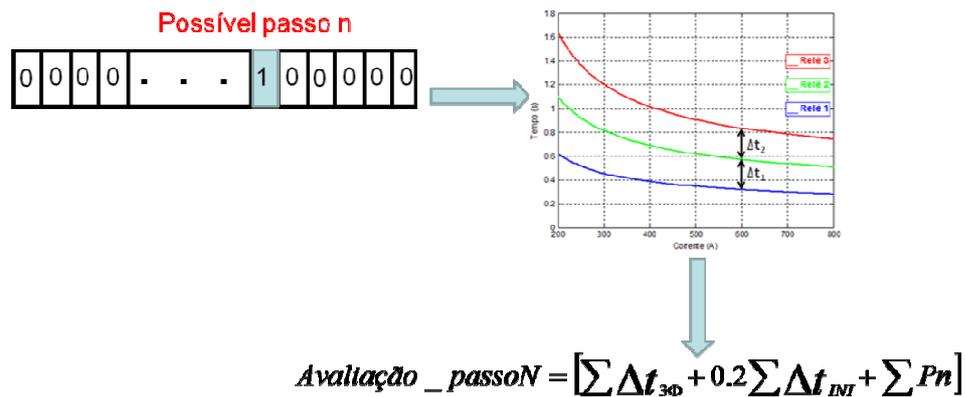


Figura 42– Avaliação do possível passo.

- d. Calcular a desejabilidade de cada possível passo:
- Se o valor de avaliação da formiga após o possível passo for melhor (menor) do que antes de dar o passo, então a desejabilidade é:

Desejabilidade (η) = Avaliação do local da formiga – Avaliação do passo N

- Se o valor de avaliação da formiga após o possível passo for igual ou pior (maior) do que antes de dar o passo, então a desejabilidade é:

Desejabilidade (η) = 0

Desta forma, a formiga só se moverá em direção aos passos que tiverem um incremento no valor de avaliação.

- e. Movimento da formiga:
- Para selecionar um nó a ser visitado, é usada uma função de probabilidade, baseado no proposto por (BECCENERI, STEPHAN, *et al.*, 2009). Uma formiga k, estando no nó i, calcula sua probabilidade de ir para o nó j na iteração t através da expressão:

$$P_{ij}^k(t) = \frac{[f_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{l=1:42} [f_{il}(t)]^\alpha [\eta_{il}]^\beta} \quad (8)$$

onde:

$f_{ij}(t)$ é a quantidade de feromônio entre os nós i e j, no instante t;

η_{ij} é a desejabilidade de ir do nó i para o nó j.

os parâmetros α e β controlam o peso relativo da quantidade (intensidade) do feromônio e da desejabilidade, respectivamente.

l são os possíveis passos da formiga k , no total de 42.

- o Neste trabalho, a partir de resultados experimentais, foram escolhidos α e β iguais a um.
- f. Acréscimo de feromônios:
 - o Uma vez que uma formiga tenha passado do nó i para o nó j , o feromônio depositado neste caminho é atualizado. Ao valor anteriormente existente, é acrescentado (por soma) 0.01.

4. Percurso das formigas:

- a. Os processos descritos nos itens 2 e 3 se repetem até que todas as formigas tenham alcançado um destino final. O destino final é tal que todos os possíveis passos, a partir dele, tenham desejabilidade nula.
- b. É armazenado o valor binário e o valor de avaliação do vetor final (local final) melhor bem avaliado.

5. Decréscimo de feromônio:

- a. Tendo todas as formigas alcançado um destino final, considera-se que um ciclo ou iteração se completou. A partir de então, o feromônio depositado em cada arco sofre uma evaporação. Seu valor é reduzido de uma constante de evaporação, arbitrada como 0,9. Desta forma, o feromônio anteriormente existente é multiplicado por 0,9, sendo a evaporação de 10%.

6. Iterações:

- a. Os processos descritos nos itens 2 a 5 são repetidos até um número arbitrado de 15 iterações. O valor 15 foi escolhido com base na análise dos estudos de caso, onde o algoritmo convergia com menor número de iterações.

6 RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados gerados pelos algoritmos propostos, através da realização de seis estudos de caso, a partir de um modelo de banco de dados baseado em um sistema elétrico industrial real. Os ajustes dos relés, gerados pelos algoritmos, são comparados com os existentes no sistema industrial, de forma a validar a proposta.

6.1 Considerações iniciais aos estudos de caso

Conforme descrito no item 5.1 e ilustrado na figura 18, para sistemas redundantes do tipo secundário seletivo, os estudos de coordenação da proteção devem prever os casos de operação nas configurações "duplo I" ou em "L". Sendo as cargas idênticas em ambos os lados do painel, entretanto, o estudo mais restritivo refere-se ao caso em que o painel opera em "L", pois haveria a necessidade de coordenação com mais um conjunto de relé e disjuntor (relé 1 e disjuntor 1). Todos os estudos de caso seguintes serão analisados desta forma.

Para fins desta aplicação, foi considerada uma alteração no conjunto da proteção do sistema industrial real. O sistema real contém as funções de proteção dos tipos sobrecorrente dependentes do tempo (função 51) e de tempo definido (função 50), da forma ilustrada na figura 43.

Na figura 43, é possível observar que os patamares da função 50 são idênticos para os relés 1 e 2, não havendo coordenação por tempo entre eles. Neste caso, numa corrente de falta na parte do gráfico correspondente à atuação desta função, os relés 1 e 2 atuariam, ao invés de apenas o relé 1. De acordo com a filosofia de proteção adotada para o sistema existente, a atuação conjunta dos relés 1 e 2 pode ser permitida. Entretanto, neste trabalho, estabelecemos como critério a necessidade de atuação do relé 1 anteriormente à atuação do relé 2, o que indica que as funções 50 dos relés 1 e 2 apresentam uma descoordenação.

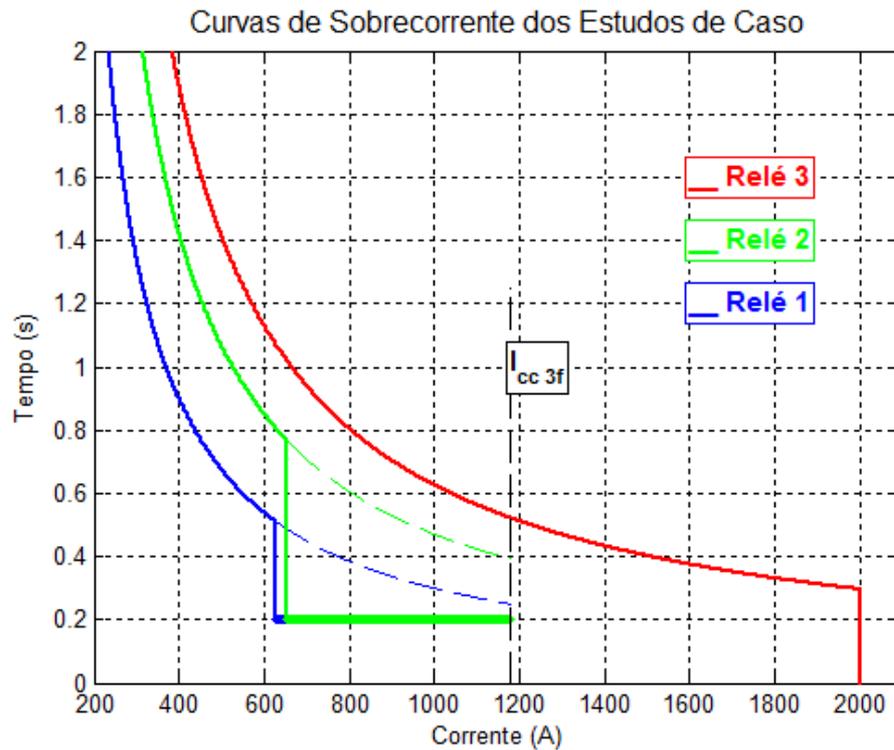


Figura 43– Curvas de sobrecorrente de um sistema industrial real.

Uma característica das curvas de sobrecorrente dependentes do tempo é tal que não há um limite à direita, apesar dos estudos considerarem um valor limite, que equivale ao valor da corrente de curto circuito trifásico ($I_{cc3\phi}$) ou ao valor de atuação da função 50, caso exista. Estes limites são justificados, conforme os itens abaixo.

I) No primeiro caso, não é esperado que a corrente de curto circuito seja maior do que o valor $I_{cc3\phi}$, não fazendo sentido perpetuar as curvas para além deste valor.

II) No segundo caso, pode ser estipulado um valor de corrente a partir do qual ocorra a atuação de outra função de sobrecorrente, além da 51: a função 50, que pode ter uma temporização definida (e não dependente do tempo) ou ter temporização nula.

Em todos os estudos de caso, o sistema industrial real possui a atuação da função 50 em determinados valores de corrente que, para os relés 1 e 2, são inferiores aos valores da corrente de curto circuito trifásico do barramento. A figura 43 ilustra o exposto pelas linhas "cheias" (não tracejadas). Portanto, este estudo de coordenação das curvas de função 51 poderia se resumir somente à região anterior

à de atuação da função 50 do primeiro relé (somente a parte das curvas que possui linha cheia, não tracejada).

Entretanto, este estudo considera a extensão das curvas de sobrecorrente temporizadas até o valor da corrente de curto circuito trifásica (linhas tracejadas, na figura 43), desprezando o efeito da outra função de proteção presente no sistema (função 50). Existem duas justificativas para isto, que são dadas por:

- o para estressar melhor os algoritmos de otimização, tendo em vista que o espaço de coordenação até o valor de atuação da função 50 é muito pequeno.
- o as curvas das funções 51 efetivamente continuam, mesmo após o valor ajustado para a função 50. Caso a função 50 não atue, por qualquer motivo, ou seja intencionalmente desabilitada, a função 51 irá atuar no valor referente à $I_{cc3\phi}$. Para estes casos, é desejável que as curvas das funções 51 estejam coordenadas.

Resumindo, em cada estudo de caso, ao representarmos o sistema existente, consideraremos apenas as curvas da função 51, objetos deste estudo, estendidas até o valor de $I_{cc3\phi}$.

A partir desta consideração, em cada estudo de caso, o tempo de atuação das curvas existentes do sistema industrial, para o valor de $I_{cc3\phi}$, torna-se inferior a 0,2s, indicando uma descoordenação inexistente. Este aspecto foi levado em consideração, para evitar uma análise incorreta.

6.2 Estudo de caso 1

O estudo de caso 1 consiste na coordenação dos relés 1, 2 e 3, mostrados na figura 44. O relé 1 deverá atender à restrição da curva de proteção do maior motor à jusante, da soma da carga máxima do barramento com a corrente de acionamento do maior motor e do valor de 0,2 segundos acima do tempo zero em qualquer ponto. O relé 3 deverá atender à restrição do ponto ANSI monofásico do transformador. Os três relés devem ter tempo mínimo de coordenação de 0,2 segundos entre si.

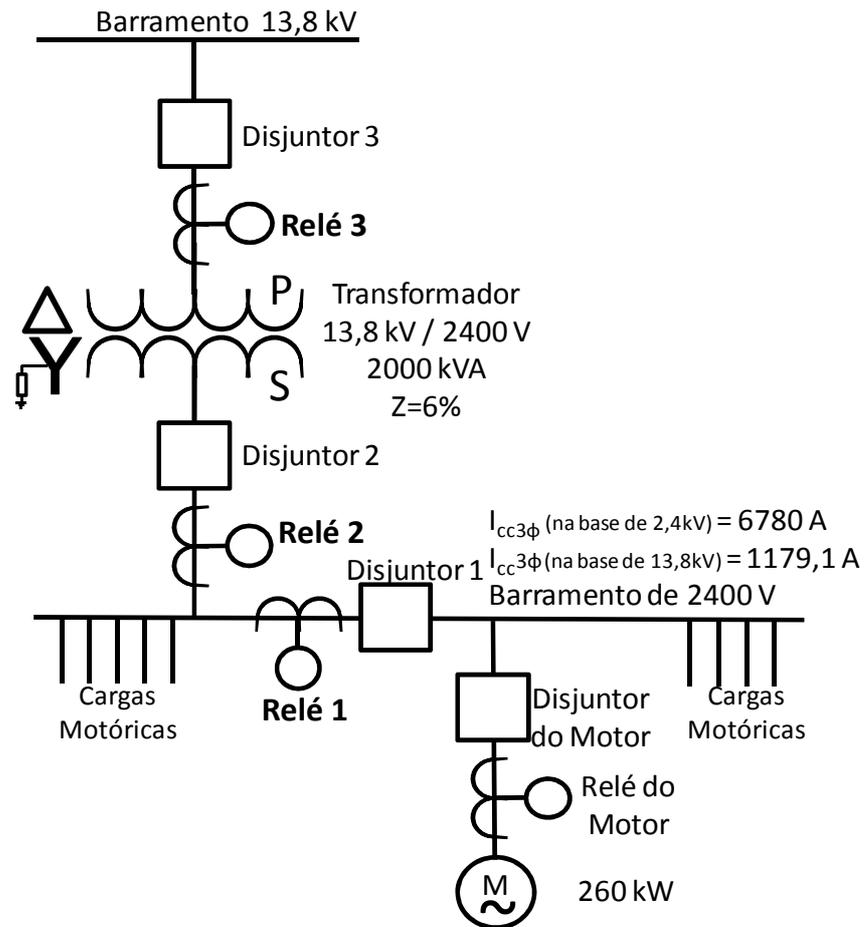


Figura 44– Sistema elétrico industrial referente ao estudo de caso 1.

6.2.1 Sistema existente na unidade industrial

Os ajustes dos relés existentes no sistema elétrico industrial do estudo de caso 1 são os descritos na tabela 7, obtidos por métodos convencionais de estudos de proteção com as curvas de sobrecorrente estendidas, conforme descrito no item 6.1. Os ajustes da tabela 7 resultam nos tempos de coordenação entre os relés apresentados na tabela 8 e nas curvas apresentadas na figura 45.

Tabela 7 - Configurações dos relés e tempos de atuação das curvas de sobrecorrente do sistema existente.

Configuração existente (curvas 51 estendidas)		
Relé 1	Curva	Muito Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,2
	Ajuste de corrente (Gs)	100,17
	Tempo máximo no intervalo	2,7092 s
	Tempo mínimo no intervalo	0,2507 s
Relé 2	Curva	Muito Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,3
	Ajuste de corrente (Gs)	104,35
	Tempo máximo no intervalo	4,4184 s
	Tempo mínimo no intervalo	0,3933 s
Relé 3	Curva	Muito Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,4
	Ajuste de corrente (Gs)	104
	Tempo máximo no intervalo	5,8500 s
	Tempo mínimo no intervalo	0,5224 s

Tabela 8 - Tempos de coordenação das curvas de sobrecorrente do sistema existente.

Configuração existente (curvas 51 estendidas)	
Diferença mínima de tempo entre as curvas dos relés 2 e 1	0,1426 s*
Diferença mínima de tempo entre as curvas dos relés 3 e 2	0,1292 s*
Diferença de tempo de atuação, no valor de $I_{cc3\phi}$ entre as curvas dos relés 2 e 1	0,1426 s*
Diferença de tempo de atuação, no valor de $I_{cc3\phi}$ entre as curvas dos relés 3 e 2	0,1292 s*

* Os valores inferiores a 0,2s, para $I_{cc3\phi}$, são devidos à extensão das curvas, não representando uma descoordenação no sistema real, pois neste caso a coordenação foi realizada considerando a função 50.

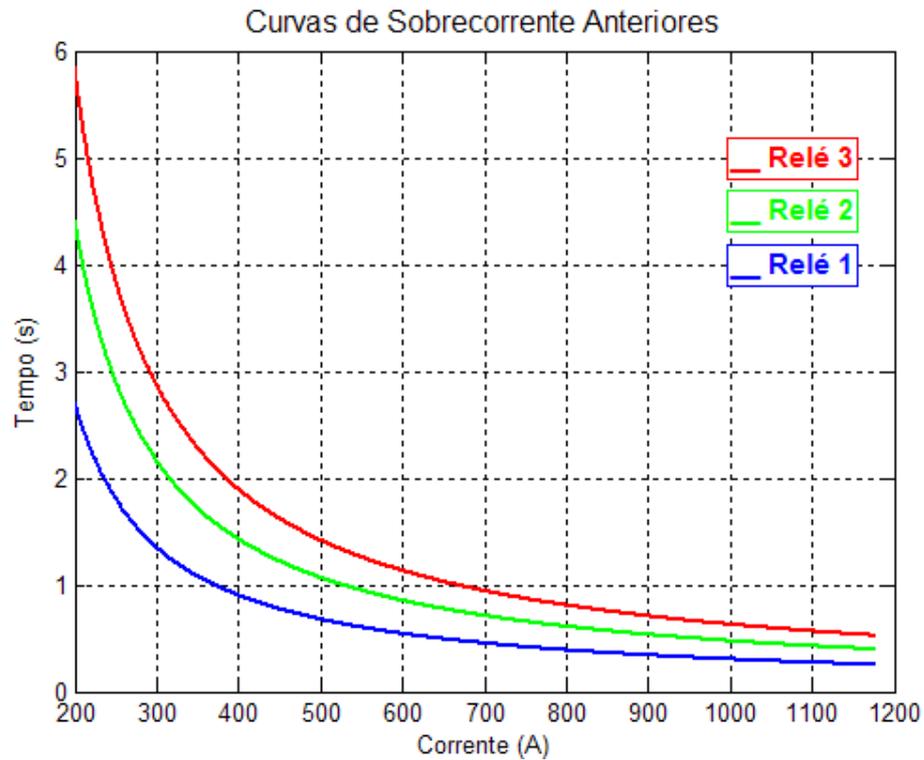


Figura 45—Curvas de sobrecorrente obtidas pelos métodos tradicionais de estudos de proteção para o estudo de caso 1, estendidas até o valor de $I_{cc3\Phi}$.

A figura 46 mostra uma das regiões das curvas onde há restrição. A curva do relé 1 deve passar: 0,2s acima da curva do relé do motor; 0,2s acima do eixo zero, para coordenar na região de atuação da função 50 do relé do motor (verificada no valor do tempo mínimo do relé 1, na tabela 7); e acima da coordenada indicada com um "X", que corresponde à corrente de plena carga do painel adicionada do valor de corrente do acionamento do maior motor. Verifica-se, na figura 46 e na tabela 7, que as restrições são atendidas.

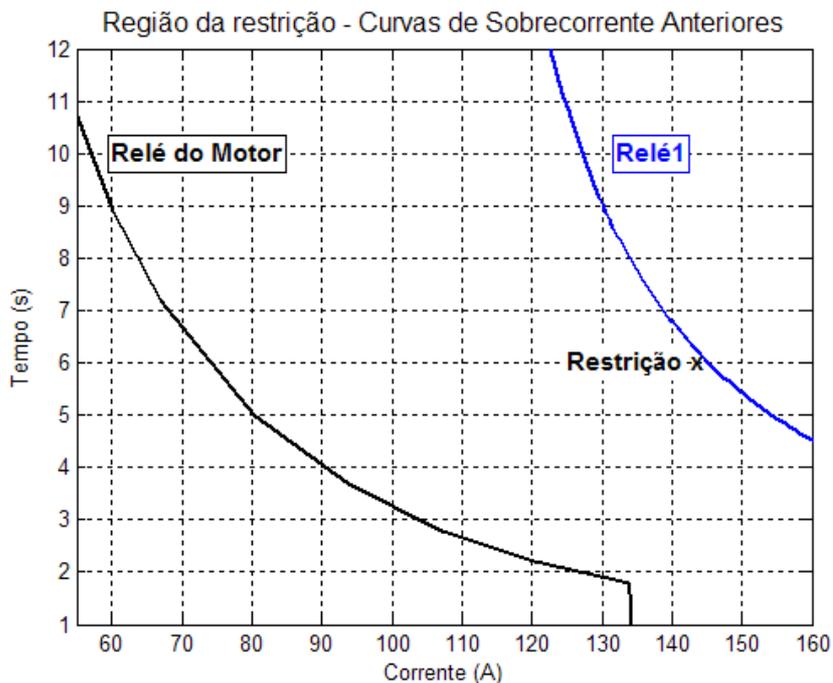


Figura 46–Região de restrição da curva de sobrecorrente anteriormente existente do relé 1, para o estudo de caso 1.

A figura 47 mostra o atendimento à restrição de que a curva do relé 3 deve estar abaixo do ponto ANSI monofásico.

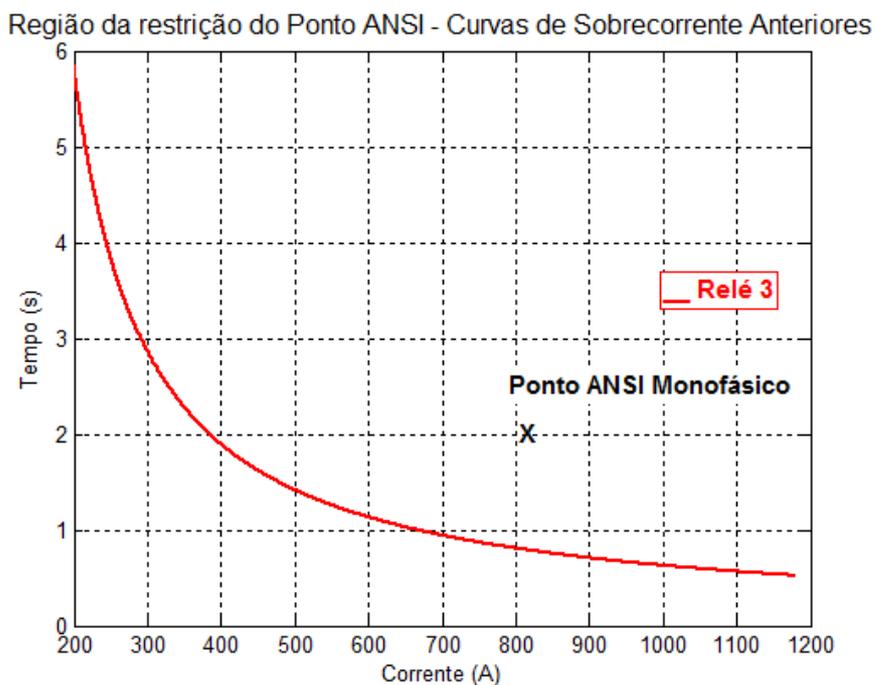


Figura 47–Região de restrição da curva de sobrecorrente anteriormente existente do relé 3, para o estudo de caso 1.

6.2.2 Resultados da otimização pelo algoritmo genético

O algoritmo genético proposto, após a inserção dos limites ou restrições do sistema, gera automaticamente as curvas para os relés 1, 2 e 3. Os resultados são demonstrados nas tabelas 9 e 10, que contém os parâmetros das curvas, os tempos de atuação e de coordenação.

Tabela 9 - Configurações dos relés e tempos de atuação das curvas de sobrecorrente obtidas do GA.

		Resultados do GA
Relé 1	Curva	IEEE Muito Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,35
	Ajuste de corrente (Gs)	100,17
	Tempo máximo no intervalo	2,4701 s
	Tempo mínimo no intervalo	0,2218 s
Relé 2	Curva	IEEE Muito Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,65
	Ajuste de corrente (Gs)	105,39
	Tempo máximo no intervalo	5,2196 s
	Tempo mínimo no intervalo	0,4218 s
Relé 3	Curva	IEEE Muito Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	1
	Ajuste de corrente (Gs)	100,88
	Tempo máximo no intervalo	7,1826 s
	Tempo mínimo no intervalo	0,6356 s

Tabela 10 - Tempos de coordenação das curvas de sobrecorrente obtidas do GA.

	Resultados do GA
Diferença mínima de tempo entre as curvas dos relés 2 e 1	0,2001s
Diferença mínima de tempo entre as curvas dos relés 3 e 2	0,2138s
Diferença de tempo de atuação, no valor de $I_{cc3\phi}$ entre as curvas dos relés 2 e 1	0,2001s
Diferença de tempo de atuação, no valor de $I_{cc3\phi}$ entre as curvas dos relés 3 e 2	0.2138s

As curvas de sobrecorrente resultantes são apresentadas na figura 48.

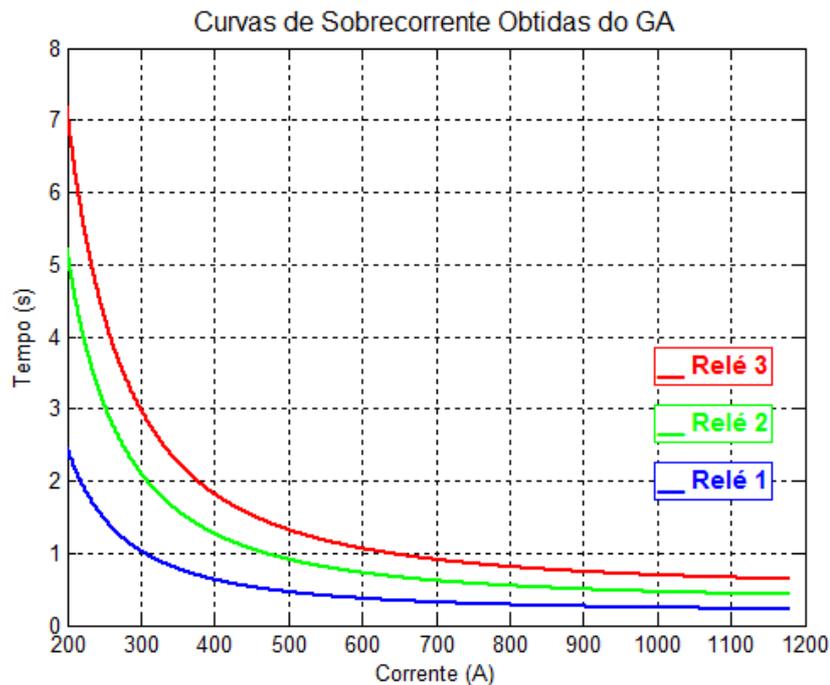


Figura 48–Curvas de sobrecorrente obtidas do GA para o estudo de caso 1.

A figura 49 mostra o atendimento das restrições por parte da curva do relé 1 e a figura 50 mostra o atendimento por parte da curva do relé 3.

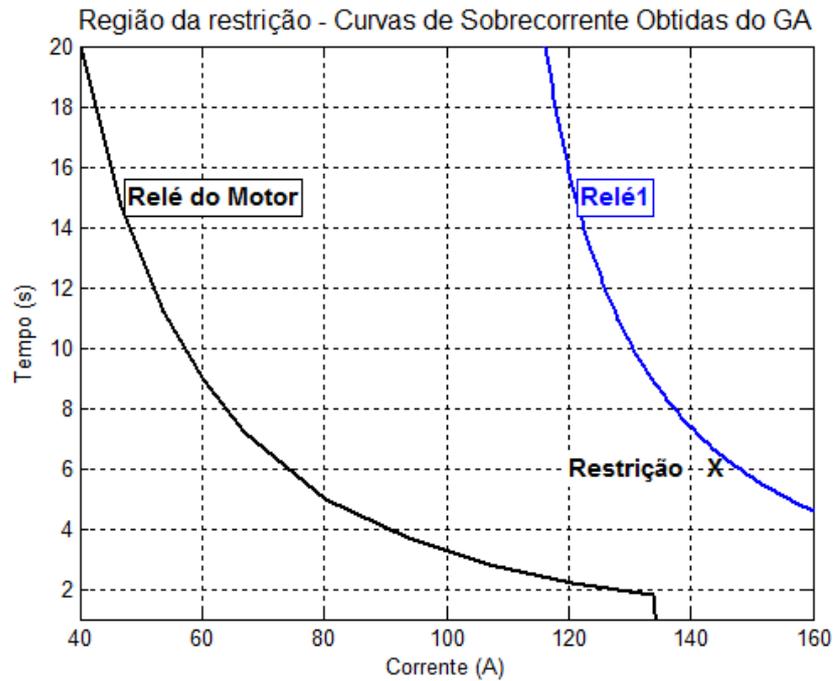


Figura 49—Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 1, obtida do GA, para o estudo de caso 1.

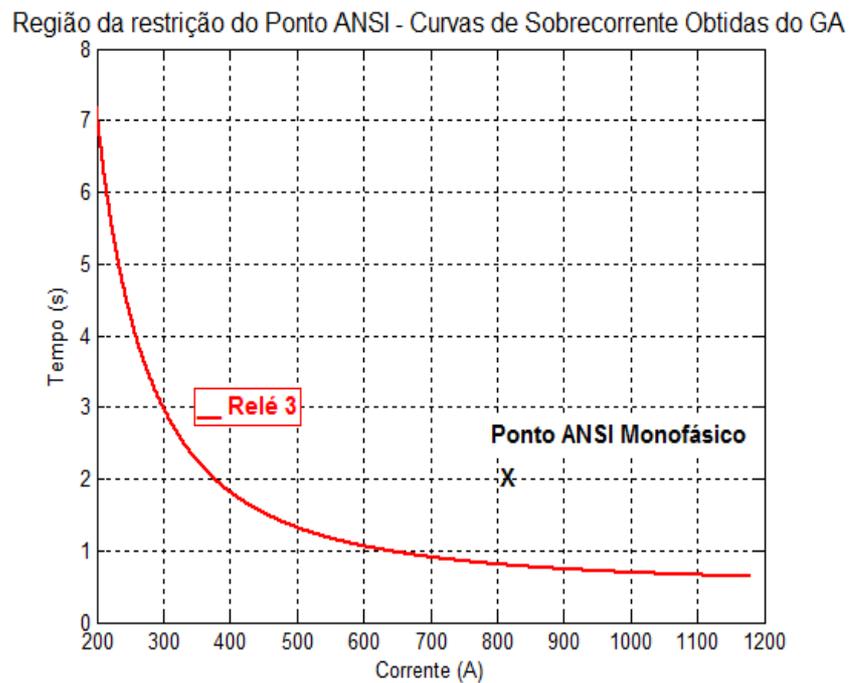


Figura 50—Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 3, obtida do GA, para o estudo de caso 1.

A figura 51 mostra a evolução do valor médio de avaliação da população e a figura 50 mostra a evolução do valor de avaliação do indivíduo melhor avaliado, ao longo das gerações do GA.

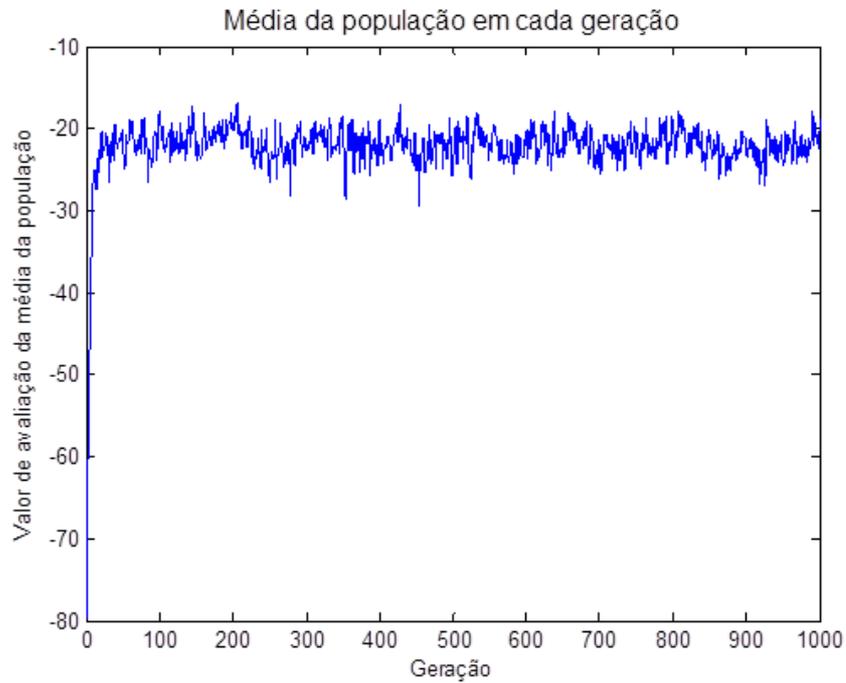


Figura 51–Gráfico da evolução da média da população ao longo dos ciclos do GA, para o estudo de caso 1.

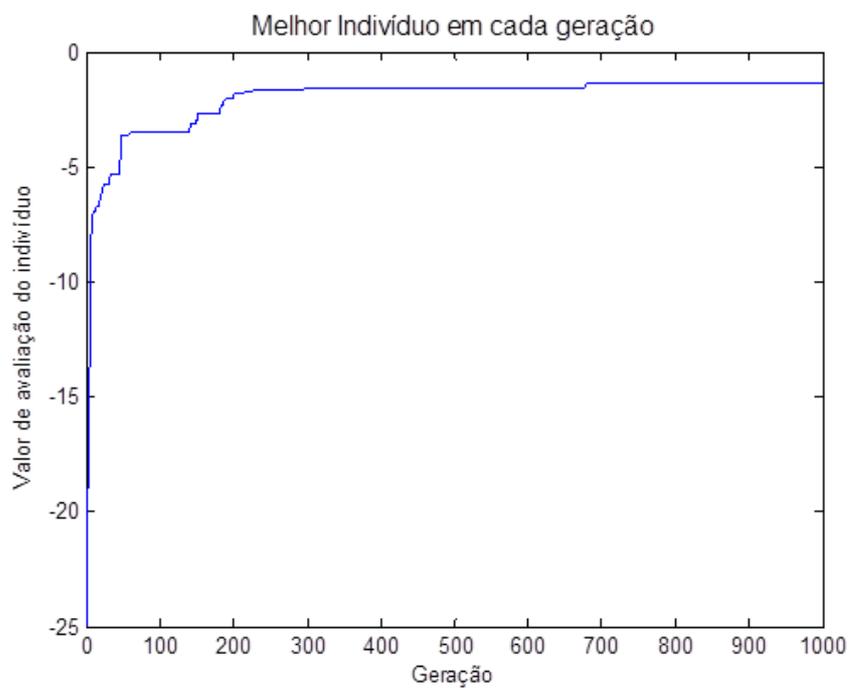


Figura 52–Gráfico da evolução do melhor indivíduo ao longo dos ciclos do GA, para o estudo de caso 1.

6.2.3 Resultados da otimização pelo algoritmo de otimização inspirado em colônia de formigas

O algoritmo de otimização inspirado em colônia de formigas proposto, após a inserção dos limites ou restrições do sistema, gera automaticamente as curvas para os relés 1, 2 e 3. Os resultados são demonstrados nas tabelas 11 e 12, que contém os parâmetros das curvas, os tempos de atuação e de coordenação.

Tabela 11 - Configurações dos relés e tempos de atuação das curvas de sobrecorrente obtidas do ACO.

Resultados do ACO		
Relé 1	Curva	IEEE Muito Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,45
	Ajuste de corrente (Gs)	97,16
	Tempo máximo no intervalo	2,9472 s
	Tempo mínimo no intervalo	0,2813 s
Relé 2	Curva	IEEE Muito Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,85
	Ajuste de corrente (Gs)	101,22
	Tempo máximo no intervalo	6,1568 s
	Tempo mínimo no intervalo	0,5411 s
Relé 3	Curva	Muito Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,65
	Ajuste de corrente (Gs)	100,88
	Tempo máximo no intervalo	8,9308 s
	Tempo mínimo no intervalo	0,8211 s

Tabela 12 - Tempos de coordenação das curvas de sobrecorrente obtidas do ACO.

	Resultados do ACO
Diferença mínima de tempo entre as curvas dos relés 2 e 1	0,2598 s
Diferença mínima de tempo entre as curvas dos relés 3 e 2	0,2800 s
Diferença de tempo de atuação, no valor de $I_{cc3\phi}$ entre as curvas dos relés 2 e 1	0,2598 s
Diferença de tempo de atuação, no valor de $I_{cc3\phi}$ entre as curvas dos relés 3 e 2	0,2800 s

As curvas de sobrecorrente resultantes são apresentadas na figura 53.

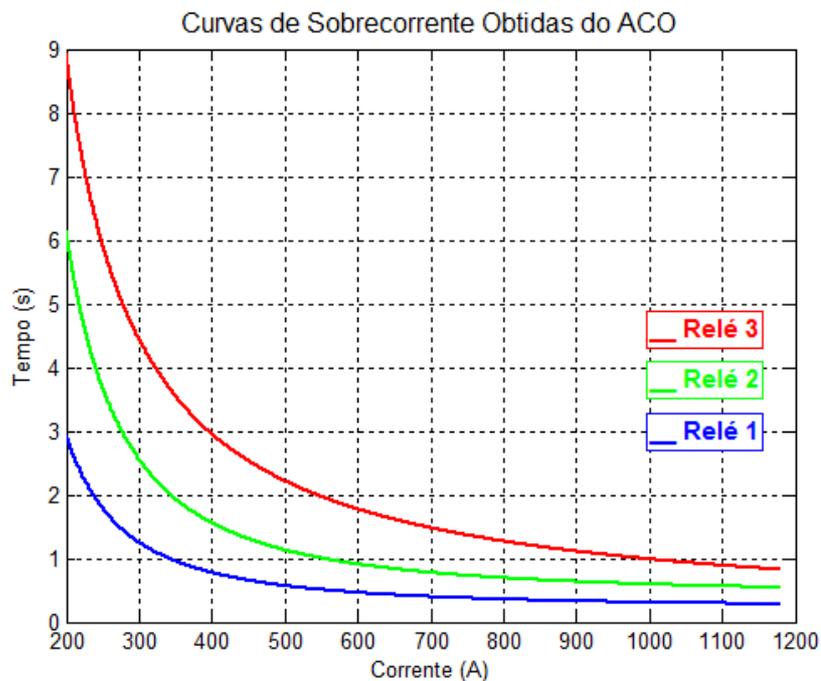


Figura 53—Curvas de sobrecorrente obtidas do ACO para o estudo de caso 1.

A figura 54 mostra o atendimento das restrições por parte da curva do relé 1 e a figura 55 mostra o atendimento por parte da curva do relé 3.

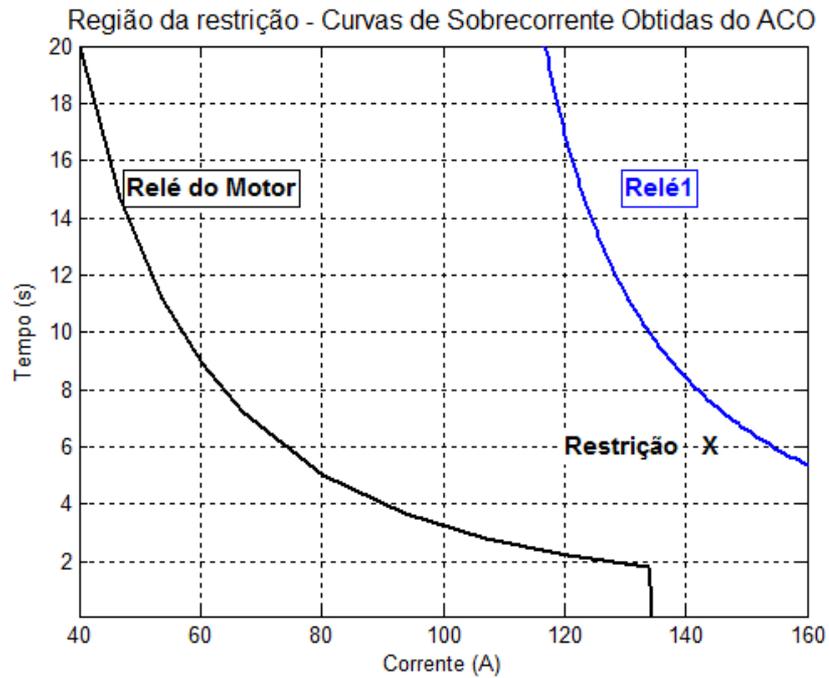


Figura 54—Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 1, obtida do ACO, para o estudo de caso 1.

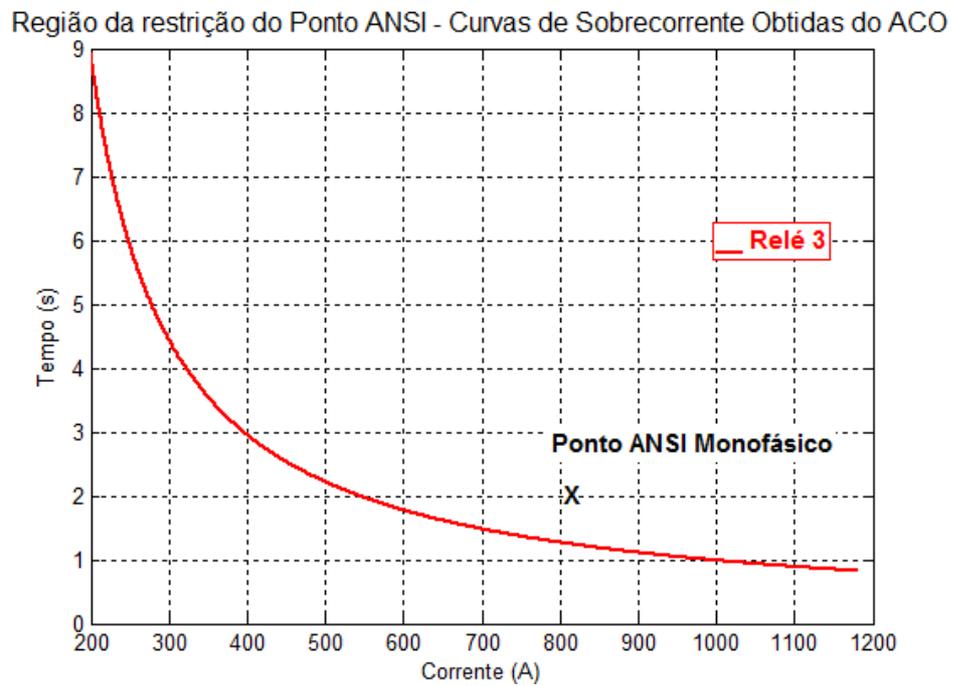


Figura 55—Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 3, obtida do ACO, para o estudo de caso 1.

A figura 56 mostra a evolução do valor de avaliação médio dos caminhos das formigas e a figura 57 mostra a evolução do valor de avaliação do melhor caminho das formigas, ao longo das iterações do ACO.

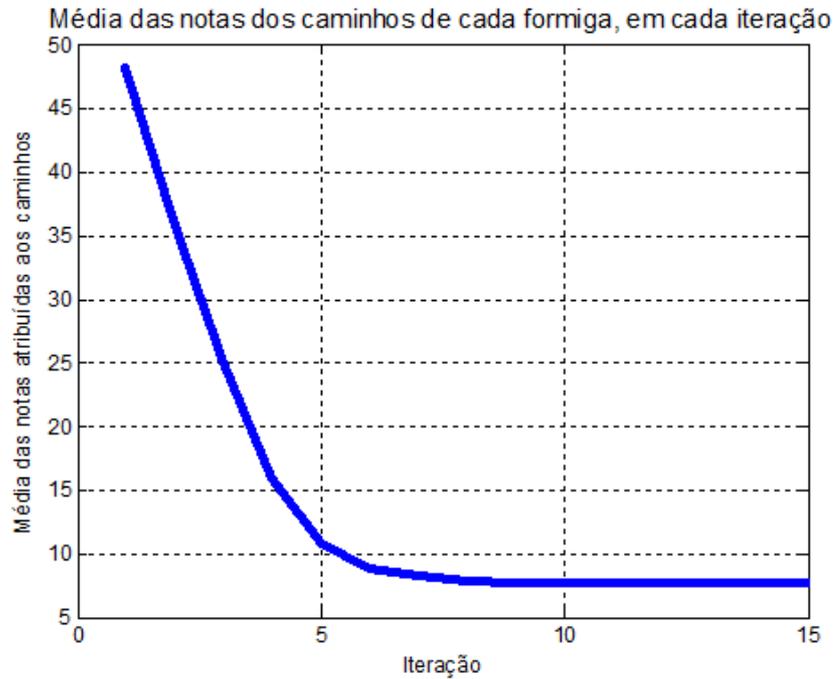


Figura 56–Gráfico da evolução do valor de avaliação médio dos caminhos das formigas, ao longo das iterações do ACO, para o estudo de caso 1.

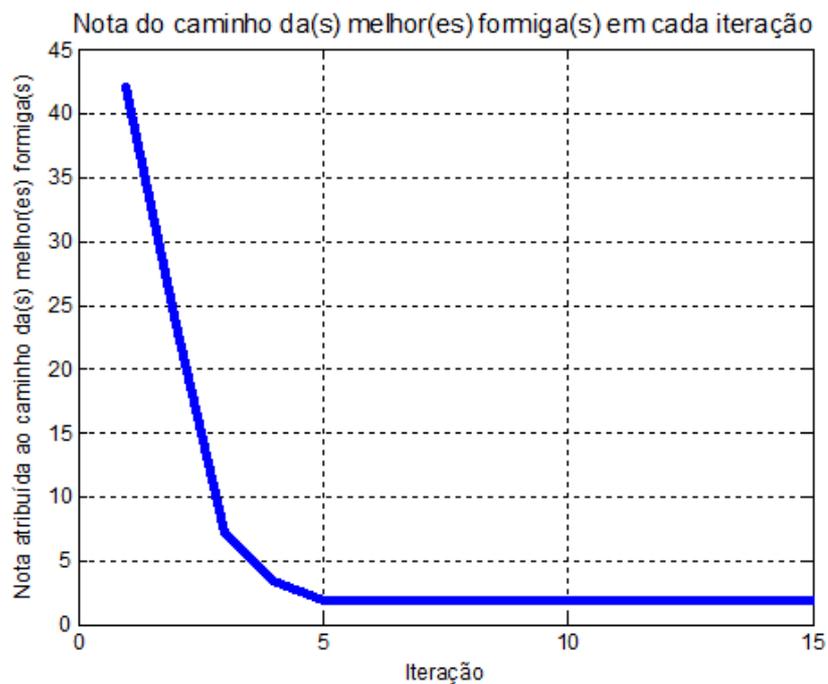


Figura 57–Gráfico da evolução do valor de avaliação do melhor caminho das formigas, ao longo das iterações do ACO, para o estudo de caso 1.

6.3 Estudo de Caso 2

O estudo de caso 2 consiste na coordenação dos relés 1, 2 e 3, mostrados na figura 58. O relé 1 deverá atender à restrição da curva de proteção do maior motor à jusante, da soma da carga máxima do barramento com a corrente de acionamento do maior motor e do valor de 0,2 segundos acima do tempo zero em qualquer ponto. O relé 3 deverá atender à restrição do ponto ANSI monofásico do transformador. Os três relés devem ter tempo mínimo de coordenação de 0,2 segundos entre si.

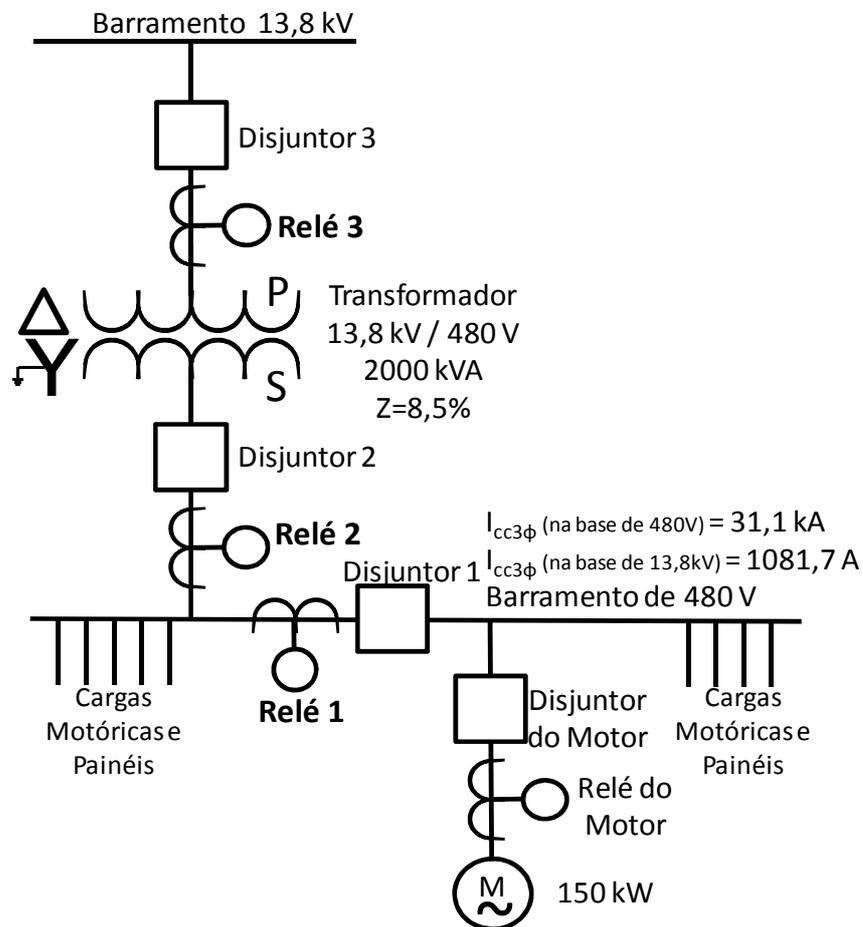


Figura 58– Sistema elétrico industrial referente ao estudo de caso 2.

6.3.1 Sistema existente na unidade industrial

Os ajustes dos relés existentes no sistema elétrico industrial do estudo de caso 2 são os descritos na tabela 13, obtidos por métodos tradicionais de estudos de proteção e tendo as curvas de sobrecorrente sido estendidas, conforme descrito no item 7.1. Os ajustes da tabela 13 resultam nos tempos de coordenação entre os relés apresentados na tabela 14 e nas curvas apresentadas na figura 59.

Tabela 13 - Configurações dos relés e tempos de atuação das curvas de sobrecorrente do sistema existente.

		Configuração existente (curvas 51 estendidas)
Relé 1	Curva	Muito Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,18
	Ajuste de corrente (Gs)	104,4
	Tempo máximo no intervalo	2.4254 s
	Tempo mínimo no intervalo	0.2595 s
Relé 2	Curva	Muito Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,3
	Ajuste de corrente (Gs)	104,4
	Tempo máximo no intervalo	4.0423 s
	Tempo mínimo no intervalo	0.4325 s
Relé 3	Curva	Muito Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,4
	Ajuste de corrente (Gs)	104,4
	Tempo máximo no intervalo	5.3486 s
	Tempo mínimo no intervalo	0.5742 s

Tabela 14 - Tempos de coordenação das curvas de sobrecorrente do sistema existente.

	Configuração existente (curvas 51 estendidas)
Diferença mínima de tempo entre as curvas dos relés 2 e 1	0.1730s*
Diferença mínima de tempo entre as curvas dos relés 3 e 2	0.1417 s*
Diferença de tempo de atuação, no valor de $I_{cc3\phi}$ entre as curvas dos relés 2 e 1	0.1730 s*
Diferença de tempo de atuação, no valor de $I_{cc3\phi}$ entre as curvas dos relés 3 e 2	0.1417 s*

* Os valores inferiores a 0,2s para $I_{cc3\phi}$, são devidos à extensão das curvas, não representando uma descoordenação no sistema real.

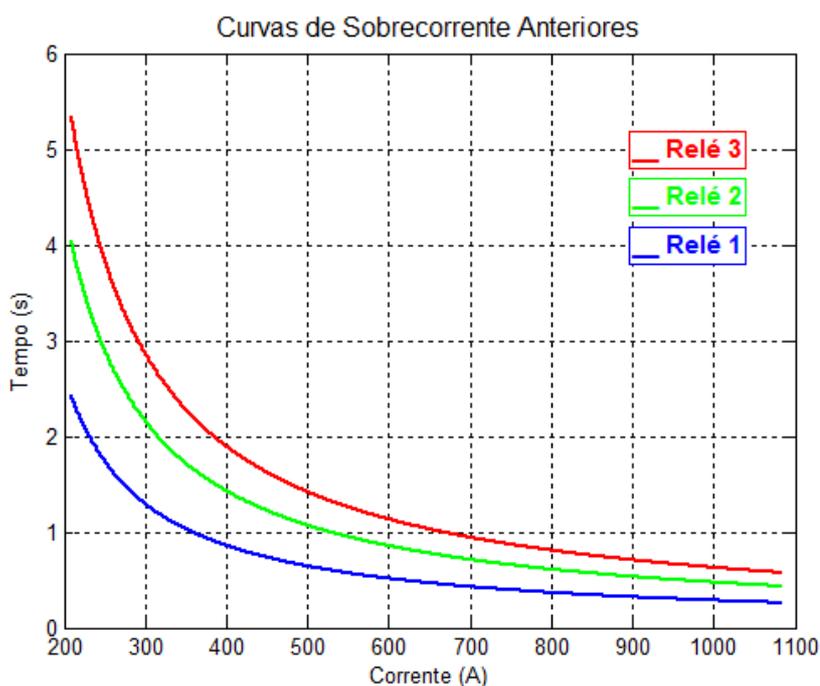


Figura 59—Curvas de sobrecorrente obtidas pelos métodos tradicionais de estudos de proteção para o estudo de caso 2, estendidas até o valor de $I_{cc3\phi}$.

A figura 60 mostra uma das regiões das curvas onde há restrição. A curva do relé 1 deve passar: 0,2s acima da curva do relé do motor; 0,2s acima do eixo zero, para coordenar na região de atuação da função 50 do relé do motor (verificada no valor do tempo mínimo do relé 1, na tabela 13); e acima da coordenada indicada com um "X", que corresponde à corrente de plena carga do painel adicionada do

valor de corrente do acionamento do maior motor. Verifica-se, na figura 60 e na tabela 7, que as restrições são atendidas.

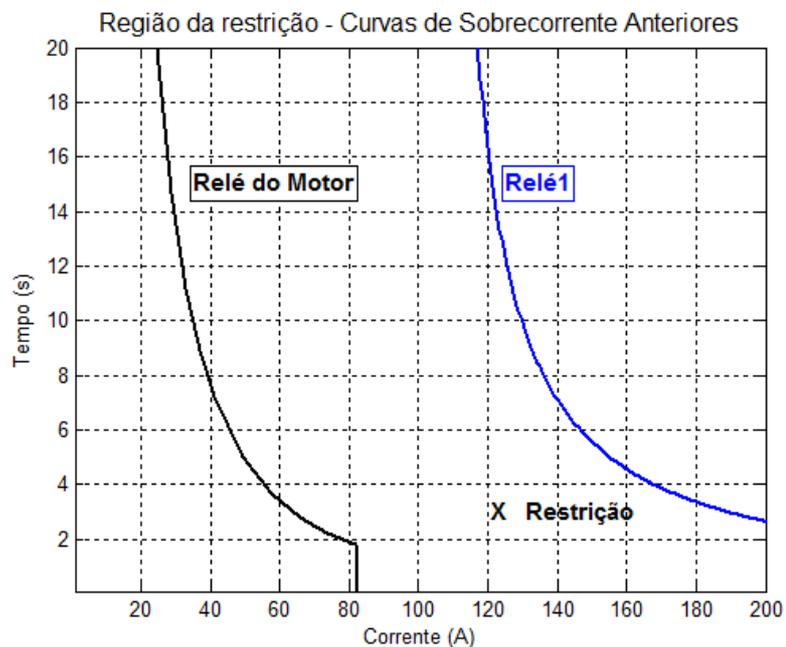


Figura 60–Região de restrição da curva de sobrecorrente anteriormente existente do relé 1, para o estudo de caso 2.

A figura 61 mostra o atendimento à restrição de que a curva do relé 3 deve estar abaixo do ponto ANSI monofásico.

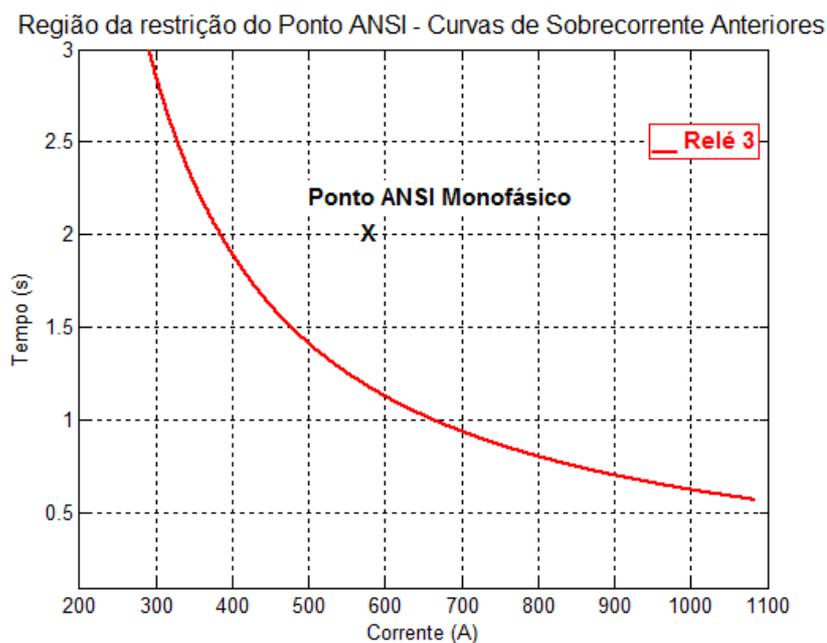


Figura 61–Região de restrição da curva de sobrecorrente anteriormente existente do relé 3, para o estudo de caso 2.

6.3.2 Resultados da otimização pelo algoritmo genético

O algoritmo genético proposto, após a inserção dos limites ou restrições do sistema, gera automaticamente as curvas para os relés 1, 2 e 3. Os resultados são demonstrados nas tabelas 15 e 16, que contém os parâmetros das curvas, os tempos de atuação e de coordenação.

Tabela 15 - Configurações dos relés e tempos de atuação das curvas de sobrecorrente obtidas do GA.

Resultados do GA		
Relé 1	Curva	IEEE Moderadamente Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,2
	Ajuste de corrente (Gs)	107,53
	Tempo máximo no intervalo	0.7926 s
	Tempo mínimo no intervalo	0.2408 s
Relé 2	Curva	Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,15
	Ajuste de corrente (Gs)	106.49
	Tempo máximo no intervalo	1.5467 s
	Tempo mínimo no intervalo	0.4425 s
Relé 3	Curva	IEEE Moderadamente Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,55
	Ajuste de corrente (Gs)	100.88
	Tempo máximo no intervalo	1.9929 s
	Tempo mínimo no intervalo	0.6456 s

Tabela 16 - Tempos de coordenação das curvas de sobrecorrente obtidas do GA.

	Resultados do GA
Diferença mínima de tempo entre as curvas dos relés 2 e 1	0.2017 s
Diferença mínima de tempo entre as curvas dos relés 3 e 2	0.2031 s
Diferença de tempo de atuação, no valor de $I_{cc3\phi}$ entre as curvas dos relés 2 e 1	0.2017 s
Diferença de tempo de atuação, no valor de $I_{cc3\phi}$ entre as curvas dos relés 3 e 2	0.2031 s

As curvas de sobrecorrente resultantes são apresentadas na figura 62.

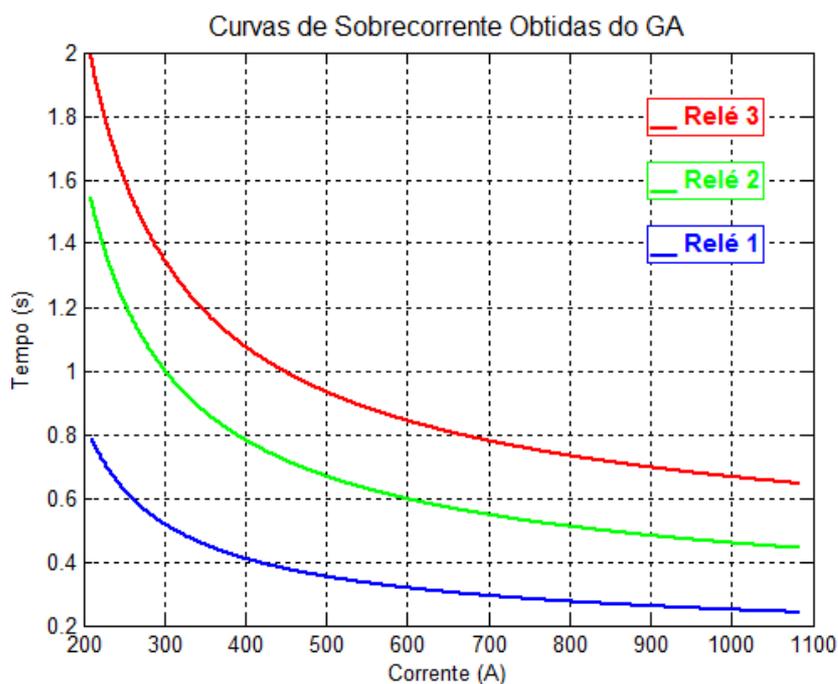


Figura 62–Curvas de sobrecorrente obtidas do GA para o estudo de caso 2.

A figura 63 mostra o atendimento das restrições por parte da curva do relé 1 e a figura 64 mostra o atendimento por parte da curva do relé 3.

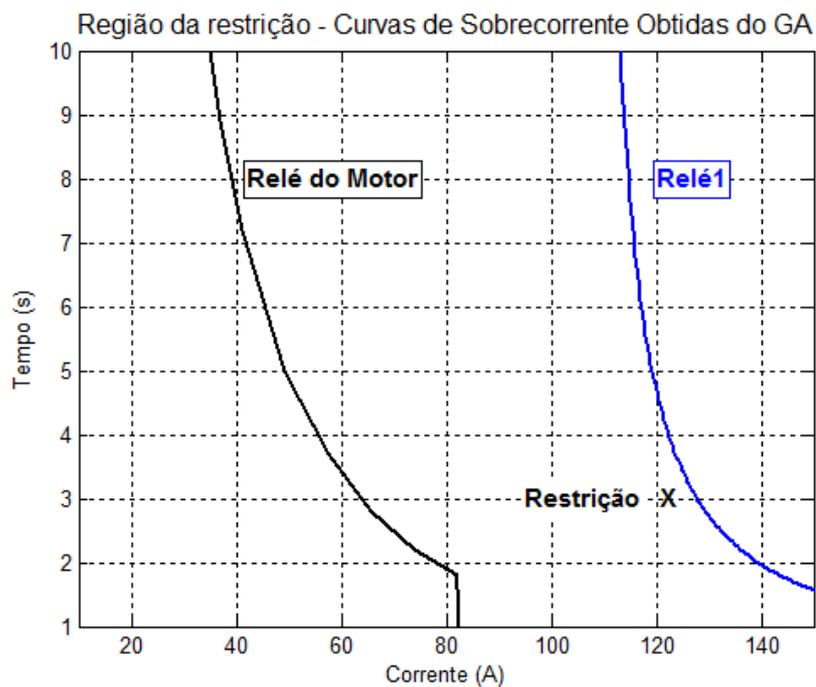


Figura 63—Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 1, obtida do GA, para o estudo de caso 2.

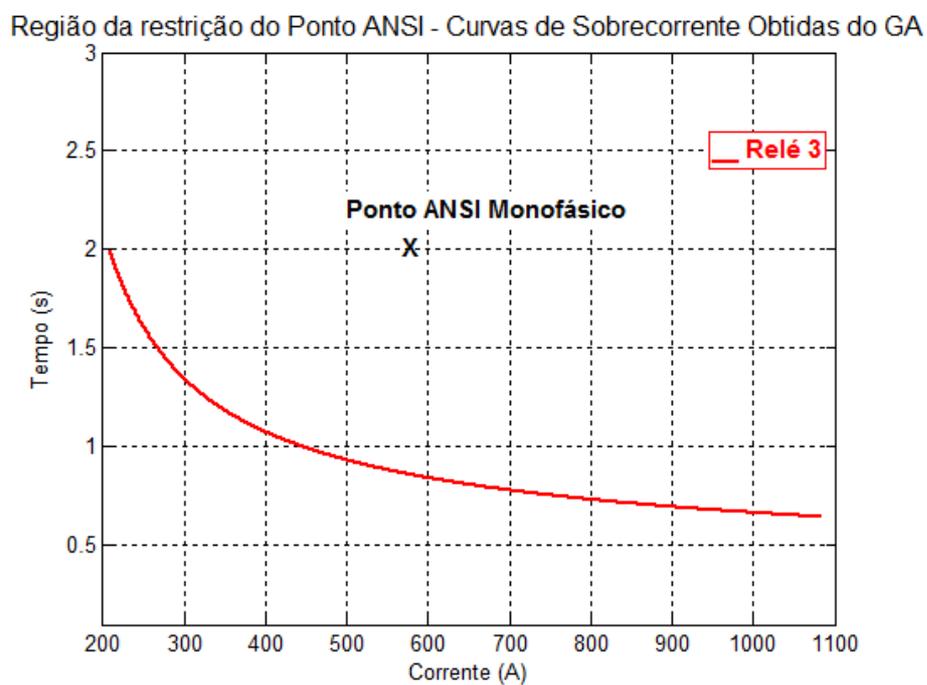


Figura 64—Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 3, obtida do GA, para o estudo de caso 2.

A figura 65 mostra a evolução do valor médio de avaliação da população e a figura 66 mostra a evolução do valor de avaliação do indivíduo melhor avaliado, ao longo das gerações do GA.

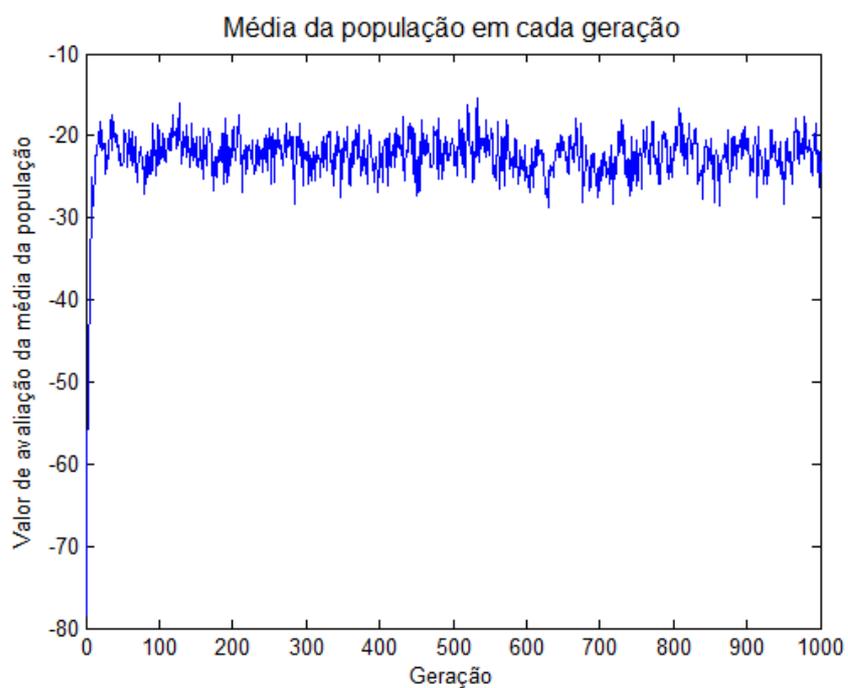


Figura 65–Gráfico da evolução da média da população ao longo dos ciclos do GA, para o estudo de caso 2.

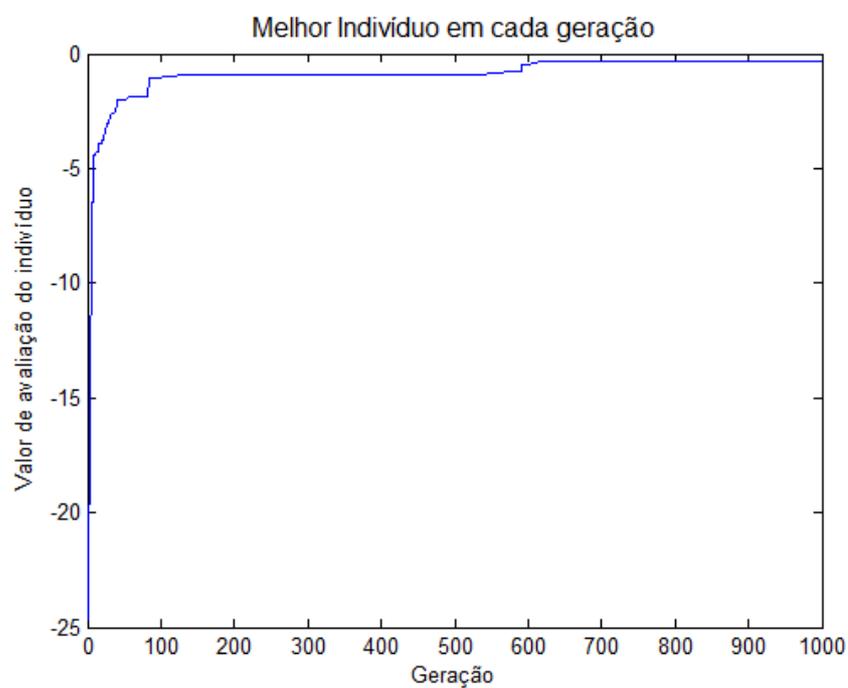


Figura 66–Gráfico da evolução do melhor indivíduo ao longo dos ciclos do GA, para o estudo de caso 2.

6.3.3 Resultados da otimização pelo algoritmo de otimização inspirado em colônia de formigas

O algoritmo de otimização inspirado em colônia de formigas proposto, após a inserção dos limites ou restrições do sistema, gera automaticamente as curvas para os relés 1, 2 e 3. Os resultados são demonstrados nas tabelas 17 e 18, que contém os parâmetros das curvas, os tempos de atuação e de coordenação.

Tabela 17 - Configurações dos relés e tempos de atuação das curvas de sobrecorrente obtidas do ACO.

Resultados do ACO		
Relé 1	Curva	Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,1
	Ajuste de corrente (Gs)	101,27
	Tempo máximo no intervalo	0,9591 s
	Tempo mínimo no intervalo	0,2886 s
Relé 2	Curva	Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,2
	Ajuste de corrente (Gs)	101,27
	Tempo máximo no intervalo	1,9182 s
	Tempo mínimo no intervalo	0,5771 s
Relé 3	Curva	Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,3
	Ajuste de corrente (Gs)	100,88
	Tempo máximo no intervalo	2,8621 s
	Tempo mínimo no intervalo	0,8643 s

Tabela 18 - Tempos de coordenação das curvas de sobrecorrente obtidas do ACO.

Resultados do ACO	
Diferença mínima de tempo entre as curvas dos relés 2 e 1	0.2886 s
Diferença mínima de tempo entre as curvas dos relés 3 e 2	0.2871 s
Diferença de tempo de atuação, no valor de $I_{cc3\phi}$ entre as curvas dos relés 2 e 1	0.2886 s
Diferença de tempo de atuação, no valor de $I_{cc3\phi}$ entre as curvas dos relés 3 e 2	0.2871 s

As curvas de sobrecorrente resultantes são apresentadas na figura 67.

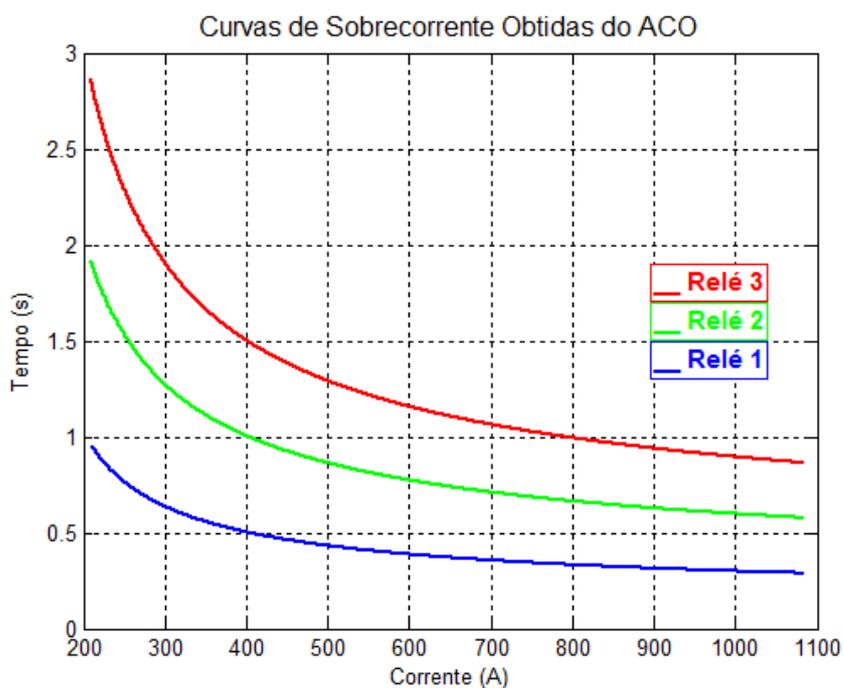


Figura 67–Curvas de sobrecorrente obtidas do ACO para o estudo de caso 2.

A figura 68 mostra o atendimento das restrições por parte da curva do relé 1 e a figura 69 mostra o atendimento por parte da curva do relé 3.

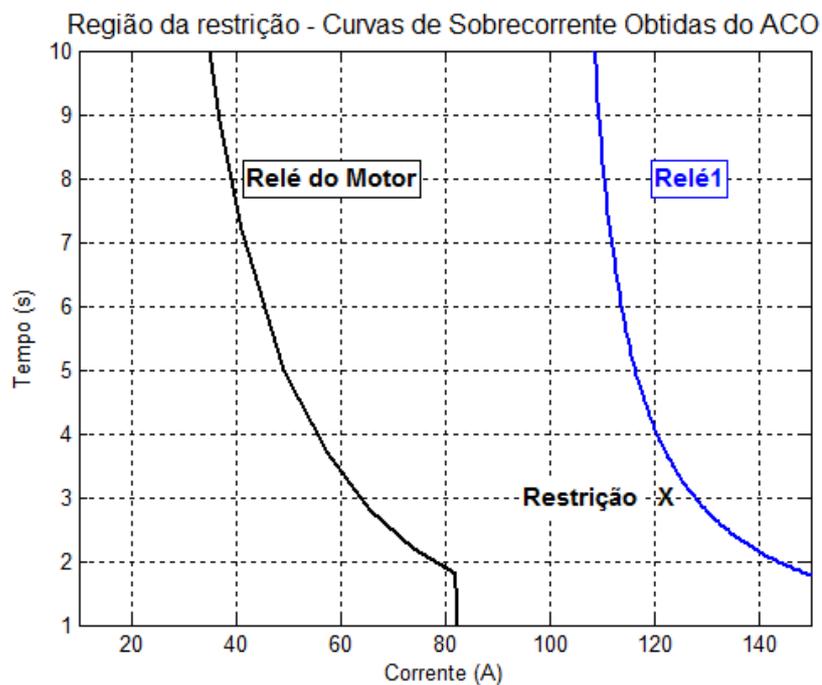


Figura 68—Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 1, obtida do ACO, para o estudo de caso 2.

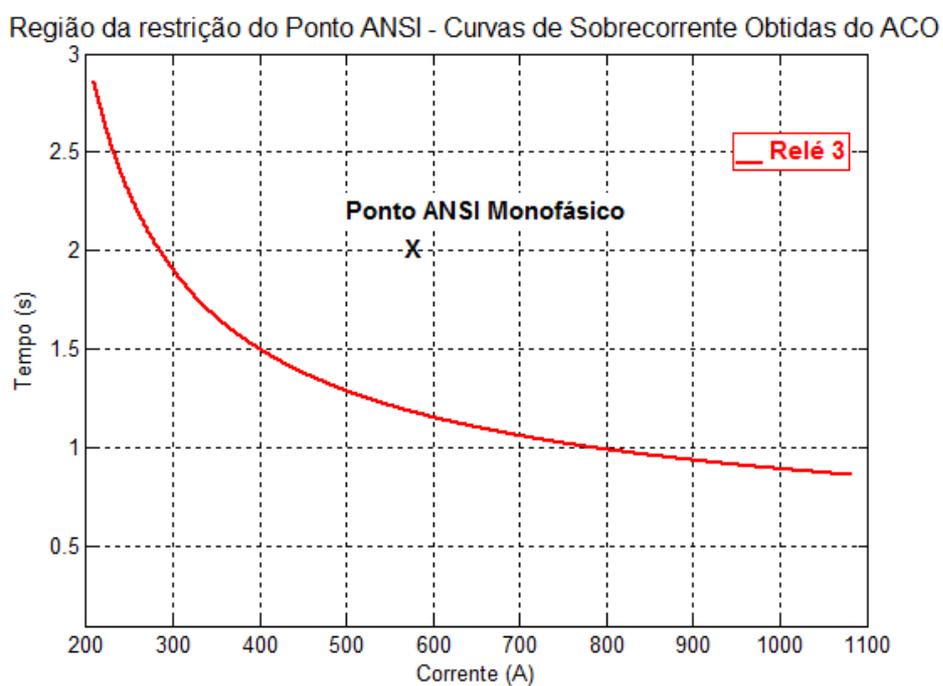


Figura 69—Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 3, obtida do ACO, para o estudo de caso 2.

A figura 70 mostra a evolução do valor de avaliação médio dos caminhos das formigas e a figura 71 mostra a evolução do valor de avaliação do melhor caminho das formigas, ao longo das iterações do ACO.

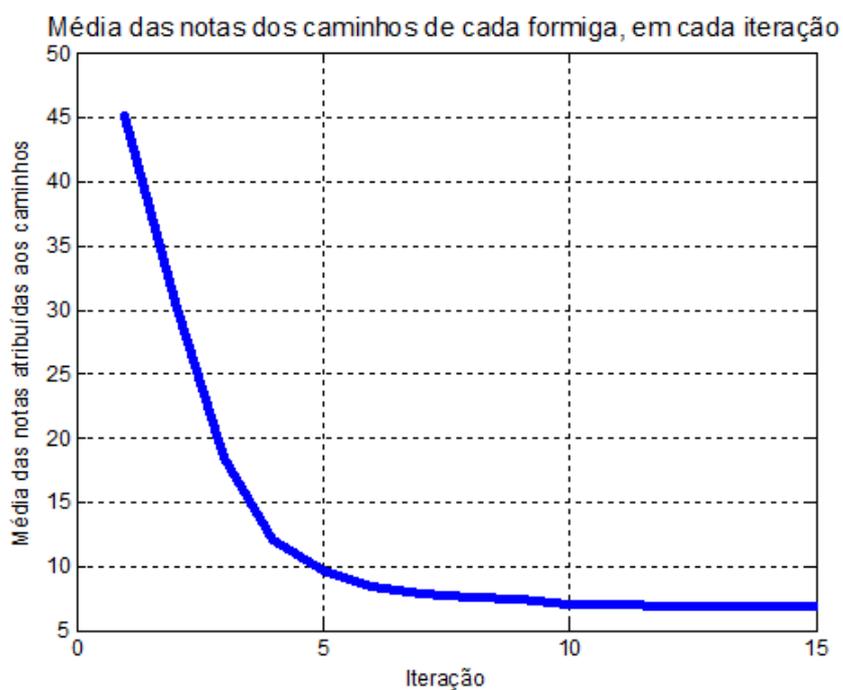


Figura 70—Gráfico da evolução do valor de avaliação médio dos caminhos das formigas, ao longo das iterações do ACO, para o estudo de caso 2.

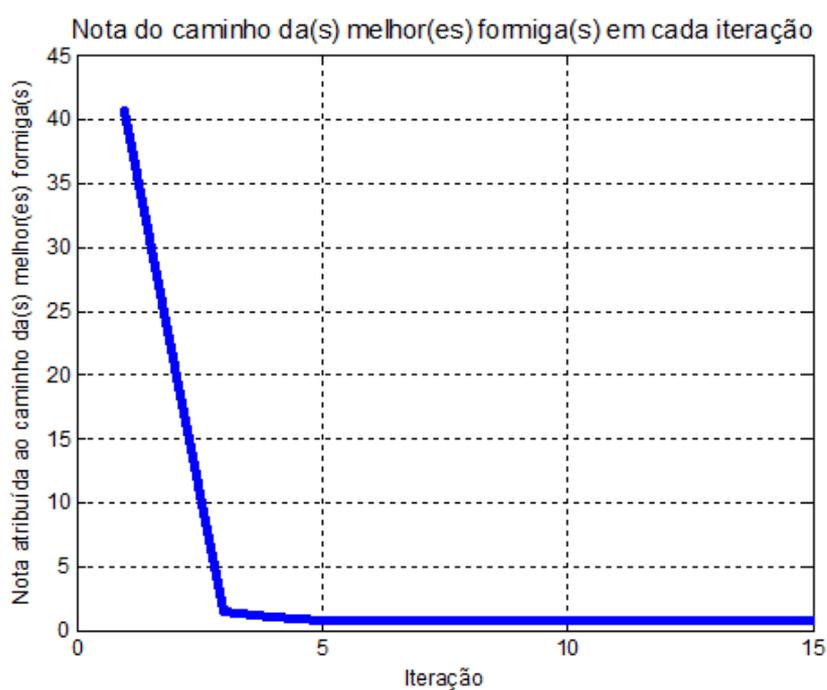


Figura 71—Gráfico da evolução do valor de avaliação do melhor caminho das formigas, ao longo das iterações do ACO, para o estudo de caso 2.

6.4 Estudo de Caso 3

O estudo de caso 3 consiste na coordenação dos relés 1, 2 e 3, mostrados na figura 72. O relé 1 deverá atender à restrição da curva de proteção do maior motor à jusante, da soma da carga máxima do barramento com a corrente de acionamento do maior motor e do valor de 0,2 segundos acima do tempo zero em qualquer ponto. O relé 3 deverá atender à restrição do ponto ANSI monofásico do transformador. Os três relés devem ter tempo mínimo de coordenação de 0,2 segundos entre si.

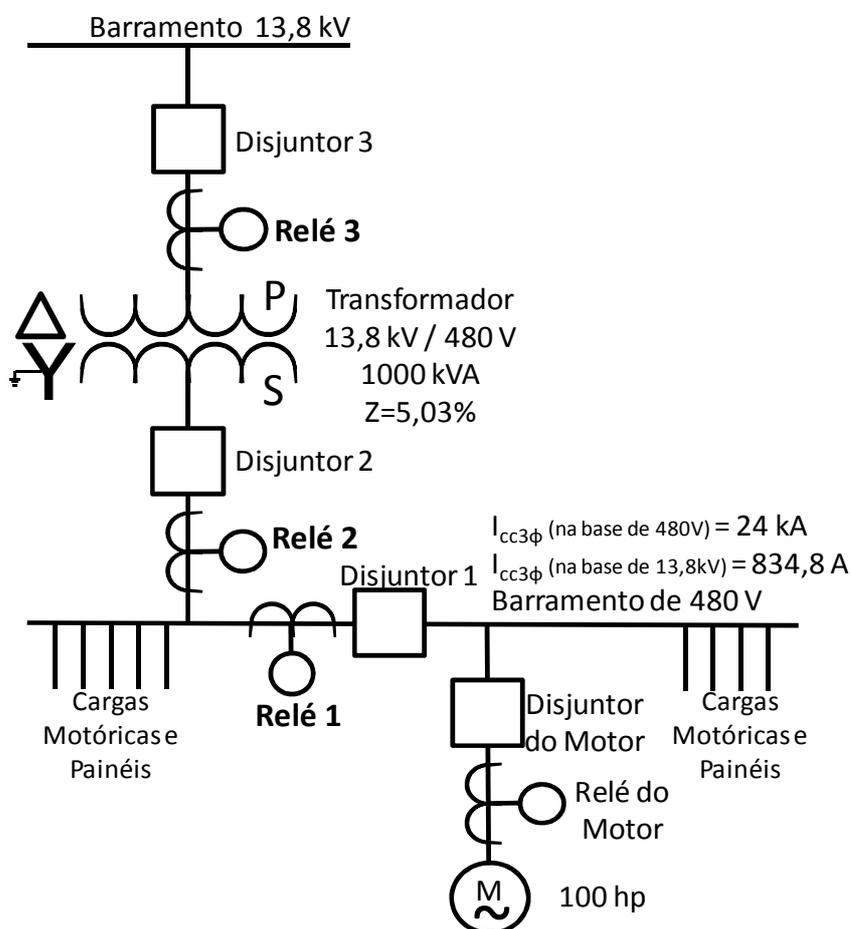


Figura 72– Sistema elétrico industrial referente ao estudo de caso 3.

6.4.1 Sistema existente na unidade industrial

Os ajustes dos relés existentes no sistema elétrico industrial do estudo de caso 3 são os descritos na tabela 19, obtidos por métodos tradicionais de estudos de proteção e tendo as curvas de sobrecorrente sido estendidas, conforme descrito no item 7.1. Os ajustes da tabela 19 resultam nos tempos de coordenação entre os relés apresentados na tabela 20 e nas curvas apresentadas na figura 73.

Tabela 19 - Configurações dos relés e tempos de atuação das curvas de sobrecorrente do sistema existente.

		Configuração existente (curvas 51 estendidas)
Relé 1	Curva	Muito Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,4
	Ajuste de corrente (Gs)	69,57
	Tempo máximo no intervalo	5,4109 s
	Tempo mínimo no intervalo	0,4908 s
Relé 2	Curva	Muito Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,4
	Ajuste de corrente (Gs)	69,57
	Tempo máximo no intervalo	5,4109 s
	Tempo mínimo no intervalo	0,4908 s
Relé 3	Curva	Muito Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,54
	Ajuste de corrente (Gs)	72
	Tempo máximo no intervalo	7,8340 s
	Tempo mínimo no intervalo	0,6879 s

Tabela 20 - Tempos de coordenação das curvas de sobrecorrente do sistema existente.

	Configuração existente (curvas 51 estendidas)
Diferença mínima de tempo entre as curvas dos relés 2 e 1	0s**
Diferença mínima de tempo entre as curvas dos relés 3 e 2	0,1971s*
Diferença de tempo de atuação, no valor de $I_{cc3\phi}$ entre as curvas dos relés 2 e 1	0s**
Diferença de tempo de atuação, no valor de $I_{cc3\phi}$ entre as curvas dos relés 3 e 2	0,1971s*

* Os valores inferiores a 0,2s para $I_{cc3\phi}$, são devidos à extensão das curvas, não representando uma descoordenação no sistema real.

** Neste caso, existe uma real descoordenação entre as curvas de sobrecorrente, no sistema existente.

A tabela 20 e a figura 73 mostram que no sistema anteriormente existente os relés 1 e 2 apresentam curvas idênticas. Neste caso, numa possível corrente de falta na parte direita do gráfico, os relés 1 e 2 atuariam, ao invés de apenas o relé 1. De acordo com a filosofia de proteção adotada para o sistema existente, a atuação conjunta dos relés 1 e 2 pode ser permitida. Entretanto, neste trabalho, estabelecemos como critério a necessidade de atuação do relé 1 anteriormente à atuação do relé 2.

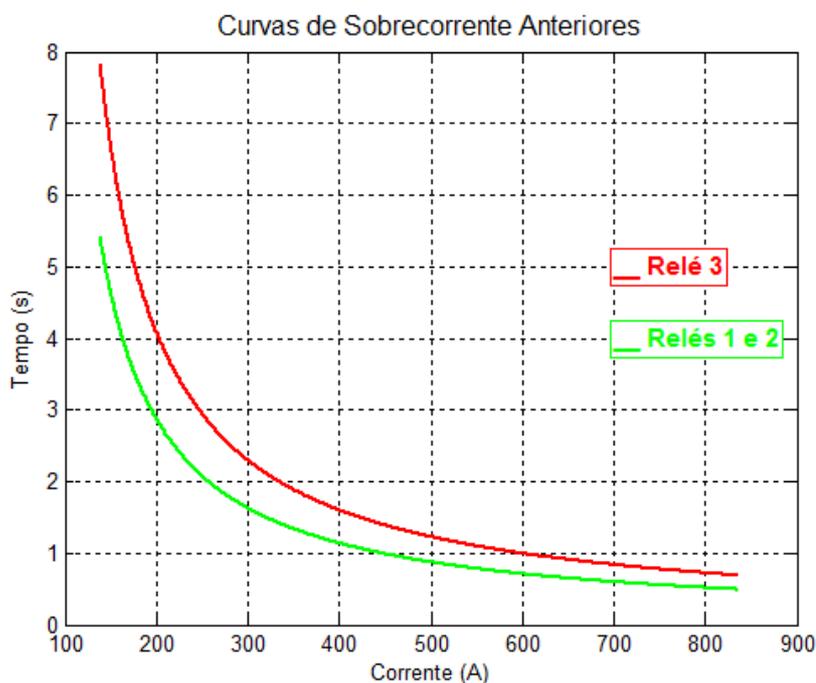


Figura 73—Curvas de sobrecorrente obtidas pelos métodos tradicionais de estudos de proteção para o estudo de caso 3, estendidas até o valor de $I_{cc3\phi}$.

A figura 74 mostra uma das regiões das curvas onde há restrição. A curva do relé 1 deve passar: 0,2s acima da curva do relé do motor; 0,2s acima do eixo zero, para coordenar na região de atuação da função 50 do relé do motor (verificada no valor do tempo mínimo do relé 1, na tabela 19); e acima da coordenada indicada com um "X", que corresponde à corrente de plena carga do painel adicionada do valor de corrente do acionamento do maior motor. Verifica-se, na figura 74 e na tabela 19, que estas restrições são atendidas.

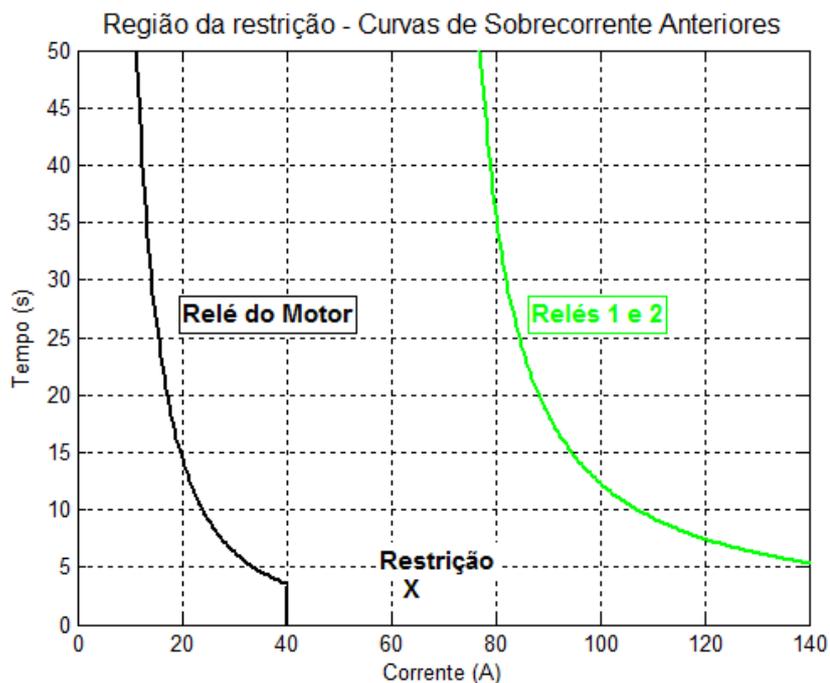


Figura 74–Região de restrição da curva de sobrecorrente anteriormente existente do relé 1, para o estudo de caso 3.

A figura 75 mostra o atendimento à restrição de que a curva do relé 3 deve estar abaixo do ponto ANSI monofásico.

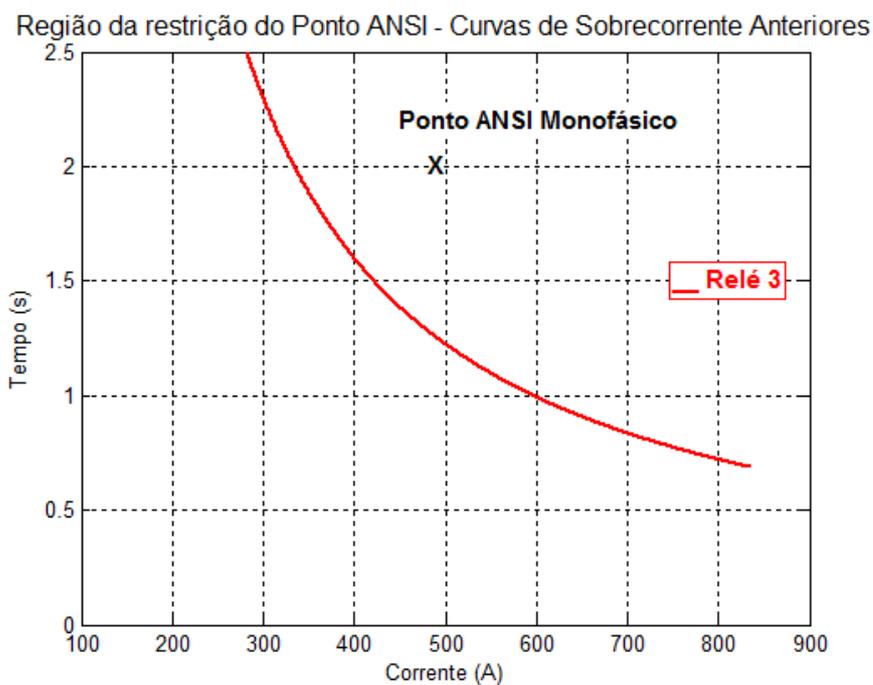


Figura 75–Região de restrição da curva de sobrecorrente anteriormente existente do relé 3, para o estudo de caso 3.

6.4.2 Resultados da otimização pelo algoritmo genético

O algoritmo genético proposto, após a inserção dos limites ou restrições do sistema, gera automaticamente as curvas para os relés 1, 2 e 3. Os resultados são demonstrados nas tabelas 21 e 22, que contém os parâmetros das curvas, os tempos de atuação e de coordenação.

Tabela 21 - Configurações dos relés e tempos de atuação das curvas de sobrecorrente obtidas do GA.

Resultados do GA	
Relé 1	Curva IEEE Moderadamente Inversa
	Ajuste de tempo (TMS) 0,25
	Ajuste de corrente (Gs) 68,18
	Tempo máximo no intervalo 0,9258 s
	Tempo mínimo no intervalo 0,2791 s
Relé 2	Curva IEEE Moderadamente Inversa
	Ajuste de tempo (TMS) 0,45
	Ajuste de corrente (Gs) 67,48
	Tempo máximo no intervalo 1,6433 s
	Tempo mínimo no intervalo 0,5004 s
Relé 3	Curva IEEE Moderadamente Inversa
	Ajuste de tempo (TMS) 0,65
	Ajuste de corrente (Gs) 69,84
	Tempo máximo no intervalo 2,4892 s
	Tempo mínimo no intervalo 0,7321 s

Tabela 22 - Tempos de coordenação das curvas de sobrecorrente obtidas do GA.

	Resultados do GA
Diferença mínima de tempo entre as curvas dos relés 2 e 1	0,2214 s
Diferença mínima de tempo entre as curvas dos relés 3 e 2	0,2316 s
Diferença de tempo de atuação, no valor de $I_{cc3\phi}$ entre as curvas dos relés 2 e 1	0,2214 s
Diferença de tempo de atuação, no valor de $I_{cc3\phi}$ entre as curvas dos relés 3 e 2	0,2316 s

As curvas de sobrecorrente resultantes são apresentadas na figura 76.

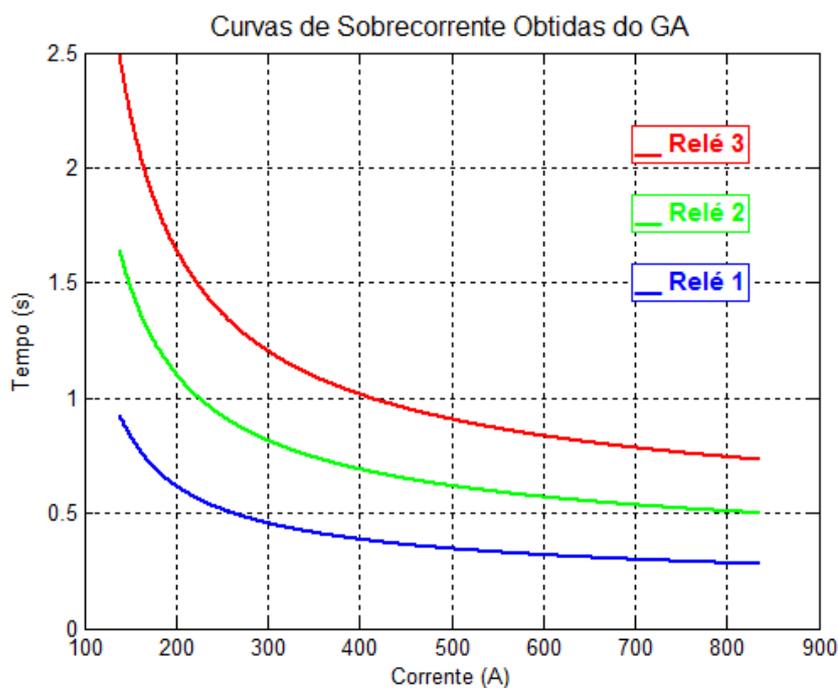


Figura 76—Curvas de sobrecorrente obtidas do GA para o estudo de caso 3.

A figura 77 mostra o atendimento das restrições por parte da curva do relé 1 e a figura 78 mostra o atendimento por parte da curva do relé 3.

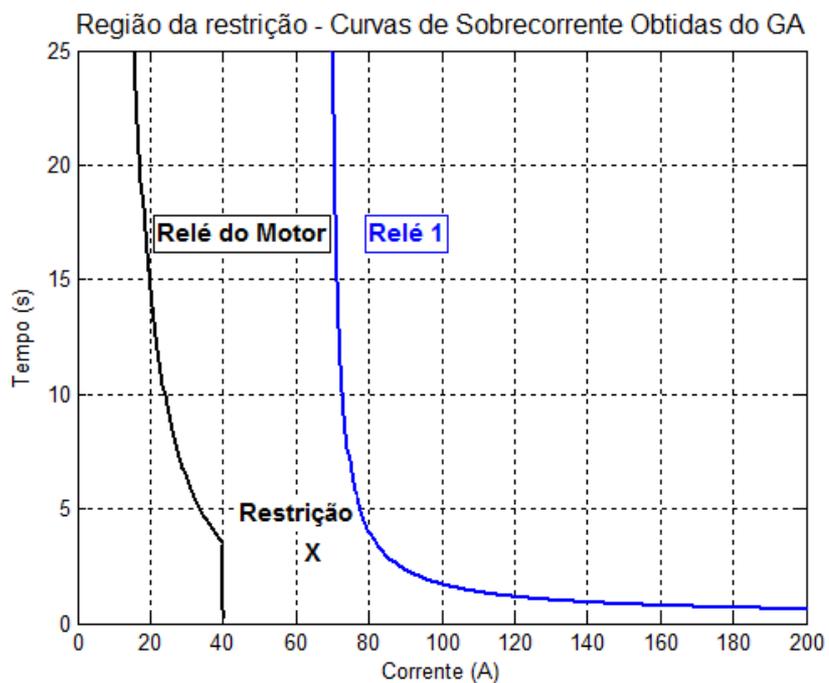


Figura 77—Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 1, obtida do GA, para o estudo de caso 3.

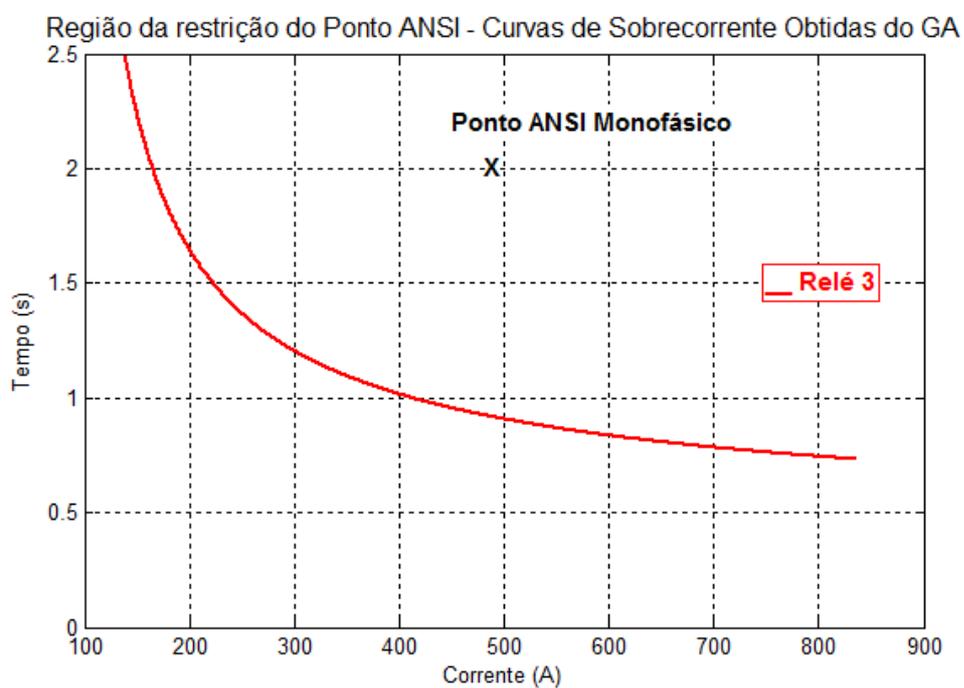


Figura 78—Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 3, obtida do GA, para o estudo de caso 3.

A figura 79 mostra a evolução do valor médio de avaliação da população e a figura 80 mostra a evolução do valor de avaliação do indivíduo melhor avaliado, ao longo das gerações do GA.

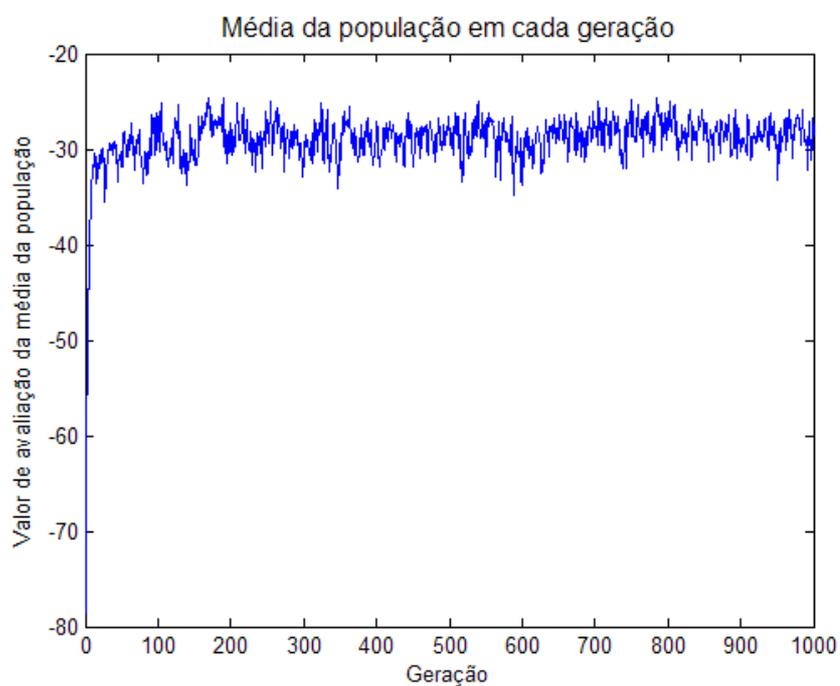


Figura 79–Gráfico da evolução da média da população ao longo dos ciclos do GA, para o estudo de caso 3.

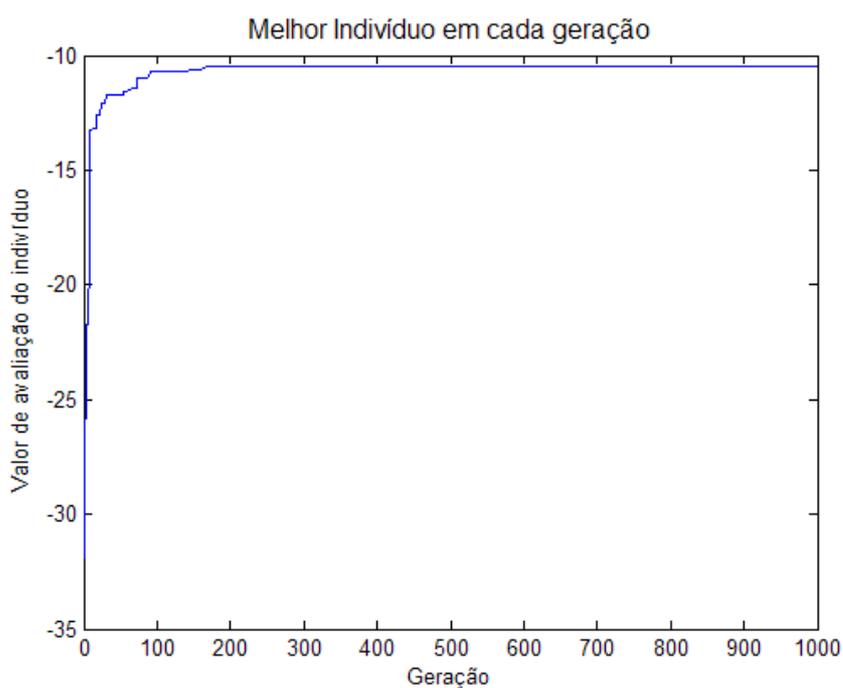


Figura 80–Gráfico da evolução do melhor indivíduo ao longo dos ciclos do GA, para o estudo de caso 3.

6.4.3 Resultados da otimização pelo algoritmo de otimização inspirado em colônia de formigas

O algoritmo de otimização inspirado em colônia de formigas proposto, após a inserção dos limites ou restrições do sistema, gera automaticamente as curvas para os relés 1, 2 e 3. Os resultados são demonstrados nas tabelas 23 e 24, que contém os parâmetros das curvas, os tempos de atuação e de coordenação.

Tabela 23 - Configurações dos relés e tempos de atuação das curvas de sobrecorrente obtidas do ACO.

Resultados do ACO		
Relé 1	Curva	Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,1
	Ajuste de corrente (Gs)	67,48
	Tempo máximo no intervalo	0,9617 s
	Tempo mínimo no intervalo	0,2713 s
Relé 2	Curva	IEEE Moderadamente Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,45
	Ajuste de corrente (Gs)	67,48
	Tempo máximo no intervalo	1,6433 s
	Tempo mínimo no intervalo	0,5004 s
Relé 3	Curva	IEEE Moderadamente Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,65
	Ajuste de corrente (Gs)	69,84
	Tempo máximo no intervalo	2,4892 s
	Tempo mínimo no intervalo	0,7321 s

Tabela 24 - Tempos de coordenação das curvas de sobrecorrente obtidas do ACO.

Resultados do ACO	
Diferença mínima de tempo entre as curvas dos relés 2 e 1	0,2291 s
Diferença mínima de tempo entre as curvas dos relés 3 e 2	0,2316 s
Diferença de tempo de atuação, no valor de $I_{cc3\phi}$ entre as curvas dos relés 2 e 1	0,2291 s
Diferença de tempo de atuação, no valor de $I_{cc3\phi}$ entre as curvas dos relés 3 e 2	0,2316 s

As curvas de sobrecorrente resultantes são apresentadas na figura 81.

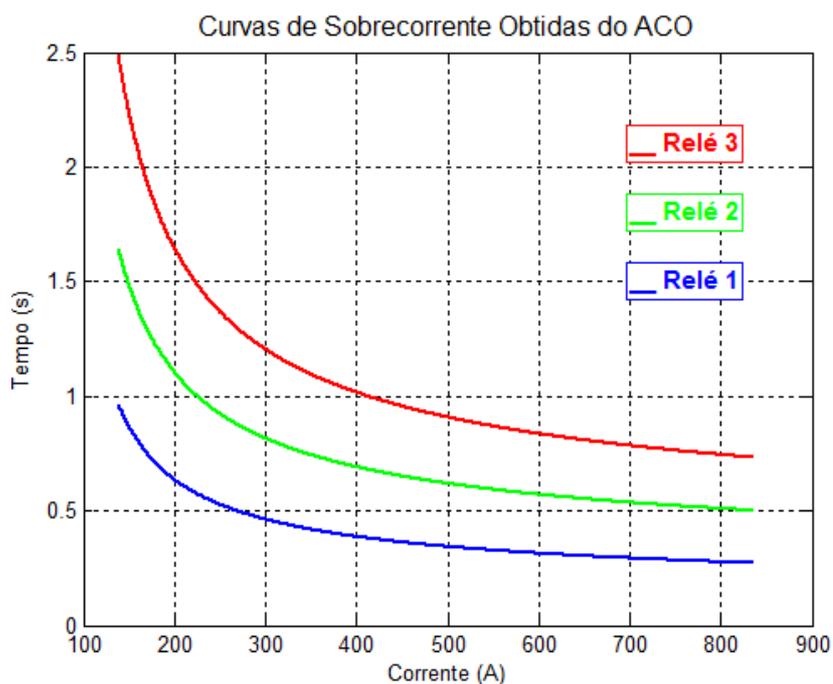


Figura 81—Curvas de sobrecorrente obtidas do ACO para o estudo de caso 3.

A figura 82 mostra o atendimento das restrições por parte da curva do relé 1 e a figura 83 mostra o atendimento por parte da curva do relé 3.

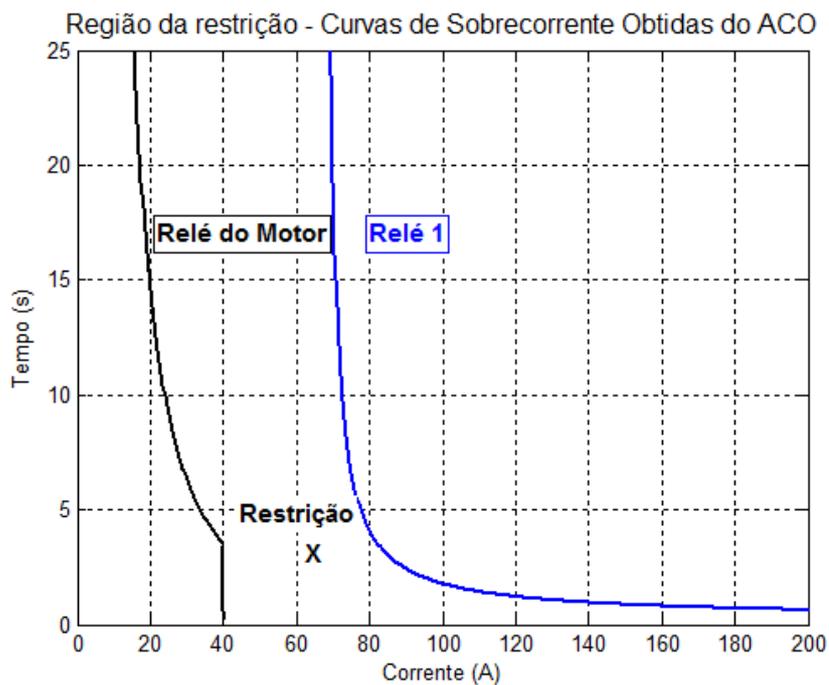


Figura 82—Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 1, obtida do ACO, para o estudo de caso 3.

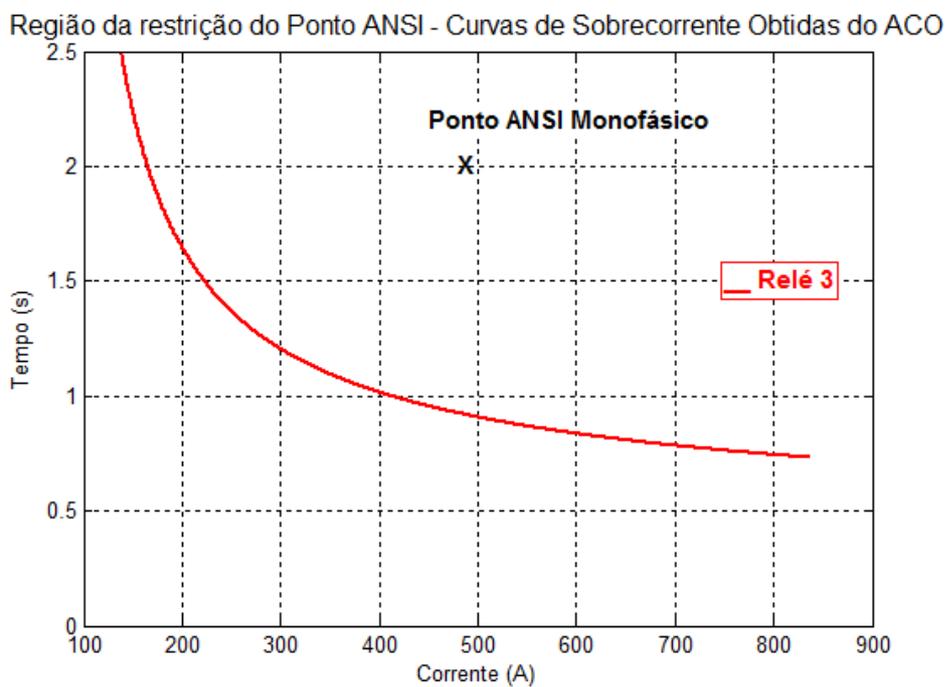


Figura 83—Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 3, obtida do ACO, para o estudo de caso 3.

A figura 84 mostra a evolução do valor de avaliação médio dos caminhos das formigas e a figura 85 mostra a evolução do valor de avaliação do melhor caminho das formigas, ao longo das iterações do ACO.

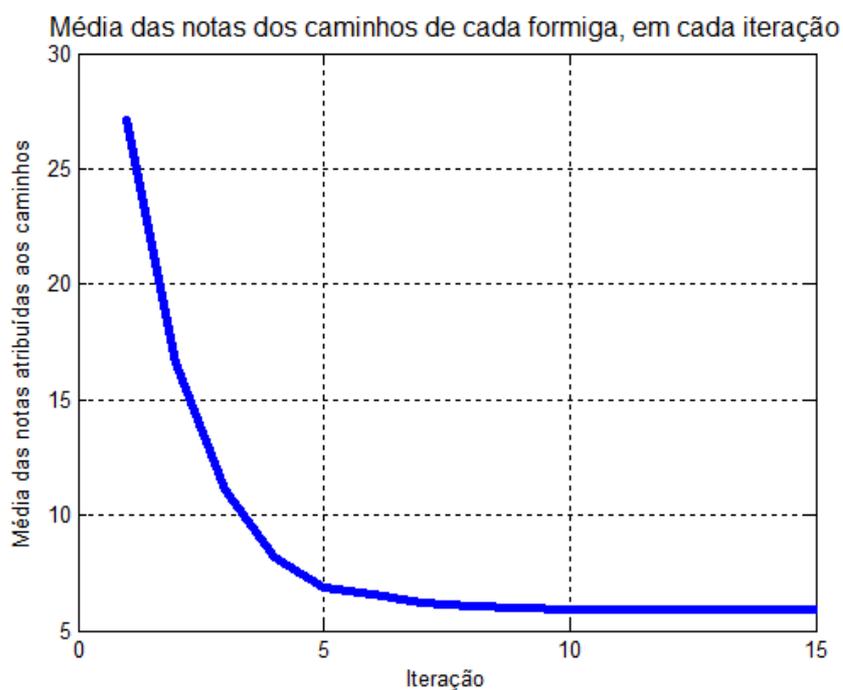


Figura 84—Gráfico da evolução do valor de avaliação médio dos caminhos das formigas, ao longo das iterações do ACO, para o estudo de caso 3.

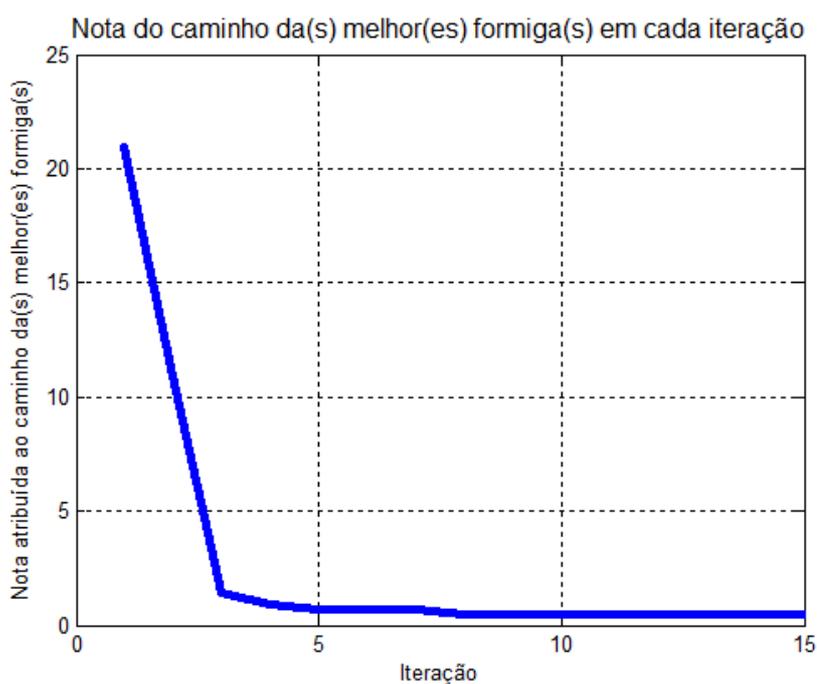


Figura 85—Gráfico da evolução do valor de avaliação do melhor caminho das formigas, ao longo das iterações do ACO, para o estudo de caso 3.

6.5 Estudo de Caso 4

O estudo de caso 4 consiste na coordenação dos relés 1, 2 e 3, mostrados na figura 86. O relé 1 deverá atender à restrição da curva de proteção do alimentador à jusante, e do valor de 0,4 segundos acima do tempo zero em qualquer ponto, devido ao tempo de coordenação de 0,2s com a atuação da função 50 do alimentador (que tem temporização de 0,2s). O relé 3 deverá atender à restrição do ponto ANSI monofásico do transformador. Os três relés devem ter tempo mínimo de coordenação de 0,2 segundos entre si.

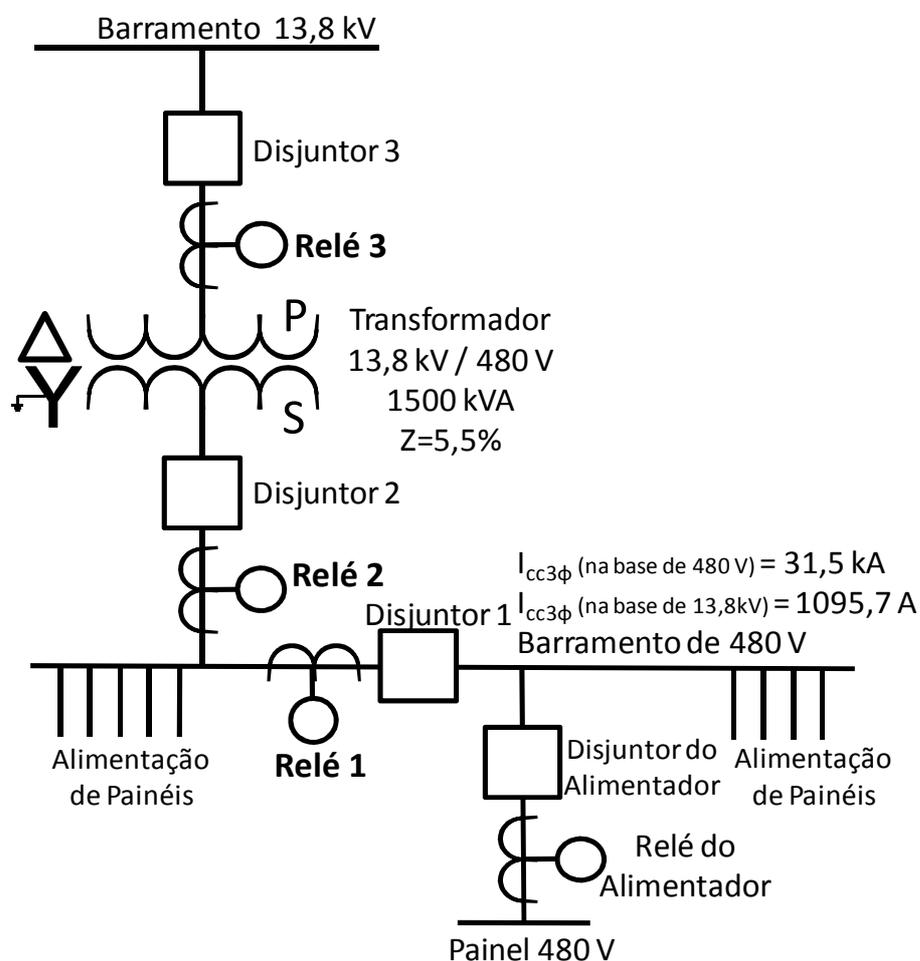


Figura 86– Sistema elétrico industrial referente ao estudo de caso 4.

6.5.1 Sistema existente na unidade industrial

Os ajustes dos relés existentes no sistema elétrico industrial do estudo de caso 4 são os descritos na tabela 25, obtidos por métodos tradicionais de estudos de proteção e tendo as curvas de sobrecorrente sido estendidas, conforme descrito no item 7.1. Os ajustes da tabela 25 resultam nos tempos de coordenação entre os relés apresentados na tabela 26 e nas curvas apresentadas na figura 87.

Tabela 25 - Configurações dos relés e tempos de atuação das curvas de sobrecorrente do sistema existente.

Configuração existente (curvas 51 estendidas)		
Relé 1	Curva	Muito Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,51
	Ajuste de corrente (Gs)	73,91
	Tempo máximo no intervalo	6,8683 s
	Tempo mínimo no intervalo	0,4979 s
Relé 2	Curva	Muito Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,51
	Ajuste de corrente (Gs)	73,91
	Tempo máximo no intervalo	6,8683 s
	Tempo mínimo no intervalo	0,4979 s
Relé 3	Curva	Muito Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,59
	Ajuste de corrente (Gs)	100
	Tempo máximo no intervalo	16,5938 s
	Tempo mínimo no intervalo	0,7997 s

Tabela 26 - Tempos de coordenação das curvas de sobrecorrente do sistema existente.

Configuração existente (curvas 51 estendidas)	
Diferença mínima de tempo entre as curvas dos relés 2 e 1	0s**
Diferença mínima de tempo entre as curvas dos relés 3 e 2	0,3018 s
Diferença de tempo de atuação, no valor de $I_{cc3\phi}$ entre as curvas dos relés 2 e 1	0s**
Diferença de tempo de atuação, no valor de $I_{cc3\phi}$ entre as curvas dos relés 3 e 2	0,3018 s

** Neste caso, existe uma real descoordenação entre as curvas de sobrecorrente, no sistema existente.

A tabela 26 e a figura 87 mostram que no sistema anteriormente existente os relés 1 e 2 apresentam curvas idênticas. Neste caso, numa possível corrente de falta na parte direita do gráfico, os relés 1 e 2 atuariam, ao invés de apenas o relé 1. De acordo com a filosofia de proteção adotada para o sistema existente, a atuação conjunta dos relés 1 e 2 pode ser permitida. Entretanto, neste trabalho, estabelecemos como critério a necessidade de atuação do relé 1 anteriormente à atuação do relé 2.

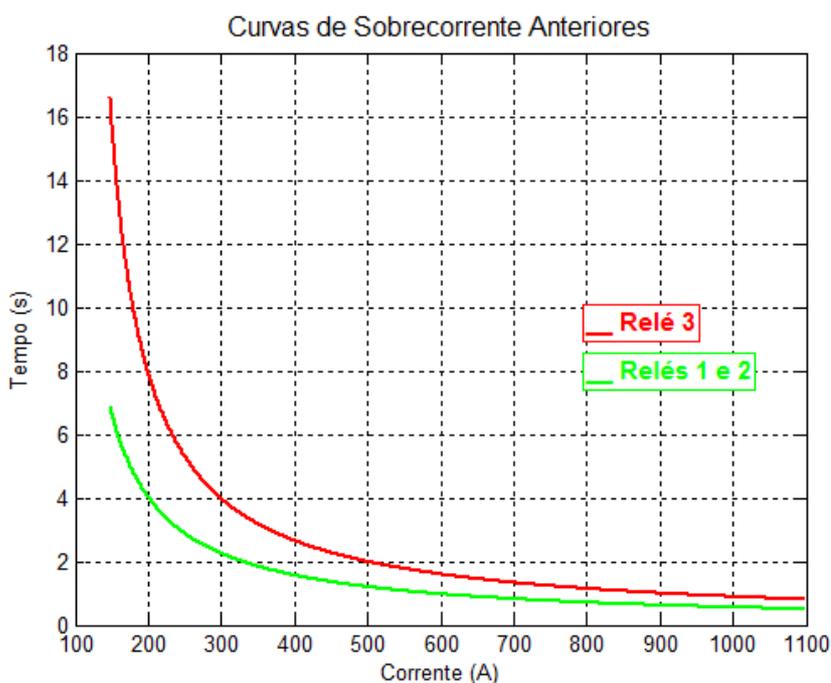


Figura 87–Curvas de sobrecorrente obtidas pelos métodos tradicionais de estudos de proteção para o estudo de caso 4, estendidas até o valor de $I_{cc3\phi}$.

A figura 88 mostra a restrição em que a curva do relé 1 deve passar: 0,2s acima da curva do relé do alimentador, em qualquer ponto; 0,4s acima do eixo zero, para coordenar na região de atuação da função 50 do relé do alimentador, que tem temporização de 0,2s (verificada no valor do tempo mínimo do relé 1, na tabela 7). Verifica-se, na figura 88 e na tabela 7, que as restrições são atendidas.

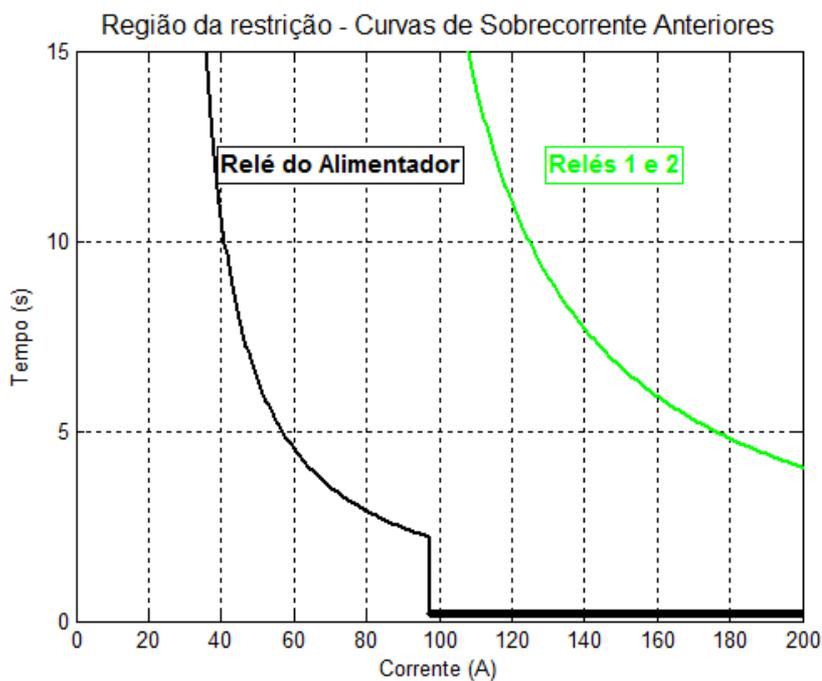


Figura 88—Região de restrição da curva de sobrecorrente anteriormente existente do relé 1, para o estudo de caso 4.

A figura 89 mostra o atendimento à restrição de que a curva do relé 3 deve estar abaixo do ponto ANSI monofásico.

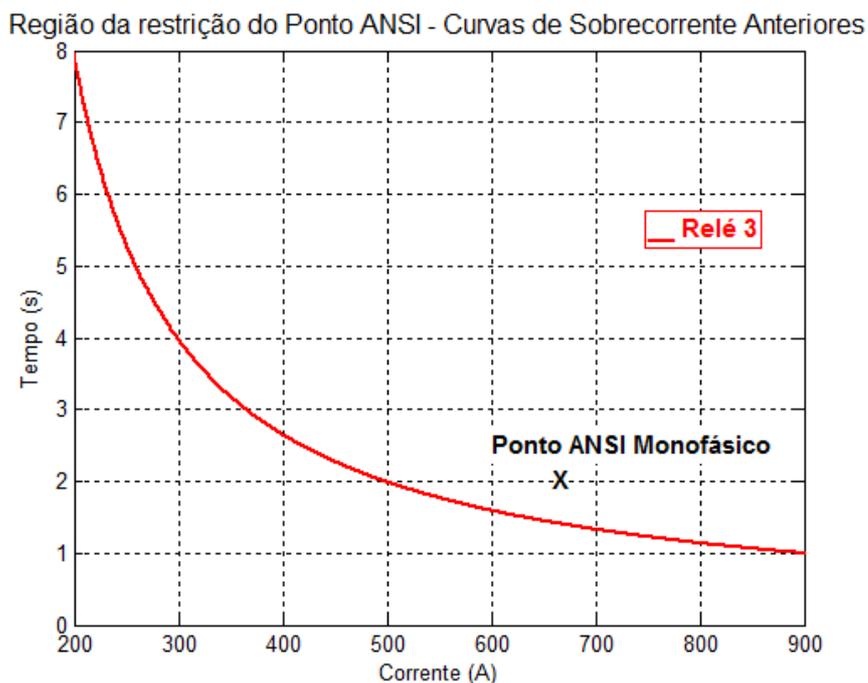


Figura 89—Região de restrição da curva de sobrecorrente anteriormente existente do relé 3, para o estudo de caso 4.

6.5.2 Resultados da otimização pelo algoritmo genético

O algoritmo genético proposto, após a inserção dos limites ou restrições do sistema, gera automaticamente as curvas para os relés 1, 2 e 3. Os resultados são demonstrados nas tabelas 27 e 28, que contém os parâmetros das curvas, os tempos de atuação e de coordenação.

Tabela 27 - Configurações dos relés e tempos de atuação das curvas de sobrecorrente obtidas do GA.

Resultados do GA		
Relé 1	Curva	IEEE Moderadamente Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,45
	Ajuste de corrente (Gs)	73,17
	Tempo máximo no intervalo	1,6847 s
	Tempo mínimo no intervalo	0,4679 s
Relé 2	Curva	IEEE Moderadamente Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,65
	Ajuste de corrente (Gs)	71,69
	Tempo máximo no intervalo	2,3666 s
	Tempo mínimo no intervalo	0,6713
Relé 3	Curva	IEEE Moderadamente Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,75
	Ajuste de corrente (Gs)	100
	Tempo máximo no intervalo	4,9923
	Tempo mínimo no intervalo	0,8730

Tabela 28 - Tempos de coordenação das curvas de sobrecorrente obtidas do GA.

Resultados do GA	
Diferença mínima de tempo entre as curvas dos relés 2 e 1	0,2033 s
Diferença mínima de tempo entre as curvas dos relés 3 e 2	0,2017 s
Diferença de tempo de atuação, no valor de $I_{cc3\phi}$ entre as curvas dos relés 2 e 1	0,2033 s
Diferença de tempo de atuação, no valor de $I_{cc3\phi}$ entre as curvas dos relés 3 e 2	0,2017 s

As curvas de sobrecorrente resultantes são apresentadas na figura 90.

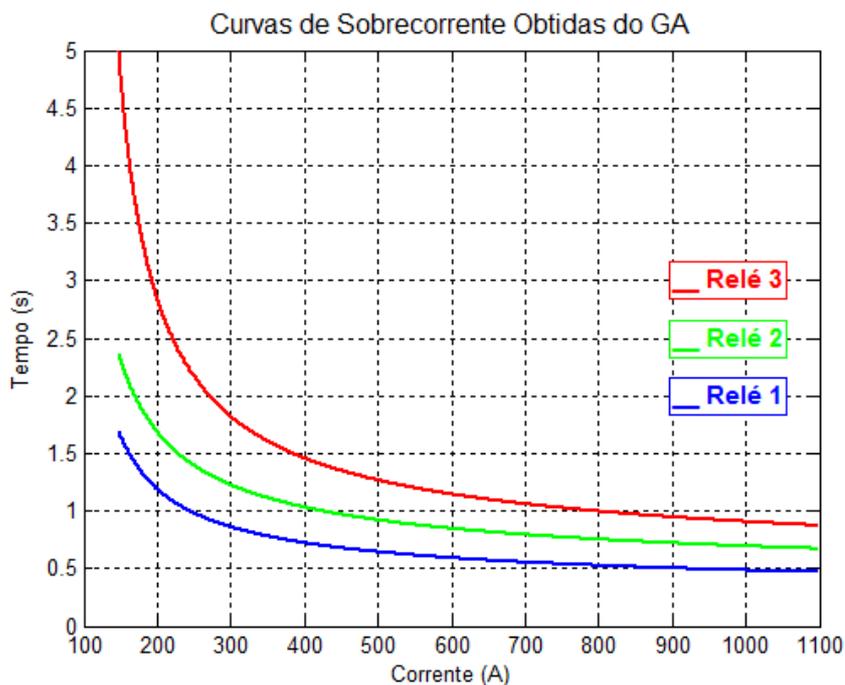


Figura 90—Curvas de sobrecorrente obtidas do GA para o estudo de caso 4.

A figura 91 mostra o atendimento das restrições por parte da curva do relé 1 e a figura 92 mostra o atendimento por parte da curva do relé 3.

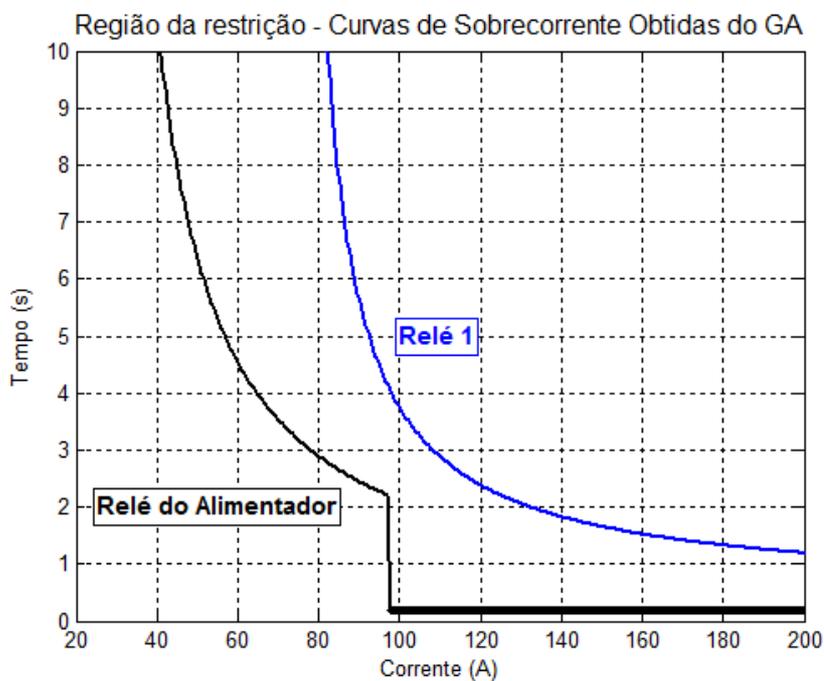


Figura 91—Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 1, obtida do GA, para o estudo de caso 4.

Região da restrição do Ponto ANSI - Curvas de Sobrecorrente Obtidas do GA

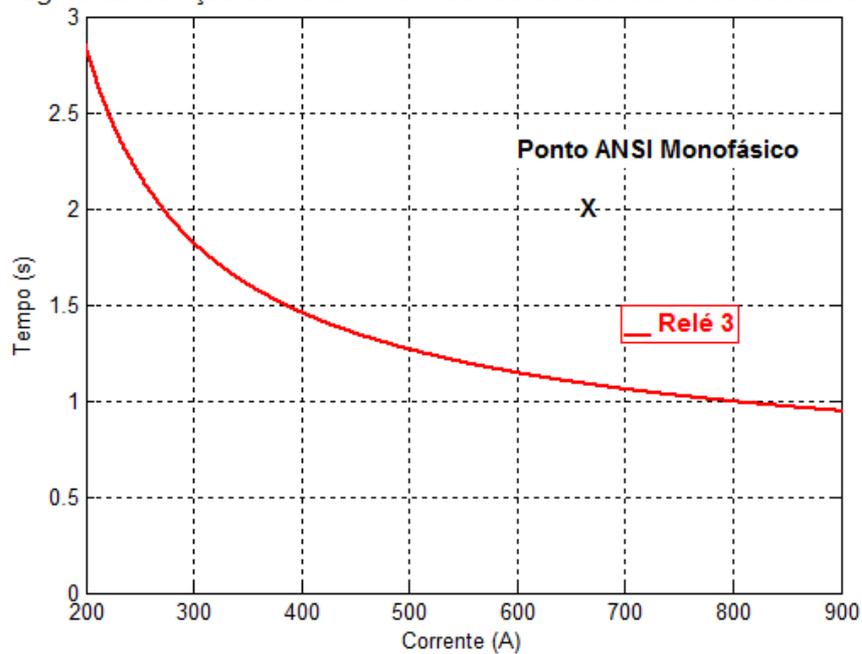


Figura 92–Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 3, obtida do GA, para o estudo de caso 4.

A figura 93 mostra a evolução do valor médio de avaliação da população e a figura 94 mostra a evolução do valor de avaliação do indivíduo melhor avaliado, ao longo das gerações do GA.

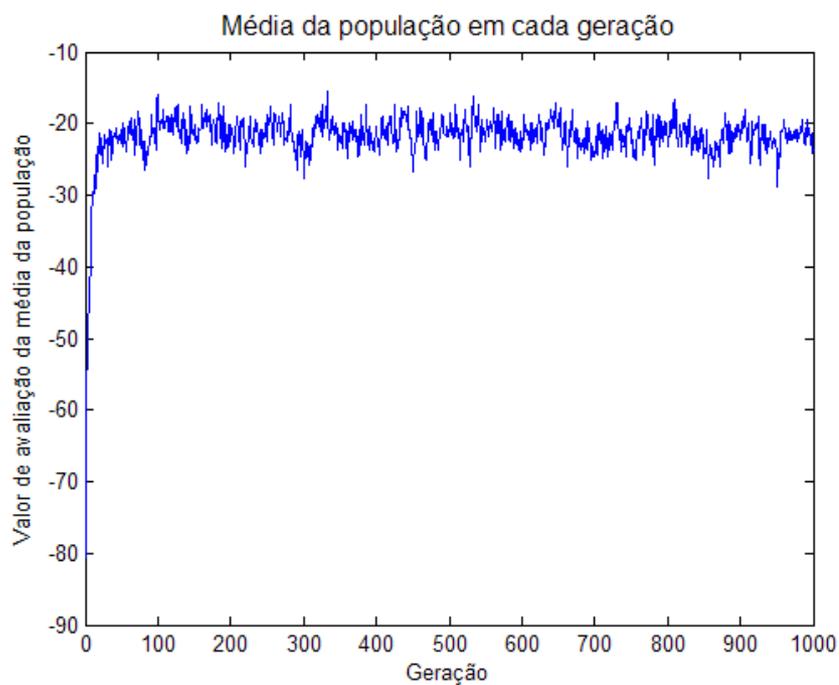


Figura 93—Gráfico da evolução da média da população ao longo dos ciclos do GA, para o estudo de caso 4.

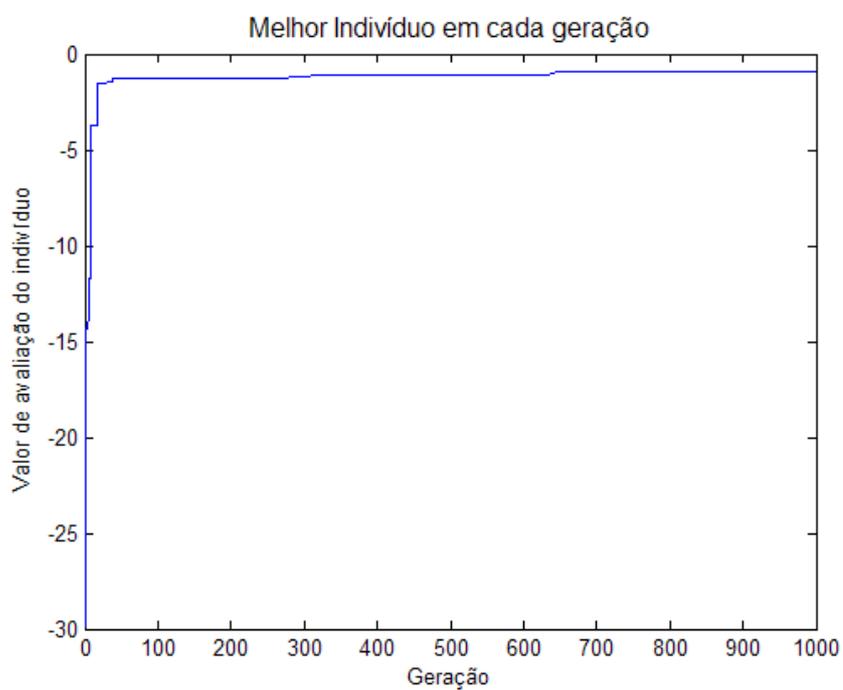


Figura 94—Gráfico da evolução do melhor indivíduo ao longo dos ciclos do GA, para o estudo de caso 4.

6.5.3 Resultados da otimização pelo algoritmo de otimização inspirado em colônia de formigas

O algoritmo de otimização inspirado em colônia de formigas proposto, após a inserção dos limites ou restrições do sistema, gera automaticamente as curvas para os relés 1, 2 e 3. Os resultados são demonstrados nas tabelas 29 e 30, que contém os parâmetros das curvas, os tempos de atuação e de coordenação.

Tabela 29 - Configurações dos relés e tempos de atuação das curvas de sobrecorrente obtidas do ACO.

Resultados do ACO		
Relé 1	Curva	Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,2
	Ajuste de corrente (Gs)	71,69
	Tempo máximo no intervalo	1,9175 s
	Tempo mínimo no intervalo	0,4995 s
Relé 2	Curva	Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,3
	Ajuste de corrente (Gs)	71,69
	Tempo máximo no intervalo	2,8763 s
	Tempo mínimo no intervalo	0,7493s
Relé 3	Curva	Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,35
	Ajuste de corrente (Gs)	97
	Tempo máximo no intervalo	5,7743 s
	Tempo mínimo no intervalo	0,9861 s

Tabela 30 - Tempos de coordenação das curvas de sobrecorrente obtidas do ACO.

Resultados do ACO	
Diferença mínima de tempo entre as curvas dos relés 2 e 1	0,2498 s
Diferença mínima de tempo entre as curvas dos relés 3 e 2	0,2369 s
Diferença de tempo de atuação, no valor de $I_{cc3\phi}$ entre as curvas dos relés 2 e 1	0,2498 s
Diferença de tempo de atuação, no valor de $I_{cc3\phi}$ entre as curvas dos relés 3 e 2	0,2369 s

As curvas de sobrecorrente resultantes são apresentadas na figura 95.

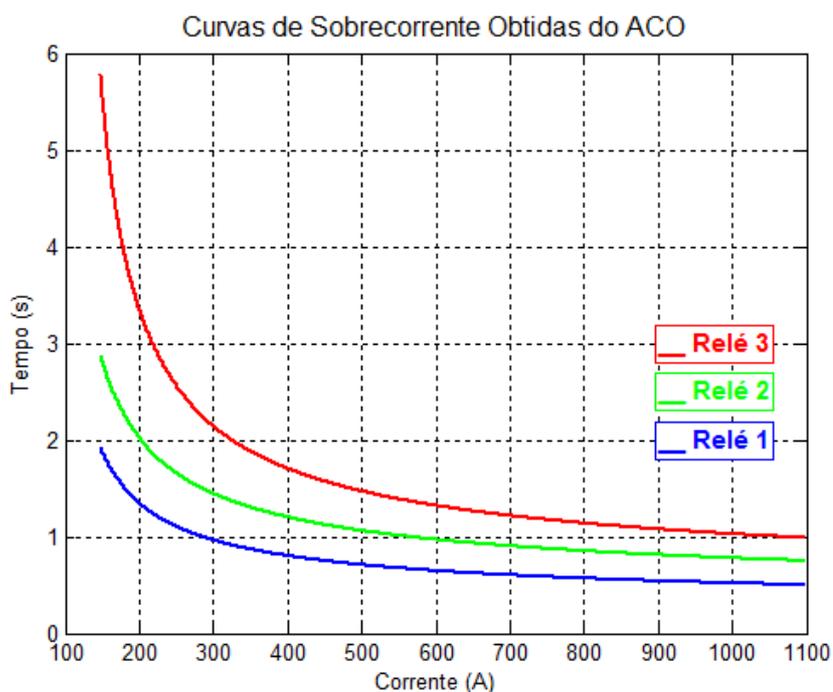


Figura 95–Curvas de sobrecorrente obtidas do ACO para o estudo de caso 4.

A figura 96 mostra o atendimento das restrições por parte da curva do relé 1 e a figura 97 mostra o atendimento por parte da curva do relé 3.

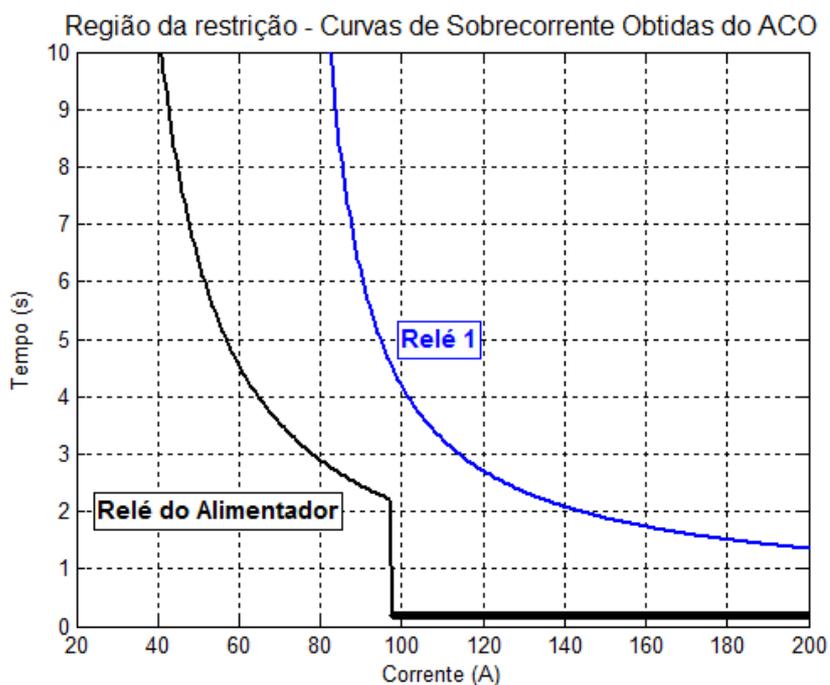


Figura 96—Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 1, obtida do ACO, para o estudo de caso 4.

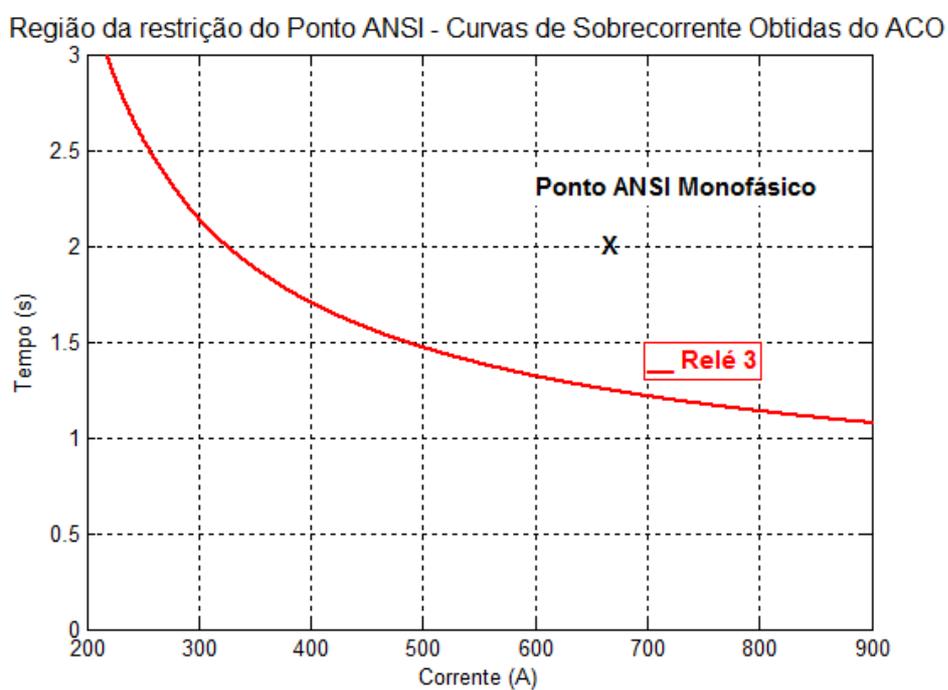


Figura 97—Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 3, obtida do ACO, para o estudo de caso 4.

A figura 98 mostra a evolução do valor de avaliação médio dos caminhos das formigas e a figura 99 mostra a evolução do valor de avaliação do melhor caminho das formigas, ao longo das iterações do ACO.

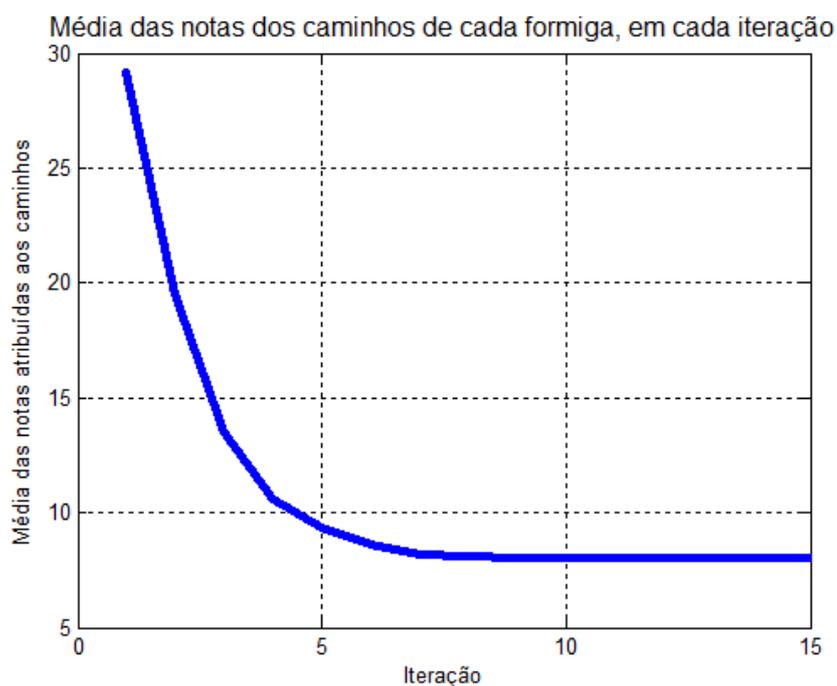


Figura 98—Gráfico da evolução do valor de avaliação médio dos caminhos das formigas, ao longo das iterações do ACO, para o estudo de caso 4.

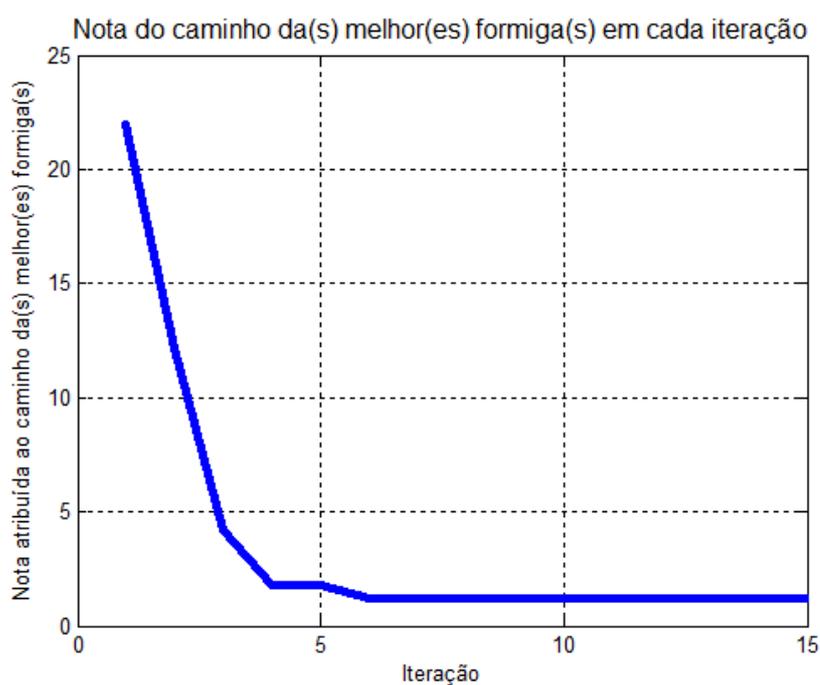


Figura 99—Gráfico da evolução do valor de avaliação do melhor caminho das formigas, ao longo das iterações do ACO, para o estudo de caso 4.

6.6 Estudo de Caso 5

O estudo de caso 5 consiste na coordenação dos relés 1, 2 e 3, mostrados na figura 100. O relé 1 deverá atender à restrição da curva de proteção do maior motor à jusante, da soma da carga máxima do barramento com a corrente de acionamento do maior motor e do valor de 0,2 segundos acima do tempo zero em qualquer ponto. O relé 3 deverá atender à restrição do ponto ANSI monofásico do transformador. Os três relés devem ter tempo mínimo de coordenação de 0,2 segundos entre si.

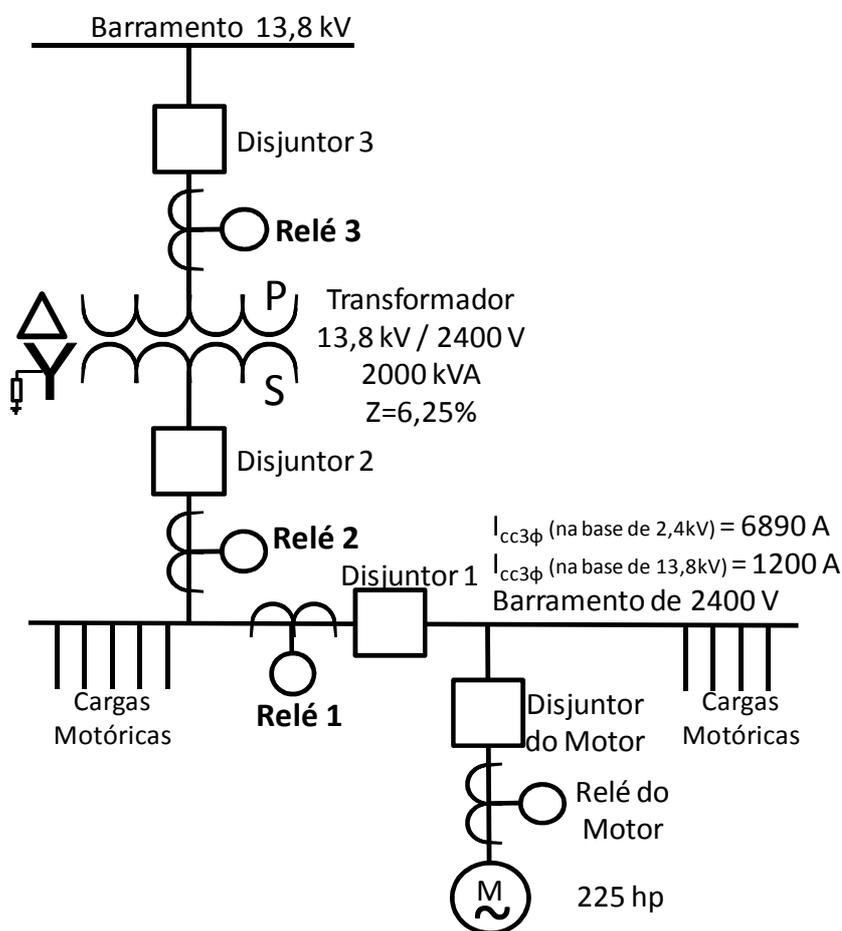


Figura 100– Sistema elétrico industrial referente ao estudo de caso 5.

6.6.1 Sistema existente na unidade industrial

Os ajustes dos relés existentes no sistema elétrico industrial do estudo de caso 5 são os descritos na tabela 31, obtidos por métodos tradicionais de estudos de proteção e tendo as curvas de sobrecorrente sido estendidas, conforme descrito no item 7.1. Os ajustes da tabela 31 resultam nos tempos de coordenação entre os relés apresentados na tabela 32 e nas curvas apresentadas na figura 101.

Tabela 31 - Configurações dos relés e tempos de atuação das curvas de sobrecorrente do sistema existente.

		Configuração existente (curvas 51 estendidas)
Relé 1	Curva	Extremamente Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,6
	Ajuste de corrente (Gs)	104,35
	Tempo máximo no intervalo	15,9389 s
	Tempo mínimo no intervalo	0,3657 s
Relé 2	Curva	Extremamente Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,6
	Ajuste de corrente (Gs)	104,35
	Tempo máximo no intervalo	15,9389 s
	Tempo mínimo no intervalo	0,3657 s
Relé 3	Curva	Extremamente Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	1,0
	Ajuste de corrente (Gs)	104,5
	Tempo máximo no intervalo	13,5000 s
	Tempo mínimo no intervalo	1,2878 s

Tabela 32 - Tempos de coordenação das curvas de sobrecorrente do sistema existente.

	Configuração existente (curvas 51 estendidas)
Diferença mínima de tempo entre as curvas dos relés 2 e 1	0s**
Diferença mínima de tempo entre as curvas dos relés 3 e 2	-2,4389s**
Diferença de tempo de atuação, no valor de $I_{cc3\phi}$ entre as curvas dos relés 2 e 1	0s**
Diferença de tempo de atuação, no valor de $I_{cc3\phi}$ entre as curvas dos relés 3 e 2	0,9220s

** Neste caso, existe uma real descoordenação entre as curvas de sobrecorrente, no sistema existente.

A tabela 32 e a figura 101 mostram que no sistema anteriormente existente os relés 1 e 2 apresentam curvas idênticas. Neste caso, numa possível corrente de falta na parte direita do gráfico, os relés 1 e 2 atuariam, ao invés de apenas o relé 1. De acordo com a filosofia de proteção adotada para o sistema existente, a atuação conjunta dos relés 1 e 2 pode ser permitida. Entretanto, neste trabalho, estabelecemos como critério a necessidade de atuação do relé 1 anteriormente à atuação do relé 2.

Adicionalmente, no sistema anteriormente existente, as curvas dos relés 1 e 2 se cruzam com a curva do relé 3, na parte esquerda do gráfico. Se a corrente de falta ocorrer com valores do lado esquerdo do gráfico, ao invés de apenas o relé 1 atuar, atuaria o relé 3, desligando todo o sistema estudado, o que indica uma falta de seletividade.

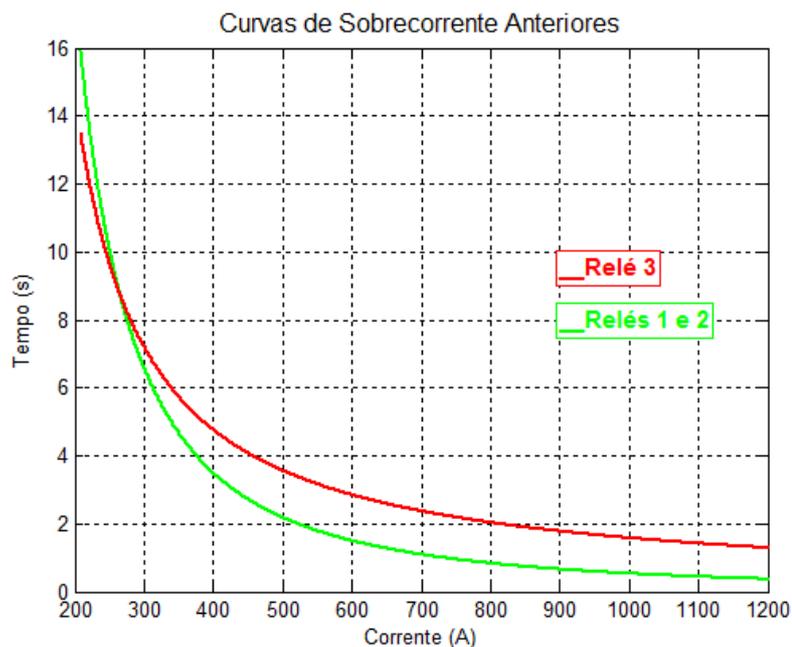


Figura 101–Curvas de sobrecorrente obtidas pelos métodos tradicionais de estudos de proteção para o estudo de caso 5, estendidas até o valor de $I_{cc3\phi}$.

A figura 102 mostra uma das regiões das curvas onde há restrição. A curva do relé 1 deve passar: 0,2s acima da curva do relé do motor; 0,2s acima do eixo zero, para coordenar na região de atuação da função 50 do relé do motor (verificada no valor do tempo mínimo do relé 1, na tabela 7); e acima da coordenada indicada com um "X", que corresponde à corrente de plena carga do painel adicionada do valor de corrente do acionamento do maior motor. Verifica-se, na figura 102 e na tabela 7, que estas restrições são atendidas.

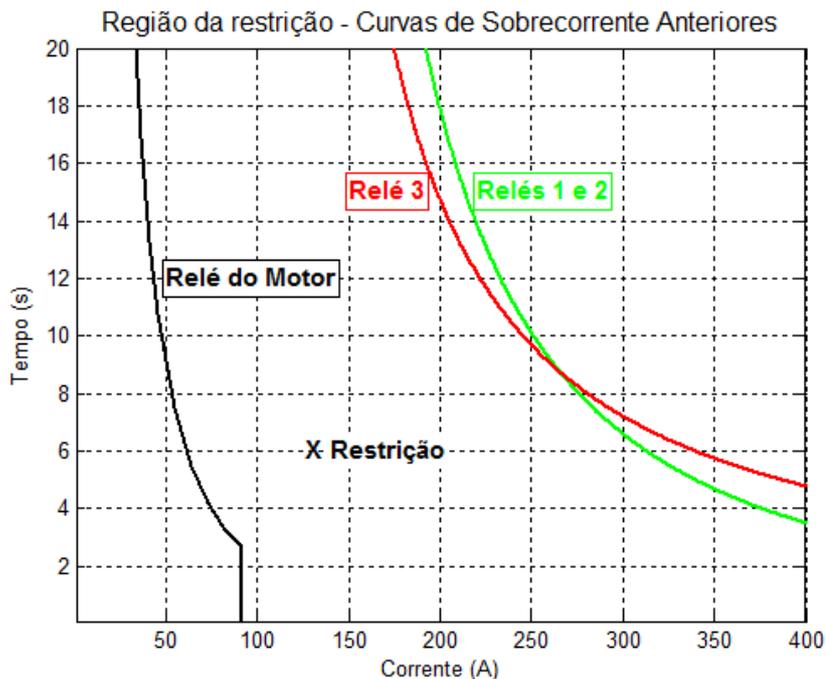


Figura 102–Região de restrição da curva de sobrecorrente anteriormente existente do relé 1, para o estudo de caso 5.

A figura 103 mostra que a curva do relé 3, que deve estar abaixo do ponto ANSI monofásico, não está atendendo a esta restrição. Ou seja, o relé 3 não está protegendo o transformador contra danos elétricos e mecânicos causados por sobrecorrente, sendo isto uma falha grave no estudo de proteção.

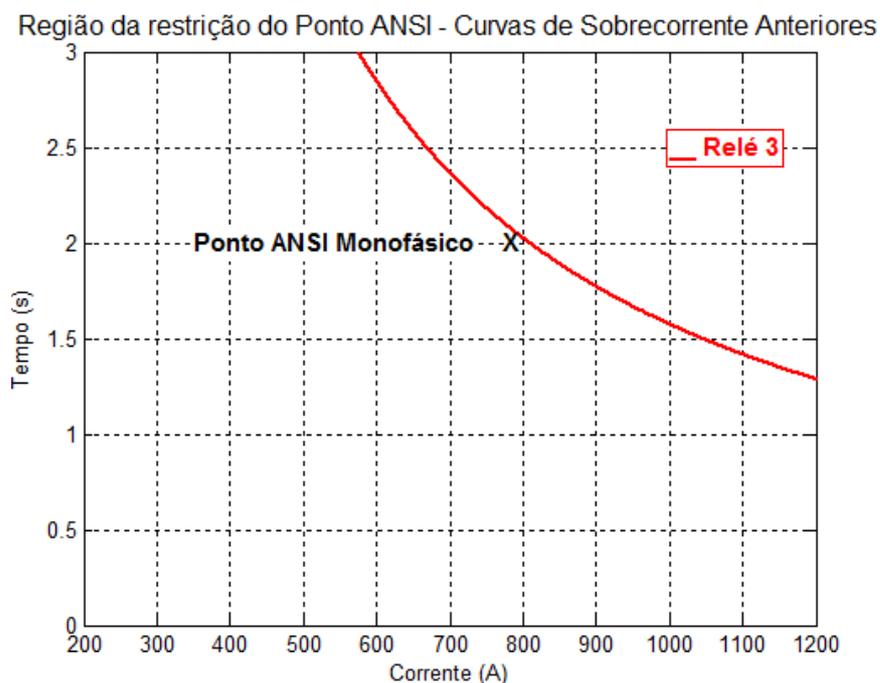


Figura 103–Região de restrição da curva de sobrecorrente anteriormente existente do relé 3, para o estudo de caso 5.

6.6.2 Resultados da otimização pelo algoritmo genético

O algoritmo genético proposto, após a inserção dos limites ou restrições do sistema, gera automaticamente as curvas para os relés 1, 2 e 3. Os resultados são demonstrados nas tabelas 33 e 34, que contém os parâmetros das curvas, os tempos de atuação e de coordenação.

Tabela 33 - Configurações dos relés e tempos de atuação das curvas de sobrecorrente obtidas do GA.

		Resultados do GA
Relé 1	Curva	IEEE Muito Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,35
	Ajuste de corrente (Gs)	102,26
	Tempo máximo no intervalo	2,3323 s
	Tempo mínimo no intervalo	0,2221 s
Relé 2	Curva	Muito Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,35
	Ajuste de corrente (Gs)	106,44
	Tempo máximo no intervalo	4,9035 s
	Tempo mínimo no intervalo	0,4599 s
Relé 3	Curva	Muito Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,55
	Ajuste de corrente (Gs)	101,37
	Tempo máximo no intervalo	6,9925 s
	Tempo mínimo no intervalo	0,6851 s

Tabela 34 - Tempos de coordenação das curvas de sobrecorrente obtidas do GA.

Resultados do GA	
Diferença mínima de tempo entre as curvas dos relés 2 e 1	0,2378s
Diferença mínima de tempo entre as curvas dos relés 3 e 2	0,2252s
Diferença de tempo de atuação, no valor de $I_{cc3\Phi}$ entre as curvas dos relés 2 e 1	0,2378 s
Diferença de tempo de atuação, no valor de $I_{cc3\Phi}$ entre as curvas dos relés 3 e 2	0,2252 s

As curvas de sobrecorrente resultantes são apresentadas na figura 104.

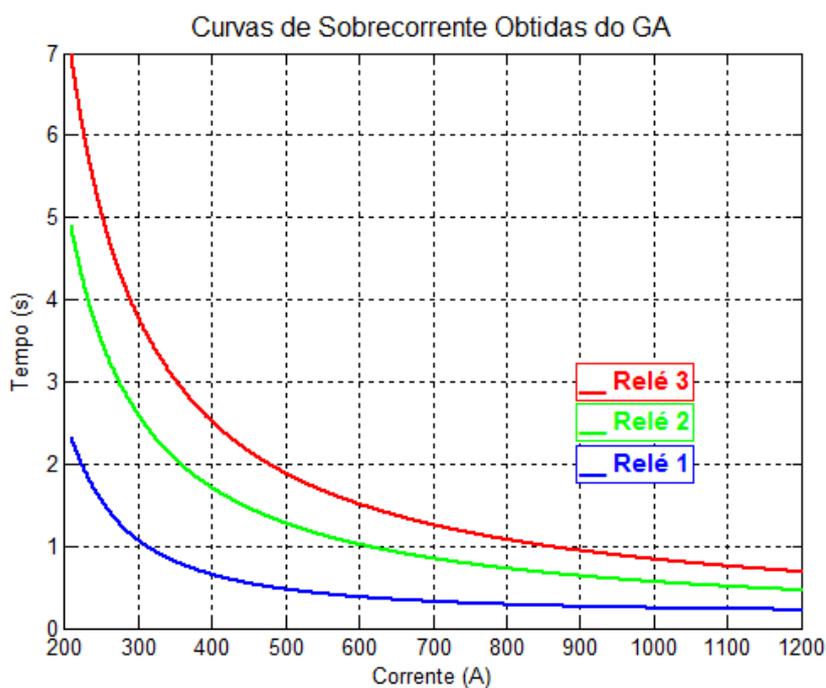


Figura 104–Curvas de sobrecorrente obtidas do GA para o estudo de caso 5.

A figura 105 mostra o atendimento das restrições por parte da curva do relé 1 e a figura 106 mostra o atendimento por parte da curva do relé 3.

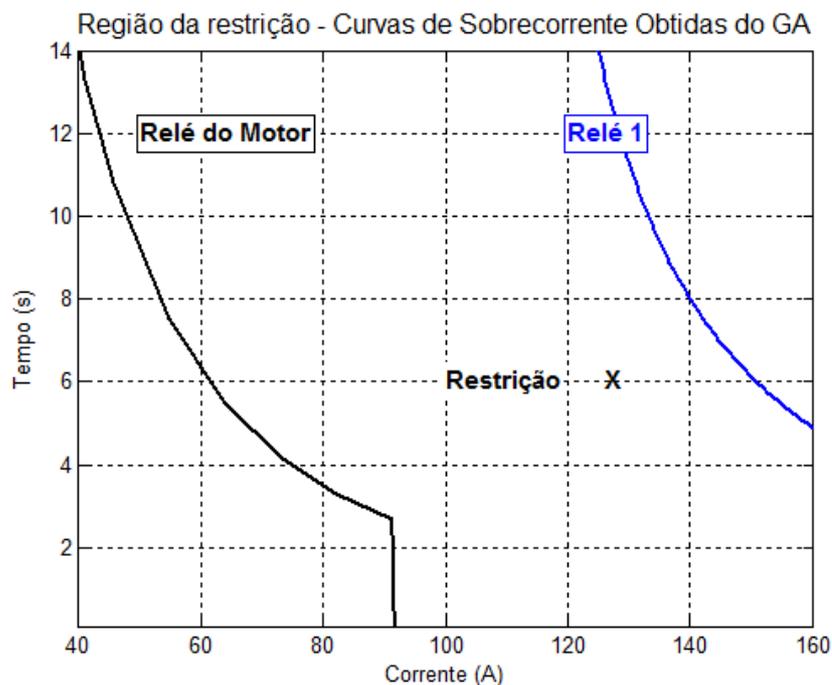


Figura 105—Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 1, obtida do GA, para o estudo de caso 5.

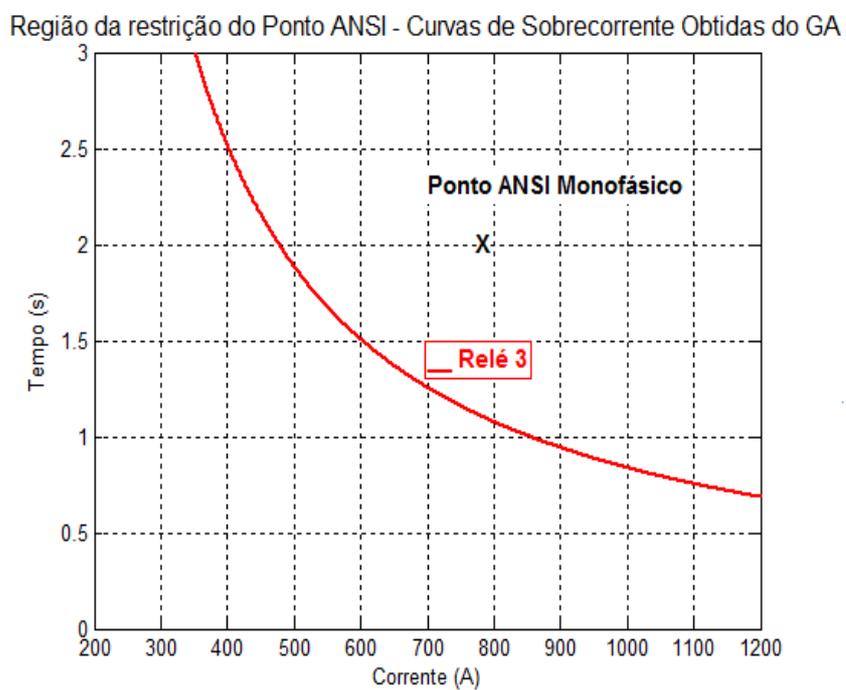


Figura 106—Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 3, obtida do GA, para o estudo de caso 5.

A figura 107 mostra a evolução do valor médio de avaliação da população e a figura 108 mostra a evolução do valor de avaliação do indivíduo melhor avaliado, ao longo das gerações do GA.

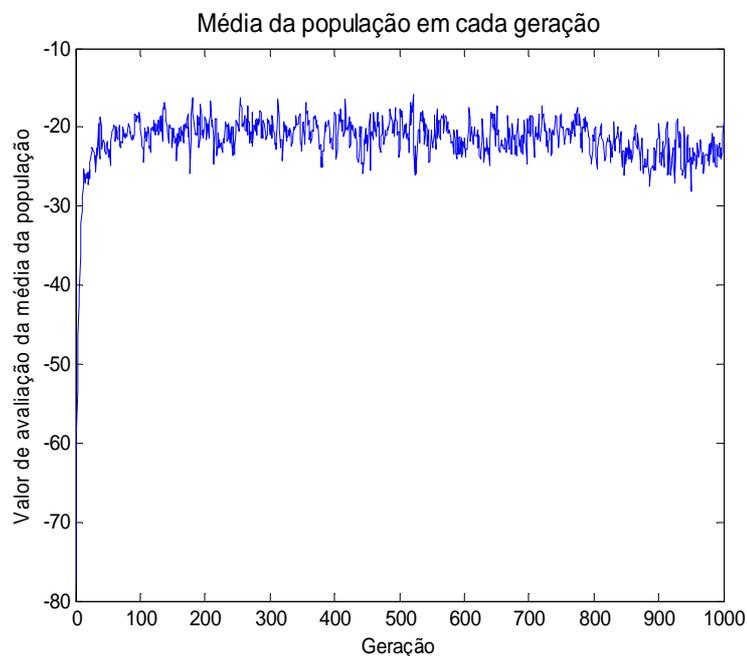


Figura 107–Gráfico da evolução da média da população ao longo dos ciclos do GA, para o estudo de caso 5.

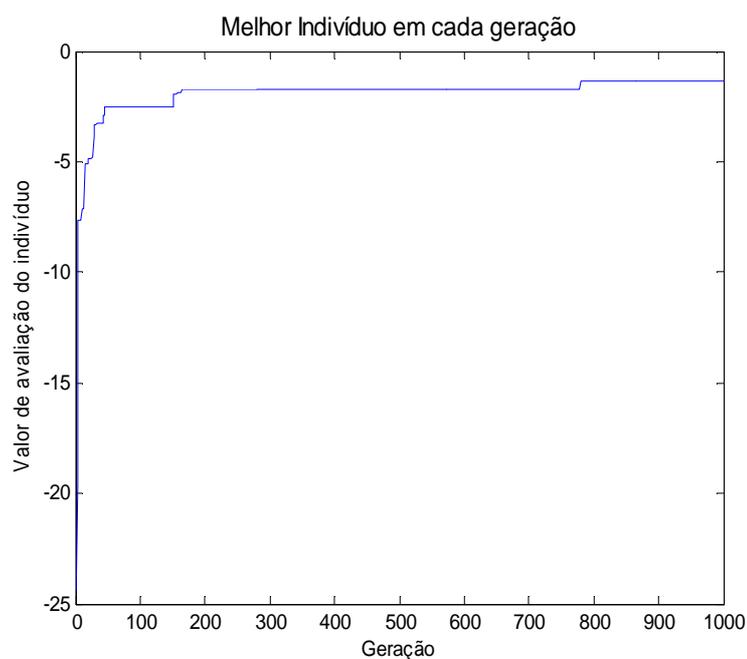


Figura 108–Gráfico da evolução do melhor indivíduo ao longo dos ciclos do GA, para o estudo de caso 5.

6.6.3 Resultados da otimização pelo algoritmo de otimização inspirado em colônia de formigas

O algoritmo de otimização inspirado em colônia de formigas proposto, após a inserção dos limites ou restrições do sistema, gera automaticamente as curvas para os relés 1, 2 e 3. Os resultados são demonstrados nas tabelas 35 e 36, que contém os parâmetros das curvas, os tempos de atuação e de coordenação.

Tabela 35 - Configurações dos relés e tempos de atuação das curvas de sobrecorrente obtidas do ACO.

Resultados do ACO		
Relé 1	Curva	Muito Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,2
	Ajuste de corrente (Gs)	101,22
	Tempo máximo no intervalo	2,5356 s
	Tempo mínimo no intervalo	0,2487 s
Relé 2	Curva	Muito Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,35
	Ajuste de corrente (Gs)	104,35
	Tempo máximo no intervalo	4,7114s
	Tempo mínimo no intervalo	0,4500 s
Relé 3	Curva	Muito Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,55
	Ajuste de corrente (Gs)	101.37
	Tempo máximo no intervalo	6,9925 s
	Tempo mínimo no intervalo	0,6851s

Tabela 36 - Tempos de coordenação das curvas de sobrecorrente obtidas do ACO.

	Resultados do ACO
Diferença mínima de tempo entre as curvas dos relés 2 e 1	0,2013s
Diferença mínima de tempo entre as curvas dos relés 3 e 2	0,2351s
Diferença de tempo de atuação, no valor de $I_{cc3\phi}$ entre as curvas dos relés 2 e 1	0,2013s
Diferença de tempo de atuação, no valor de $I_{cc3\phi}$ entre as curvas dos relés 3 e 2	0,2351s

As curvas de sobrecorrente resultantes são apresentadas na figura 109.

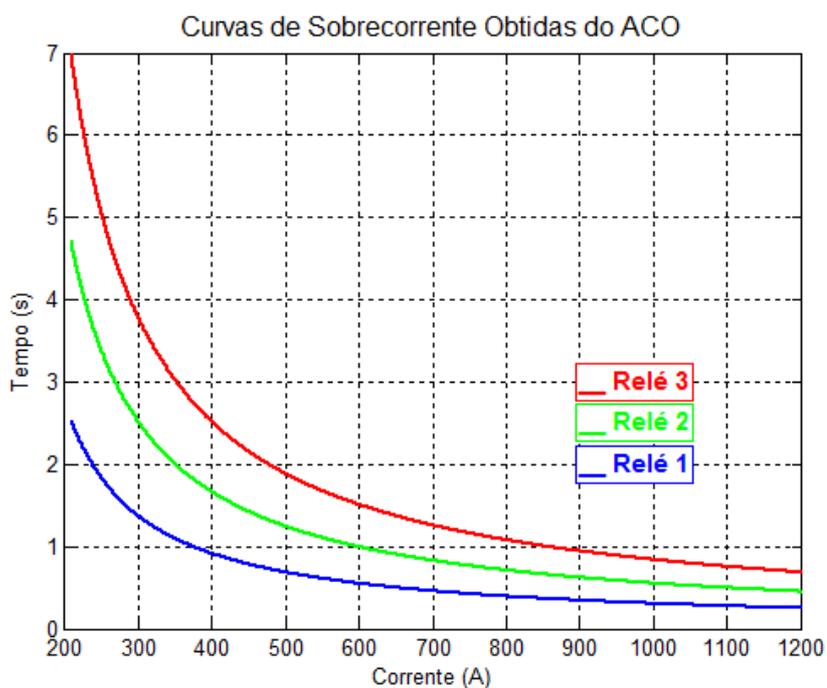


Figura 109–Curvas de sobrecorrente obtidas do ACO para o estudo de caso 5.

A figura 110 mostra o atendimento das restrições por parte da curva do relé 1 e a figura 111 mostra o atendimento por parte da curva do relé 3.

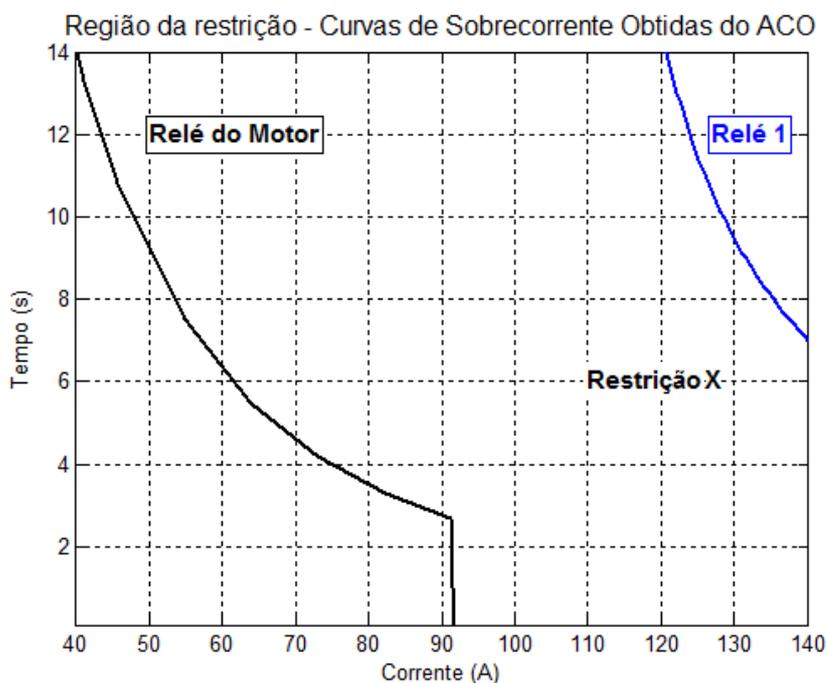


Figura 110–Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 1, obtida do ACO, para o estudo de caso 5.

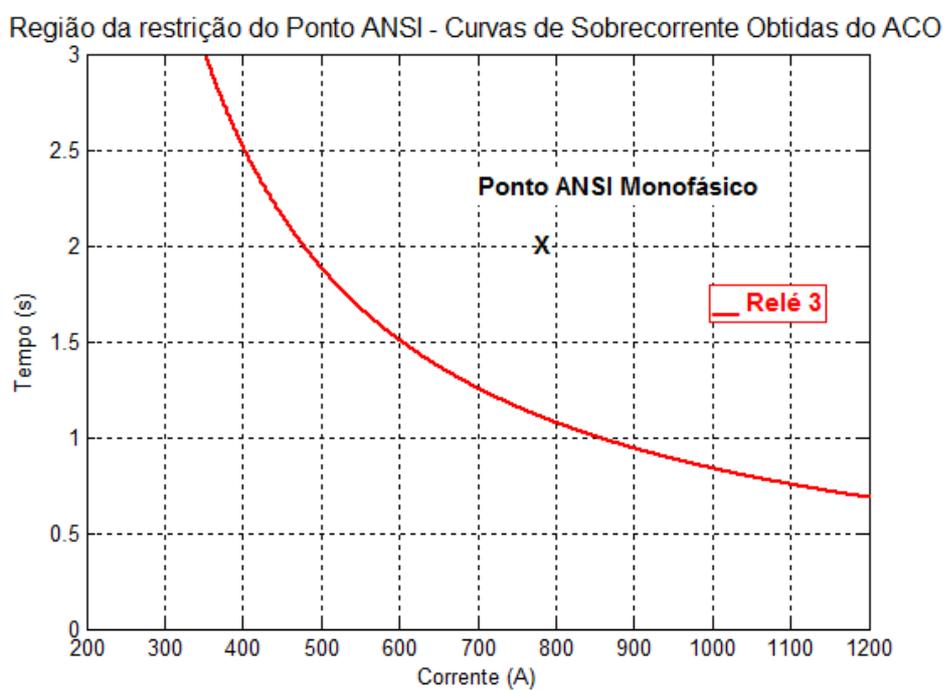


Figura 111–Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 3, obtida do ACO, para o estudo de caso 5.

A figura 112 mostra a evolução do valor de avaliação médio dos caminhos das formigas e a figura 113 mostra a evolução do valor de avaliação do melhor caminho das formigas, ao longo das iterações do ACO.

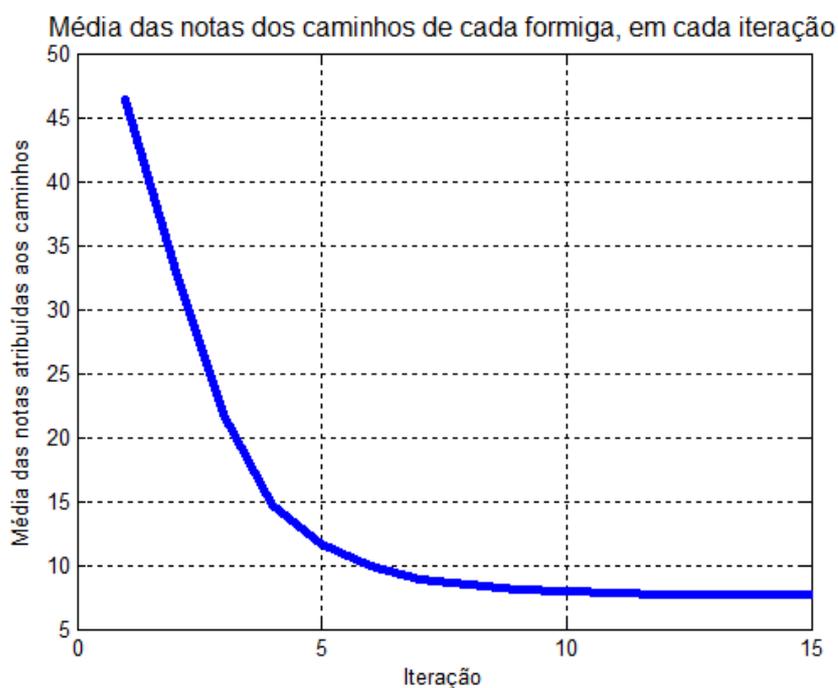


Figura 112—Gráfico da evolução do valor de avaliação médio dos caminhos das formigas, ao longo das iterações do ACO, para o estudo de caso 5.

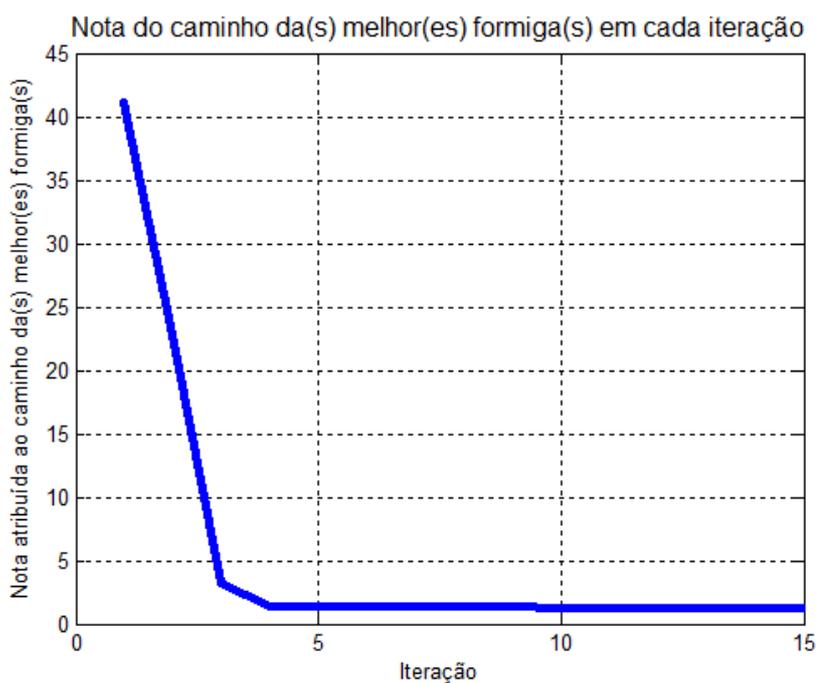


Figura 113—Gráfico da evolução do valor de avaliação do melhor caminho das formigas, ao longo das iterações do ACO, para o estudo de caso 5.

6.7 Estudo de Caso 6

O estudo de caso 6 consiste na coordenação dos relés 1, 2 e 3, mostrados na figura 114. O relé 1 deverá atender à restrição da curva de proteção do alimentador à jusante, e do valor de 0,4 segundos acima do tempo zero em qualquer ponto, devido ao tempo de coordenação de 0,2s com a atuação da função 50 do alimentador (que tem temporização de 0,2s). O relé 3 deverá atender à restrição do ponto ANSI monofásico do transformador. Os três relés devem ter tempo mínimo de coordenação de 0,2 segundos entre si.

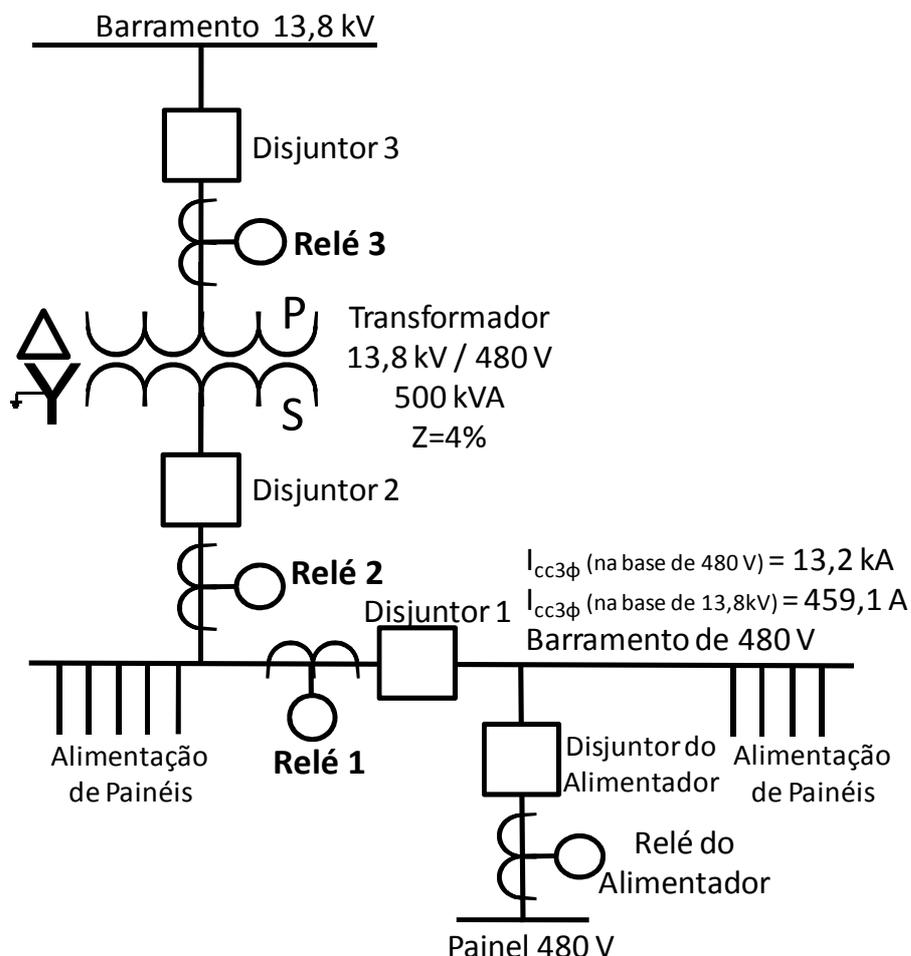


Figura 114– Sistema elétrico industrial referente ao estudo de caso 6.

6.7.1 Sistema existente na unidade industrial

Os ajustes dos relés existentes no sistema elétrico industrial do estudo de caso 6 são os descritos na tabela 37, obtidos por métodos tradicionais de estudos de proteção e tendo as curvas de sobrecorrente sido estendidas, conforme descrito no item 7.1. Os ajustes da tabela 37 resultam nos tempos de coordenação entre os relés apresentados na tabela 38 e nas curvas apresentadas na figura 115.

Tabela 37 - Configurações dos relés e tempos de atuação das curvas de sobrecorrente do sistema existente.

		Configuração existente (curvas 51 estendidas)
Relé 1	Curva	Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,1
	Ajuste de corrente (Gs)	20,87
	Tempo máximo no intervalo	0,9939 s
	Tempo mínimo no intervalo	0,2196s
Relé 2	Curva	Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,1
	Ajuste de corrente (Gs)	26,46
	Tempo máximo no intervalo	1,5080 s
	Tempo mínimo no intervalo	0,2384 s
Relé 3	Curva	Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,1
	Ajuste de corrente (Gs)	26
	Tempo máximo no intervalo	2,9053 s
	Tempo mínimo no intervalo	0,4738 s

Tabela 38 - Tempos de coordenação das curvas de sobrecorrente do sistema existente.

	Configuração existente (curvas 51 estendidas)
Diferença mínima de tempo entre as curvas dos relés 2 e 1	0,0188s*
Diferença mínima de tempo entre as curvas dos relés 3 e 2	0,2354 s
Diferença de tempo de atuação, no valor de $I_{cc3\phi}$ entre as curvas dos relés 2 e 1	0,0188s*
Diferença de tempo de atuação, no valor de $I_{cc3\phi}$ entre as curvas dos relés 3 e 2	0,2354 s

* Os valores inferiores a 0,2s para $I_{cc3\phi}$, são devidos à extensão das curvas, não representando uma descoordenação no sistema real.

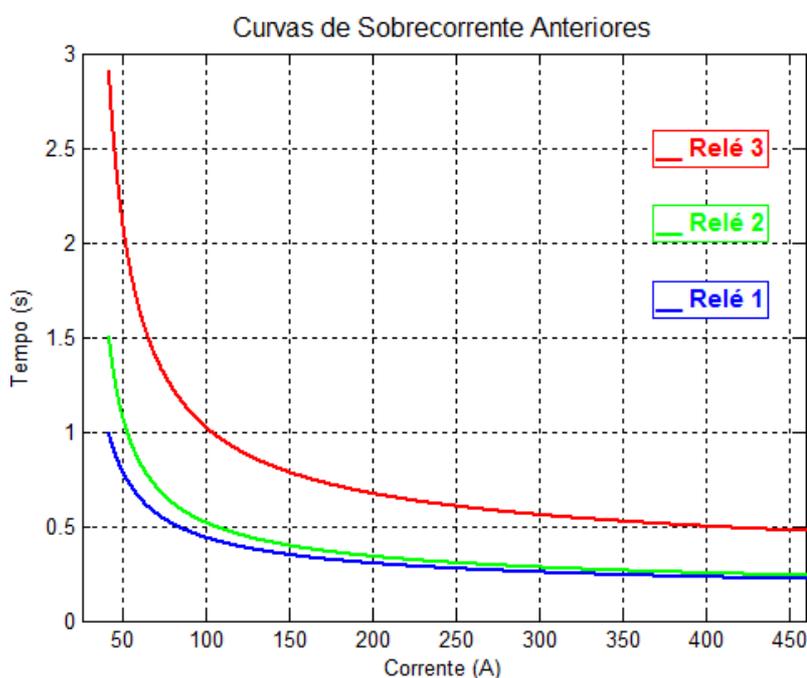


Figura 115–Curvas de sobrecorrente obtidas pelos métodos tradicionais de estudos de proteção para o estudo de caso 6, estendidas até o valor de $I_{cc3\phi}$.

A figura 116 mostra a restrição em que a curva do relé 1 deve passar: 0,2s acima da curva do relé do alimentador, em qualquer ponto; 0,4s acima do eixo zero, para coordenar na região de atuação da função 50 (neste estudo de caso, a partir de 81 ampères) do relé do alimentador, que tem temporização de 0,2s (verificada no

valor do tempo mínimo do relé 1, na tabela 37). Verifica-se, na figura 116 e na tabela 37, que as restrições são atendidas.

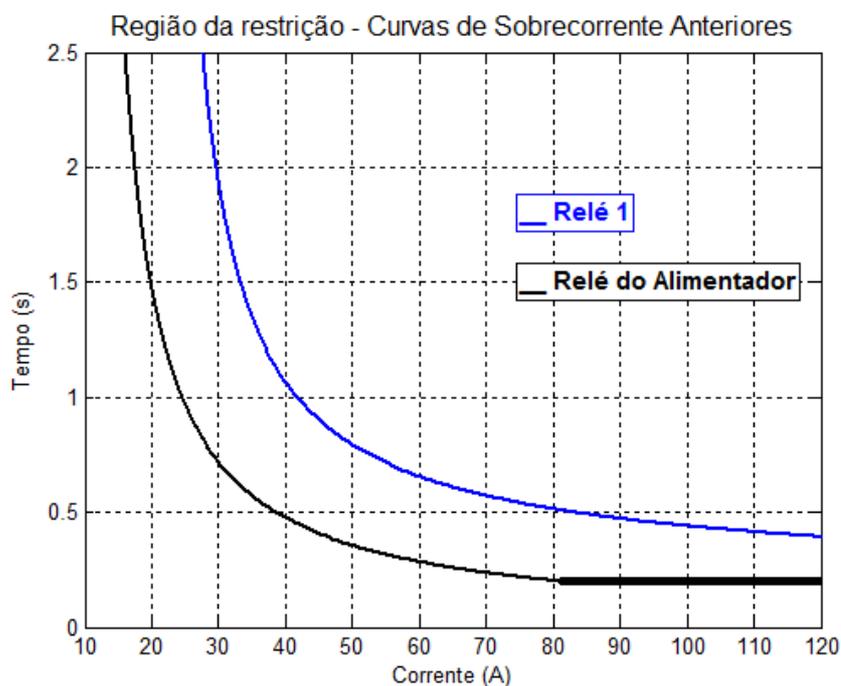


Figura 116–Região de restrição da curva de sobrecorrente anteriormente existente do relé 1, para o estudo de caso 6.

A figura 47 mostra o atendimento à restrição de que a curva do relé 3 deve estar abaixo do ponto ANSI monofásico.

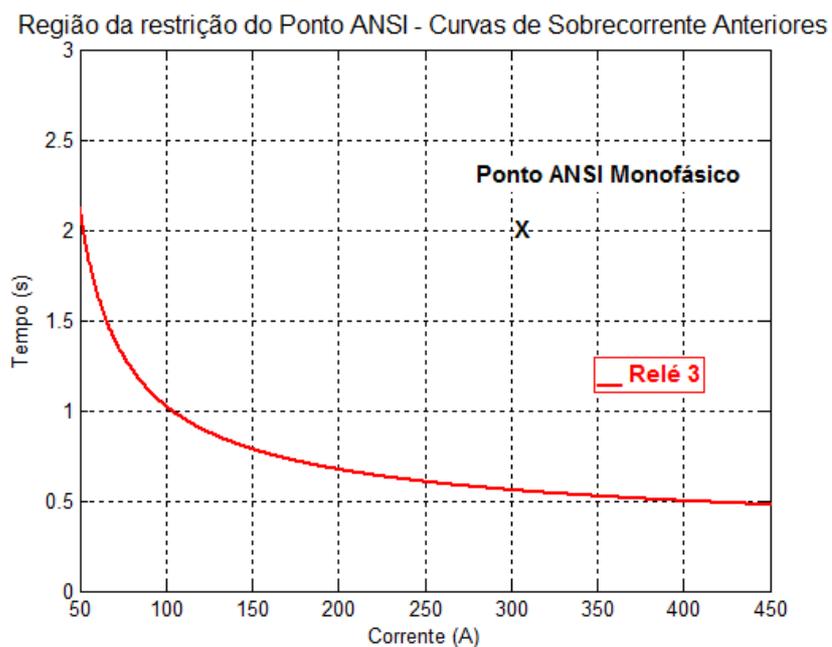


Figura 117–Região de restrição da curva de sobrecorrente anteriormente existente do relé 3, para o estudo de caso 6.

6.7.2 Resultados da otimização pelo algoritmo genético

O algoritmo genético proposto, após a inserção dos limites ou restrições do sistema, gera automaticamente as curvas para os relés 1, 2 e 3. Os resultados são demonstrados nas tabelas 39 e 40, que contém os parâmetros das curvas, os tempos de atuação e de coordenação.

Tabela 39 - Configurações dos relés e tempos de atuação das curvas de sobrecorrente obtidas do GA.

Resultados do GA		
Relé 1	Curva	IEEE Moderadamente Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,45
	Ajuste de corrente (Gs)	21,50
	Tempo máximo no intervalo	1,7697 s
	Tempo mínimo no intervalo	0,4184 s
Relé 2	Curva	IEEE Moderadamente Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,65
	Ajuste de corrente (Gs)	27,52
	Tempo máximo no intervalo	4,0160 s
	Tempo mínimo no intervalo	0,6523 s
Relé 3	Curva	IEEE Moderadamente Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,9
	Ajuste de corrente (Gs)	25,22
	Tempo máximo no intervalo	4,6233 s
	Tempo mínimo no intervalo	0,8784 s

Tabela 40 - Tempos de coordenação das curvas de sobrecorrente obtidas do GA.

	Resultados do GA
Diferença mínima de tempo entre as curvas dos relés 2 e 1	0,2339s
Diferença mínima de tempo entre as curvas dos relés 3 e 2	0,2261s
Diferença de tempo de atuação, no valor de $I_{cc3\phi}$ entre as curvas dos relés 2 e 1	0,2339 s
Diferença de tempo de atuação, no valor de $I_{cc3\phi}$ entre as curvas dos relés 3 e 2	0,2261 s

As curvas de sobrecorrente resultantes são apresentadas na figura 118.

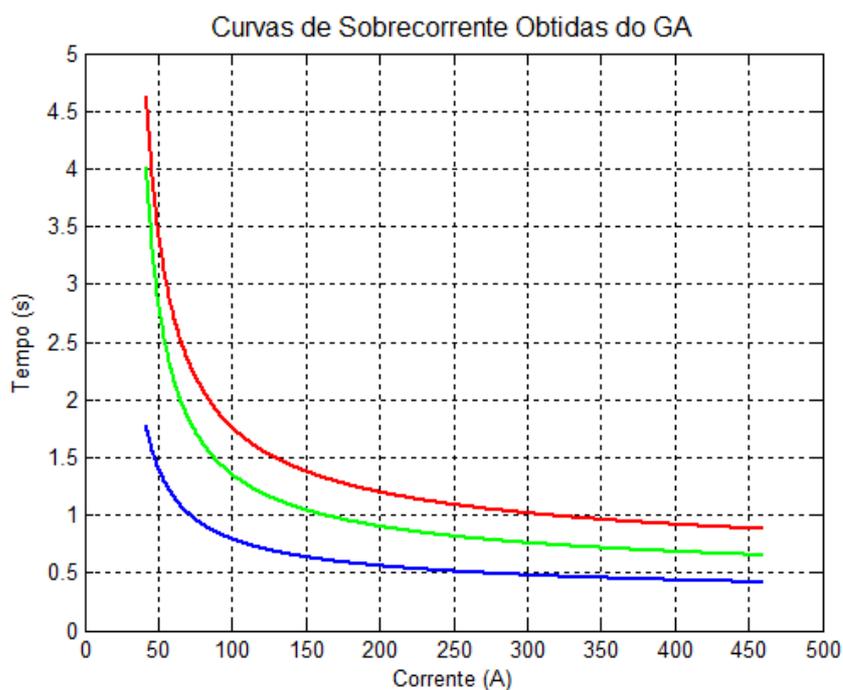


Figura 118–Curvas de sobrecorrente obtidas do GA para o estudo de caso 6.

A figura 119 mostra o atendimento das restrições por parte da curva do relé 1 e a figura 120 mostra o atendimento por parte da curva do relé 3.

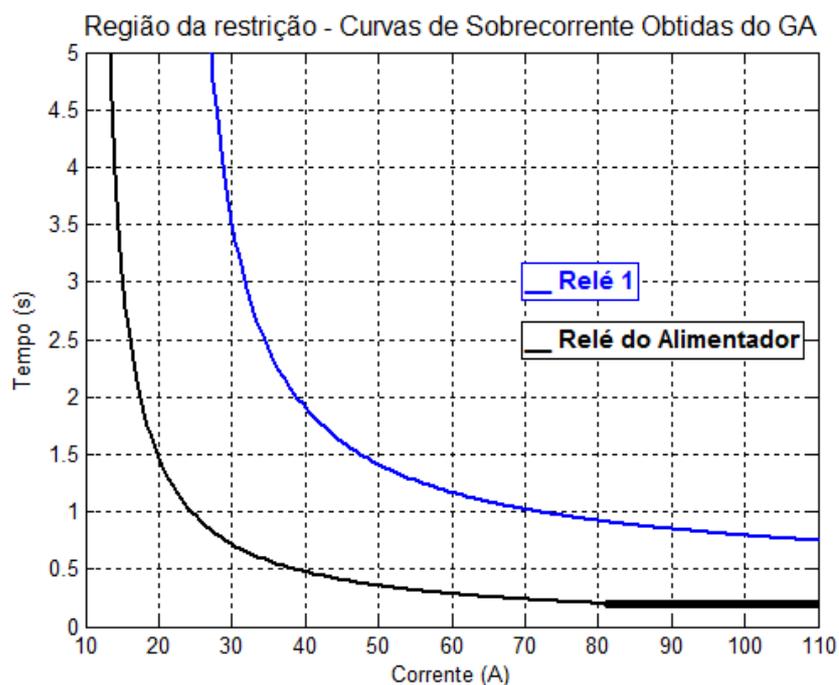


Figura 119—Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 1, obtida do GA, para o estudo de caso 6.

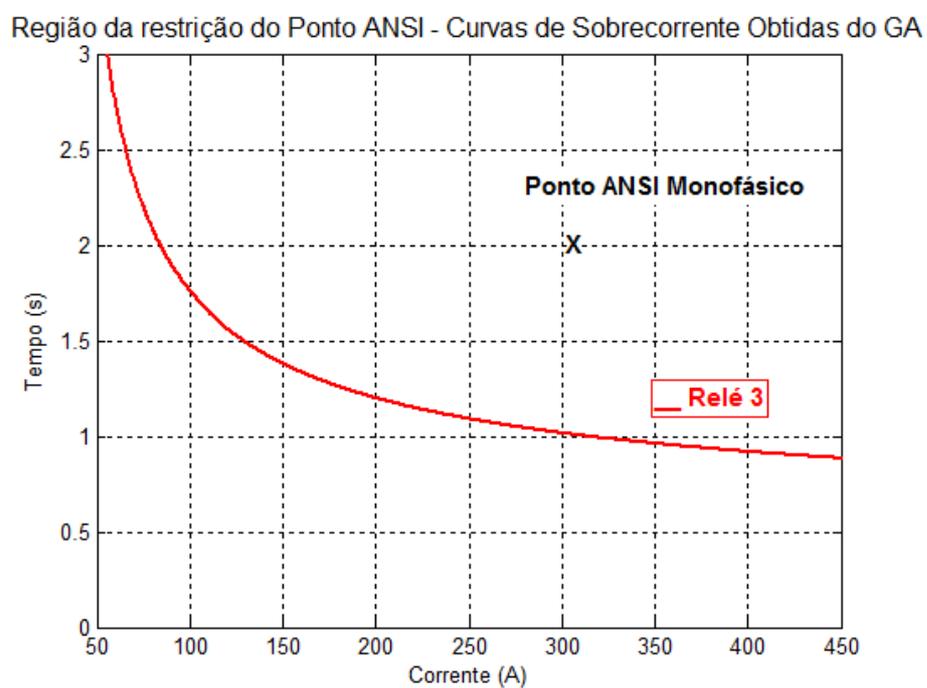


Figura 120—Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 3, obtida do GA, para o estudo de caso 6.

A figura 121 mostra a evolução do valor médio de avaliação da população e a figura 122 mostra a evolução do valor de avaliação do indivíduo melhor avaliado, ao longo das gerações do GA.

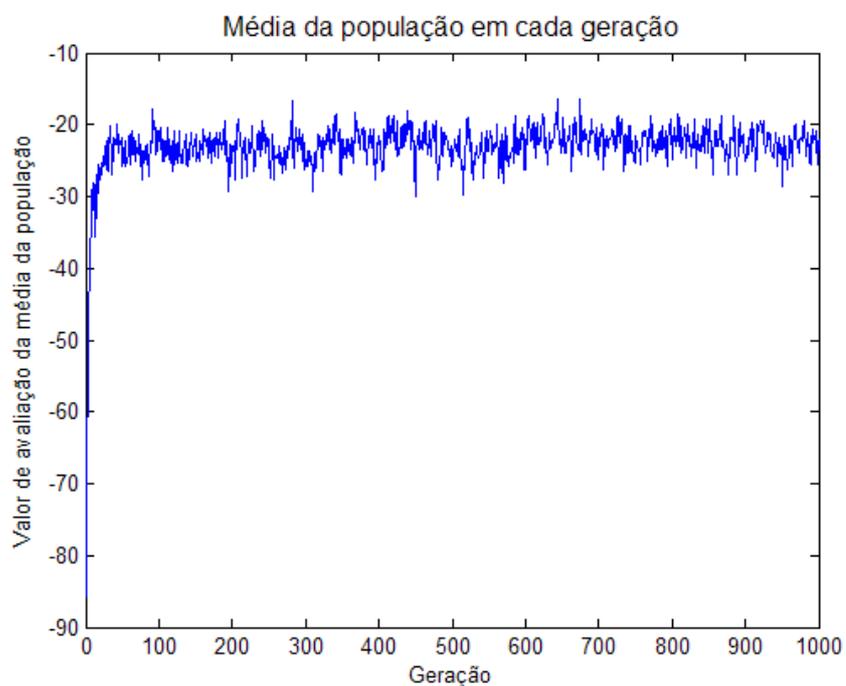


Figura 121–Gráfico da evolução da média da população ao longo dos ciclos do GA, para o estudo de caso 6.

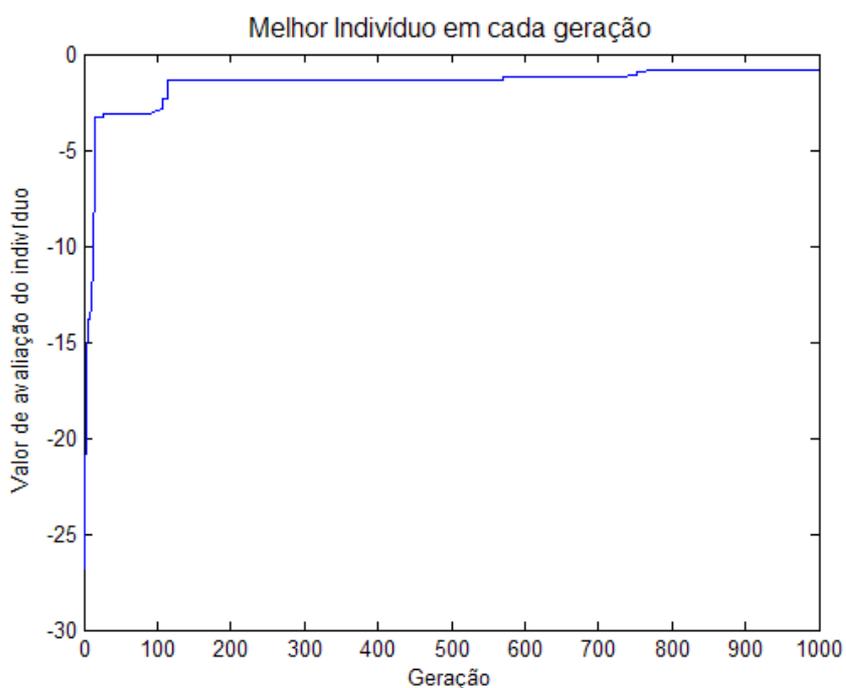


Figura 122–Gráfico da evolução do melhor indivíduo ao longo dos ciclos do GA, para o estudo de caso 6.

6.7.3 Resultados da otimização pelo algoritmo de otimização inspirado em colônia de formigas

O algoritmo de otimização inspirado em colônia de formigas proposto, após a inserção dos limites ou restrições do sistema, gera automaticamente as curvas para os relés 1, 2 e 3. Os resultados são demonstrados nas tabelas 41 e 42, que contém os parâmetros das curvas, os tempos de atuação e de coordenação.

Tabela 41 - Configurações dos relés e tempos de atuação das curvas de sobrecorrente obtidas do ACO.

Resultados do ACO		
Relé 1	Curva	Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,2
	Ajuste de corrente (Gs)	20,24
	Tempo máximo no intervalo	1,9043 s
	Tempo mínimo no intervalo	0,4347 s
Relé 2	Curva	Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,3
	Ajuste de corrente (Gs)	26,73
	Tempo máximo no intervalo	4,6242 s
	Tempo mínimo no intervalo	0,7177 s
Relé 3	Curva	Inversa
	Ajuste de tempo (TMS)	0,4
	Ajuste de corrente (Gs)	25,22
	Tempo máximo no intervalo	5,4619 s
	Tempo mínimo no intervalo	0,9373 s

Tabela 42 - Tempos de coordenação das curvas de sobrecorrente obtidas do ACO.

Resultados do ACO	
Diferença mínima de tempo entre as curvas dos relés 2 e 1	0,2830s
Diferença mínima de tempo entre as curvas dos relés 3 e 2	0,2196s
Diferença de tempo de atuação, no valor de $I_{cc3\phi}$ entre as curvas dos relés 2 e 1	0,2830s
Diferença de tempo de atuação, no valor de $I_{cc3\phi}$ entre as curvas dos relés 3 e 2	0,2196s

As curvas de sobrecorrente resultantes são apresentadas na figura 123.

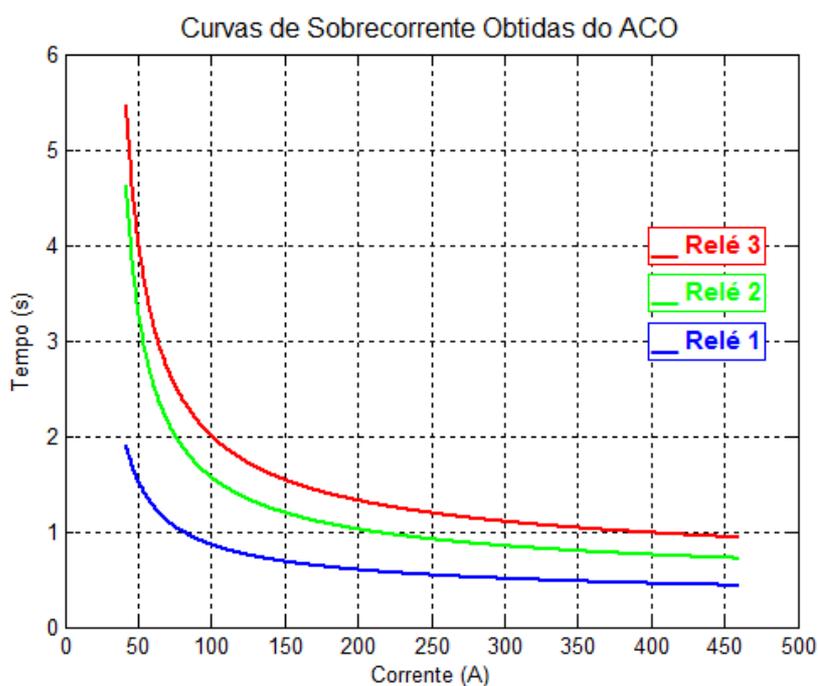


Figura 123–Curvas de sobrecorrente obtidas do ACO para o estudo de caso 6.

A figura 124 mostra o atendimento das restrições por parte da curva do relé 1 e a figura 125 mostra o atendimento por parte da curva do relé 3.

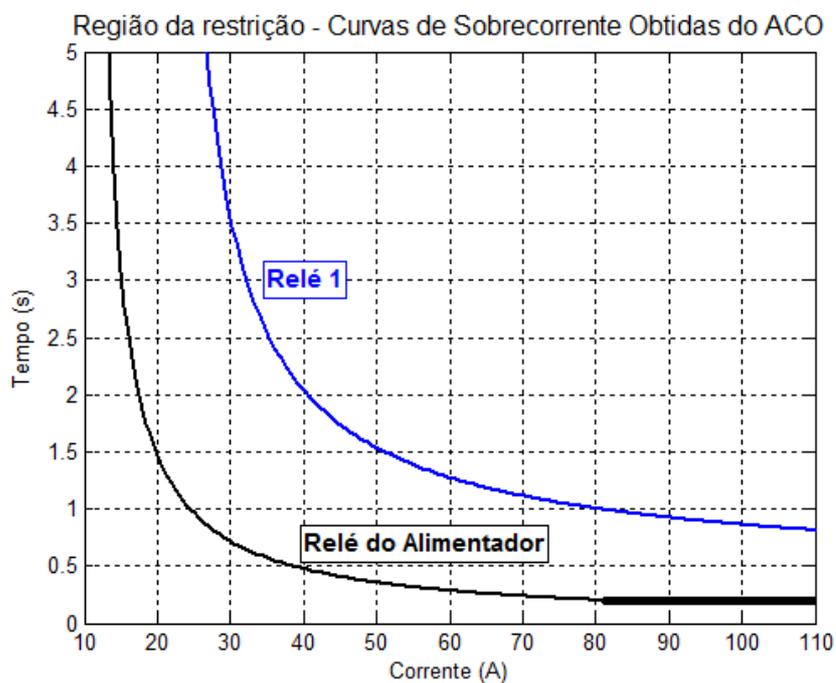


Figura 124–Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 1, obtida do ACO, para o estudo de caso 6.

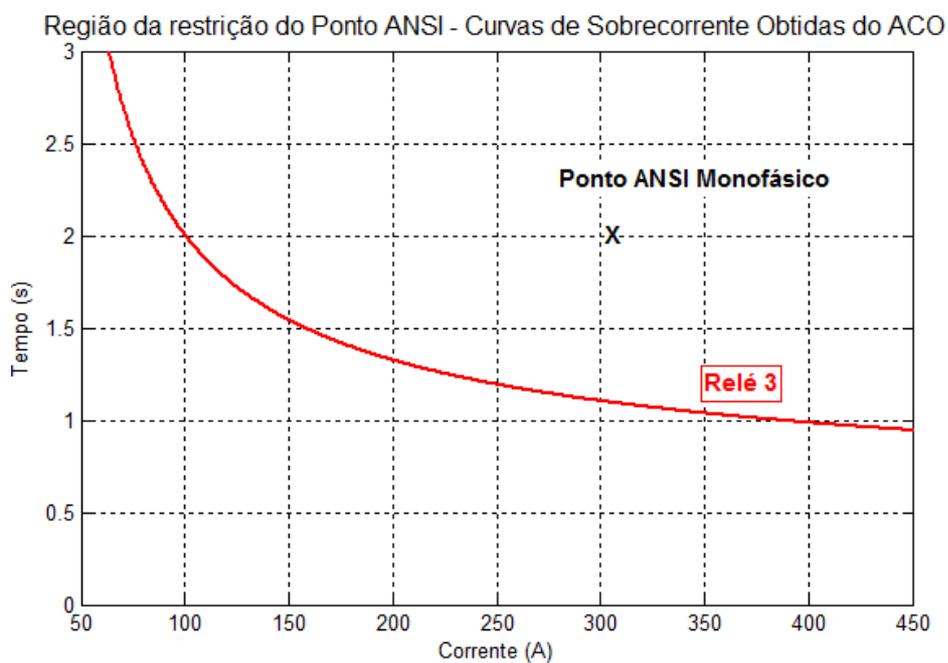


Figura 125–Região de restrição da curva de sobrecorrente do relé 3, obtida do ACO, para o estudo de caso 6.

A figura 126 mostra a evolução do valor de avaliação médio dos caminhos das formigas e a figura 127 mostra a evolução do valor de avaliação do melhor caminho das formigas, ao longo das iterações do ACO.

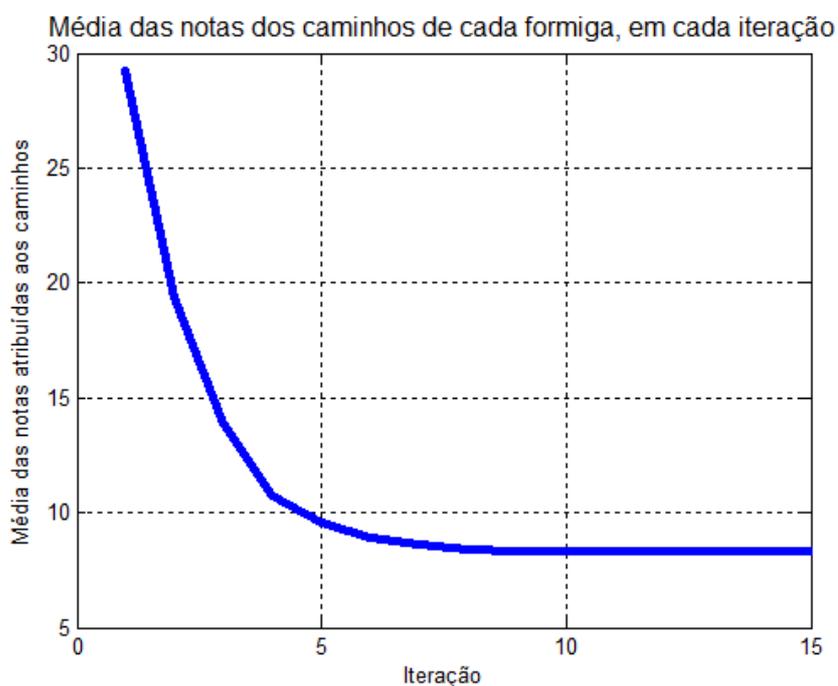


Figura 126—Gráfico da evolução do valor de avaliação médio dos caminhos das formigas, ao longo das iterações do ACO, para o estudo de caso 6.

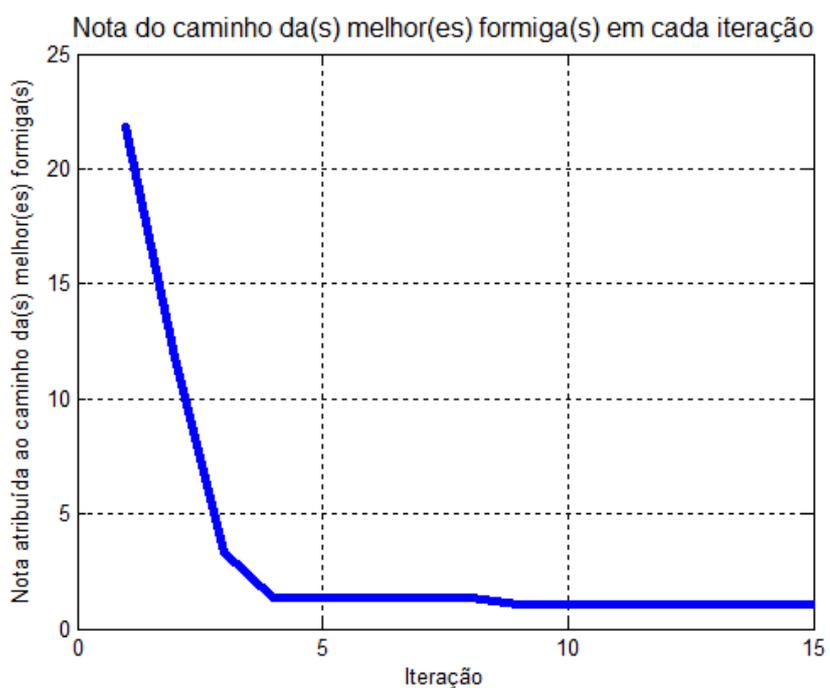


Figura 127—Gráfico da evolução do valor de avaliação do melhor caminho das formigas, ao longo das iterações do ACO, para o estudo de caso 6.

6.8 Síntese dos resultados dos estudos de caso

Este item apresenta, em 6 tabelas, a síntese dos resultados obtidos nos 6 estudos de caso.

Tabela 43 - Síntese dos resultados obtidos para o estudo de caso 1.

		Solução Ideal	Sistema Existente(curvas estendidas)	GA	ACO
Estudo de Caso 1	Atende às restrições?	Sim	Sim	Sim	Sim
	Atende à coordenação das curvas?	Sim	Não*	Sim	Sim
	Tempo de atuação do relé 1 em $I_{cc3\phi}$	0,2s	0,2507s	0,2218s	0,2813s
	Diferença temporal de atuação dos relés 2 e 1 em $I_{cc3\phi}$	0,2s	0,1426s*	0,2001s	0,2598s
	Diferença temporal de atuação dos relés 3 e 2 em $I_{cc3\phi}$	0,2s	0,1292s*	0,2138s	0,2800s
	Tempo máximo de atuação do relé 3	o menor possível	5,85s	7,1826s	8,9308s

* Caso em que a extensão das curvas do sistema existente implica na sua descoordenação.

Tabela 44 - Síntese dos resultados obtidos para o estudo de caso 2.

		Solução Ideal	Sistema Existente (curvas estendidas)	GA	ACO
Estudo de Caso 2	Atende às restrições?	Sim	Sim	Sim	Sim
	Atende à coordenação das curvas?	Sim	Não*	Sim	Sim
	Tempo de atuação do relé 1 em $I_{cc3\phi}$	0,2s	0.2595s	0.2408s	0,2886s
	Diferença temporal de atuação dos relés 2 e 1 em $I_{cc3\phi}$	0,2s	0.1730s*	0.2017s	0.2886s
	Diferença temporal de atuação dos relés 3 e 2 em $I_{cc3\phi}$	0,2s	0.1417s*	0.2031s	0.2871s
	Tempo máximo de atuação do relé 3	o menor possível	5.3486s	1.9929s	2,8621s

* Caso em que a extensão das curvas do sistema existente implica na sua descoordenação.

Tabela 45 - Síntese dos resultados obtidos para o estudo de caso 3.

		Solução Ideal	Sistema Existente (curvas estendidas)	GA	ACO
Estudo de Caso 3	Atende às restrições?	Sim	Sim	Sim	Sim
	Atende à coordenação das curvas?	Sim	Não**	Sim	Sim
	Tempo de atuação do relé 1 em $I_{cc3\phi}$	0,2s	0,4908s	0,2791s	0,2713s
	Diferença temporal de atuação dos relés 2 e 1 em $I_{cc3\phi}$	0,2s	0s	0,2214s	0,2291s
	Diferença temporal de atuação dos relés 3 e 2 em $I_{cc3\phi}$	0,2s	0,1971s*	0,2316s	0,2316s
	Tempo máximo de atuação do relé 3	o menor possível	7,8340s	2,4892s	2,4892s

* Caso em que a extensão das curvas do sistema existente implica na sua descoordenação.

** Caso em que as curvas do sistema existente possuem outra(s) descoordenação(ões), além da extensão da curva.

Tabela 46 - Síntese dos resultados obtidos para o estudo de caso 4.

		Solução Ideal	Sistema Existente (curvas estendidas)	GA	ACO
Estudo de Caso 4	Atende às restrições?	Sim	Sim	Sim	Sim
	Atende à coordenação das curvas?	Sim	Não**	Sim	Sim
	Tempo de atuação do relé 1 em $I_{cc3\phi}$	0,4s	0,4979s	0,4679s	0,4995s
	Diferença temporal de atuação dos relés 2 e 1 em $I_{cc3\phi}$	0,2s	0s	0,2033s	0,2498s
	Diferença temporal de atuação dos relés 3 e 2 em $I_{cc3\phi}$	0,2s	0,3018s	0,2017s	0,2369s
	Tempo máximo de atuação do relé 3	o menor possível	16,5938s	4,9923s	5,7743s

** Caso em que as curvas do sistema existente possuem outra(s) descoordenação(ões), além da extensão da curva.

Tabela 47 - Síntese dos resultados obtidos para o estudo de caso 5.

		Solução Ideal	Sistema Existente (curvas estendidas)	GA	ACO
Estudo de Caso 5	Atende às restrições?	Sim	Não	Sim	Sim
	Atende à coordenação das curvas?	Sim	Não**	Sim	Sim
	Tempo de atuação do relé 1 em $I_{cc3\phi}$	0,2s	0,3657s	0,2221s	0,2487s
	Diferença temporal de atuação dos relés 2 e 1 em $I_{cc3\phi}$	0,2s	0s	0,2378s	0,2013s
	Diferença temporal de atuação dos relés 3 e 2 em $I_{cc3\phi}$	0,2s	0,9220s	0,2252s	0,2351s
	Tempo máximo de atuação do relé 3	o menor possível	13,5s	6.9925s	6.9925s

** Caso em que as curvas do sistema existente possuem outra(s) descoordenação(ões), além da extensão da curva.

Tabela 48 - Síntese dos resultados obtidos para o estudo de caso 6.

		Solução Ideal	Sistema Existente (curvas estendidas)	GA	ACO
Estudo de Caso 6	Atende às restrições?	Sim	Sim	Sim	Sim
	Atende à coordenação das curvas?	Sim	Não*	Sim	Sim
	Tempo de atuação do relé 1 em $I_{cc3\phi}$	0,4s	0,2196s*	0,4184s	0,4347s
	Diferença temporal de atuação dos relés 2 e 1 em $I_{cc3\phi}$	0,2s	0,0188s*	0,2339s	0,2830s
	Diferença temporal de atuação dos relés 3 e 2 em $I_{cc3\phi}$	0,2s	0,2354s*	0,2261s	0,2196s
	Tempo máximo de atuação do relé 3	o menor possível	2,9053s	4,6233s	5,4619s

* Caso em que a extensão das curvas do sistema existente implica na sua descoordenação.

6.9 Discussão dos resultados

No sistema anteriormente existente, cujas curvas de proteção foram geradas pelos métodos tradicionais de tentativa e erro, com base na experiência dos especialistas, dos seis estudos de caso analisados, em três deles (estudos de caso 3, 4 e 5) houve falta de seletividade, onde os relés 1 e 2 assumiram curvas idênticas. Adicionalmente, no estudo de caso 5, as curvas dos relés 1 e 2 cruzavam com a curva do relé 3 e, ainda, o relé 3 não protegia o transformador contra danos elétricos e mecânicos causados por uma possível sobrecorrente.

Os casos listados acima são exemplos dos problemas em se projetar adequadamente um sistema de proteção de sobrecorrente para plantas industriais, atendendo todas as restrições, coordenando as curvas, protegendo os equipamentos e buscando uma diferença temporal próxima de 0,2 segundos.

Com a utilização dos sistemas inteligentes propostos, os algoritmos geraram, em todos os seis estudos de caso, curvas totalmente coordenadas e atendendo a todas as restrições previamente estabelecidas.

Quanto à otimização temporal, tanto o algoritmo genético proposto quanto o algoritmo inspirado em colônia de formigas apresentaram resultados satisfatórios. Em todos os estudos de caso, a diferença temporal de atuação dos relés, no valor de corrente de curto circuito trifásica, apresentou-se entre 0,2 e 0,3 segundos, valores muito próximos do estabelecido como ótimo pelo padrão IEEE Std. 242 (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2001).

Em suma, o algoritmo genético foi o que apresentou as diferenças temporais mais próximas de 0,2s, sendo melhores do que os resultados apresentados pelo algoritmo inspirado em colônia de formigas. A técnica de algoritmos genéticos tem sido largamente utilizada, com resultados satisfatórios, em diferentes aplicações, inclusive na otimização de diferenças temporais de curvas de sobrecorrente, conforme descrito na revisão bibliográfica da introdução deste trabalho. Por outro lado, o algoritmo inspirado em colônia de formigas desenvolvido atingiu valores razoavelmente próximos do considerado ótimo, podendo este algoritmo ser aprimorado em trabalhos futuros.

Quanto ao tempo máximo de atuação do relé 3, percebe-se, das tabelas 43 à 48, que, nos estudos de caso 2 à 5, os dois algoritmos geraram curvas nas quais

este tempo foi muito inferior (melhores) ao das curvas do sistema existente. Somente nos estudos de caso 1 e 6, os dois algoritmos geraram curvas em que este tempo foi superior ao do sistema existente. Há que se justificar que as curvas do sistema existente não estão coordenadas, até o valor da corrente de curto circuito trifásica. Esta condição favorece que apresentem tempos menores no início do intervalo. A constatação dos tempos superiores nos estudos de caso 1 e 6, portanto, não deve ser considerada como uma deficiência dos algoritmos. Ao contrário, apesar de apresentarem resultados com curvas coordenadas, em desfavorabilidade quanto ao tempo inicial, em relação ao sistema existente, ainda assim os sistemas inteligentes propostos apresentaram menores tempos de atuação do relé 3 no início do intervalo em 4 estudos de caso.

Com relação à convergência dos algoritmos, constatou-se que o ACO convergiu em menos de 15 iterações (vide figuras 56, 57, 70, 71, 84, 85, 98, 99, 112, 113, 126, 127), uma convergência que pode ser considerada como muito rápida. Estas figuras mostram que o valor assumido pela melhor formiga, mesmo após a convergência, ainda é bastante inferior ao valor médio. A explicação para este fenômeno é o seguinte: todas as formigas depositam feromônios, à medida que caminham, e, com o tempo, ocorre a formação de grupos de formigas seguindo o mesmo caminho (e não apenas um grupo). Caso apenas a melhor formiga de cada iteração gerasse feromônios, o algoritmo tenderia a formar uma concentração em apenas um grupo, com poucas formigas se dispersando pela escolha estatística.

Uma característica da codificação vetorial do problema estudado é que a função de avaliação apresenta inúmeros máximos e mínimos locais. A diferença entre eles não se resume a apenas um passo de formiga, que equivale à mudança de um único bit. A escolha do uso de depósito de feromônio por parte de todas as formigas, com a formação de vários grupos de concentração, teve como objetivo explorar melhor o espaço de busca. Este processo pode ser aprimorado em trabalhos futuros, de tal forma ao algoritmo inspirado em colônia de formigas proporcionar resultados que convirjam para o mínimo global.

Por sua vez, o algoritmo genético proposto, conforme apresentado nas figuras 36 e 37, apresenta duas fases, em termos de variação nos valores de aptidão do melhor indivíduo e da média da população. Até o número de ciclos na faixa de algumas dezenas (por volta da geração 20), há uma taxa elevada de melhoria da média da população e da aptidão do indivíduo mais apto. Nas gerações de número

40, por exemplo, todos os indivíduos mais aptos encontrados já atendem às restrições definidas e apresentam diferenças temporais. Após esta faixa, a variação da média da população oscila, enquanto que o surgimento de melhores indivíduos ocorre de forma menos acentuada, demonstrando que o algoritmo atinge uma faixa em que a aleatoriedade (em encontrar novos indivíduos mais aptos) é mais significativa.

Para este trabalho, foi utilizado como critério de parada a geração de número 1000. À primeira vista, este é um valor elevado. Entretanto, observou-se que, da forma como foram estruturados, o processamento das gerações do AG ocorre de forma muito mais rápida do que as iterações do ACO. Como exemplo, no computador utilizado para as simulações, as 15 iterações do ACO consumiam um tempo aproximado de 1 minuto, enquanto que as 1000 gerações do AG consumiam por volta de 1,5 minutos.

7 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram desenvolvidos um algoritmo genético e um algoritmo inspirado em colônia de formigas para automatizar e otimizar a coordenação da função de sobrecorrente de fase de relés digitais microprocessados (IEDs), em subestações industriais.

As curvas de sobrecorrente utilizadas seguiram o padrão IEC 60255-151 e estabeleceu-se, como tempo ótimo para a coordenação entre os relés, o valor de 0,2s apresentado na IEEE Std 242.

Foram analisados seis estudos de caso, à partir de um modelo de banco de dados baseado em um sistema elétrico industrial real, nos quais os resultados obtidos dos algoritmos foram comparados entre si, com os valores preestabelecidos como ótimos e com os valores do sistema existente.

Os métodos propostos apresentaram, em todos os seis estudos de caso, curvas totalmente coordenadas, atendendo à todas as restrições previamente estabelecidas e cujas diferenças temporais de atuação dos relés, no valor de corrente de curto circuito trifásica, apresentaram-se entre 0,2 e 0,3 segundos, valores muito próximos do estabelecido como ótimo. O algoritmo genético proposto apresentou resultados ligeiramente superiores aos do algoritmo inspirado em colônia de formigas.

As ferramentas desenvolvidas constituem numa valiosa contribuição aos estudos de coordenação da proteção, tendo resultados positivos na melhoria da segurança das instalações, das pessoas, da continuidade do processo e do impedimento de emissões prejudiciais ao meio ambiente.

7.1 Recomendações de trabalhos futuros

Recomendam-se, como trabalhos futuros:

- um aprimoramento no algoritmo inspirado em colônia de formigas, ou a utilização de modelos híbridos, de forma a aproximar seus resultados do ponto ótimo global;
- a utilização de outras técnicas de sistemas inteligentes aplicadas à otimização para este estudo de coordenação da proteção; a integração dos algoritmos desenvolvidos aos softwares de estudos de proteção atualmente existentes,

com uma interface amigável, permitindo que projetistas e especialistas possam se beneficiar das ferramentas, sem a necessidade de um conhecimento prévio da teoria dos sistemas inteligentes.

- a aplicação das técnicas de sistemas inteligentes na coordenação da proteção de relés em configurações diferentes da apresentada neste trabalho.

REFERÊNCIAS

ABYANEH, H. A. et al. A new genetic algorithm method for optimal coordination of overcurrent relays in a mixed protection scheme with distance relays. **43rd International Universities Power Engineering Conference**, 2008.

ALVES, P. E.; ROLIM, J. G. Melhoria na seletividade da proteção de transformadores através do uso de múltiplos grupos de ajustes. **9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications - INDUSCON**, 2010.

AMARAL, J. F. M.; PACHECO, M. A. C.; TANSCHKEIT, R. Sintonia de Controladores PID utilizando Algoritmos Genéticos. **Inteligência Computacional Aplicada - Revista online**, n. 8, 2010.

ASADI, M. R.; KOUHSARI, S. M. Optimal Overcurrent relays coordination using particle-swarm-optimization algorithm. **IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition**, 2009.

BANSAL, J. C.; DEEP, K. Optimization of directional overcurrent relay times by particle swarm optimization. **IEEE Swarm Intelligence Symposium**, 2008.

BASHIR, M. et al. A new hybrid particle swarm optimization for optimal coordination of over current relay. **International Conference on Power System Technology**, 2010.

BECCENERI, J. C.; SILVA NETO, J. A. **Técnicas de Inteligência Computacional Inspiradas na Natureza - Aplicação em Problemas Inversos em Transferência Radiativa**. 1a. ed. São Carlos: SBMAC, v. 41, 2009.

BECCENERI, J. C. Meta-heurísticas e Otimização Combinatória: Aplicações em Problemas Ambientais, 2012. Disponível em: <http://www.lac.inpe.br/ELAC13/arquivos/MiniCurso_02ELAC2012.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2013.

BECCENERI, J. C. et al. Otimização por Colônia de Formigas (Ant Colony Optimization). In: NETO, A. J. D. S.; (ORG.), J. C. B. **Técnicas de Inteligência Computacional Inspiradas na Natureza - Aplicação em Problemas Inversos em Transferência Radiativa**. São Carlos: SBMAC, v. 41, 2009. Cap. 7, p. 59-70.

BEDEKAR, P. P.; BHIDE, S. R. Optimum coordination of overcurrent relay timing using continuous genetic algorithm. **Expert Systems with Applications**, 2011.

BEDEKAR, P. P.; BHIDE, S. R.; KALE, V. S. Optimum coordination of overcurrent relays in distribution system using genetic algorithm. **International Conference on Power Systems**, 2009.

BEDEKAR, P. P.; BHIDE, S. R.; KALE, V. S. Determining optimum TMS and PS of overcurrent relays using big-M method. **International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems**, 2010.

BERMUDEZ, O. V.; CISNEROS, F. T.; CHAVEZ, J. C. S. Coordinación óptima de relevadores contra sobrecorriente usando algoritmos genéticos. **IEEE Sección México Reunión de Verano, RVP-AI**, Acapulco, 2010.

BLACKBURN, J. L.; DOMIN, T. J. **Protective Relaying – Principles and Applications**. 3rd. ed. CRC Press, 2007.

BLUM, C.; LÓPEZ-IBÁÑEZ, M. Ant Colony Optimization. In: WILAMOWSKI, B. M.; IRWIN, J. D. **Intelligent Systems**. 2a. ed. CRC Press, 2011. Cap. 26.

BOECHEL, T. **Algoritmo de otimização: uma abordagem híbrida utilizando o algoritmo das formigas e genético**. Universidade Federal de Santa Catarina (Dissertação). Florianópolis. 2003.

BRAGA, A. S.; SARAIVA, J. T. Coordination of overcurrent directional relays in meshed networks using the Simplex method. **8th Mediterranean Electrotechnical Conference**, 1996.

CAMAZINE, S. et al. **Self-organization in Biological Systems**. Princeton University Press, 2003.

CAMINHA, A. C. **Introdução a Proteção dos Sistemas Elétricos**. 1a. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1977.

CESAR, E. L. et al. **Coordenação ótima da Proteção de Sobrecorrente de Relés digitais em Subestações industriais utilizando Algoritmos Genéticos**. IEEE PCIC-BR. 2012.

CHABANLOO, R. M. et al. A new genetic algorithm method for optimal coordination of overcurrent and distance relays considering various characteristics for overcurrent relays. **IEEE 2nd International Power and Energy Conference**, p. 569 – 573, 2008.

CHELLAPILLA, K.; HOORFAR, A. Evolutionary programming: an efficient alternative to genetic algorithms for electromagnetics optimization problems. **IEEE - Antennas and Propagation Society - International Symposium**, Atlanta - USA, 1998. 42-45.

CORRÊA, R. et al. Coordenação de relés de sobrecorrente em sistemas de potência industriais: uma abordagem considerando algoritmos genéticos. **IEEE/IAS International Conference on Industry Applications**, 2010.

CORRÊA, R. et al. Coordenação ótima de relés de sobrecorrente por meio de um algoritmo genético que incorpora programação linear. **III Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**, 2010.

CORRÊA, R.; OBREGON, L. C.; JR., G. C. Coordenação de relés de sobrecorrente: uma abordagem utilizando a programação linear incorporada ao algoritmo genético. **XVIII Congresso Brasileiro de Automática**, 2010.

DAMCHI, Y. et al. Optimal coordination of directional overcurrent relays in a microgrid system using a hybrid particle swarm optimization. **International Conference on Advanced Power System Automation and Protection**, 2011.

DEEP, K.; BANSAL, J. C. Optimization of directional overcurrent relay times using Laplace Crossover Particle Swarm Optimization (LXPSO). **World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing**, 2009.

DORIGO, M. **Optimization, Learning and Natural Algorithms**. Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano (Ph.D.thesis). Milão. 1992.

DORIGO, M.; THOMAS, S. **Ant Colony Optimization**. 1a. ed. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 2004.

ELMORE, W. A. **Protective Relaying Theory and Applications**. 2nd. ed. Marcel Dekker, 2004.

ERMÚDEZ, O. V.; , C. F. T.; CHÁVEZ, J. C. S. Coordinación Óptima de Relevadores Contra Sobrecorriente Usando Algoritmos Genéticos. **IEEE Sección Mexico Reunión de Verano, RVP-AI 2010**, Acapulco, 2010.

EZZEDDINE, M.; KACZMAREK, R. Reduction of effect of coordination constraints in the linear optimization of operating times of overcurrent relays. **14th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference**, 2008.

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, p. 1475–1481, 2011.

FUTUYAMA, D. J. **Biologia evolutiva**. Ribeirão Preto: FUNPEC-RP, 2003.

GHOLINEZHAD, J.; MAZLUMI, K.; FARHANG, P. Overcurrent relay coordination using MINLP technique. **19th Iranian Conference on Electrical Engineering**, 2011.

GUTJAHR, W. J. A Graph-based Ant System and its convergence. **Future Generation Computer Systems**, v. 16, p. 873–888, 2000.

GUTJAHR, W. J. ACO algorithms with guaranteed convergence to the optimal solution. **Information Processing Letters**, v. 82, n. 3, p. 145–153, 2002.

HEWITSON, L. G.; BROWN, M.; BALAKRISHNAN, B. R. **Practical Power Systems Protection**. Elsevier, 2004. ISBN 0 7506 6397 9.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in Natural and Artificial Systems**. 1. ed. University of Michigan Press, 1975.

HOUCK, C. R.; JOINES, J. A.; KAY, M. G. A Genetic Algorithm for Function Optimization: A Matlab Implementation, North Carolina State University, 1996.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std 399 - IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis**, 1997.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std 242 – IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems – Buff Book**, 2001.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std C37.2 – IEEE Standard for Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms and Contact Designations**, 2008.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std C57.12.00 - IEEE Standard for General requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power and Regulating Transformers**, 2010.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60255-151 – Measuring relays and protection equipment – Functional requirements for over/under current protection**. 1.0. ed., 2009.

JOINES, J.; HOUCK, C. On the use of non-stationary penalty functions to solve nonlinear constrained optimization problems with genetic algorithms. **IEEE International Symposium Evolutionary Computation**, Orlando, 1994. 579-584.

KAMANGAR, S. et al. A new genetic algorithm method for optimal coordination of overcurrent and earth fault relays in networks with different levels of voltages. **IEEE Bucharest PowerTech**, 2009.

KAVEHNIA, F. et al. Optimal Coordination of Directional Over Current Relays in Power System Using Genetic Algorithm. **Proceedings of the 41st International Universities Power Engineering Conference**, v. 3, p. 824-827, 2006.

KINDERMANN, G. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. Florianópolis, v. 1, 2005.

KOOCHAKI, A. et al. Optimal Overcurrent relays coordination using genetic algorithm. **11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment**, 2008.

LACERDA, E. G. M.; CARVALHO, A. C. P. L. F. Introdução aos Algoritmos Genéticos. Disponível em: <<http://www.leca.ufrn.br/~estefane/metaheuristicas/ag.pdf>>. Acesso em: 02 abril 2013.

LEE, C. H.; CHEN, C. R. Using Genetic Algorithm for Overcurrent Relay Coordination in Industrial Power System. **International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems**, 2007.

LEITE, H.; BARROS, J.; MIRANDA, V. The evolutionary algorithm EPSO to coordinate directional overcurrent relays. **10th IET International Conference on Developments in Power System Protection**, 2010.

LI, Y.; SHI, D.; DUAN, X. An integrated power system relay coordination software. **Power Engineering Society Summer Meeting**, 2001.

LINDEN, R. **Algoritmos Genéticos: uma importante ferramenta da Inteligência Computacional**. 2. ed. Rio de Janeiro: Brasport, 2008.

LIU, A.; YANG, M. T. Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays Using NM-PSO Technique. **International Symposium on Computer, Consumer and Control**, 2012.

MANSOUR, M. M.; MEKHAMER, S. F.; EL-KHARBAWE, N. E. A Modified Particle Swarm Optimizer for the Coordination of Directional Overcurrent Relays. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 22, n. 3, p. 1400-1410, 2007.

MARDEGAN, C. Proteção dos transformadores – Parte I. **O Setor Elétrico**, p. 26-39, setembro 2010.

MATTOS, F. M. **Estudo de caso de coordenação e seletividade da proteção contra sobrecorrente em um sistema elétrico industrial**. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, São Carlos. 2010.

MICHALEWICZ, Z. **Genetic algorithms + data structures = evolution programs**. 3. ed. Berlim: Springer, 1996.

MITCHELL, M. **An introduction to genetic algorithms**. 5. ed. London: MIT Press, 1999. ISBN 0-262-13316-4.

MOGNON, V. R. **Algoritmos genéticos aplicados na otimização de antenas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2004.

MOSTAFA, Y. G.; HUSSIEN, M. S.; ELAMARY, N. H. Co-ordination of overcurrent voltage controlled protection in large electrical networks using particle swarm optimization technique. **International Conference on Computer Engineering & Systems**, 2009.

MOUSAVI, S. M.; ABYANEH, H. A.; MAHDAVI, M. Optimum setting and coordination of overcurrent relays considering cable damage curve. **IEEE Bucharest PowerTech**, 2009.

NATARAJAN, R. **Computer-Aided Power System Analysis**. New York: Marcel Dekker Inc., 2002.

NIYOMPANT, S. et al. Application of linear programming for optimal coordination of directional over-current relays. **9th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology**, 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.

O. JUNIOR, G. R. D. **Coordenação de relés de sobrecorrente em sistemas radiais utilizando algoritmo genético**. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Rio de Janeiro. 2008.

OLIVEIRA, N. L. S.; JÚNIOR, F. C. S.; SOUZA, B. A. Automatização da coordenação da proteção de sobrecorrente em sistemas elétricos de distribuição utilizando algoritmos genéticos. **9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications - INDUSCON**, 2010.

OLIVEIRA, N. L. S.; SOUZA, B. A. Coordenação Ótima da Proteção de Sobrecorrente em Sistemas Elétricos de Distribuição Utilizando Algoritmos Genéticos. **XVIII Congresso Brasileiro de Automática**, 2010.

RAHMAT-SAMII, Y.; MICHIELSEN, E. **Electromagnetic optimization by genetic algorithms**. John Wiley & Sons, 1999.

RASHTCHI, V.; GHOLINEZHAD, J.; FARHANG, P. Optimal coordination of overcurrent relays using Honey Bee Algorithm. **International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops**, 2010.

RAZAVI, F. et al. A new comprehensive genetic algorithm method for optimal overcurrent relays coordination. **Electric Power Systems Research**, v. 78, p. 713–720, 2008.

SADEH, J.; AMINOTOJARI, V.; BASHIR, M. Optimal coordination of overcurrent and distance relays with hybrid genetic algorithm. **10th International Conference on Environment and Electrical Engineering**, 2011.

SADEH, J.; AMINTOJJAR, V.; BASHIR, M. Coordination of overcurrent and distance relays using hybrid Particle Swarm Optimization. **International Conference on Advanced Power System Automation and Protection**, 2011.

SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES. **SEL-451 Relay Protection, Automation, and Control System. Manual de Instruções**, 2007.

SERAPIÃO, A. B. S. Fundamentos de otimização por inteligência de enxames: uma visão geral. **Revista Controle & Automação**, v. 20, n. 3, Julho, Agosto e Setembro 2009.

SILVEIRA, T. **A utilização de meta-heurística de otimização denominada colônia de formigas para o restabelecimento de sistemas elétricos de potência**. Universidade Federal de Alfenas (Monografia). Alfenas. 2010.

SINGH, D. K.; GUPTA. Optimal coordination of directional overcurrent relays: A genetic algorithm approach. **2012 Students Conference on Engineering and Systems**, 2012.

SINGH, D. K.; GUPTA, S. Use of genetic algorithms (GA) for optimal coordination of directional over current relays. **2012 Students Conference on Engineering and Systems**, 2012.

SINGH, M.; PANIGRAHI, B. K.; ABHYANKAR, A. R. Optimal overcurrent relay coordination in distribution system. **2011 International Conference on Energy, Automation, and Signal**, 2011.

SIVANANDAM, S. N.; DEEPA, S. N. **Introduction to Genetic Algorithms**. New York: Springer Berlin Heidelberg, 2008. ISBN 978-3-540-73189-4.

SO, C. W. et al. Application of genetic algorithm for overcurrent relay coordination. **Sixth International Conference on Developments in Power System Protection**, p. 66-69, 1997.

SO, C. W. et al. Application of genetic algorithm to overcurrent relay grading coordination. **Proceedings of the 4th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, APSCOM-97**, Hong Kong, November 1997.

SO, C. W.; LI, K. K. Overcurrent relay coordination by evolutionary programming. **Electric Power Systems Research**, v. 53, p. 83–90, 2000.

SO, C. W.; LI, K. K. The Influence of Time Coordination Method on Supply Reliability. **IEEE Industry Applications Conference**, 2000.

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

SOUZA, B. A.; OLIVEIRA, N. L. S.; LEITE, L. R. P. A Coordenação da Proteção de Sistemas de Distribuição como Um Problema de Otimização. **III Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**, 2010.

SOUZA, M. P. M. G. **Coordenação da Proteção de um Sistema Elétrico de Potência Interligado Utilizando Relés de Sobrecorrente e de Distância**. Monografia (Conclusão de Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Rio de Janeiro, p. 77. 2010.

SOUZA, S. A. **Algoritmos genéticos aplicados à proteção e estimação de harmônicos em sistemas elétricos de potência**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo. São Carlos. 2008.

STEARNS, S. C. **Evolução: uma introdução**. São Paulo: Atheneu, 2003.

STUTZLE, T.; DORIGO, M. A Short Convergence Proof for a Class of ACO Algorithms. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 6, n. 4, p. 358–365, 2002.

THANGARAJ, R.; PANT, M.; K., D. Optimal coordination of overcurrent relays using modified differential evolution algorithms. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 23, p. 820–829, 2010.

URDANETA , A. J. et al. Coordination of directional overcurrent relay timing using linear programming. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 11, n. 1, 1996.

URDANETA, A. J.; NADIRA, R.; JIMENEZ, L. G. P. Optimal coordination of directional overcurrent relays in interconnected power Systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 3, n. 3, 1988.

URDANETA, A. J.; NADIRA, R.; JIMENEZ, L. G. P. Optimal coordination of directional overcurrent relays in interconnected power systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 3, n. 3, Julho 1998.

UTHITSUNTHOM, D.; KULWORAWANICHPONG, T. Optimal Overcurrent Relay Coordination using Genetic Algorithms. **2010 International Conference on Advances in Energy Engineering**, 2010.

UTHITSUNTHOM, D.; PAO-LA-OR, P.; KULWORAWANICHPONG, T. Optimal Overcurrent Relay Coordination Using Artificial Bees Colony Algorithm. **The 8th Electrical Engineering Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology Conference**, 2011.

VIJAYAKUMAR, D.; NEMA, R. K. Superiority of PSO Relay Coordination Algorithm over Non-Linear Programming: A Comparison, Review and Verification. **IEEE Power India Conference**, 2008.

VON ZUBEN, F. J. Computação evolutiva: Uma abordagem pragmática. **Anais da I Jornada de Estudos em Computação de Piracicaba e Região (1a. JECOMP)**, Piracicaba, SP, 2000. 25-45.

XU, C. et al. Optimal coordination of protection relays using new hybrid evolutionary algorithm. **IEEE Congress on Evolutionary Computation**, 2008.

YANG, Z.; SHI, D.; DUAN, X. Study on flexible power system protection relay coordination software based on user-defined principle. **42nd International Universities Power Engineering Conference**, 2007.

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, p. 988–995, 2006.