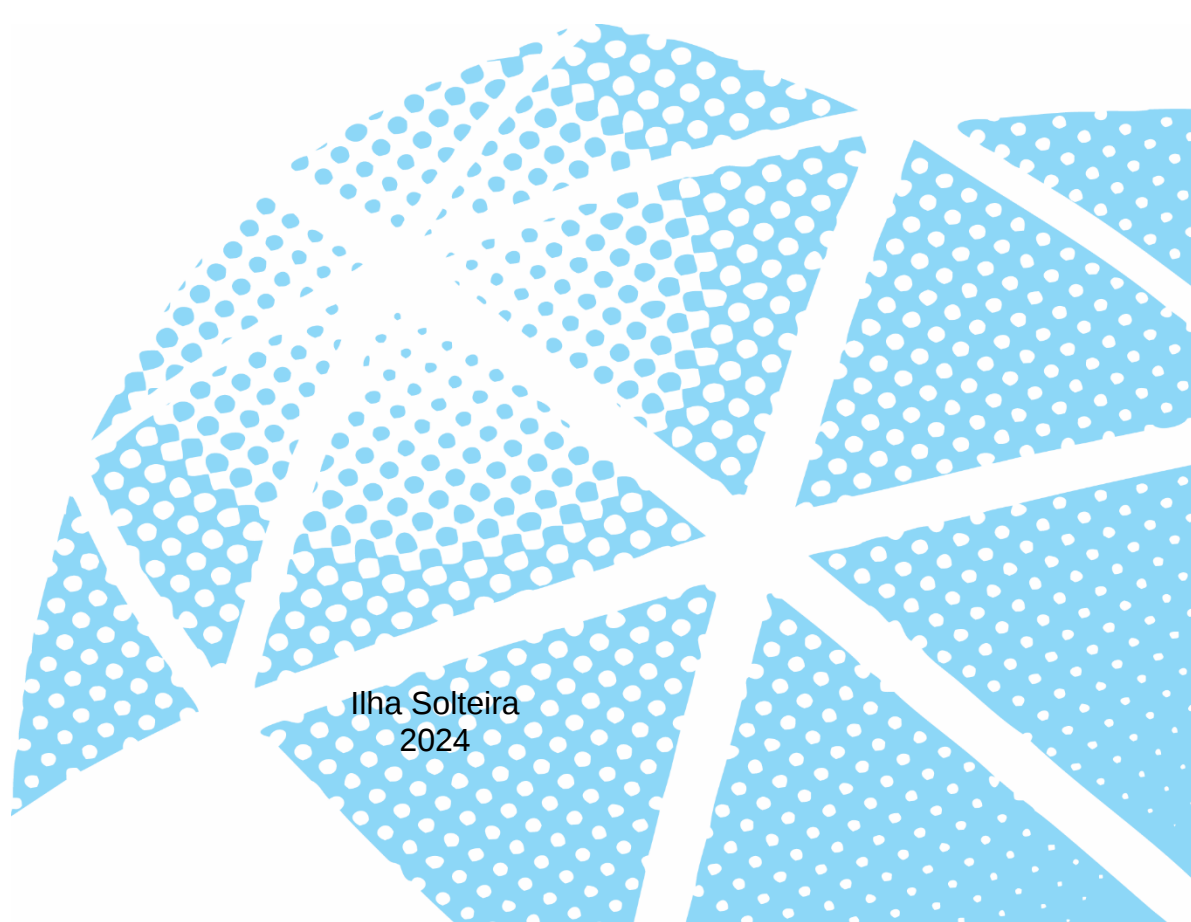


**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

VAGNER ANTONIO DE MORAES DA CRUZ

**COORDENAÇÃO ÓTIMA DE RELÉS DE SOBRECORRENTE EM REDES DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA USANDO O MÉTODO DO GRADIENTE
REDUZIDO GENERALIZADO**

Ilha Solteira
2024



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

VAGNER ANTONIO DE MORAES DA CRUZ

**COORDENAÇÃO ÓTIMA DE RELÉS DE SOBRECORRENTE EM REDES DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA USANDO O MÉTODO DO GRADIENTE
REDUZIDO GENERALIZADO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista – UNESP, Câmpus de Ilha Solteira, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de Conhecimento: Automação.

Jonatas Boás Leite
Orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvida pela Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

C957c Cruz, Vagner Antonio de Moraes da.
Coordenação ótima de relés de sobrecorrente em redes de distribuição de energia elétrica usando o método do gradiente reduzido generalizado / Vagner Antonio de Moraes da Cruz. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
134 f.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2024

Orientador: Jônatas Boás Leite
Inclui bibliografia

1. Redes de distribuição de energia elétrica. 2. Coordenação e seletividade. 3. Relés de sobrecorrente. 4. Gradiente reduzido generalizado. 5. Algoritmo genético. 6. Sistema de proteção.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: COORDENAÇÃO ÓTIMA DE RELÉS DE SOBRECORRENTE EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA USANDO O MÉTODO DO GRADIENTE REDUZIDO GENERALIZADO

AUTOR: VAGNER ANTONIO DE MORAES DA CRUZ

ORIENTADOR: JONATAS BOAS LEITE

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, área: Automação pela Comissão Examinadora:

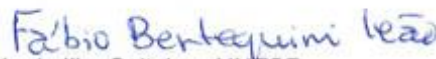
Prof. Dr. JONATAS BOAS LEITE (Participação Presencial)

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

A handwritten signature in blue ink, reading "Jonatas Boas Leite", is positioned to the right of the text for the first examiner.

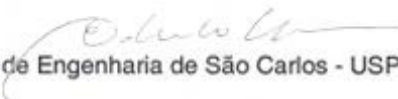
Prof. Dr. FABIO BERTEQUINI LEÃO (Participação Presencial)

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

A handwritten signature in blue ink, reading "Fabio Bertequini Leão", is positioned to the right of the text for the second examiner.

Prof. Dr. EDUARDO NOBUHIRO ASADA (Participação Virtual)

Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação / Escola de Engenharia de São Carlos - USP

A handwritten signature in blue ink, reading "Eduardo Nobuhiro Asada", is positioned to the right of the text for the third examiner.

Ilha Solteira, 09 de setembro de 2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela preciosa saúde que me permite trilhar na carreira profissional e pela sabedoria e discernimento que tornaram possível a realização deste trabalho.

À minha esposa Pricila da Rocha Belatti, pela companhia constante e pelos sábios conselhos que sempre nos orientaram em nosso crescimento de maneira compreensiva e serena, tanto nos momentos de felicidade quanto nos desafios.

Ao meu orientador Prof. Dr. Jônatas Boás Leite, pela amizade e paciência em esclarecer minhas dúvidas sempre de maneira cordial, incentivando a realização de uma pesquisa de qualidade e transmitindo confiança nos momentos mais desafiadores, gostaria de expressar minha profunda gratidão.

Aos docentes e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica e da Seção de Pós-graduação da FEIS/UNESP, pelos ensinamentos transmitidos e cordialidade, como também a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, pelo suporte financeiro durante o período de mestrado.

A todos os amigos que colaboraram para a realização deste trabalho, compartilhando conhecimento e proporcionando momentos memoráveis.

RESUMO

O sistema de proteção nas redes de distribuição de energia elétrica é essencial para garantir a segurança e eficiência do fornecimento de energia elétrica. Coordenar e otimizar a operação dos dispositivos de proteção é um problema complexo cujo objetivo é garantir a detecção adequada e o isolamento de faltas, minimizando interrupções e assegurando a estabilidade da rede. Algumas técnicas têm sido aplicadas para coordenação otimizada, incluindo métodos heurísticos, meta-heurísticas (MHs) e modelos linearizados. Essas técnicas têm limitações, ou seja, não garantem soluções de boa qualidade e simplificam o problema reduzindo o número de variáveis. Este trabalho propõe o método do gradiente reduzido generalizado (GRG) para buscar soluções de boa qualidade para coordenação e seletividade entre relés de sobrecorrente (OCR). A metodologia proposta é submetida a um estudo comparativo com um algoritmo genético, como abordagem MH, avaliando fatores como qualidade da solução, eficiência computacional e robustez. Os resultados obtidos demonstram várias vantagens do GRG, incluindo melhor coordenação e seletividade entre OCRs, eficiência computacional e uma resposta mais rápida do sistema de proteção.

Palavras-chave: algoritmo genético; coordenação e seletividade; gradiente reduzido generalizado; redes de distribuição de energia elétrica; relés de sobrecorrente; sistema de proteção.

ABSTRACT

The protection system in the electrical power distribution networks is essential to guarantee the safety and efficiency of the electrical energy supply. Coordinating and optimizing the operation of protection devices is a complex problem whose objective is to guarantee adequate detection and isolation of faults, minimizing interruptions and ensuring network stability. Some techniques have been applied for optimal coordination including heuristic methods, metaheuristics (MHs) and linearized models. These techniques have limitations, i. e., do not guarantee good quality solution and simplify the problem by reducing the number of variables. This work proposes the generalized reduced gradient (GRG) method to find good quality solution for coordination and selectivity between overcurrent relays (OCR). The proposed methodology is subjected to a comparative study with a genetic algorithm, as an MH approach, by evaluating factors such as solution quality, computational efficiency and robustness. The obtained results demonstrate several advantages of the GRG, including better coordination and selectivity between OCRs, computational tractability and a faster response of the protection system.

Keywords: coordination and selectivity; electrical power distribution networks; genetic algorithm; generalized reduced gradient; overcurrent relays; protection system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curvas MM e TC para elos fusíveis K e T	34
Figura 2 – Ciclo operacional do religador durante uma falta	35
Figura 3 – Comportamento das curvas IEC, IEEE e de fabricantes de relés	40
Figura 4 – Resumo das principais características dos relés.....	44
Figura 5 – Conceito de coordenação entre curvas de dispositivos.....	47
Figura 6 – Conceito de zonas de proteção	48
Figura 7 – Alocação de dois fusíveis na rede	48
Figura 8 – Alocação de relé/relicador e elo fusível na rede.....	49
Figura 9 – Alocação entre relés/relicadores na rede	50
Figura 10 – Superfícies das curvas IEC analisadas na função objetivo	55
Figura 11 – Pseudocódigo do algoritmo GRG	63
Figura 12 – Fluxograma do algoritmo GRG.....	65
Figura 13 – Estrutura cromossômica do indivíduo.....	68
Figura 14 – Pseudocódigo do algoritmo AG.....	69
Figura 15 – Seleção de indivíduos a partir da roleta	70
Figura 16 – Processo de <i>crossover</i> entre indivíduos.....	70
Figura 17 – Processo de mutação entre indivíduos.....	71
Figura 18 – Diagrama do SDEE com 135 barras – caso de estudo	72
Figura 19 – Convergência do GRG em cada iteração para OCRs 51F.....	77
Figura 20 – Convergência do GRG em cada iteração para OCRs 51N	77
Figura 21 – Produto $S \cdot \lambda_s$ em cada iteração para OCRs 51F	78
Figura 22 – Produto $S \cdot \lambda_s$ em cada iteração para OCRs 51N.....	78
Figura 23 – Produto $T \cdot \lambda_T$ em cada iteração para OCRs 51F.....	79
Figura 24 – Produto $T \cdot \lambda_T$ em cada iteração para OCRs 51N	79
Figura 25 – Direção de S em cada iteração para OCRs 51F	80
Figura 26 – Direção de S em cada iteração para OCRs 51N.....	80
Figura 27 – Direção de T em cada iteração para OCRs 51F	81
Figura 28 – Direção de T em cada iteração para OCRs 51N.....	81
Figura 29 – Corrente de <i>pick-up</i> em cada iteração para OCRs 51F.....	82
Figura 30 – Corrente de <i>pick-up</i> em cada iteração para OCRs 51N	82
Figura 31 – TMS em cada iteração para OCRs 51F	83
Figura 32 – TMS em cada iteração para OCRs 51N	83
Figura 33 – Tempo de execução do GRG para os sistemas testados	84
Figura 34 – Número de iterações do GRG para os sistemas testados.....	85
Figura 35 – Número de iterações do GRG por OCR para os sistemas testados.....	85
Figura 36 – SDEE com sistema de proteção de 4 OCRs	86
Figura 37 – Coordenogramas do sistema de proteção com 4 OCRs obtidos pelo GRG	88
Figura 38 – SDEE com sistema de proteção de 5 OCRs	89
Figura 39 – Coordenogramas do sistema de proteção com 5 OCRs obtidos pelo GRG	92
Figura 40 – SDEE com sistema de proteção de 6 OCRs	93

Figura 41 – Coordenogramas do sistema de proteção com 6 OCRs obtidos pelo GRG	95
Figura 42 – SDEE com sistema de proteção de 4 OCRs e 13 fusíveis	96
Figura 43 – Coordenogramas do sistema de proteção de fase com 4 OCRs e 13 fusíveis obtidos pelo GRG	100
Figura 44 – Coordenogramas do sistema de proteção de neutro com 4 OCRs e 13 fusíveis obtidos pelo GRG	101
Figura 45 – Comparativos para Pop/Ger de 300/320 com 4 OCRs	104
Figura 46 – Comparativos para Pop/Ger de 2400/1280 com 4 OCRs	104
Figura 47 – Comparativos dos tempos de operação com 4 OCRs	106
Figura 48 – Comparativos das correntes de <i>pick-up</i> com 4 OCRs	107
Figura 49 – Comparativos das TMS com 4 OCRs	107
Figura 50 – Comparativos para Pop/Ger de 300/320 com 5 OCRs	109
Figura 51 – Comparativos para Pop/Ger de 2400/1280 com 5 OCRs	109
Figura 52 – Comparativos dos tempos de operação com 5 OCRs	111
Figura 53 – Comparativos das correntes de <i>pick-up</i> com 5 OCRs	112
Figura 54 – Comparativos das TMS com 5 OCRs	112
Figura 55 – Comparativos para Pop/Ger de 300/320 com 6 OCRs	114
Figura 56 – Comparativos para Pop/Ger de 2400/1280 com 6 OCRs	114
Figura 57 – Comparativos dos tempos de operação com 6 OCRs	117
Figura 58 – Comparativos das correntes de <i>pick-up</i> com 6 OCRs	117
Figura 59 – Comparativos das TMS com 6 OCRs	118
Figura 60 – Comparativos para Pop/Ger de 300/320 com 4 OCRs e 13 fusíveis ...	119
Figura 61 – Comparativos para Pop/Ger de 2400/1280 com 4 OCRs e 13 fusíveis	120
Figura 62 – Comparativos dos tempos de operação com 4 OCRs e 13 fusíveis....	124
Figura 63 – Comparativos das correntes de <i>pick-up</i> ou nominal com 4 OCRs e 13 fusíveis	125
Figura 64 – Comparativos das TMS com 4 OCRs e 13 fusíveis	126
Figura 65 – Comparativos entre os tempos de execução	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo das principais características dos trabalhos revisados	28
Tabela 2 – Correntes nominais dos elos fusíveis K e T	33
Tabela 3 – Correntes nominais do elo-fusível H	33
Tabela 4 – Curvas IEC, IEEE e de fabricantes de relés de proteção.....	39
Tabela 5 – Tempo de coordenação dos pares de dispositivos de proteção	50
Tabela 6 – Parâmetros de ajuste das restrições.....	73
Tabela 7 – Parâmetros de ajuste do AG	74
Tabela 8 – Correntes de falta e pré-falta do SDEE de 135 barras.....	75
Tabela 9 – Ajustes do sistema de proteção de fase com 4 OCRs obtidos pelo GRG	87
Tabela 10 – Ajustes do sistema de proteção de neutro com 4 OCRs obtidos pelo GRG	87
Tabela 11 – Coordenação do sistema de proteção de fase com 4 OCRs obtidos pelo GRG	87
Tabela 12 – Coordenação do sistema de proteção de neutro com 4 OCRs obtidos pelo GRG	88
Tabela 13 – Ajustes do sistema de proteção de fase com 5 OCRs obtidos pelo GRG	90
Tabela 14 – Ajustes do sistema de proteção de neutro com 5 OCRs obtidos pelo GRG	90
Tabela 15 – Coordenação do sistema de proteção de fase com 5 OCRs obtidos pelo GRG	91
Tabela 16 – Coordenação do sistema de proteção de neutro com 5 OCRs obtidos pelo GRG	91
Tabela 17 – Ajustes do sistema de proteção de fase com 6 OCRs obtidos pelo GRG	93
Tabela 18 – Ajustes do sistema de proteção de neutro com 6 OCRs obtidos pelo GRG	94
Tabela 19 – Coordenação do sistema de proteção de fase com 6 OCRs obtidos pelo GRG	94
Tabela 20 – Coordenação do sistema de proteção de neutro com 6 OCRs obtidos pelo GRG	95
Tabela 21 – Ajustes do sistema de proteção de fase com 4 OCRs e 13 fusíveis obtidos pelo GRG.....	97
Tabela 22 – Ajustes do sistema de proteção de neutro com 4 OCRs e 13 fusíveis obtidos pelo GRG.....	98
Tabela 23 – Coordenação do sistema de proteção de fase com 4 OCRs e 13 fusíveis obtidos pelo GRG.....	99
Tabela 24 – Coordenação do sistema de proteção de neutro com 4 OCRs e 13 fusíveis obtidos pelo GRG.....	99
Tabela 25 – Comparativos das FOs com 4 OCRs	103
Tabela 26 – Ajustes do sistema de proteção pelo AG com 4 OCRs.....	105

Tabela 27 – Coordenação do sistema de proteção pelo AG com 4 OCRs	105
Tabela 28 – Comparativos dos tempos de operação, correntes de <i>pick-up</i> e TMS com 4 OCRs.....	106
Tabela 29 – Comparativos das FOs com 5 OCRs	108
Tabela 30 – Ajustes do sistema de proteção pelo AG com 5 OCRs	110
Tabela 31 – Coordenação do sistema de proteção pelo AG com 5 OCRs	110
Tabela 32 – Comparativos dos tempos de operação, correntes de <i>pick-up</i> e TMS com 5 OCRs	111
Tabela 33 – Comparativos das FOs com 6 OCRs	113
Tabela 34 – Ajustes do sistema de proteção pelo AG com 6 OCRs.....	115
Tabela 35 – Coordenação do sistema de proteção pelo AG com 6 OCRs	115
Tabela 36 – Comparativos dos tempos de operação, correntes de <i>pick-up</i> e TMS com 6 OCRs.....	116
Tabela 37 – Comparativos das FOs com 4 OCRs e 13 fusíveis	118
Tabela 38 – Ajustes do sistema de proteção de fase pelo AG com 4 OCRs e 13 fusíveis	120
Tabela 39 – Ajustes do sistema de proteção de neutro pelo AG com 4 OCRs e 13 fusíveis	121
Tabela 40 – Coordenação de fase obtido pelo AG com 4 OCRs e 13 fusíveis	122
Tabela 41 – Coordenação de neutro obtido pelo AG com 4 OCRs e 13 fusíveis ...	122
Tabela 42 – Comparativos dos tempos de operação, correntes de <i>pick-up</i> ou nominal e TMS com 4 OCRs e 13 fusíveis	123

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A-CTO	<i>Aggrandized Class Topper optimization</i>
ADC	<i>Analog to Digital Conversion</i>
AG	Algoritmo Genético
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
CTO	<i>Class Topper optimization</i>
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DFT	<i>Discrete Fourier Transforms</i>
DOCR	<i>Directional Overcurrent Relay</i>
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
EI	<i>Extremely Inverse</i>
F	Fase
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
FFP	Função <i>Fitness</i> Penalizada
FO	Função Objetivo
FOP	Função Objetivo Penalizada
FV	Fotovoltaico
GD	Gerador Distribuído
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GR	Gradiente Reduzido
GRG	Gradiente Reduzido Generalizado
HPSO	<i>Hybridized Particle Swarm Optimization</i>
HWOA	<i>Hybridized Whale Optimization Algorithm</i>
ICA	<i>Imperialist Competitive Algorithm</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
KKT	<i>Karush-Kuhn-Tucker</i>
LaPSEE	Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica
MM	<i>Minimum Melting</i>
MHs	Metaheurísticas
MINLP	<i>Mixed Integer Nonlinear Programming</i>
N	Neuro
PL	Programação Linear
PNL	Programação Não Linear
PSM	<i>Plug Setting Multiplier</i>
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
OBL-Focto	<i>Opposition Based Learning Fractional Order Class Topper Optimization</i>
OCR	<i>Overcurrent Relays</i>
OV	<i>Overvoltage</i>
PEN	Penalidade
RP	<i>Reverse-Power</i>
RTC	Relação de Transformação de Corrente
RTOS	<i>Real Time Operating System</i>
RTP	Relação de Transformação de Potencial
SA	<i>Simulated Annealing</i>
SBB	<i>Standard Branch-and-Bound</i>
SCA	<i>Sine Cosine Algorithm</i>

SDEE	Sistema de Distribuição de Energia Elétrica
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SI	<i>Standard Inverse</i>
SQP	<i>Sequential Quadratic Programming</i>
SR	<i>Speed Ratio</i>
SSA	<i>Salp-Swarm Algorithm</i>
STEE	Sistema de Transmissão de Energia Elétrica
STI	<i>Short Time Inverse</i>
TC	<i>Total Clearing</i>
TCC	<i>Time Current Characteristic</i>
TMS	<i>Time Setting Multiplier</i>
UV	<i>Undervoltage</i>
VI	<i>Very Inverse</i>
VNS	<i>Variable Neighborhood Search</i>
XML	<i>Extensible Markup Language</i>
WOA	<i>Whale optimization algorithm</i>
1Ø	Monofásico
2Ø	Bifásico
3Ø	Trifásico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	19
1.2	OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES	20
1.2.1	Objetivos específicos.....	21
1.3	JUSTIFICATIVA.....	22
1.4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
1.5	ESTRUTURA DO DOCUMENTO	29
2	ESTRATÉGIAS E TÉCNICAS DE PROTEÇÃO EM SDEE	31
2.1	CARACTERÍSTICAS DOS DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO	31
2.1.1	Elos fusíveis.....	32
2.1.2	Religadores	34
2.1.3	Relés de proteção.....	37
2.1.3.1	Funções de proteção	37
2.1.3.2	Tecnologias de construção	40
2.1.3.3	Modo de instalação.....	43
2.2	RESTRIÇÕES E COORDENAÇÃO NA PROTEÇÃO.....	44
2.2.1	Restrições de corrente.....	45
2.2.2	Coordenação e seletividade da proteção	47
3	METODOLOGIA PROPOSTA PARA COORDENAÇÃO OTIMIZADA.....	51
3.1	MODELO MATEMÁTICO PARA OTIMIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO	52
3.2	OTIMIZAÇÃO COM GRG	53
3.2.1	Condições de KKT.....	54
3.2.2	Modelo matemático para otimização com GRG.....	60
3.2.3	Algoritmo GRG.....	62
3.3	OTIMIZAÇÃO COM AG	66
3.3.1	Modelo matemático para otimização com AG.....	66
3.3.2	Algoritmo AG	67

4	RESULTADOS	72
4.1	CONFIGURAÇÃO GERAL DOS ALGORITMOS.....	73
4.2	ANÁLISE DO GRG	75
4.2.1	Análise de desempenho do algoritmo GRG.....	76
4.2.1.1	Desempenho das variáveis características do GRG	76
4.2.1.2	Desempenho computacional	84
4.2.2	Análise da coordenação otimizada do GRG	86
4.2.2.1	Sistema de proteção com 4 OCRs	86
4.2.2.2	Sistema de proteção com 5 OCRs	89
4.2.2.3	Sistema de proteção com 6 OCRs	93
4.2.2.4	Sistema de proteção com 4 OCRs e 13 fusíveis	96
4.3	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O GRG E AG	102
4.3.1	Sistema de proteção com 4 OCRs	102
4.3.2	Sistema de proteção com 5 OCRs	108
4.3.3	Sistema de proteção com 6 OCRs	113
4.3.4	Sistema de proteção com 4 OCRs e 13 fusíveis	118
4.3.5	Desempenho computacional.....	126
4.4	CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS	127
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	129
	REFERÊNCIAS	131

1 INTRODUÇÃO

O sistema de distribuição de energia elétrica (SDEE) é uma parte vital da infraestrutura de energia, conectando as usinas geradoras aos consumidores finais. Seu planejamento, construção e operação eficientes são fundamentais para garantir um fornecimento confiável, seguro e de qualidade de energia elétrica para atender às necessidades da sociedade (Melgar-Domingues; Pourakbari-Kasmaei; Mantovani, 2019). Além disso, seu planejamento deve levar em consideração não apenas as condições normais de operação, mas também as condições atípicas e eventos de falta, como sobrecorrente e curto-circuito. Esses eventos adversos podem ter um impacto significativo na operação e na segurança da rede, portanto, é essencial que o sistema seja projetado para lidar com eles de maneira eficaz.

Dentre as condições atípicas, tem-se uma variedade de fatores externos que podem causar interrupções no fornecimento de energia. Esses fatores podem variar desde eventos climáticos severos até interferências naturais, humanas e de animais (Jaramillo-Leon; Leite, 2022). Portanto, o fornecimento de energia elétrica deve ser confiável para atender às necessidades da sociedade moderna, que depende significativamente da eletricidade para suas atividades diárias. No entanto, garantir essa confiabilidade muitas vezes implica em custos mais elevados, tornando-se um desafio encontrar um equilíbrio entre confiabilidade e economicidade (Alston Grid, 2011).

A construção de um SDEE totalmente imune às interrupções seria extremamente dispendiosa devido a necessidade de implementar redundâncias significativas em equipamentos e circuitos, envolvendo a duplicação de componentes críticos, como geradores, linhas de transmissão e dispositivos de proteção, para garantir a continuidade do fornecimento de energia, ocasionando inevitavelmente, no aumento nos custos de construção e manutenção, resultando em tarifas de energia mais altas para os consumidores. Apesar das melhorias constantes na confiabilidade e resiliência dos SDEE, é praticamente impossível eliminar completamente todas as possíveis fontes de falhas, e essas falhas podem representar um risco à vida ou à propriedade (Alston Grid, 2011).

Portanto, os planejadores do SDEE geralmente buscam equilibrar a confiabilidade com a economicidade e a sua proteção é uma abordagem mais eficiente economicamente do que buscar a construção de um sistema totalmente

imune às faltas, permitindo a redução das interrupções por eventos não considerados graves e diminuindo o tempo de duração caso venham a ocorrer. A estratégia comum é detectar e isolar rapidamente as faltas quando ocorrem, para limitar o impacto e permitir a rápida restauração do fornecimento de energia elétrica. Embora o sistema de proteção do SDEE não o torne imune às faltas, ele desempenha um papel crucial na redução do impacto dessas faltas e na manutenção da confiabilidade do fornecimento de energia elétrica.

Estima-se que cerca de 80% do tempo total de interrupção do sistema elétrico de potência (SEP) é decorrente de faltas na rede primária de distribuição, ou seja, mais próxima do consumidor e, portanto, a adoção de práticas de planejamento robustas, manutenção preventiva, tecnologias em proteções e planos de contingência eficazes são essenciais para garantir a confiabilidade e a resiliência desses sistemas e minimizar as interrupções no fornecimento de energia (Teng; Liu, 2003). Isto impacta diretamente nos indicadores de continuidade, que podem gerar ações punitivas pelas agências reguladoras de energia caso não sejam atendidas. Para exemplificar os desafios de se manter a continuidade do fornecimento de energia elétrica, considerem-se os indicadores de continuidade brasileiro até o mês de fevereiro de 2023. O valor de duração equivalente de interrupção por unidade consumidora (DEC) acumulado no período de 12 meses tinha uma tendência anual de 10,71 horas, valor dentro do Limite Regulatório de 11,27 horas estabelecido pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) no período, porém das cinco regiões presentes no país três delas: Centro-Oeste, Nordeste e Sul apresentaram tendência fora dos limites (Ministério de Minas e Energia-SEE, 2023). Isto mostra os desafios de se restabelecer rapidamente a continuidade do fornecimento de energia elétrica. Já a frequência equivalente de Interrupção por unidade consumidora (FEC) tinha uma tendência anual de 5,31 interrupções, valor dentro do Limite Regulatório de 7,84 interrupções estabelecido pela ANEEL (Ministério de Minas e Energia-SEE, 2023). Isto indica que as interrupções são inevitáveis, porém há a garantia que estejam dentro de níveis aceitáveis, impactando minimamente a economia e a sociedade e garantindo a confiabilidade do sistema.

A confiabilidade dos SDEEs modernos, e, portanto, também o projeto das proteções, é alterado com a implantação cada vez mais frequente da geração distribuída (GD). Por exemplo no Brasil, em outubro de 2023, a GD ultrapassou os 24,4 GW instalados em 2.167.501 unidades, representando 11% da matriz de

capacidade instalada de geração de energia elétrica e com crescimento de 64,1% no período de 12 meses (Ministério de Minas e Energia-SEE, 2023), mostrando uma tendência cada vez maior na implantação de GDs, que por um lado tem o benefício da diminuição da contribuição do fornecimento de energia das grandes gerações, e por outro lado ocasiona problemas aos sistemas de proteção devido a capacidade destes GDs alimentarem os curto-circuitos, elevando os seus níveis no SDEE e consequentemente levando o sistema a condições mais severas de esforços. Isto pode ocasionar fusão, combustão ou até mesmo a explosão de dispositivos da rede elétrica, por ultrapassarem a sua capacidade operacional (Thurner; Braun, 2018). Portanto cada vez mais o desempenho e atuação dos dispositivos de proteção têm sido mais solicitadas de modo a criar um sistema de proteção elétrica robusto, capaz de identificar e isolar faltas de maneira rápida e eficiente, garantindo a segurança e a confiabilidade contínua do SEP. O constante aprimoramento do desempenho dos dispositivos de proteção é fundamental para atender às demandas cada vez mais rigorosas dos sistemas elétricos modernos. O dimensionamento e parametrização adequada, garantido pelo estudo de coordenação e seletividade, envolve a análise detalhada do comportamento do SEP em diferentes condições de operação e falta. Essa análise depende das informações coletadas nos instantes de pré-falta, pós-falta e no instante de ocorrência do evento de falta (Reiz, 2019).

Os dispositivos de proteção atuais são capazes de monitorar e controlar o fluxo de energia elétrica na rede, identificando e isolando rapidamente faltas e condições atípicas para minimizar os danos aos equipamentos e assegurar a segurança das pessoas. Estas novas tecnologias têm permitido uma capacidade adaptativa, permitindo a reconfiguração baseada em leituras de dados da rede elétrica praticamente em tempo real, exigindo cada vez mais algoritmos eficientes para realização deste desafio. Entre esses dispositivos, o OCR desempenha um papel fundamental, sendo amplamente utilizado em todo o mundo para proteção contra sobrecargas e faltas (Rojnić; Prenc *et al.*, 2022). Devido ao seu baixo custo em comparação com outros tipos de relés, os OCRs são utilizados como o principal dispositivo de proteção de SDEE (Gers; Holmes, 2021). A coordenação desses relés, realizada de forma adequada, permite minimizar seu tempo de operação, que possui como variáveis a característica de tempo corrente (TCC) com seus coeficientes, correntes de curto-circuito e de *pick-up* e ajuste multiplicador de tempo (TMS). Entretanto, o tempo de operação possui não linearidades envolvidas e natureza

combinatória e, a aplicação de abordagens avançadas com algoritmos eficientes pode ajudar a enfrentar esses desafios e encontrar soluções eficazes para garantir a segurança e a operação confiável do SDEE.

1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Nos SDEEs deve-se assegurar a sua operação apropriada através da coordenação e seletividade dos dispositivos de proteção através da obtenção dos parâmetros necessários para o ajuste de relés de proteção e a escolha dos valores nominais para os elos fusíveis. Os relés de proteção digital e numéricos, especialmente os OCRs devido ao seu baixo custo, estão alocados desde a subestação até a rede de distribuição através de religadores automáticos, buscando aumentar a confiabilidade e segurança do SDEE, mas a otimização de seus tempos de operação é um problema, pois nem sempre os OCRs são configurados levando em consideração o seu menor tempo de operação, sendo aceito apenas o fato dos dispositivos estarem coordenados e seletivos, gerando problemas na sua utilização em redes inteligentes (*smart-grids*), onde o poder de decisão é dependente do tempo de operação dos dispositivos a ela conectados.

A otimização da coordenação dos OCRs, portanto, é fundamental, minimizando o seu tempo de operação garantindo que o OCR detecte a falta no menor tempo possível e de forma coordenada, permitindo a atuação mais rápida de algoritmos tomadores de decisão para alertar equipes de manutenção, favorecendo a melhora de indicadores de continuidade e permitindo uma reconfiguração mais rápida do SDEE isolando a parte em falta. Além disso, o tempo de operação otimizado aumenta a durabilidade dos dispositivos do SDEE evitando prematura substituição destes dispositivos e também garantindo a segurança das pessoas em espaços públicos. Para isto há um grande desafio, onde é necessário que algoritmos sejam testados exaustivamente para avaliar seu desempenho para estas aplicações e validar ou não a viabilidade de sua utilização. Para operação destes algoritmos são necessários modelos matemáticos eficazes para que os algoritmos tenham uma efetiva eficiência computacional e consequentemente gerar tempos de operação otimizados.

1.2 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES

Para resolver problemas complexos de otimização que não apresentam um modelo matemático bem estabelecido, no geral, as MHs são boas opções devido principalmente à sua flexibilidade e não depender de complexos modelamentos matemáticos para obtenção de respostas. Elas são capazes de lidar com a natureza não linear e combinatória dos problemas de coordenação, sendo, portanto, úteis em situações desafiadoras, minimizando ou maximizando, sempre dentro de uma respectiva vizinhança, mas dependendo da aplicação podem ter tempos computacionais impraticáveis. Os métodos híbridos, junção de diferentes algoritmos para um objetivo comum, permitem simplificações consideráveis no problema de coordenação, porém, esta combinação pode afastar a formulação do problema de suas características originais e aumentar o tempo computacional, dependendo do tamanho do sistema em estudo.

Portanto, em contraste com outras abordagens, o presente trabalho propõe a otimização da operação de OCRs através de programação não linear (PNL), mais especificamente o GRG, que mantém as principais propriedades do problema, considerando as restrições não lineares dos OCRs e busca da solução ótima que satisfaça as condições de *Karush-Kuhn-Tucker* (KKT). Uma implementação da MH populacional, do tipo AG permite avaliar comparativamente o desempenho e qualidade das soluções obtidas usando o método do GRG.

Este trabalho traz as seguintes contribuições:

- Introduz um algoritmo robusto de otimização determinística, que resolve eficientemente o problema de coordenação de OCR;
- Garante uma redução no tempo de resposta da solução, permitindo seu uso na parametrização em tempo real, particularmente, em dispositivos conectados em redes inteligentes (*smart-grids*);
- Garante que os SDEEs sejam protegidos de forma eficiente, com redução nos tempos de operação dos OCRs, através de soluções de boa qualidade.

A implementação da metodologia proposta foi desenvolvida no ambiente do C#, com desempenho e eficiência computacional comparáveis ao C/C++, garantindo um tempo de processamento aceitável para o objetivo proposto. A coordenação ótima dos OCRs utilizou o padrão normativo da *International Electrotechnical Commission* IEC

60255-151 (2009) para os tempos de operação e TCCs com três tipos de curvas do padrão normativo da IEC e um com o padrão da fabricante de relés de proteção *Schneider Electric*.

1.2.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Estabelecer os modelos matemáticos essenciais para calcular o tempo de operação do OCR de forma otimizada, buscando a minimização da operação de forma coordenada. Essa determinação deve levar em consideração as características técnicas e operacionais específicas do relé de proteção, proporcionando uma abordagem precisa e abrangente para a análise do tempo de operação na coordenação otimizada;
- Realizar um levantamento detalhado dos padrões normativos mais utilizados na coordenação de relés de proteção para a adequada aplicação nas análises e configuração do método proposto;
- Desenvolver um procedimento para obter e registrar as informações relacionadas à corrente de curto-circuito em todos os ramos do SDEE para diversas categorias de faltas. Esses dados são importantes para a adequada parametrização dos OCRs;
- Realizar o modelamento matemático do tempo de operação do OCR e conjunto de restrições utilizando PNL e utilizar a condição de KKT para provar as condições de otimalidade do modelo proposto;
- Implementar o GRG para o modelo matemático proposto, para adequada otimização e coordenação incluindo todas as informações necessárias para seu adequado funcionamento;
- Ajustar o método de resolução do AG para abordar a problemática de coordenação e desenvolver uma codificação que possibilite a inclusão de todas as informações essenciais à proposta de solução;
- Configurar adequadamente o método AG e GRG, com seus principais parâmetros de ajuste para obter resultados adequados necessários nas análises comparativas;

- Realizar análises comparativas com base nos índices de confiabilidade mais amplamente empregados na literatura. Esse procedimento visa verificar e validar a consistência, coerência e precisão dos resultados obtidos por meio dos modelos utilizados.

1.3 JUSTIFICATIVA

A implementação de uma coordenação otimizada de OCRs em SDEEs apresenta diversas justificativas fundamentais para garantir a eficácia e a confiabilidade da proteção do sistema. Algumas dessas justificativas incluem:

1. Minimização de tempos de desligamento: A coordenação otimizada dos OCRs permite uma resposta seletiva e rápida a eventos de sobrecorrente. Isso minimiza os tempos de desligamento, reduzindo o impacto das interrupções no fornecimento de energia;
2. Prevenção de desligamentos desnecessários: A otimização da coordenação evita desligamentos desnecessários, assegurando que apenas o relé mais próximo da falta seja ativado. Isso contribui para manter o restante do sistema em operação, minimizando interrupções não essenciais;
3. Proteção adequada a diferentes níveis de falta: A coordenação otimizada permite ajustar a sensibilidade dos OCRs de acordo com a localização e a gravidade da falta. Isso garante uma proteção adequada em diferentes regiões do sistema, considerando as características específicas de cada uma delas;
4. Prevenção de distúrbios em cascata: A coordenação eficiente impede a propagação de distúrbios em cascata, isolando rapidamente as áreas afetadas. Isso protege o restante do sistema e evita a ampliação de problemas para outras partes da rede;
5. Melhoria na vida útil dos equipamentos: Ao reduzir o tempo de exposição a condições anormais, a coordenação otimizada contribui para a preservação dos equipamentos elétricos, prolongando sua vida útil e reduzindo a necessidade de manutenção corretiva;
6. Adaptação a mudanças na rede: A otimização da coordenação permite ajustes dinâmicos da proteção com a mudança no fluxo de carga ou a entrada ou saída de dispositivos de proteção na rede de distribuição,

- recalculando de maneira otimizada os novos parâmetros ideais para aquele momento específico, garantindo uma proteção contínua e eficiente;
7. Maximização da eficiência operacional: Uma coordenação otimizada maximiza a eficiência operacional, garantindo uma resposta rápida e seletiva às falhas. Isso contribui para a continuidade do fornecimento de energia e a minimização de impactos adversos;
 8. Atendimento a critérios de segurança e normativas: A coordenação otimizada permite o cumprimento eficaz de critérios de segurança e normativas regulatórias, assegurando que o sistema esteja em conformidade com os padrões estabelecidos.

Em resumo, a coordenação otimizada de OCRs em SDEEs é essencial para aprimorar a proteção do sistema, garantindo uma resposta eficiente a eventos adversos e contribuindo para a confiabilidade e a segurança da distribuição de energia elétrica.

1.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A literatura disponibiliza diversos métodos de obtenção da coordenação ótima dos dispositivos de proteção e alguns autores focam em sistemas de transmissão de energia elétrica (STEE) e outros em SDEE com diferentes dispositivos de proteção, com propostas para os tempos de operação dos OCRs nos padrões da IEC 60255-151 (2009) ou do *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE) C37.112 (2018b).

Os autores em Habib e Lai *et al.* (2022) resolvem o problema de coordenação de OCRs direcionais (DOCRs) utilizando uma versão híbrida de otimização por enxame de partículas (HPSO). A hibridação é alcançada através da introdução de recozimento simulado (SA) na otimização de enxame de partículas (PSO), aumentando o espaço de busca. Os autores aplicaram com sucesso o método proposto a cinco estudos de caso com SDEEs da IEEE, e segundo eles os resultados obtidos superam as demais técnicas tradicionais e de última geração em termos de minimização do tempo de operação do DOCRs e das características de convergência, exigindo menor tempo computacional para alcançar a solução ótima.

Em Rojnic´ e Prenc *et al.* (2023) os autores desenvolvem um AG e o testam em um sistema de distribuição radial real de 15 barras para dois casos de teste diferentes. A partir dos resultados obtidos, eles descobrem que levar em consideração a localização da falta não melhora realmente a operação dos OCRs e que usar uma função objetivo (FO) relativamente simples produz melhores resultados. Os autores concluem que para minimizar o tempo de operação dos relés de proteção em toda a rede, basta apenas observar as faltas no início dos elementos protegidos e incluí-las no algoritmo de otimização.

O problema de coordenação é resolvido pelos autores em Alaee e Amraee (2021) através de um algoritmo competitivo imperialista (ICA) baseado em AG. Semelhante aos cromossomos do AG, a população inicial representa o país e os melhores indivíduos são os impérios, e os demais são as colônias. A força de um império é medida pela sua FO, somada à força de suas colônias. Os impérios mais fracos entram em colapso e os mais fortes permanecem. O problema de coordenação para o DOCR é formulado como um problema não linear inteiro misto (MINLP) e os autores testam o algoritmo em três SDEE de 3, 8 e 15 barras. Os resultados são comparados com o algoritmo *standard branch-and-bound* (SBB) e outros algoritmos de otimização MH, o que demonstra a eficácia do algoritmo proposto. Os autores utilizam várias TCCs, com um único tipo de TCC para cada cenário.

Em Saad, El-Naily e Mohamed (2019) os autores realizam uma análise detalhada das limitações nas características de disparo dos OCRs fabricados e propondo uma nova restrição levando em consideração o ajuste multiplicador do plugue (PSM) para melhorar as técnicas de otimização. Os autores também buscam aprimorar as características de disparo complementares aos OCRs industriais com as técnicas de otimização para os tempos de operação coordenados. Eles utilizam um toolbox com AG do MATLAB® para otimizar o TMS dos OCRs e um SDEE de referência é implementada no ETAP® para investigar a eficácia da nova restrição proposta.

Os autores em Saldarriaga-Zuluaga, López-Lezama e Munoz-Galeano (2020) propõem uma abordagem para a coordenação ótima de DOCRs em microrredes que integram GD renovável e apresentam vários modos operacionais. Os autores consideram as TCCs variáveis de decisão, ao invés de fixar um único tipo de curva para todos os OCRs como considerado em outros trabalhos. A abordagem proposta permite a seleção de diversas curvas IEC e IEEE cuja combinação resulta na melhor

coordenação de proteção. Os autores resolvem o problema de otimização proposto por um AG convencional que foi implementado em MATLAB® e utilizam uma microrrede de um SDEE referência da IEC. Eles comparam os resultados com outras abordagens de coordenação mostrando que a abordagem proposta é capaz de encontrar tempos de operação menores e, ao mesmo tempo, garantir a operação adequada das proteções sob diferentes condições de faltas e modos operacionais.

Em Kida, Rivas e Gallego (2020) os autores propõem uma técnica híbrida intitulada programação linear (PL) de recozimento simulado (SA-LP) para a coordenação otimizada de DOCRs. Eles utilizam cinco SDEEs de teste da IEEE de 3, 6, 8, 15 e 30 barras para verificar a eficácia da técnica proposta e os resultados foram comparados com outras técnicas de otimização da literatura apresentando soluções de boa qualidade, baixos tempos de processamento computacional e grande probabilidade de convergência para a solução ótima.

É proposto pelos autores em Al-Bhadely e İnan (2023) um algoritmo híbrido com AG e programação quadrática sequencial (SQP) intitulado AG-SQP para melhorar a coordenação de DOCRs em SDEEs radiais e não radiais com GDs. O método proposto busca otimizar a FO da coordenação do relé da melhor maneira. Segundo os autores as técnicas híbridas propostas melhoraram a convergência do problema e aumentaram a probabilidade de obtenção de uma solução ótima. Eles testaram o método através de três estudos de caso envolvendo SDEEs da IEEE de 3, 8 e 30 barras modificados comparando os resultados com outros métodos obtendo resultados que indicam que a abordagem de otimização proposta é eficiente em termos de precisão e tempos de operação entre os pares de relés primário e de backup.

Os autores em Sarwagya, Nayak e Ranjan (2020) utilizam um novo algoritmo de otimização denominado Algoritmo Seno Cosseno (SCA) para resolver os problemas de coordenação ótima de DOCRs em SDEE. SCA é um algoritmo baseado em população recentemente proposto, usado para resolver problemas de otimização altamente não lineares onde o padrão cíclico da função seno e cosseno reposiciona uma solução em torno de outra solução garantindo a exploração do espaço definido entre as soluções. Os autores testam a eficácia do SCA com diferentes dados de faltas gerados em sistemas da IEEE de 3, 8, 15 e 30 barras. Segundo os autores os resultados fornecidos pelo algoritmo proposto são superiores na redução do tempo de operação dos relés primários em comparação com os algoritmos de otimização

recentemente publicados para coordenação de DOCRs, sendo robusto em manter a coordenação e reduzindo o tempo de coordenação entre pares de relés primários e de retaguarda.

Em Choudhary e Das (2021) os autores propõem melhorar o desempenho dos tempos de operação dos DOCRs em SDEE, através de um algoritmo de otimização chamado *opposition based learning fractional order class topper optimization* (OBL- Focto) que é uma nova proposta do *class topper optimization* (CTO). O desempenho do método proposto é avaliado usando seis sistemas de teste como o sistema IEEE de 3, 4 e 30 barras, respectivamente. Segundo os autores os resultados do método apresentado mostram que o tempo de operação dos relés é minimizado, enquanto comparado com os resultados existentes para todos os seis sistemas de teste com a manutenção das coordenações entre cada relé e também atendendo a outras restrições. Os autores aplicam uma hipótese estatística não paramétrica a todos os sistemas de teste dos resultados da simulação para mostrar a sua relevância.

Os autores em Khurshaid e Wadood *et al.* (2019) buscam desenvolver uma versão hibridizada do algoritmo de otimização *Whale* (WOA) denominado HWOA para a coordenação ótima dos DOCRs. Eles realizam a hibridização implantando o SA no algoritmo WOA, ou seja, SA-WOA, para melhorar a melhor solução encontrada após cada iteração e aprimorar a exploração pesquisando as regiões mais promissoras localizadas pelo algoritmo WOA, o que leva a uma solução ótima. O algoritmo proposto foi avaliado para cinco sistemas de teste, incluindo os sistemas de teste IEEE de 3, 8, 9, 15 e 30 barras. Os resultados obtidos pelos autores são comparados com o WOA tradicional e uma série de algoritmos atualizados obtendo eficácia do HWOA proposto em minimizar o tempo de operação para a coordenação ótima dos DOCRs.

Em Reiz e Leite (2022) os autores propõem um modelo matemático para a coordenação ótima de OCRs em SDEE com GDs em dois modos de operação: conectados à rede e ilhados. Os autores também propõem a técnica de minimização dos tempos de operação utilizando um AG elitista com processos variáveis de *crossover* e mutação. Eles testam o modelo em um SDEE de 135 barras com múltiplos cenários e os resultados obtidos mostram que a metodologia proposta apresenta bons resultados com tempos de operação dos OCRs apresentando valores próximos aos limites impostos pelas restrições, a qualidade e a velocidade de processamento são atrativas, proporcionando informações rápidas para a tomada de decisões no

planejamento do SDEE e adequada coordenação, garantindo a operação segura das microrredes.

Os autores em Usama e Moghavvemi *et al.* (2021) propõem um esquema de proteção robusto no qual as configurações de coordenação do relé sejam otimizadas com base no *layout* da rede. Eles buscam diminuir os impactos potenciais dos GDs no SDEE através do tempo de operação mínimo dos DOCRs e, ao mesmo tempo, satisfazer as restrições de coordenação de proteção. Eles propõem um novo algoritmo híbrido chamado SSA-LP, baseado no Algoritmo *Salp-Swarm* (SSA) com PL, para atingir a solução ótima e reduzir o tempo computacional. O desempenho da técnica proposta é testado em SDEE radial integrado com microrrede. Segundo os autores a técnica proposta reduziu com sucesso o tempo de operação do relé e sucesso na coordenação de proteção para modos de operação dinâmicos de um SDEE.

No artigo de Bouchekara e Shahriar *et al.* (2021) os autores desenvolvem um novo algoritmo de busca de vizinhança variável (VNS) para coordenação dos DOCRs, particularmente as configurações de corrente e tempos de operação. Os autores testam o desempenho do algoritmo proposto em redes do SDEE de 8, 9 e 15 barras em diversos cenários. Segundo os autores após comparar os resultados com outros algoritmos convencionais o algoritmo proposto mostrou superioridade técnica na coordenação dos DOCRs melhorando a proteção do SDEE.

Em Choudhary e Das (2022) os autores propõem um método para parametrização dos DOCRs e melhorar os tempos de operação através de um algoritmo de otimização que eles chamam de *Aggrandized Class Topper optimization* (A-CTO). Eles avaliam a capacidade do método proposto através da análise de seis SDEE de teste da IEEE de 3, 4 e 8 Barras e comprovando a eficácia da técnica pela análise dos resultados adquiridos com o CTO e outros métodos.

Os autores em Alasali e El-Naily *et al.* (2021) propõem um método de coordenação ótima usando características de disparo não padronizadas para reduzir o tempo de operação dos OCRs em um SDEE conectado a um GD fotovoltaico (FV) utilizando dois métodos de otimização, PSO e AG. Através de um estudo de caso, utilizando um SDEE da IEEE de 9 barras conectado ao sistema FV, os autores realizam simulações com o software comercial ETAP® e os resultados do esquema de coordenação ótima proposto são comparados com as TCCs da IEC e IEEE. Os autores também avaliam diferentes SDEEs e locais de falta. Segundo os autores, os

resultados indicam que o método proposto reduz com sucesso o tempo de operação dos OCRs.

Na **Tabela 1** apresenta-se um resumo de todos os trabalhos revisados com as características mais relevantes utilizadas pelos autores, como o SEP, o relé, quais os algoritmos, se foram utilizadas múltiplas curvas e quais os padrões normativos. Pode-se verificar que na maioria dos trabalhos utilizam-se em suas análises os DOCRs como proteção, devido as análises verificarem o comportamento de GDs no SDEE.

Tabela 1 – Resumo das principais características dos trabalhos revisados

Referência	Tipo de Sistema	Relé	Algoritmo	Múltiplas Curvas	Curvas		
					IEEE	IEC	outras
(Habib; Lai et al., 2022)	SDEE	DOCR	AS-PSO			✓	
(Rojnic; Prenc et al., 2023)	SDEE	OCR	AG	✓		✓	
(Alaee; Amraee, 2021)	SDEE	DOCR	ICA	✓		✓	
(Saad; El-Naily; Mohamed, 2019)	SDEE	OCR	AG toolbox-MATLAB			✓	
(Saldarriaga-Zuluaga; López-Lezama; Munoz-Galeano, 2020)	SDEE	DOCR	AG	✓	✓	✓	
(Kida; Rivas; Gallego, 2020)	SDEE	DOCR	SA-LP			✓	
(Al-Bhadely; Inan, 2023)	SDEE	DOCR	AG-SQP			✓	
(Sarwagya; Nayak; Ranjan, 2020)	SDEE	DOCR	SCA			✓	
(Choudhary; Das, 2021)	SDEE	DOCR	OBL-Focto			✓	
(Khurshaid; Wadood et al., 2019)	SDEE	DOCR	SA-WOA			✓	
(Reiz; Leite, 2022)	SDEE	DOCR	AG	✓		✓	✓
(Usama; Moghavvemi et al., 2021)	SDEE	DOCR	SSA-LP	✓		✓	
(Boucekara; Shahriar et al., 2021)	SDEE	DOCR	VNS			✓	
(Choudhary; Das, 2022)	SDEE	DOCR	A-CTO			✓	
(Alasali; El-Naily et al., 2021)	SDEE	OCR	PSO e AG	✓	✓	✓	✓
Método proposto	SDEE	OCR	GRG	✓		✓	✓

Fonte: Elaboração do autor

Nestes trabalhos, algoritmos dos mais variados tipos são propostos para resolver o problema de coordenação otimizada, sendo o AG o algoritmo que mais se

destaca, seja na sua forma convencional ou na forma hibridizada. A forma hibridizada dos algoritmos também se destaca, aparentemente a opção por dois algoritmos trabalhando juntos para alcançar o objetivo, busca verificar o desempenho destes utilizando a melhor característica de cada um. Algoritmos mais recentes também são testados mostrando uma possibilidade de utilização. As curvas IEC são as mais utilizadas e há uma tendência da maioria dos autores por utilizar uma única curva para suas análises.

1.5 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos, cada uma abordando um aspecto específico do tema sob estudo. A seguir, é apresentado um resumo do conteúdo de cada capítulo.

O capítulo 1 é iniciado com uma contextualização abrangente do problema, destacando os desafios da operação e da segurança do SDEE bem como a influência de eventos atípicos nas interrupções do fornecimento de energia e qual as estratégias para reduzir essas ocorrências. Explora-se a importância de buscar um equilíbrio entre confiabilidade e economicidade no SDEE, ressaltando a proteção como uma abordagem eficaz e economicamente vantajosa para alcançar este equilíbrio. São discutidos os impactos resultantes da ausência ou parametrização inadequada da proteção, especialmente no contexto do planejamento, operação e indicadores de continuidade. No texto destaca-se o impacto significativo das contribuições de corrente dos GDs no SDEE durante situações de falta. Uma revisão bibliográfica aborda as técnicas utilizadas para resolver o problema de coordenação otimizada, mostrando alguns dos métodos presentes na literatura especializada atual.

No capítulo 2 realiza-se uma introdução dos conceitos fundamentais e definições relacionadas às proteções do SDEE. Ao apresentar os princípios essenciais, o leitor é orientado na compreensão dos elementos-chaves relacionados à segurança e funcionamento eficiente desses sistemas bem como as práticas de coordenação destes dispositivos de proteção. Essa exposição inicial proporciona a contextualização necessária para a discussão subsequente de propostas e metodologias, contribuindo para uma compreensão abrangente do tema abordado no trabalho.

No capítulo 3 o método GRG proposto para otimização da coordenação é minuciosamente detalhado, abordando a sua estrutura e modelagem matemática do problema de coordenação de OCRs. Paralelamente, é apresentado com igual profundidade o método AG, que é utilizado como ponto de referência comparativa para a avaliação do desempenho do método proposto. A descrição abrangente inclui toda a estrutura e a formulação matemática necessária, oferecendo uma compreensão abrangente da abordagem proposta e estabelecendo uma base sólida para as análises comparativas subsequentes.

No capítulo 4 apresenta-se a descrição dos testes realizados em um SDEE e a discussão minuciosa dos resultados obtidos pelo método do GRG e AG. Quatro sistemas de teste possuindo sistemas de proteção composto por quatro, cinco e seis OCRs e quatro OCRs com treze elos fusíveis, respectivamente, são analisadas e as soluções identificadas são apresentadas de forma clara. Destaca-se, especialmente, a melhor solução, determinada com base em critérios preestabelecidos. Coordenogramas são elaborados para diferentes combinações de TCCs de proteção, destacando os limites de coordenação e seletividade. Essas representações visuais evidenciam os pontos de coordenação mais sensíveis, proporcionando uma análise aprofundada sobre os limiares ideais e reais a serem aplicados na proteção dos SDEEs. Esse enfoque permite uma discussão consistente sobre as estratégias de proteção mais eficazes para garantir a segurança e confiabilidade do sistema.

No capítulo 5 são apresentadas as considerações finais, juntamente com as propostas para investigações futuras. Por fim, são disponibilizadas as referências bibliográficas para respaldar e contextualizar as fontes consultadas ao longo do estudo.

2 ESTRATÉGIAS E TÉCNICAS DE PROTEÇÃO EM SDEE

As estratégias adotadas para a adequada proteção do SDEE se inicia com a escolha dos dispositivos de proteção mais convenientes de serem alocados em cada setor do sistema, levando em consideração as características regionais e técnicas da rede, permitindo que os dispositivos de proteção atuem de forma seletiva, sem que haja interrupções de partes não afetadas pela falta. A partir disso entra o processo de coordenação da proteção, onde os dispositivos de proteção devem atuar de forma coordenada, sem que um ultrapasse os limites temporais do outro, garantindo uma seletividade adequada.

Neste capítulo são discutidas quais as principais características dos dispositivos de proteção utilizados em SDEE, como eles atuam, e quais os padrões normativos recomendados na literatura especializada para especificação dos dispositivos na adequada coordenação do SDEE. Além disso, são discutidos os modelos matemáticos que regem a coordenação destes dispositivos. Todos estes modelos matemáticos servem de base para o modelamento matemático para o método proposto neste trabalho.

2.1 CARACTERÍSTICAS DOS DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO

Tradicionalmente, os sistemas de proteção dos SDEEs utilizam dispositivos interruptores na rede, que operam com a finalidade de manobra, cuja ação visa exclusivamente controlar a abertura ou fechamento da rede para estabelecer, alterar ou interromper o seu fluxo de corrente. A manobra geralmente esta associada ao controle operacional normal do SEP, sendo realizada geralmente durante atividades de medição e reconfiguração da rede. Entretanto, quando os dispositivos interruptores são operados com a finalidade de seccionamento, a ação é exclusivamente de abrir ou fechar a rede com o objetivo específico de isolar uma parte do sistema, em resposta às faltas ocorridas. Tanto para manobra ou seccionamento, o SDEE utiliza usualmente disjuntores, religadores e chave-fusíveis para este propósito. Estes dispositivos dependem de outro tipo de dispositivo que seja capaz de enviar um comando para sua operação após detectar a falta. Entre estes dispositivos estão os elos fusíveis e relés. Os elos fusíveis em conjunto com as chave-fusíveis atuam sobre efeito exclusivo de curto-circuito e os relés em conjunto com disjuntores e religadores atuam sobre

efeito das mais variadas anormalidades presentes no sistema, podendo ser configurados e possuindo flexibilidades não encontradas nos fusíveis. Portanto, a proteção deve atuar para uma ampla faixa de valores de corrente e as mais variadas anormalidades presentes, mas também devem evitar atuação indevida sobre efeitos transitórios, como as correntes de *inrush* que ocorrem na energização dos transformadores de potência (Reiz, 2023).

Neste trabalho é dado ênfase aos relés de proteção, devido a sua variedade de curvas características, sua facilidade de operação coordenada e flexibilidade de configurações, possibilitando uma ampla variedade de estudos, mas, também, é detalhado o funcionamento dos elos fusíveis, com uma explicação do funcionamento do religador contendo o relé como elemento de controle e suas características que o levam a operar com a funcionalidade de religador.

2.1.1 Elos fusíveis

Os elos fusíveis são os dispositivos de proteção mais utilizados em saídas de ramais em SDEEs, principalmente devido ao seu baixo custo dentre todas os dispositivos de proteção (CPFL-Energia, 2016). Eles são compostos por um elemento sensível e outras partes que, em caso de ocorrência de um curto-circuito, geram um efeito térmico. Esse efeito térmico resulta na fusão do elemento fusível, interrompendo o circuito. A alta temperatura do arco voltaico provoca a queima e a decomposição parcial do revestimento interno do cartucho, gerando gases que interrompem o arco voltaico no instante de corrente nula. À medida que a temperatura aumenta, a pressão dentro do cartucho também aumenta. A geração de gases cria condições dentro do tubo que auxiliam na desionização do caminho do arco voltaico. A pressão exercida contribui para manter a condição de circuito aberto, já que as partículas ionizadas forçam a abertura das extremidades do cartucho, sendo subsequentemente expelidas (Eletrobrás, 1982) (Gers; Holmes, 2021).

Os elos fusíveis podem ser do tipo K, T e H, cada um com uma velocidade de operação e portanto aplicações diferente.

Os elos tipo K são de rápida atuação, *Speed Ratio* (SR) variando entre 6 e 8 e são aplicados na proteção de ramais laterais. Os elos tipo T são mais lentos, seu SR varia entre 10 e 13 e são aplicados na proteção de ramais laterais e de transformadores (Filho; Mamede, 2020) (Gers; Holmes, 2021). Eles são classificados

em dois grupos, preferenciais e não preferenciais com capacidade de sobrecarga de 50% do seu valor nominal, conforme **Tabela 2**.

Tabela 2 – Correntes nominais dos elos fusíveis K e T

Nº:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Corrente nominal (A)</i>									
Preferenciais:	6	10	15	25	40	65	100	140	200
Não preferenciais:	8	12	20	30	50	80			

Fonte: Elaboração do autor

Os elos fusíveis preferenciais não coordenam com não preferenciais e vice-versa, devendo haver apenas a coordenação entre elos fusíveis do mesmo grupo.

Os elos fusíveis tipo H são especiais, SR variando de 11,4 a 36,4 e suportando elevada sobrecorrente, porém são considerados muito lentos e aplicados exclusivamente na proteção de transformadores de potência, devido a transitórios de curta duração como as correntes de *Inrush* (Filho; Mamede, 2020). Eles são classificados de acordo com suas correntes nominais conforme **Tabela 3**.

Tabela 3 – Correntes nominais do elo-fusível H

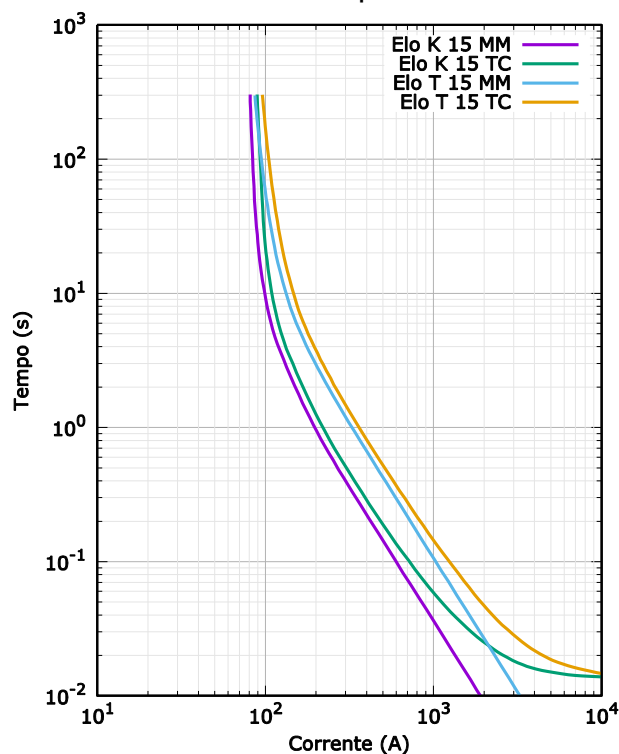
Nº:	1	2	3	4	5
<i>Corrente nominal (A)</i>					
	0,5	1	2	3	5

Fonte: Elaboração do autor

Para todos os tipos de elos fusíveis há essencialmente dois tipos de curvas associadas a um mesmo valor nominal. As curvas de mínima fusão (MM) correspondem a 90% do tempo médio de fusão, para levar em conta as tolerâncias de fabricação. As curvas de máxima interrupção (TC) correspondem ao tempo médio de fusão mais o tempo de arco e as tolerâncias de fabricação (Short, 2004). Como exemplo, na **Figura 1** são apresentadas as curvas MM e TC para os elos fusíveis do tipo K e T respectivamente. As curvas MM são empregadas na coordenação do elo fusível com um religador no esquema salva-fusível, ao passo que as curvas TC são utilizadas no esquema queima-fusível. Na coordenação entre elos fusíveis, ambas as curvas são empregadas (Reiz, 2023). Não há disponível uma equação característica das curvas dos elos fusíveis, portanto deve-se obter a sua equação a partir de

regressão não linear ou obter o tempo de operação diretamente de uma tabela de dados da curva e interpolando o intervalo próximo.

Figura 1 – Curvas MM e TC para elos fusíveis K e T



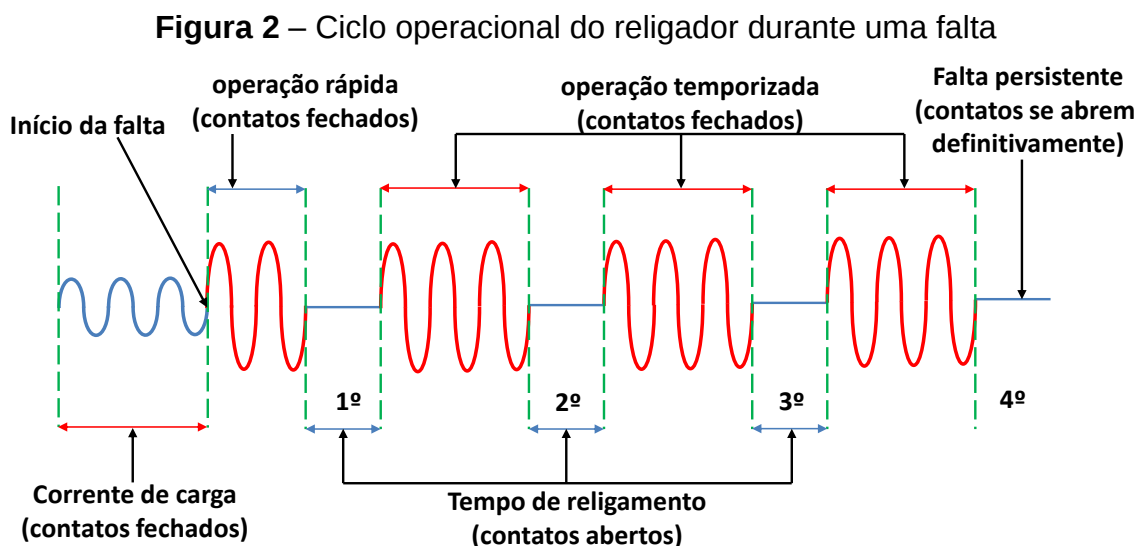
Fonte: Elaboração do autor.

2.1.2 Religadores

Em um SDEE, entre 80 e 95 por cento das faltas são de natureza temporárias e têm duração limitada, ocorrendo, no máximo, em alguns ciclos ou segundos. Nesse contexto, o religador, com sua capacidade de abrir/fechar automaticamente seus contatos repetidamente, em caso de uma falta no circuito sob sua proteção, desempenha grande importância ao evitar que o SDEE fique inoperante devido às faltas temporárias (Gers; Holmes, 2021).

Sua principal função é proporcionar proteção contra sobrecorrente, agindo automaticamente ao detectar um curto-circuito. Quando o curto-circuito é detectado, ele interrompe a circulação dessa corrente ao abrir seus contatos que assim permanecem por um período determinado, conhecido como tempo de religamento, antes de se fecharem automaticamente para reenergizar a rede. Caso, no momento do fechamento dos contatos, a corrente persista, a sequência de abertura/fechamento é repetida por 3 ciclos. Se a falta persistir, após a quarta abertura, os contatos

permanecem abertos e travados, sendo necessário um novo fechamento manual para restabelecer a operação normal do sistema (Gers; Holmes, 2021). Na **Figura 2** encontra-se um diagrama do ciclo operacional de um religador.



Fonte: adaptado (Gers; Holmes, 2021)

Os religadores são classificados em três categorias distintas: hidráulicos, eletrônicos e microprocessados, conforme descrito a seguir:

- **Hidráulicos:**

Seu sistema de controle é hidráulico e o componente atuante desse controle é o embolo de uma bobina-série, que funciona como uma bomba, operando quando esta bobina é percorrida por um fluxo de corrente 60% acima da sua corrente nominal, acionando o sistema de seccionamento (Eletrobrás, 1982). A operação de contagem se faz quando há desenergização da bobina-série acarretando na perda do campo magnético, fazendo com que o embolo retorne a sua posição superior, forçando o óleo a acionar um pistão de disparo que faz com que o seccionador registre uma contagem (Gers; Holmes, 2021). Eles possuem como curvas características, as curvas *Kyle*, sendo uma curva rápida, e duas curvas temporizadas. Tanto o sistema de controle quanto o sistema de seccionamento estão integrados em um único dispositivo (Gers; Holmes, 2021);

- **Eletrônicos:**

Seu sistema de seccionamento tem suas operações supervisionadas por um sistema de controle composto por um circuito eletrônico, onde a corrente que circula pelo seccionador é amostrada pelos transformadores de corrente do tipo bucha, e após todo um processamento eletrônico de um número prefixado de contagem, envia um sinal de disparo com a finalidade de atuar sobre a bobina de disparo (Eletrobrás, 1982) (Gers; Holmes, 2021). Eles possuem como curvas características as curvas *Kyle* como nos religadores hidráulicos. Tanto o sistema de controle quanto o sistema de seccionamento estão fisicamente separados, sendo que o sistema de controle é instalado em um painel que pode ser posicionado em qualquer localização desejada no poste;

- **Microprocessados:**

Seu sistema de seccionamento tem suas operações supervisionadas por um sistema de controle microprocessado, composto por um relé de proteção, proporcionando versatilidade e flexibilidade de configuração (Gers; Holmes, 2021). O relé a ele incorporado permite a configuração de diversas funções de proteção, dentre elas a função 50 e 51 de sobrecorrente instantâneo e temporizado, respectivamente, e também tempo definido 50TD com as tradicionais curvas IEC, IEEE e uma diversidade de outras curvas padronizadas pelos próprios fabricantes. O relé também oferece a função 79 de religamento automático, possibilitando o acionamento repetido do sistema de seccionamento (Conceição, 2018). Além destas características fundamentais, ele permite a sua automação e conexão em redes com medição remota (Ramos, 2014). Ambos, o sistema de controle e o sistema de seccionamento, estão fisicamente separados, sendo que o sistema de controle é montado em um painel que pode ser posicionado em qualquer local desejado no poste.

Atualmente, devido as características dos SDEEs no Brasil serem majoritariamente convencionais, ou seja, aéreos, as distribuidoras de energia elétrica estão cada vez mais adotando o uso de religadores microprocessados devido as vantagens descritas e, dessa forma, eles se tornam elementos fundamentais em redes

modernas onde cada vez mais tem-se adotado as tecnologias *smart grids* (Ramos, 2014).

2.1.3 Relés de proteção

Nos SDEEs, os relés de proteção desempenham um papel fundamental assegurando a proteção adequada dos principais ramais e da saída da subestação. Conforme discutido anteriormente, esses relés estão integrados aos religadores microprocessados, que se tornam cada vez mais predominantes nos modernos SDEEs devido à sua capacidade de automação. Essa presença crescente contribui significativamente para o aumento da confiabilidade e resiliência da rede elétrica.

Os relés, por sua definição, são dispositivos de controle e proteção instalados em circuitos elétricos. Sua função principal é comandar o desligamento ou religamento de equipamentos de interrupção, como disjuntores ou religadores, em caso de ocorrência de uma falta no circuito que estão protegendo. Essa funcionalidade é fundamental para preservar a integridade do sistema e garantir uma operação segura e eficiente do SDEE (Energisa, 2012).

Um relé possui três características principais, a função que ele executa, a sua tecnologia de construção e o seu modo de instalação.

2.1.3.1 Funções de proteção

Nos SDEEs, há três tipos principais de funções utilizadas para proteção de fase (F) e de neutro (N). De acordo com as normas do *American National Standards Institute* (ANSI), temos:

- **Função de sobrecorrente:**

A função 50 é para atuação instantânea e a função 51 para atuação temporizada, com curva característica de tempo inversa. Esses relés supervisionam a intensidade da corrente que circula no alimentador, e comandam a abertura de disjuntores ou religadores quando uma determinada corrente ultrapassa um valor pré-determinado, chamado de *pick-up* do relé (Filho; Mamede, 2020) (Energisa, 2012);

- **Função direcional:**

A função 67 tem ganho relevância em sistemas radiais nos últimos tempos devido a sua capacidade direcional, uma de suas aplicações é quando há necessidade de proteger o sistema contra correntes de falta que poderiam circular em ambas as direções através de um elemento do sistema. Isto pode acontecer em sistemas do tipo anel, ou malha, e em sistemas com vários GDs (Gers; Holmes, 2021). A função 67 também é comumente associada a outras proteções, como potência ou distância, possibilitando que a atuação desses equipamentos seja restrita a um único sentido do fluxo de potência (Junior, 2017). Na aplicação de sobrecorrente, o princípio de funcionamento está relacionado com a defasagem angular entre a tensão de referência e a corrente de operação. Durante a operação normal, esta defasagem se mantém dentro do intervalo de -90° e 90° , e os valores são positivos indicando que o fluxo está no sentido esperado, caso o fluxo esteja na direção oposta, a defasagem angular aumenta e o valor se torna negativo permitindo a atuação de outra função, como por exemplo a função de sobrecorrente 50/51 (Reiz, 2023) (Reiz; Pereira; Leite, 2023);

- **Função de religamento:**

A função 79, de religamento automático, é empregada para controlar o religamento de um dispositivo, como um disjuntor ou religador. Essa função pode efetuar o fechamento do equipamento de interrupção imediatamente após sua abertura ou com um certo atraso de tempo, dependendo das características da carga do circuito ou da coordenação com outros dispositivos de proteção do SDEE (Energisa, 2012).

Estas funções são essenciais para garantir a operação segura e eficiente do SDEE, mas outras funções também estão disponíveis para proteção, porém menos frequentes no SDEE, como as de subtensão (UV) 27 e sobretensão (OV) 59, as de potência reversa (RP) 32 e de frequência 81. Outras variedades de funções também são encontradas devendo ser consultadas na tabela ANSI.

Para a operação da função de sobrecorrente 51, as curvas da IEC 60255-151 (2009) e IEEE C37.112 (2018b) são normalmente utilizadas, mas outros padrões definidos pelos próprios fabricantes de relés também são utilizados. O tempo de

operação do relé na função 51 (t_R^{51}) é determinado por (1) que depende do tipo de curva selecionado onde C_1 , C_2 e C_3 são seus coeficientes, TMS é o ajuste multiplicador de tempo, I é a Corrente que sensibiliza o relé e I_{pkip}^{51} é a Corrente de pick-up do relé (corrente de partida).

$$t_R^{51} = TMS \cdot \left(\frac{C_1}{\left(\frac{I}{I_{pkip}^{51}} \right)^{C_2} - 1} + C_3 \right) \quad (1)$$

Na **Tabela 4**, estão especificados os padrões da IEC, IEEE e de alguns fabricantes de relés para as TCCs e seus respectivos coeficientes associados.

Tabela 4 – Curvas IEC, IEEE e de fabricantes de relés de proteção

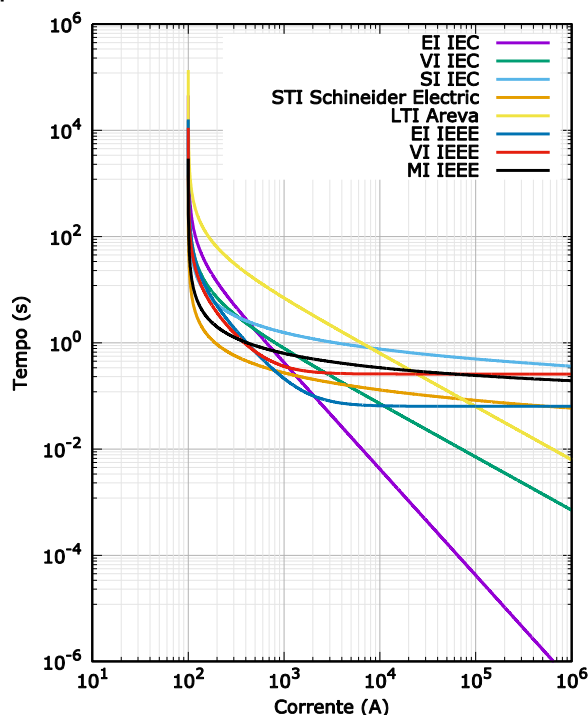
Nº	TCC		Fonte	C_1	C_2	C_3
1	Standard Inverse	SI	IEC	0,14	0,02	0
2	Very Inverse	VI	IEC	13,5	1	0
3	Extremely Inverse	EI	IEC	80	2	0
4	Short Time Inverse	STI	Schneider Electric	0,05	0,04	0
5	Long time inverse	LTI	Areva	120	1	0
6	Moderately Inverse	MI	IEEE	0,0515	0,02	0,1140
7	Very Inverse	VI	IEEE	19,61	2	0,491
8	Extremely Inverse	EI	IEEE	28,2	2	0,1217

Fonte: Elaboração do autor

O comportamento do TMS, conforme dado em (2), é permitir que a curva se desloque verticalmente através do eixo dos tempos, dentro de um intervalo de restrição. O comportamento de I_{pkip}^{51} é permitir o deslocamento da curva através do eixo das correntes. Estas variáveis em (1) possibilitam uma flexibilidade muito interessante na curva, permitindo a sua modulação para uma adequada coordenação com outros dispositivos de proteção.

$$TMS_{min} \leq TMS \leq TMS_{max} \quad (2)$$

Na **Figura 3** tem-se um exemplo do comportamento de cada tipo de curva da **Tabela 4** para uma mesma corrente de *pick-up*.

Figura 3 – Comportamento das curvas IEC, IEEE e de fabricantes de relés

Fonte: Elaboração do autor.

2.1.3.2 Tecnologias de construção

Há basicamente quatro importantes características construtivas dos relés, que podem permitir flexibilidade ou não, dependendo de sua utilização. Os eletromecânicos e estáticos são considerados obsoletos e não são mais fabricados, mas continuam em operação devido a sua segurança e precisão, só sendo substituídos em caso de *retrofits* ou operação inadequada do dispositivo.

- **Eletromecânicos:**

Esses relés são fabricados com componentes elétricos, magnéticos e mecânicos e são compostos por bobinas de operação e vários contatos, tornando-os extremamente robustos e confiáveis. Devido aos seus componentes magnéticos, também são conhecidos como relés eletromagnéticos (Gers; Holmes, 2021). Eles são de fácil configuração, porém considerados obsoletos e ainda encontrados em operação. Podem ser do tipo atração, que basicamente operam pelo movimento de um contato metálico, que é atraído pelo campo magnético da corrente circulante. Podem ser do tipo bobina móvel, que é composto por um mecanismo

giratório contendo uma pequena bobina suspensa ou articulada, que possui a liberdade de girar entre os polos de um ímã permanente. Duas molas não apenas mantêm os contatos em sua posição, mas também desempenham o papel de conexões, permitindo o transporte de corrente até a bobina (Gers; Holmes, 2021). Finalmente o tipo de indução que é composto basicamente por um disco que se movimenta por indução eletromagnética dentro de um entreferro com núcleo magnético excitado pela corrente no secundário de transformadores de corrente interligado na bobina elétrica do relé. Acoplado ao disco, existe um contato móvel que comanda a abertura do disjuntor (Energisa, 2012);

- **Estáticos:**

O termo 'estático' está relacionado à ausência de partes móveis em sua construção. Seu design é fundamentado no uso de dispositivos eletrônicos analógicos em vez de bobinas e ímãs para desempenhar as características do relé. Inicialmente, eram utilizados transistores, diodos, resistores, capacitores e indutores, mas ao longo do tempo, houve a transição para o uso de circuitos integrados lineares e digitais. Embora os circuitos básicos fossem compartilhados por vários relés, cada função de proteção tinha seu próprio gabinete, resultando em funções complexas que demandavam múltiplos gabinetes de hardware interconectados. A capacidade de programação do usuário era limitada às funções básicas de ajuste das curvas características do relé. Portanto, esses relés podem ser vistos como substitutos eletrônicos analógicos para os relés eletromecânicos, oferecendo alguma flexibilidade adicional nas configurações e economizando espaço (Alston Grid, 2011);

- **Digitais:**

Os relés de proteção digital representaram uma mudança significativa na tecnologia, substituindo os circuitos analógicos dos relés estáticos por microprocessadores e microcontroladores para implementar suas funções. Esses relés digitais realizam a conversão analógica para digital (ADC) de todas as grandezas medidas e utilizam um microprocessador para executar o algoritmo de proteção que pode empregar uma técnica de contagem ou

utilizar algoritmos de processamento digital de sinais como as transformadas discretas de fourier (DFTs). Em comparação com os relés eletromecânicos ou estáticos, os relés digitais oferecem uma ampla variedade de configurações, maior precisão e a capacidade de estabelecer uma conexão de comunicação com um computador remoto. Geralmente, os relés digitais utilizam microprocessadores de 8 ou 16 bits, porém devido a capacidade limitada desses microprocessadores o número de amostras da forma de onda fica restrito, o que, por sua vez, pode limitar a velocidade de operação do relé em certas aplicações. Consequentemente, um relé digital projetado para uma função de proteção específica pode ter um tempo de operação mais longo em comparação com um relé estático equivalente. No entanto, esse tempo adicional é geralmente insignificante quando comparado ao tempo total de disparo e aos possíveis impactos na estabilidade do SEP (Alston Grid, 2011);

- **Numéricos:**

A distinção entre relés digitais e numéricos é específica para Proteção. Os relés numéricos são uma evolução natural dos relés digitais devido aos avanços na tecnologia. Eles utilizam um ou mais processadores digitais de sinais (DSPs) otimizados para processamento de sinais em tempo real, executando os algoritmos matemáticos para as funções de proteção. Para um processamento mais rápido em tempo real e uma análise mais detalhada das formas de onda, vários DSPs podem ser executados em paralelo. Um componente essencial do relé é o seu sistema operacional em tempo real (RTOS) que garante que todas as tarefas sejam executadas quando necessário, na prioridade correta (Alston Grid, 2011).

Assim como no relé digital, um algoritmo DFT obtém informações de magnitude e fase para a corrente, entre outras grandezas elétricas importantes (Alston Grid, 2011). A maioria dos relés numéricos são multifuncionais e podem ser considerados dispositivos eletrônicos inteligentes (IEDs). O manejo adequado de todos os recursos requer uma plataforma lógica programável flexível para que o usuário aplique as funções disponíveis com total flexibilidade e seja capaz de personalizar a proteção para atender aos requisitos do SEP protegido (Gers; Holmes,

2021). Todas as vantagens oferecidas pelo relé digital são disponibilizadas pelos numéricos além da capacidade de oferecer outros recursos como oscilografia, funções lógicas programáveis e tempo de sincronização com sistema de posicionamento global (GPS) aplicado aos mais diversos propósitos, como registros de perturbações relacionados ao consumo de energia (Alston Grid, 2011).

Uma das funcionalidades notáveis que o relé numérico pode oferecer é a proteção adaptativa. Essa capacidade permite que a configuração do relé seja ajustada conforme as condições operacionais da rede, garantindo assim configurações adequadas do relé em tempo real. Isso significa que o relé não se apóia apenas em uma configuração predeterminada considerada a mais crítica do sistema, o que às vezes pode não ser a solução mais apropriada (Gers; Holmes, 2021).

2.1.3.3 Modo de instalação

Os relés de proteção podem ser instalados de duas formas, diretamente nos terminais de entrada do dispositivo interruptor ou de forma indireta, com a utilização de transformadores.

- **Primário:**

Possui uma bobina de corrente em torno de um núcleo móvel imerso em um líquido viscoso. A bobina está em série com a linha de alta tensão e a corrente circulante é que sensibiliza a proteção, não existindo, portanto, uma bobina de secundário. Algumas instalações antigas ainda possuem este tipo de dispositivo, porém não são mais aceitos pela referência normativa brasileira NBR14039:2021 (Energisa, 2012) (Filho; Mamede, 2020);

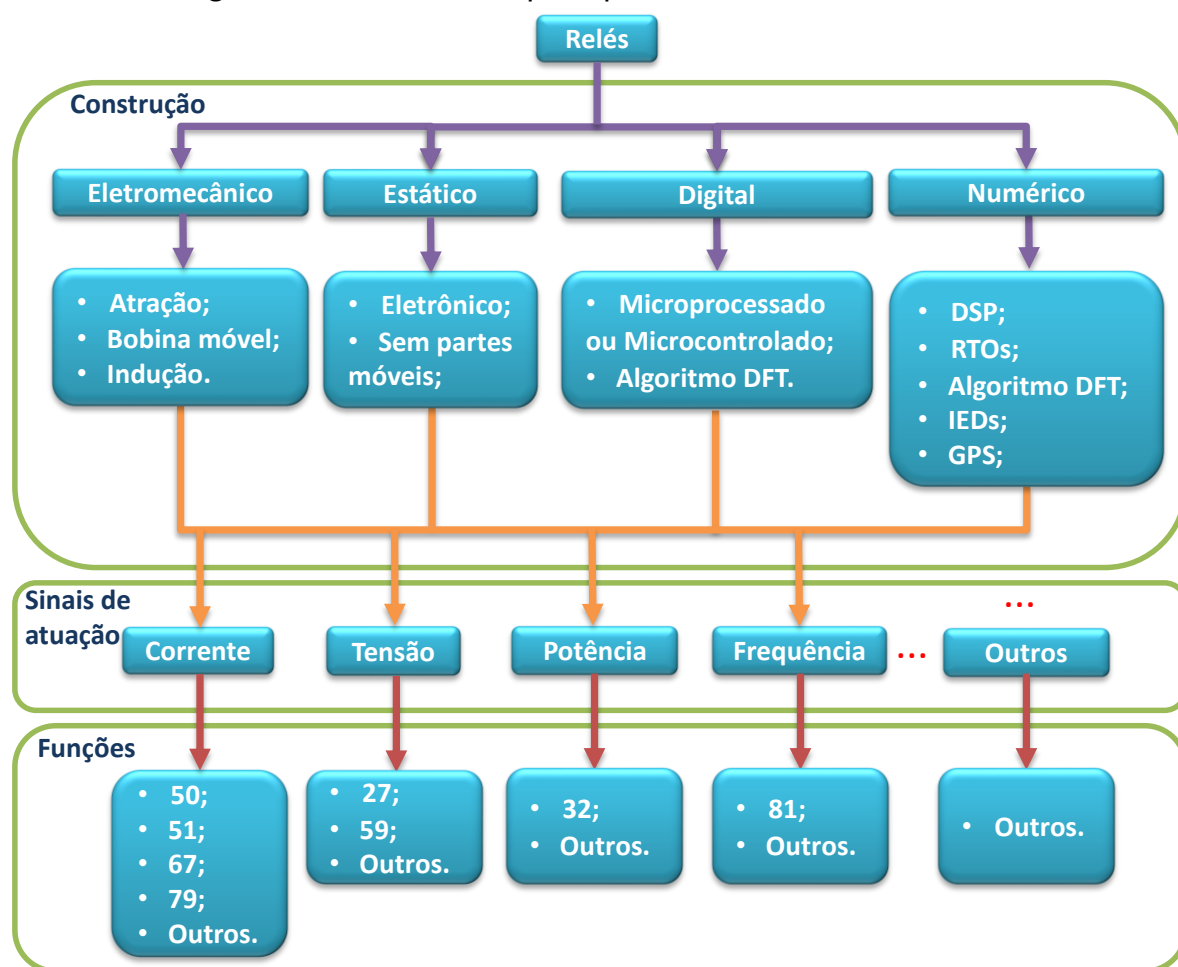
- **Secundário:**

São alimentados por transformadores de corrente e de potencial a partir do secundário destes transformadores. Os relés são dependentes, portanto, de uma relação de transformação de corrente (RTC) e de potencial (RTP) para

poderem operar adequadamente. Todos os SDEEs modernos utilizam este modo de instalação (Energisa, 2012) (Filho; Mamede, 2020).

Na **Figura 4** é apresentado um resumo das principais características encontradas nos relés de proteção aqui descritos e utilizadas em SDEEs entre outras funções também disponíveis.

Figura 4 – Resumo das principais características dos relés



Fonte: Elaboração do autor

2.2 RESTRIÇÕES E COORDENAÇÃO NA PROTEÇÃO

Para a adequada coordenação dos dispositivos de proteção, as correntes de operação dos dispositivos devem garantir a correta sensibilidade do sistema de proteção. Essas correntes são fundamentais para garantir que os dispositivos de proteção possam responder de forma adequada a situações de sobrecorrente ou falta no SDEE. Além disso, há a necessidade de estimar as correntes de carga em todos

os ramos do alimentador, mesmo sem conhecimento prévio da localização exata dos dispositivos na rede. Isso permite a preparação do sistema de proteção para responder eficientemente a possíveis variações e demandas, contribuindo para a segurança e a estabilidade do SDEE como um todo.

Os tempos de operação dos dispositivos de proteção devem atuar de forma ágil e coordenada para assegurar a segurança das pessoas e dos dispositivos da rede, ao mesmo tempo em que possibilitam a seletividade adequada do SDEE. Isso impede o desligamento de setores não afetados pela falta, garantindo a continuidade do fornecimento de energia de forma eficiente e segura.

Deste modo, nas próximas seções são apresentados os critérios para determinar as restrições de corrente que os dispositivos podem operar e, em seguida, apresentam-se os critérios para que haja adequada coordenação entre os dispositivos, levando em consideração os seus respectivos tempos de operação.

2.2.1 Restrições de corrente

São as restrições comumente utilizadas para os relés na função 51, nos elos fusíveis e nos religadores. De modo geral, estas restrições levam em consideração uma porcentagem de segurança para as correntes de carga máxima da linha e para os curtos-circuitos, devendo o dispositivo de proteção estar ajustado dentro deste intervalo para adequada sensibilidade e coordenação. Estas porcentagens de segurança podem ser definidas pelas distribuidoras de energia elétrica, não sendo, portanto, uma regra bem definida.

Na função 51, tanto de fase quanto de neutro, segundo (Gers; Holmes, 2021), a regra geral para restrição é que a corrente de *pick-up* do relé deve estar entre um intervalo de porcentagem mínima e máxima de segurança do carregamento máximo de corrente da linha inclusive, conforme dado em (3). Portanto, para a função 51F a corrente de *pick-up* deve estar entre um coeficiente de segurança 1 (K_1) de 120% e um coeficiente de segurança 2 (K_2) de 150% do carregamento máximo de corrente da linha (I_{Load}^{Max}) inclusive, e para a função 51N a corrente de *pick-up* deve estar entre um fator K_1 de 10% e K_2 de 30% do carregamento máximo de corrente da linha inclusive, pois para esta função um possível desequilíbrio de fase em regime pode resultar em uma corrente circulante no neutro, levando à sensibilização indevida do relé.

$$K_1 \cdot I_{Load}^{Max} \leq I_{Pkp}^{51} \leq K_2 \cdot I_{Load}^{Max} \quad (3)$$

Para o elo fusível, a regra geral para restrição é que a corrente nominal do elo (I_F^{Elo}) deve estar entre uma porcentagem de segurança do carregamento máximo de corrente da linha e uma porcentagem de segurança da corrente de curto-circuito monofásico ($I_{CC}^{\phi T}$) mínimo para uma impedância de 40 Ω inclusive, conforme dado em (4) (Reiz, 2019) (Conceição, 2018).

A porcentagem de segurança K_1 corresponde ao horizonte de expansão da rede, que tipicamente utiliza-se o valor de 150% em um horizonte de cinco anos para uma taxa de crescimento de 8,5% ao ano e K_2 corresponde a 25% (Energisa, 2012).

$$K_1 \cdot I_{Load}^{Max} \leq I_F^{Elo} \leq K_2 \cdot I_{CC}^{\phi T} \quad (4)$$

Para os religadores, deve-se ajustar as correntes de disparo ou ajuste, que depende da categoria do dispositivo e se é de fase ou neutro. A regra geral para restrição de fase é que a corrente de *pick-up* do religador (I_{Pkp}^{RLG}) deve estar entre uma porcentagem de segurança do carregamento máximo da corrente de linha e uma porcentagem de segurança da corrente de curto-circuito bifásico ($I_{CC}^{2\phi}$) mínima inclusive, conforme expressão (5).

Para o disparo de fase de religadores eletrônicos e microprocessados, a corrente de *pick-up* é igual a corrente nominal da bobina série, K_1 é o horizonte de expansão da rede e K_2 possui valor máximo de 66,7%. Para os religadores hidráulicos a corrente de *pick-up* é duas vezes a corrente nominal da bobina série e K_1 tem valor unitário.

Para o disparo de neutro independentemente do tipo, K_1 deve estar entre 10% e 30% para garantir que não haja disparo indevido por desequilíbrio de fase em regime e K_2 possui valor máximo de 66,7% (Energisa, 2012). Todas as correntes de *pick-up* de fase ou neutro devem, independentemente do tipo de religador, ser ajustadas com o mínimo valor possível dentro da restrição em (5).

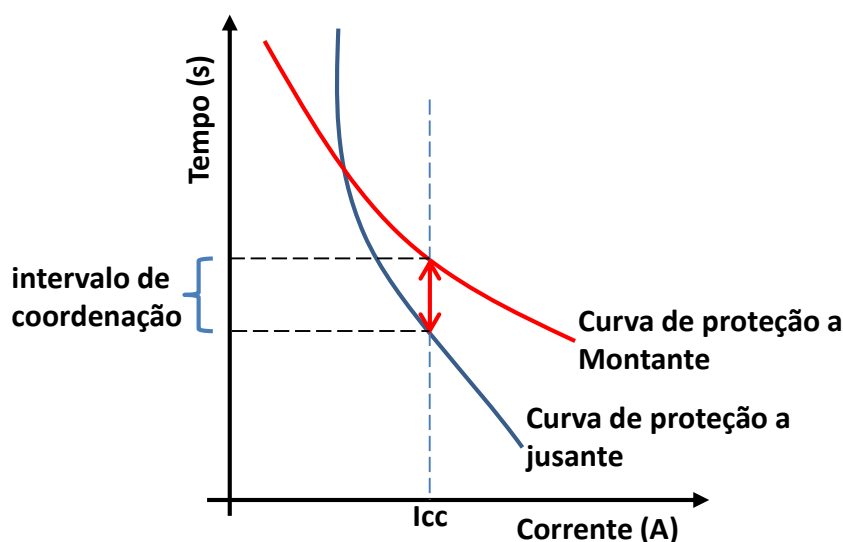
$$K_1 \cdot I_{Load}^{Max} < I_{Pkp}^{RLG} \leq K_2 \cdot I_{CC}^{2\phi} \quad (5)$$

2.2.2 Coordenação e seletividade da proteção

Para que haja um adequado entendimento da filosofia de coordenação e seletividade é necessário definir estes termos, e então entender o conceito de zonas de proteção.

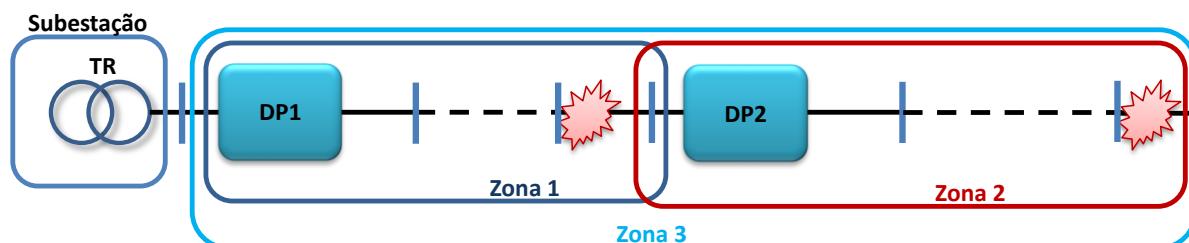
A coordenação é a garantia de que, em uma falta ocorrida, o dispositivo mais próximo da falta, ou seja, a jusante atue antes que o dispositivo a montante. Para isto as curvas no tempo de operação, de ambos os dispositivos devem respeitar um adequado intervalo de coordenação, como pode-se observar na **Figura 5**. Devido às diferenças de dispositivos, algumas combinações requerem abordagens ligeiramente diferentes (Short, 2004). Portanto, a coordenação deve acontecer entre pares consecutivos de dispositivos de proteção, em que um dispositivo atua como proteção primária (jusante) e outro como proteção de retaguarda ou *back-up* (montante).

Figura 5 – Conceito de coordenação entre curvas de dispositivos



Fonte: Elaboração do autor

Como consequência da adequada coordenação, somente a zona em que a falta ocorreu é que é desligada pelo dispositivo mais próximo, podendo-se afirmar, portanto, que a seletividade está garantida. Este conceito de zonas de proteção é importante para a seletividade, garantindo que somente o dispositivo mais próximo a falta é que deve desligar o circuito, na sua zona de proteção, evitando que o problema se propague para zonas que não apresentam problema, como se pode observar na **Figura 6**.

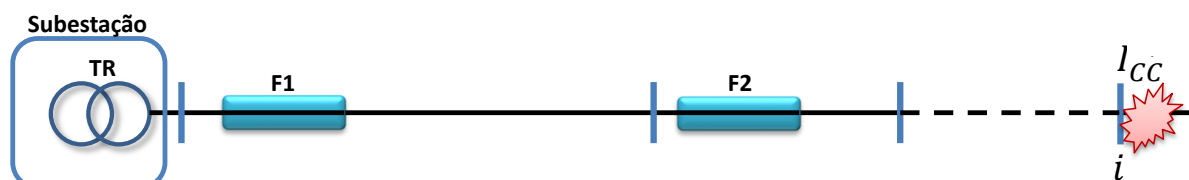
Figura 6 – Conceito de zonas de proteção

Fonte: Elaboração do autor

Na **Figura 6** o dispositivo DP2 atua como proteção primária para faltas na zona de proteção 2 e o dispositivo DP1 como proteção primária para faltas na zona de proteção 1 e como proteção de retaguarda de DP2, para faltas ocorridas na zona 2 que não foram detectadas por DP2 por uma eventual falha. Logo, DP1 abrange toda a zona 3 que cobre as zonas 1 e 2 simultaneamente. Em condições normais de operação, os dispositivos DP1 e DP2 devem trabalhar coordenados, garantindo que um não atue indevidamente na zona do outro.

Pode-se combinar a coordenação entre elos fusíveis, relés e elos fusíveis e relés. Considerando que os religadores possuem relés com a função 79 de religamento automático, eles podem ser considerados como coordenação entre relés.

Para coordenação entre elos fusíveis sobre efeito de um curto-circuito na i -ésima barra a jusante, conforme representado na **Figura 7**, a coordenação do par está assegurada quando o tempo de operação de TC do elo fusível (t_F^{TC}) a jusante for menor ou igual a um coeficiente de segurança (K) de 75% do tempo de operação de MM do elo fusível (t_F^{MM}) a montante, como apresentado em (6).

Figura 7 – Alocação de dois fusíveis na rede

Fonte: Elaboração do autor

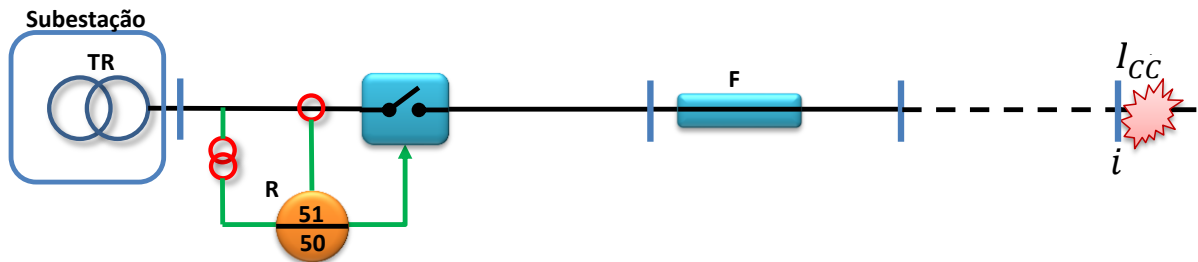
$$t_{F2}^{TC} \leq K \cdot t_{F1}^{MM} \quad (6)$$

Para coordenação entre relé/religador e elo fusível sobre efeito de um curto-circuito na i -ésima barra a jusante, conforme representado na **Figura 8**, a coordenação do par está assegurada quando o tempo de operação de MM do elo

fusível a jusante for menor ou igual a um K de 135% do tempo de operação na função 50 do relé (t_{R1}^{50}) a montante, como apresentado em (7).

Também deve-se assegurar que o tempo de operação na função 51 do relé seja maior ou igual a soma aritmética do tempo de operação do elo fusível para TC e o tempo de coordenação do relé 51 e a curva TC do elo fusível (t_{CD}^{51-TC}), conforme apresentado em (8).

Figura 8 – Alocação de relé/religador e elo fusível na rede



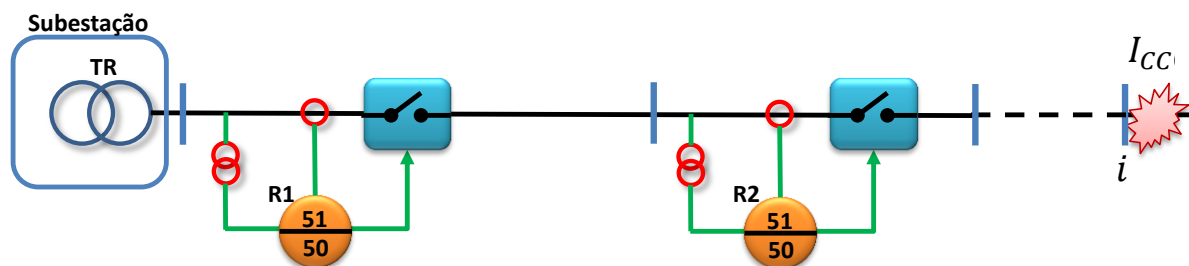
Fonte: Elaboração do autor

$$t_F^{MM} \leq K \cdot t_R^{50} \quad (7)$$

$$t_R^{51} \geq t_F^{TC} + t_{CD}^{51-TC} \quad (8)$$

Para coordenação entre relés/religadores sobre efeito de um curto-circuito na i -ésima barra a jusante, conforme representado na **Figura 9**, a coordenação do par está assegurada quando o tempo de operação do relé na função 50 (t_{R1}^{50}) e 51 a montante seja maior ou igual a soma aritmética do tempo de operação na função 50/51 do relé a jusante e o tempo de coordenação entre os dois dispositivos envolvidos, conforme dado de (9) a (11), onde t_{CD}^{51-51} , t_{CD}^{50-50} e t_{CD}^{51-50} são os tempos de coordenação entre relés nas funções 51, 50 e nas funções 51 e 50 respectivamente.

Os tempos de coordenação dos relés nas funções 50/51 levam em consideração os tempos de operação da chave interruptora, a tolerância do fabricante da chave e um tempo de segurança do projeto na qual está incluída a latência do relé. Esta latência é a soma de dois tempos, o tempo de resposta entre a detecção da falta até o momento em que se inicia a temporização e o tempo após a temporização e o envio do sinal de *trip* (abertura) para a chave interruptora.

Figura 9 – Alocação entre relés/religadores na rede

Fonte: Elaboração do autor

$$t_{R1}^{50} \geq t_{R2}^{50} + t_{CD}^{50-50} \quad (9)$$

$$t_{R1}^{51} \geq t_{R2}^{51} + t_{CD}^{51-51} \quad (10)$$

$$t_{R1}^{51} \geq t_{R2}^{50} + t_{CD}^{51-50} \quad (11)$$

Na **Tabela 5** tem-se os tempos de coordenação dos pares de dispositivos relacionados neste trabalho com seus respectivos valores mínimos e máximos admissíveis.

Tabela 5 – Tempo de coordenação dos pares de dispositivos de proteção

Dispositivos		Coordenação	Tempos de coordenação (s)	
montante	jusante		mín	máx
Relé/Relig.	Relé/Relig.	50-50	0,2	0,4
Relé/Relig.	Relé/Relig.	51-51	0,2	0,4
Relé/Relig.	Relé/Relig.	51-50	-	0,02
Relé/Relig.	Fusível	51-TC	-	0,3

Fonte: (Filho; Mamede, 2020) (Reiz, 2023)

Por meio das restrições de corrente e dos critérios de coordenação até aqui apresentados tem-se condições mínimas necessárias para, em conjunto com outras técnicas, propor um modelo matemático para coordenação otimizada que será apresentada na próxima seção.

3 METODOLOGIA PROPOSTA PARA COORDENAÇÃO OTIMIZADA

No problema da coordenação otimizada de dispositivos de proteção para o SDEE, as determinações dos menores tempos de operação são fundamentais, e para isto é necessário propor modelos matemáticos que possam levar a esta solução. As características dos dispositivos, como descrito na Seção 2.1, na maioria dos casos são regidas por TCCs não lineares, como na função 51 dos relés e as curvas MM e TC dos elos fusíveis. Estas não linearidades não são facilmente resolvidas, podendo ser um obstáculo na proposta de soluções otimizadas. Como mencionado na seção 1.4 diversas são as propostas para buscar a otimização, todas elas têm algo em comum que é a resolução de uma FO podendo ser singular ou múltipla, utilizando um modelo matemático mínimo ou em alguns casos evitando a sua utilização. Para este propósito, geralmente buscam-se soluções mais rápidas e que apresentam bons resultados, mas que muitas vezes cobram um alto custo computacional, que para algumas aplicações se torna impraticável.

Nesta seção propõe-se a otimização da operação de OCRs através da técnica de PNL, mais especificamente o método iterativo GRG, que mantém as principais propriedades do problema, considerando a não linearidade do tempo de operação dos OCRs. O método GRG busca a solução ótima que satisfaça as condições de KKT, com uma alta possibilidade de encontrar tempos de operação ótimos quando devidamente ajustado para regiões de factibilidade convexa. O algoritmo é totalmente dependente deste modelo matemático e devido a sua natureza determinística, sempre apresenta uma única solução ótima, ao contrário das propostas estocásticas convencionais. Devido a sua natureza determinística, ele possui uma capacidade de convergência elevada reduzindo consideravelmente o tempo computacional, que o torna uma opção interessante para aplicações em proteção adaptativa, permitindo que a configuração do relé seja ajustada conforme as condições operacionais da rede, garantindo assim configurações adequadas do relé em tempo real. Isso significa que o relé não se baseia apenas em uma configuração predeterminada, considerada a mais crítica do sistema, o que às vezes pode não ser a solução mais apropriada, mas oferecendo sempre a melhor condição naquele intervalo de tempo, caso haja uma reconfiguração da rede de distribuição com entradas e saídas de dispositivos de proteção ocasionadas pela entrada ou saída de linhas de distribuição no SDEE como por exemplo a conexão de uma nova linha por realocação de carga, manutenção de

uma linha que exige sua desconexão ou faltas que isolam uma determinada parte da linha.

Um AG também é implementado, cuja escolha por ele se faz, dentre várias características importantes, por estar entre os algoritmos mais utilizados de acordo com a literatura pesquisada e mencionada na seção 1.4, servindo, assim, como meio comparativo para os dados gerados pelo GRG e para outros pesquisadores que também possuem o AG como referência em suas pesquisas.

3.1 MODELO MATEMÁTICO PARA OTIMIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO

É necessário desenvolver um modelo matemático que garanta a otimização dos tempos de operação para todos os OCRs de forma factível. Os autores Marcolino, Leite e Mantovani (2015) e Reiz e Leite (2022) propõem um modelo de otimização dos tempos de operação dos OCRs e elos fusíveis, dado pela FO (12) e sujeito às restrições (13) a (18), sendo n o número total de OCRs e nf o número total de elos fusíveis da rede. Para este trabalho definiu-se trabalhar com o padrão normativo da IEC e suas curvas compatíveis, portanto o coeficiente C_{3_i} é igual a zero conforme

Tabela 4.

$$\min FO = \sum_{i=1}^n t_{R_i}^{51} + \sum_{j=1}^{nf} t_{F_j} = \sum_{i=1}^n TMS_i \cdot \left(\frac{C_{1_i}}{\left(\frac{I_{CC_i}}{I_{Pkp_i}^{51}} \right)^{C_{2_i}} - 1} + C_{3_i} \right) + \sum_{j=1}^{nf} t_{F_j} \quad (12)$$

s.a.

$$t_{R_i}^{51} - t_{R_{i+1}}^{51} - t_{CD}^{51-51} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (13)$$

$$TMS_{\min} \leq TMS_i \leq TMS_{\max}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

$$I_{Pkp_{\min}}^{51} \leq I_{Pkp_i}^{51} \leq I_{Pkp_{\max}}^{51}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

$$t_{R_i}^{51} - t_{F_j}^{TC} - t_{CD}^{51-TC} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

$$0,75 \cdot t_{F_j}^{MM} - t_{F_{j+1}}^{TC} \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, nf-1 \quad (17)$$

$$I_{F_{\min}}^{Elo} \leq I_{F_j}^{Elo}, \quad j = 1, 2, \dots, nf \quad (18)$$

Na expressão (12) deste modelo, a FO possui dois termos, sendo o primeiro correspondente ao tempo de operação dos relés na função 51 apresentado em (1) e o segundo correspondente ao tempo de operação dos elos fusíveis. A restrição (13) se baseia no critério de coordenação entre relés na função 51 apresentado em (10),

a restrição (14) é o deslocamento temporal da curva apresentada em (2) e a restrição (15) corresponde à restrição de corrente de *pick-up* apresentada em (3). A restrição (16) se baseia no critério de coordenação entre relés na função 51 e elos fusíveis apresentado em (8), a restrição (17) corresponde ao critério de coordenação entre elos fusíveis apresentado em (6) e a restrição (18) está relacionada a restrição de corrente nominal do elo-fusível apresentada em (4).

Este modelo genérico pode ser facilmente aplicado em MHs sem a necessidade de grandes adaptações. Portanto este modelo será o ponto de partida para o desenvolvimento de um modelo matemático dedicado para otimização de OCRs com GRG.

3.2 OTIMIZAÇÃO COM GRG

Originalmente, o GRG foi projetado para lidar com problemas que incluem FO e ou restrições não lineares, tornando-o mais contemporâneo em comparação ao seu antecessor, o Gradiente Reduzido (GR). Ambas são técnicas iterativas que buscam encontrar o mínimo (ou máximo) de uma FO (Rao, 2019). Assim, é necessário propor um modelo matemático para otimização de OCRs seguindo modelo representativo por PNL, com restrições menores ou iguais a zero e restrições de igualdade, para ser posteriormente testado sob as condições de KKT e, caso suas condições de otimalidade sejam confirmadas, definir um modelo matemático simplificado para uso no método GRG.

Neste trabalho, o algoritmo GRG deriva de um modelo de coordenação relaxado, onde, da FO dado por (12), C_{1i} , C_{2i} e I_{CCi} são inicialmente considerados parâmetros e TMS_i e $I_{Pkp_i}^{51}$ são consideradas variáveis do sistema representadas pelo vetor $\mathbb{X}$ (19).

$$\mathbb{X} = \left[TMS_i \ I_{Pkp_i}^{51} \right]^T = [\mathbf{y} \ \mathbf{z}]^T \quad (19)$$

Manipulando matematicamente as restrições de (13) a (15) para os $n - 1$ OCRs, fazendo-as menores ou iguais a zero, obteve-se as restrições apresentadas de (21) a (25) que são chamadas de restrições de desigualdade $h(\mathbb{X})$. Também é necessário definir as condições iniciais, partindo do n -ésimo OCR até o primeiro OCR

da rede. Esta condição é garantida conforme as restrições (26) e (27), que são chamadas de restrições de igualdade $g(\mathbb{X})$. Em (27) a variável TMS_i corresponde ao valor mínimo de sua respectiva restrição, e t_{min} o menor valor de tempo que torna $I_{Pkp_i}^{51}$ factível para a restrição (15). Finalmente em (20) define-se a FO e seu conjunto de restrições de (21) a (27), conforme o modelo representativo por PNL.

$$\min FO = \sum_{i=1}^n t_{R_i}^{51} = \sum_{i=1}^n TMS_i \cdot \frac{C_{1i}}{\left(\frac{I_{CCi}}{I_{Pkp_i}^{51}}\right)^{C_{2i}} - 1} \quad (20)$$

s.a.

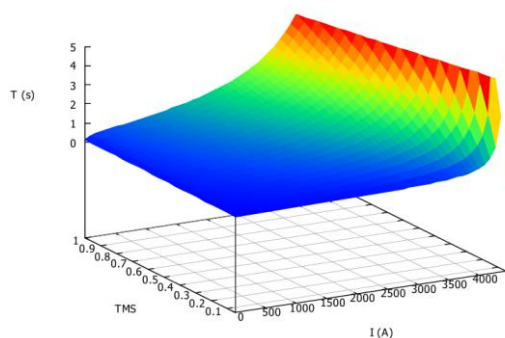
$$h(\mathbb{X}) = \begin{cases} t_{R_{i+1}}^{51} - t_{R_i}^{51} + t_{CD}^{51} \leq 0, & i = 1, 2, \dots, n-1 & (21) \\ TMS_{min} - TMS_i \leq 0, & i = 1, 2, \dots, n-1 & (22) \\ TMS_i - TMS_{max} \leq 0, & i = 1, 2, \dots, n-1 & (23) \\ I_{Pkp_{min}}^{51} - I_{Pkp_i}^{51} \leq 0, & i = 1, 2, \dots, n-1 & (24) \\ I_{Pkp_i}^{51} - I_{Pkp_{max}}^{51} \leq 0, & i = 1, 2, \dots, n-1 & (25) \end{cases}$$

$$g(\mathbb{X}) = \begin{cases} TMS_i - TMS_{min} = 0, & i = n & (26) \\ I_{Pkp_i}^{51} - \frac{I_{CCi}}{\left(\frac{C_{1i} \cdot TMS_i}{t_{min}} + 1\right)^{\frac{1}{C_{2i}}}} = 0, & i = n & (27) \end{cases}$$

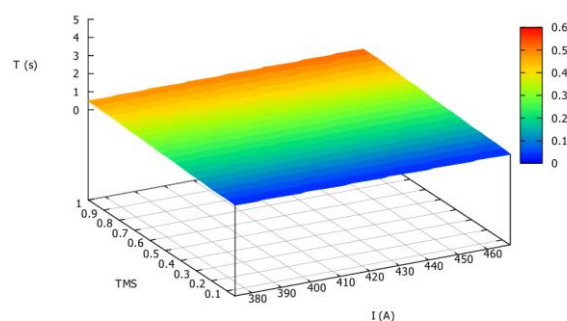
3.2.1 Condições de KKT

As condições de KKT são critérios necessários para avaliar se um determinado ponto é uma solução ótima em problemas de PNL. Estas condições são fundamentais na teoria da otimização e são frequentemente utilizadas (Rao, 2019). As condições necessárias de KKT são a estacionariedade, a factibilidade primal e dual e a folga complementar. Para que as condições necessárias sejam suficientes para atestar que um ponto é uma solução ótima global, a FO deve operar em uma região que garanta a sua convexidade.

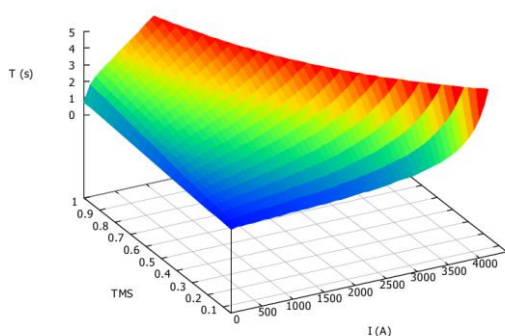
Para verificar se o modelo matemático proposto de (20) a (27) é capaz de apresentar uma solução ótima, são aplicadas as condições necessárias de KKT. Para esta condição, avaliou-se a região de operação da FO para as curvas STI, SI, EI e VI. Pode-se verificar na **Figura 10** o comportamento das superfícies (a), (c), (e) e (g) quando limitadas pela máxima corrente de curto-circuito.

Figura 10 – Superfícies das curvas IEC analisadas na função objetivo

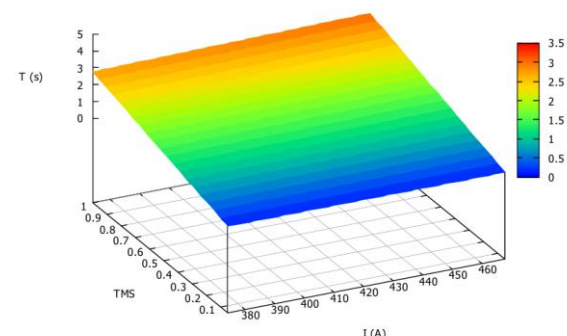
(a) STI



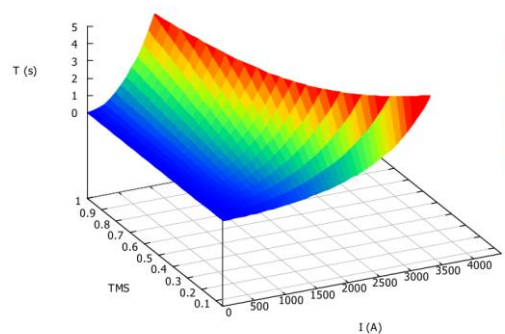
(b) STI



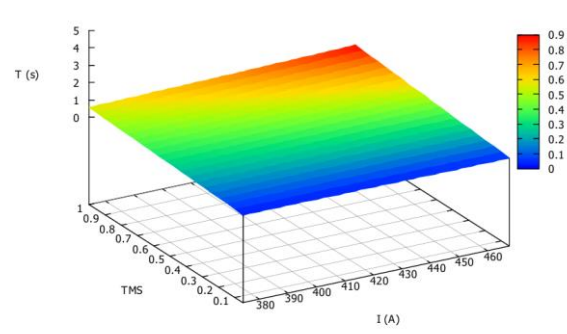
(c) SI



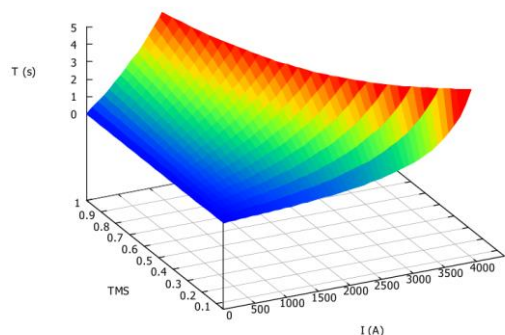
(d) SI



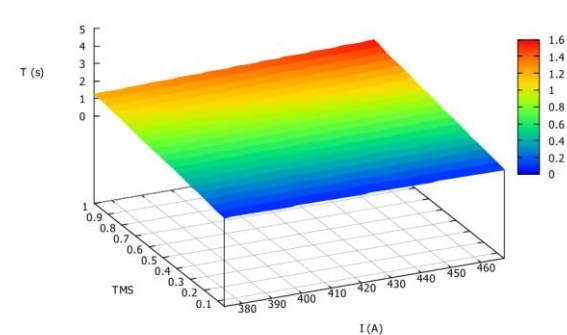
(e) EI



(f) EI



(g) VI



(h) VI

Fonte: Elaboração do autor

Ao se restringir a corrente dentro de um intervalo muito pequeno, segundo as expressões (14) e (15), obtém-se uma região com as características representadas

pelas superfícies (b), (d), (f) e (h), que representa a região de operação da FO e suas respectivas restrições.

Para a condição de estacionariedade é necessário construir uma função Lagrangeana ($\mathcal{L}$), conforme representação genérica em (28), onde N_{ig} é o número de restrições de igualdade, N_{ds} é o número de restrições de desigualdade, λ é o multiplicador de Lagrange de igualdade e π é o multiplicador de Lagrange de desigualdade.

$$\mathcal{L} = FO + \sum_{j=1}^{N_{ig}} \lambda_j \cdot g_j(\mathbb{X}) + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{l=1}^{N_{ds}} \pi_{li} \cdot h_l(\mathbb{X}) \quad (28)$$

Após a devida manipulação de (28), particularizando-a para o problema proposto, tem-se (29), que é a representação completa da função Lagrangeana.

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = FO &+ \sum_{j=1}^2 \lambda_j \cdot g_j(x) + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{l=1}^5 \pi_{li} \cdot h_l(x) = \\ &FO + \lambda_1 \cdot g_1(\mathbb{X}) + \lambda_2 \cdot g_2(\mathbb{X}) + \sum_{i=1}^{n-1} [\pi_{1i} \cdot h_1(\mathbb{X}) + \\ &\pi_{2i} \cdot h_2(\mathbb{X}) + \pi_{3i} \cdot h_3(\mathbb{X}) + \pi_{4i} \cdot h_4(\mathbb{X}) + \pi_{5i} \cdot h_5(\mathbb{X})] = \\ &FO + \lambda_1 \cdot (TMS_n - TMS_{min}) + \lambda_2 \cdot \left(I_{Pkp_n}^{51} - \frac{I_{CCn}}{\left(\frac{C_{1n} \cdot TMS_n}{t_{min}} + 1 \right)^{\frac{1}{C_{2n}}}} \right) + \\ &\sum_{i=1}^{n-1} [\pi_{1i} \cdot (t_{R_{i+1}}^{51} - t_{R_i}^{51} + t_{CD}^{51}) + \pi_{2i} \cdot (TMS_{min} - TMS_i) + \\ &\pi_{3i} \cdot (TMS_i - TMS_{max}) + \pi_{4i} \cdot (I_{Pkp_{min}}^{51} - I_{Pkp_i}^{51}) + \pi_{5i} \cdot (I_{Pkp_i}^{51} - I_{Pkp_{max}}^{51})] \end{aligned} \quad (29)$$

Para que as condições necessárias de KKT sejam satisfeitas, deve-se aplicar a condição de estacionariedade, em que o gradiente da função Lagrangeana deve ser zero no ponto de ótimo, e em seguida aplicar a factibilidade primal e dual para as restrições de igualdade e desigualdade.

Realiza-se a factibilidade primal para $i = n$ e $\nabla_{\lambda} \mathcal{L} = 0$ como em (30) e (31) obtendo-se as expressões (32) e (33).

$$\nabla_{\lambda_1} \mathcal{L} = TMS_n - TMS_{min} = 0 \quad (30)$$

$$\nabla_{\lambda_2} \mathcal{L} = I_{Pkp_n}^{51} - \frac{I_{CCn}}{\left(\frac{C_{1n} \cdot TMS_n}{t_{min}} + 1\right)^{\frac{1}{C_{2n}}}} = 0 \quad (31)$$

$$TMS_n = TMS_{min} \quad (32)$$

$$I_{Pkp_n}^{51} = \frac{I_{CCn}}{\left(\frac{C_{1n} \cdot TMS_{min}}{t_{min}} + 1\right)^{\frac{1}{C_{2n}}}} \quad (33)$$

Aplica-se a factibilidade dual para $i = n$ e $\nabla_{\mathbf{x}} \mathcal{L} = 0$ obtendo-se as expressões (34) e (35).

$$\nabla_{TMS_n} \mathcal{L} = \frac{C_1}{\left(\frac{I_{CCn}}{I_{Pkp_n}^{51}}\right)^{C_2} - 1} + \lambda_1 + \pi_{1n-1} \cdot \frac{C_1}{\left(\frac{I_{CCn}}{I_{Pkp_n}^{51}}\right)^{C_2} - 1} = 0 \quad (34)$$

$$\begin{aligned} \nabla_{I_{Pkp_n}^{51}} \mathcal{L} &= \frac{C_2 \cdot I_{Pkp_n}^{51 \cdot C_2 - 1} \cdot TMS_n \cdot C_1 \cdot I_{CCn}^{C_2}}{\left(I_{CCn}^{C_2} - I_{Pkp_n}^{51 \cdot C_2}\right)^2} + \lambda_2 + \\ &\pi_{1n-1} \cdot \frac{C_2 \cdot I_{Pkp_n}^{51 \cdot C_2 - 1} \cdot TMS_n \cdot C_1 \cdot I_{CCn}^{C_2}}{\left(I_{CCn}^{C_2} - I_{Pkp_n}^{51 \cdot C_2}\right)^2} = 0 \end{aligned} \quad (35)$$

Assume-se que λ_2 é uma combinação linear de λ_1 , conforme expressão (36) e sujeito a uma restrição (37).

$$\lambda_2 = \beta + \alpha \cdot \lambda_1 \quad (36)$$

s.a.

$$\lambda_1, \lambda_2 \geq 0 \quad (37)$$

Isola-se o λ_1 de $\nabla_{I_{Pkp_n}^{51}} \mathcal{L} = 0$ em (35) e substitui-se em (36) obtendo-se a expressão (38).

$$\lambda_1 = (\pi_{1n-1} - 1) \cdot \frac{C_2 \cdot I_{Pkp_n}^{51 \cdot C_2 - 1} \cdot TMS_n \cdot C_1 \cdot I_{CCn}^{C_2}}{\alpha \cdot \left(I_{CCn}^{C_2} - I_{Pkp_n}^{51 \cdot C_2}\right)^2} - \frac{\beta}{\alpha} \quad (38)$$

Após substituição de λ_1 em $\nabla_{TMS_n} \mathcal{L} = 0$ (34) obtém-se (39).

$$\pi_{1n-1} = \frac{\beta \cdot \left(I_{CCn}^{C_2} - I_{Pkp_n}^{51} \right)^2}{C_1 \cdot \left[I_{Pkp_n}^{51} \cdot \alpha \cdot \left(I_{CCn}^{C_2} - I_{Pkp_n}^{51} \right) - C_2 \cdot I_{Pkp_n}^{51} \cdot TMS_n \cdot I_{CCn}^{C_2} \right]} - 1 \quad (39)$$

Portanto para que $\pi_{1n-1} \geq 0$ seja satisfeita, os valores de α e β devem satisfazer as condições (40) e (41) respectivamente.

$$\alpha \geq \frac{C_2 \cdot TMS_n \cdot I_{CCn}^{C_2}}{I_{Pkp_n}^{51} \cdot \left(I_{CCn}^{C_2} - I_{Pkp_n}^{51} \right)} \quad (40)$$

$$\beta \geq \frac{C_1 \cdot \left[I_{Pkp_n}^{51} \cdot \alpha \cdot \left(I_{CCn}^{C_2} - I_{Pkp_n}^{51} \right) - C_2 \cdot I_{Pkp_n}^{51} \cdot TMS_n \cdot I_{CCn}^{C_2} \right]}{\left(I_{CCn}^{C_2} - I_{Pkp_n}^{51} \right)^2} \quad (41)$$

Aplica-se a factibilidade dual para $i = n - 1$ e $\nabla_{\mathbb{X}} \mathcal{L} = 0$ obtendo-se as expressões (42) e (43).

$$\nabla_{TMS_{n-1}} \mathcal{L} = \frac{C_1}{\left(\frac{I_{CCn-1}}{I_{Pkp_{n-1}}^{51}} \right)^{C_2} - 1} + \pi_{1n-2} \cdot \frac{C_1}{\left(\frac{I_{CCn-1}}{I_{Pkp_{n-1}}^{51}} \right)^{C_2} - 1} - \pi_{1n-1} \cdot \frac{C_1}{\left(\frac{I_{CCn-1}}{I_{Pkp_{n-1}}^{51}} \right)^{C_2} - 1} + \pi_{3n-1} - \pi_{2n-1} = 0 \quad (42)$$

$$\nabla_{I_{Pkp_{n-1}}^{51}} \mathcal{L} = (1 - \pi_{1n-1} + \pi_{1n-2}) \cdot \frac{C_2 \cdot I_{Pkp_{n-1}}^{51} \cdot TMS_{n-1} \cdot C_1 \cdot I_{CCn-1}^{C_2}}{\left(I_{CCn-1}^{C_2} - I_{Pkp_{n-1}}^{51} \right)^2} + \pi_{5n-1} - \pi_{4n-1} = 0 \quad (43)$$

Aplica-se a folga complementar, tornando inativas as restrições de desigualdade de (22) a (25) e fazendo-as negativas. Dessa forma, os seus respectivos multiplicadores de Lagrange têm valores nulos e, conseqüentemente, factíveis, como apresentado de (44) a (47).

$$TMS_{min} - TMS_{n-1} < 0 \rightarrow \pi_{2n-1} = 0 \quad (44)$$

$$TMS_{n-1} - TMS_{max} < 0 \rightarrow \pi_{3n-1} = 0 \quad (45)$$

$$I_{Pkp_{min}}^{51} - I_{Pkp_{n-1}}^{51} < 0 \rightarrow \pi_{4_{n-1}} = 0 \quad (46)$$

$$I_{Pkp_{n-1}}^{51} - I_{Pkp_{max}}^{51} < 0 \rightarrow \pi_{5_{n-1}} = 0 \quad (47)$$

Substitui-se as expressões (44) a (47) nas expressões (42) e (43) e manipula-se matematicamente as expressões, obtendo-se as novas expressões (48) e (49).

$$\nabla_{TMS_{n-1}} \mathcal{L} = \frac{C_1}{\left(\frac{I_{CC_{n-1}}}{I_{Pkp_{n-1}}^{51}} \right)^{C_2} - 1} \cdot (1 + \pi_{1_{n-2}} - \pi_{1_{n-1}}) = 0 \quad (48)$$

$$\begin{aligned} \nabla_{I_{Pkp_{n-1}}^{51}} \mathcal{L} &= (1 - \pi_{1_{n-1}} + \pi_{1_{n-2}}) \cdot \\ &\frac{C_2 \cdot I_{Pkp_{n-1}}^{51}{}^{C_2-1} \cdot TMS_{n-1} \cdot C_1 \cdot I_{CC_{n-1}}^{C_2}}{\left(I_{CC_{n-1}}^{C_2} - I_{Pkp_{n-1}}^{51}{}^{C_2} \right)^2} = 0 \end{aligned} \quad (49)$$

Manipula-se matematicamente a expressão (48) e considera-se que o primeiro termo do produto corresponde a relação entre o tempo de operação e o TMS em $n - 1$, e este valor é sempre positivo e diferente de zero, obtendo-se a expressão (50). Da mesma forma, manipula-se matematicamente a expressão (49) e considera-se que o segundo termo do produto sempre é positivo e diferente de zero, obtendo-se a expressão (50).

$$\pi_{1_{n-2}} = \pi_{1_{n-1}} - 1 \quad (50)$$

Como tem-se $\pi_{1_{n-1}} \geq 0$ quando as condições (40) e (41) são satisfeitas, manipula-se a expressão (50) obtendo-se $\pi_{1_{n-2}} \geq -1$, que é infactível, pois é necessário que $\pi_{1_{n-2}}$ seja maior ou igual a zero, então verifica-se o valor de $\pi_{1_{n-1}}$ para esta condição de factibilidade. Fazendo-se $\pi_{1_{n-2}} \geq 0$ obtém-se $\pi_{1_{n-1}} \geq 1$ que é factível e portanto satisfaz as duas condições.

Escolhe-se então ativar a restrição de desigualdade (21) em zero, que é a restrição responsável pela coordenação, obtendo-se então (51), que após manipulação matemática resulta em (52).

$$t_{R_n}^{51} - t_{R_{n-1}}^{51} + t_{CD}^{51} = t_{R_n}^{51} - TMS_{n-1} \cdot \frac{C_1}{\left(\frac{I_{CCn}}{I_{Pkp_{n-1}}^{51}} \right)^{C_2} - 1} + t_{CD}^{51} = 0 \quad (51)$$

$$w(\mathbb{X}) = I_{Pkp_{n-1}}^{51} \cdot \frac{C_2}{\frac{C_1 \cdot TMS_{n-1}}{t_{R_n}^{51} + t_{CD}^{51}} + 1} - \frac{I_{CCn}^{C_2}}{1} = 0 \quad (52)$$

Para a restrição ativa da expressão (52), as variáveis TMS_{n-1} e $I_{Pkp_{n-1}}^{51}$ podem ser determinadas utilizando um algoritmo determinístico, por exemplo o método GRG.

3.2.2 Modelo matemático para otimização com GRG

Como detalhado na seção anterior, as variáveis TMS_{n-1} e $I_{Pkp_{n-1}}^{51}$ podem ser determinadas pelo método GRG, portanto o modelo matemático para otimização para os $n - 1$ OCRs da rede pode ser obtido a partir das restrições ativas, que neste problema em questão, corresponde a (52), portanto o modelo matemático para otimização definitivo pode ser verificado de (53) a (58).

$$\min f(\mathbb{X}) = TMS_{n-1} \cdot \frac{C_{1n-1}}{\left(\frac{I_{CCn-1}}{I_{Pkp_{n-1}}^{51}} \right)^{C_{2n-1}} - 1} \quad (53)$$

s.a.

$$w(\mathbb{X}) = \left(I_{Pkp_{n-1}}^{51} \right)^{C_{2n-1}} - \frac{(I_{CCn})^{C_{2n-1}}}{\frac{C_{1n-1} \cdot TMS_{n-1}}{t_{R_n}^{51} + t_{CD}^{51}} + 1} = 0 \quad (54)$$

$$TMS_{min} - TMS_{n-1} < 0 \quad (55)$$

$$TMS_{n-1} - TMS_{max} < 0 \quad (56)$$

$$I_{Pkp_{min}}^{51} - I_{Pkp_{n-1}}^{51} < 0 \quad (57)$$

$$I_{Pkp_{n-1}}^{51} - I_{Pkp_{max}}^{51} < 0 \quad (58)$$

Em (53) e (54), no vetor de variáveis $\mathbb{X}$, a variável TMS_{n-1} é a variável independente e $I_{Pkp_{n-1}}^{51}$ a variável dependente. Derivando parcialmente (53) em relação a TMS_{n-1} obtém-se (60) e em relação a $I_{Pkp_{n-1}}^{51}$ obtém-se (61) e derivando parcialmente (54) em relação a variável TMS_{n-1} obtém-se (63) e em relação a $I_{Pkp_{n-1}}^{51}$ obtém-se (62), que são utilizados na determinação do GRG (59) (Rao, 2019).

$$G_R = \frac{df(\mathbb{X})}{dy} = \nabla_y f - \nabla_z f \cdot D^{-1} \cdot C \quad (59)$$

$$\nabla_y f = \frac{C_{1n-1}}{\left(\frac{I_{CCn-1}}{I_{Pkp n-1}^{51}} \right)^{C_{2n-1}} - 1} \quad (60)$$

$$\nabla_z f = \frac{C_{2n-1} \cdot I_{Pkp n-1}^{51} \cdot TMS_{n-1} \cdot C_{1n-1} \cdot I_{Pkp n-1}^{51}}{\left(I_{CCn-1}^{C_{2n-1}} - I_{Pkp n-1}^{51} \right)^2} \quad (61)$$

$$D = \frac{\partial w}{\partial z} = C_{2n-1} \cdot I_{Pkp n-1}^{51} \quad (62)$$

$$C = \frac{\partial w}{\partial y} = \frac{I_{CCn}^{C_{2n-1}}}{\left(\frac{C_{1n-1} \cdot TMS_{n-1}}{t_{Rn}^{51} + t_{CD}^{51}} + 1 \right)^2} \cdot \frac{C_{1n-1}}{t_{Rn}^{51} + t_{CD}^{51}} \quad (63)$$

Da expressão (59), para o caso de minimização, determina-se a direção de busca para a variável $\mathbf{y}$, representado por (64) e para a direção de busca da variável $\mathbf{z}$, utiliza-se a expressão (65) (Rao, 2019).

$$S = -G_R \quad (64)$$

$$T = -D^{-1} \cdot C \cdot S \quad (65)$$

Deve-se determinar os passos para as direções de busca (64) e (65) respectivamente, permitindo que as variáveis do problema atinjam seu ponto mínimo não ultrapassando a região de factibilidade. Nas expressões (66) e (67) têm-se as condições necessárias para determinação dos valores dos passos (Rao, 2019).

$$\lambda_S = \begin{cases} \frac{TMS_{max} - TMS_{n-1}}{S}, & S > 0 \\ \frac{TMS_{min} - TMS_{n-1}}{S}, & S < 0 \end{cases} \quad (66)$$

$$\lambda_T = \begin{cases} \frac{I_{Pkp max}^{51} - I_{Pkp n-1}^{51}}{T}, & T > 0 \\ \frac{I_{Pkp min}^{51} - I_{Pkp n-1}^{51}}{T}, & T < 0 \end{cases} \quad (67)$$

O produto do passo com a direção de busca, são adicionadas nas variáveis do sistema para a determinação de novos valores de $\mathbf{y}$ (68) e $\mathbf{z}$ (69), criando um novo vetor de variáveis do sistema $\mathbb{X}^{New}$ (70) (Rao, 2019). Em (68) e (69) o F_{stp} é o fator de

passo, responsável por aumentar ou diminuir a precisão no processo de busca do algoritmo, ou seja, é um ajuste fino dos valores de passo, sendo ajustado automaticamente conforme expressão (71).

$$TMS_{n-1}^{New} = TMS_{n-1} + F_{Stp} \cdot \lambda_S \cdot S \quad (68)$$

$$I_{Pkp_{n-1}}^{51\ New} = I_{Pkp_{n-1}}^{51} + F_{Stp} \cdot \lambda_T \cdot T \quad (69)$$

$$\mathbb{X}^{New} = \left[TMS_{n-1}^{New} \ I_{Pkp_{n-1}}^{51\ New} \right]^T = [\mathbf{y}^{New} \ \mathbf{z}^{New}]^T \quad (70)$$

$$F_{Stp} = \begin{cases} 1 - \frac{\lambda_S}{\lambda_T}, & \lambda_S < \lambda_T \\ 1 - \frac{\lambda_T}{\lambda_S}, & \lambda_S > \lambda_T \end{cases} \quad (71)$$

3.2.3 Algoritmo GRG

Nesta seção descreve-se o funcionamento do algoritmo em detalhes, apresentando as suas características que possibilitam uma adequada busca pela solução ótima do problema.

Para o n -ésimo OCR o valor de t_n deve ser estipulado e fazendo um $TMS_n = TMS_{min}$ e TCC_n a curva mais rápida EI, troca-se a curva se necessário, até que as restrições (26), (27), (57) e (58) sejam respeitadas, obtendo-se então a $I_{Pkp_n}^{51}$. O algoritmo GRG se inicia a partir do n -ésimo-1 OCR conforme algoritmo da **Figura 11**, devendo-se aplica-lo até o primeiro OCR na saída da subestação. Deve-se definir na entrada do algoritmo os parâmetros de correntes de falta I_{CC} e carga I_{Load}^{Max} além da TCC_0 , TMS_{n-1} , $I_{Pkp_{n-1}}^{51}$, t_n e o número total de iterações N_{Itr} . A TCC_0 será sempre a curva EI, o TMS_{n-1} determina-se pelo ponto médio de sua respectiva restrição para o n -ésimo-1 OCR e para os demais OCRs utiliza-se o valor anterior e finalmente para a $I_{Pkp_{n-1}}^{51}$ determina-se pelo ponto médio de sua respectiva restrição. No caso de existência de elo-fusível a jusante do n -ésimo OCR, t_n assume o tempo de operação do elo-fusível e ao n -ésimo OCR aplica-se o algoritmo GRG.

O processo iterativo inicia-se na linha 1, determinando-se (59) a (67) na linha 4, selecionando-se o passo ótimo λ_{opt} na linha 5, que é o menor valor entre os passos (66) e (67).

Figura 11 – Pseudocódigo do algoritmo GRG**Algoritmo:** GRG para coordenação otimizada

Input: I_{Load}^{Max} , I_{CC} , TCC_0 , t_n , N_{Itr} , TMS_{n-1} , $I_{Pkp_{n-1}}^{51} = (I_{Pkp_{max}}^{51} + I_{Pkp_{min}}^{51})/2$

- 1: **repeat**
- 2: $C_{Itr} = C_{Itr} + 1$
- 3: **if** ($C_{Itr} < N_{Itr}$) **then**
- 4: *calcule:* $\nabla_y f$, $\nabla_z f$, D^{-1} , C , G_R , S , T , λ_S , λ_T , $F_{stp} \rightarrow$ **até 1ª convergência**
- 5: $\lambda_{opt} = \min\{\lambda_S; \lambda_T\}$
- 6: **if** ($\lambda_{opt} \cdot |G_R| < \varepsilon \rightarrow 0$) **then**
- 7: sai do algoritmo
- 8: **else**
- 9: *calcule:* $\mathbb{X}^{New}$
- 10: **if** (TMS_{n-1}^{New} é infactível) **then**
- 11: faça $TMS_{n-1}^{New} > TMS_{min}$
- 12: **end if**
- 13: **if** ($I_{Pkp_{n-1}}^{51}$ é infactível) **then**
- 14: faça $I_{Pkp_{n-1}}^{51 New} > I_{Pkp_{min}}^{51}$
- 15: **end if**
- 16: *calcule:* $w(\mathbb{X}^{New})$
- 17: **if** ($w(\mathbb{X}^{New})$ é infactível) **then**
- 18: fixa TMS_{n-1}^{New} em $w = 0$ e calcula $I_{Pkp_{prov}}^{51}$
- 19: **if** ($I_{Pkp_{prov}}^{51}$ é infactível) **then**
- 20: fixa $I_{Pkp_{n-1}}^{51 New}$ em $w = 0$ e calcula TMS_{prov}
- 21: **if** (TMS_{prov} é infactível) **then**
- 22: **if** (todas as TCCs foram testadas) **then**
- 23: sai do algoritmo
- 24: **end if**
- 25: muda a TCC,
- 26: $TMS_{n-1}^{New} = (TMS_{max} + TMS_{min})/2$
- 27: $I_{Pkp_{n-1}}^{51 New} = (I_{Pkp_{max}}^{51} + I_{Pkp_{min}}^{51})/2$
- 28: **else** $TMS_{n-1}^{New} = TMS_{prov}$
- 29: **end if**
- 30: **else** $I_{Pkp_{n-1}}^{51 New} = I_{Pkp_{prov}}^{51}$
- 31: **end if**
- 32: **end if**
- 33: **end if**
- 34: **end if**
- 35: **until** (*true*)

Output: TMS_{n-1}^{New} , $I_{Pkp_{n-1}}^{51 New}$ e TCC

Fonte: Elaboração do autor

Ainda na linha 4 o F_{stp} (71) é ajustado automaticamente durante as iterações até encontrar o valor ótimo após a primeira convergência, devendo permanecer inalterado nas próximas vezes que o algoritmo é solicitado.

Na linha 9 determina-se o vetor $\mathbb{X}^{New}$ (70) e a sua respectiva factibilidade é avaliada nas linhas 11 e 14, caso algum deles sejam infactíveis, força-se um valor levemente acima da sua respectiva restrição mínima, tornando-os factíveis.

Determina-se na linha 16 o valor de $w(\mathbb{X}^{New})$ (54) e verifica-se a sua restrição na linha 17, caso a factibilidade não seja satisfeita, fixa-se o valor de TMS_{n-1}^{New} encontrado e determina-se uma I_{Pkp}^{51} provisória na linha 18 para a restrição (54), onde sua factibilidade é avaliada na linha 19, caso seja infactível fixa-se então o valor de $I_{Pkp_{n-1}}^{51\ New}$ encontrado e determina-se uma TMS provisória na linha 20 para a restrição (54), onde sua factibilidade é testada na linha 21. Caso I_{Pkp}^{51} provisória ou TMS provisória sejam factíveis, os valores são atribuídos a $I_{Pkp_{n-1}}^{51\ New}$ na linha 30 e TMS_{n-1}^{New} na linha 28, respectivamente.

Caso nenhum dos valores provisórios sejam factíveis avalia-se na linha 22 se todas as possibilidades de TCCs de 1 a 4 da **Tabela 4** foram testadas durante o processo iterativo, o algoritmo é encerrado caso verdadeiro, entregando como saída o resultado encontrado até aquele instante, e caso contrário troca a TCC na linha 25 e faz TMS_{n-1}^{New} e $I_{Pkp_{n-1}}^{51\ New}$ nas linhas 26 e 27 valores médio de suas respectivas restrições.

Caso alguma factibilidade seja encontrada nas linhas 19 ou 21 ou não tenha se esgotado as tentativas de TCCs, o algoritmo retorna para a linha 2 incrementado o contador de iterações que é avaliado na linha 3, e caso não tenha atingido seu limite o processo iterativo continua.

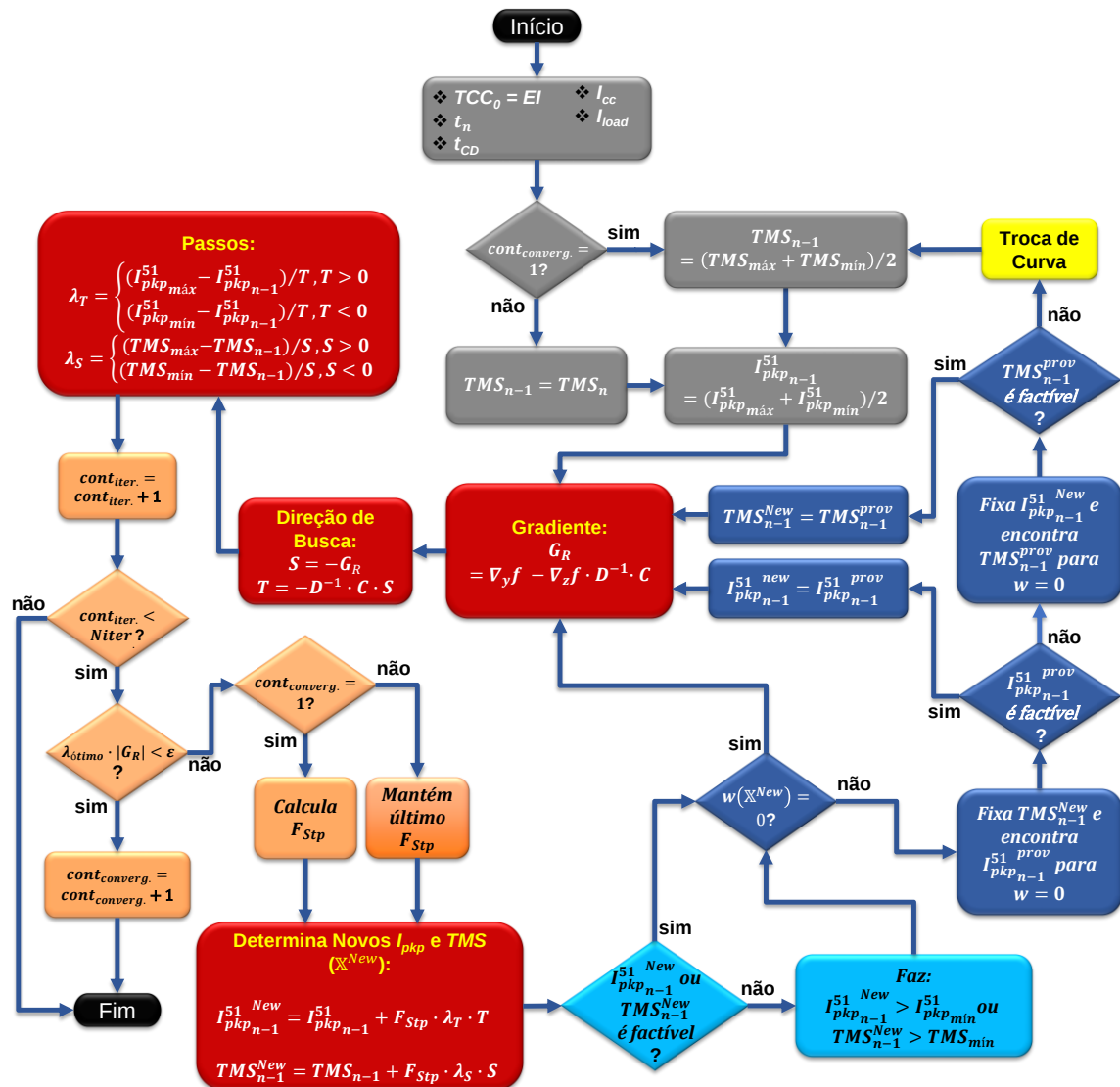
Na linha 17 caso $w(\mathbb{X}^{New})$ (70) seja factível, o algoritmo retorna para a linha 2 incrementado o contador de iterações que é avaliado na linha 3, caso não tenha atingido seu limite o processo iterativo continua.

Na linha 6 ocorre a verificação da convergência ε , caso não tenha convergido, o algoritmo repete a determinação de $\mathbb{X}^{New}$ (64), até que a convergência na linha 6 seja alcançada. Todo este processo ocorre para um único OCR da rede. Uma vez alcançada a convergência, os valores de TMS_{n-1}^{New} , $I_{Pkp_{n-1}}^{51\ New}$ e TCC ficam disponíveis

para a determinação do tempo de operação do OCR atual e este tempo disponível para a nova execução do algoritmo para o próximo OCR a montante.

Na **Figura 12** tem-se o fluxograma do algoritmo GRG que também auxilia na compreensão do processo de execução.

Figura 12 – Fluxograma do algoritmo GRG



Fonte: Elaboração do autor

Uma vez definida toda a estrutura do algoritmo GRG relacionada ao seu funcionamento parte-se para a estruturação de um algoritmo clássico de otimização na coordenação para comparações dos resultados com o algoritmo GRG, este algoritmo representa uma MH e é detalhada na próxima seção.

3.3 OTIMIZAÇÃO COM AG

Uma MH é projetada para lidar com uma ampla variedade de problemas, sem depender de detalhes específicos de cada problema (Boussaïd; Lepagnot; Siarry, 2013).

No contexto de problemas de coordenação de dispositivos de proteção em sistemas elétricos, o uso de uma MH, pode ajudar a encontrar soluções interessantes e adaptáveis, que podem ser difíceis de alcançar por meio de abordagens mais convencionais.

Para este trabalho foi selecionado o AG entre as MHs, pela facilidade de implementação e velocidade na obtenção de soluções, principalmente quando envolve busca e otimização em amplo espaço de busca (Kothari; Dhillon, 2011), além disso, por ser um dos algoritmos mais amplamente empregados, conforme evidenciado pela literatura revisada e referenciada na seção 1.4. O AG serve como um ponto de referência comparativo para os valores gerados pelo GRG, bem como para outros pesquisadores que também adotam o AG como base em suas investigações. Ele trabalha com condições de penalização dos indivíduos menos aptos para que os mais aptos possam ser selecionados através de operadores genéticos.

3.3.1 Modelo matemático para otimização com AG

O algoritmo usa as expressões de (12) a (18) como FO e restrições, entretanto é necessário definir outros recursos matemáticos como penalidade (PEN), função objetivo penalizada (FOP) e função *fitness* penalizada (FFP). Da restrição (13) obtém-se (72) para a determinação da PEN (73), sendo nPr a quantidade de pares consecutivos de OCRs, da restrição (16) obtém-se (74) para a determinação da PEN (75), sendo $nPrf$ a quantidade de pares consecutivos de OCRs e elos fusíveis, da restrição (17) obtém-se (76) para a determinação da PEN (77), sendo nPf a quantidade de pares consecutivos de elos fusíveis (Marcolino; Leite; Mantovani, 2015) (Reiz; Leite, 2022).

$$\Delta t_i^{51} = t_{R_i}^{51} - t_{R_{i+1}}^{51} - t_{CD}^{51-51} \quad (72)$$

$$PEN_{R-R}^{51} = \sum_{i=1}^{nPr} (|\Delta t_i^{51} - |\Delta t_i^{51}||) \quad (73)$$

$$\Delta t_i^{51-F} = t_{R_i}^{51} - t_{F_j}^{TC} - t_{CD}^{51-TC} \quad (74)$$

$$PEN_{R-F}^{51} = \sum_{i=1}^{nPrf} (|\Delta t_i^{51-F} - |\Delta t_i^{51-F}||) \quad (75)$$

$$\Delta t_i^F = 0,75 \cdot t_{F_j}^{MM} - t_{F_{j+1}}^{TC} \quad (76)$$

$$PEN_{F-F} = \sum_{i=1}^{nPf} (|\Delta t_i^F - |\Delta t_i^F||) \quad (77)$$

Caso (72), (74) e (76) sejam positivas ou zero, o par de dispositivos encontra-se coordenado, e consequentemente os valores de (73), (75) e (77) é zero, não penalizando a FO. Caso contrário o par encontra-se descoordenado e os valores de (73), (75) e (77) são positivos e diferentes de zero, aplicando uma penalização na FO. Através de (12), (73), (75) e (77) obtém-se a FOP (78) (Marcolino; Leite; Mantovani, 2015) (Reiz; Leite, 2022), utilizada na determinação da FFP (79) (Kothari; Dhillon, 2011).

$$FOP = \gamma \cdot FO + \delta \cdot PEN_{R-R}^{51} + \sigma \cdot PEN_{R-F}^{51} + \rho \cdot PEN_{F-F} \quad (78)$$

$$FFP = \frac{1}{1 + FOP} \quad (79)$$

Em (78) utiliza-se os coeficientes de ajuste γ , δ , σ e ρ . Para um mesmo valor de FOP, uma elevação do valor de γ diminui a FO e caso contrário aumenta. Os coeficientes δ , σ e ρ trabalham de forma semelhante, com a diferença que elas influenciam na PEN (73) e, portanto, influenciando na coordenação, aumentando ou diminuindo a sua precisão (Reiz; Leite, 2022) (Marcolino; Leite; Mantovani, 2015).

3.3.2 Algoritmo AG

Inicialmente, é necessário definir como é a estrutura cromossômica do indivíduo para a coordenação, como apresentado na **Figura 13**, definindo seus genes de acordo com o problema proposto. Esta estrutura possui como genes as componentes necessárias para determinação dos tempos de operação dos OCRs e dos elos fusíveis. Para os OCRs, o gene **A** corresponde a uma variável real positiva

relacionada a variável I_{Pkp}^{51} , **B** a uma variável real positiva relacionada a *TMS* e **C** uma variável inteira positiva relacionada às TCCs de 1 a 4 da **Tabela 4**, com todos os genes respeitando as suas respectivas restrições. Para os elos fusíveis o gene **D** corresponde a uma variável inteira positiva relacionada a 9 valores preferenciais de corrente nominal do elo I_F^{Elo} de 1 a 9, para os elos K e T, corresponde a **Tabela 2**.

O gene **E** corresponde a uma variável inteira positiva relacionada ao tipo de curva do elo-fusível, sendo 1 para K e 2 para T. Esta estrutura do indivíduo é gerada seguindo a sequência dos dispositivos encontrados no vetor de proteções primárias, portanto não possui um padrão definido, portanto apenas a estrutura cromossômica do OCR e do elo fusível é que são padronizadas.

Figura 13 – Estrutura cromossômica do indivíduo



Fonte: Elaboração do autor

Uma vez definido a estrutura cromossômica, o algoritmo para coordenação ótima com AG pode operar conforme o pseudocódigo apresentado na **Figura 14**.

Na linha 1 determinam-se os limites da restrição da corrente de *pick-up* I_{Pkp}^{51} e na linha 2 uma população inicial é gerada de forma aleatória, respeitando o tamanho da população (S_{Pop}), o número de relés (N_{Rls}) e o tamanho do cromossomo (S_{Chr}), tornando-se a primeira população corrente.

Na linha 4 é necessário avaliar cada indivíduo da população, obtendo seus *fitness*, que indica o quão apto é um indivíduo para solucionar o problema. Quanto maior o valor da aptidão, melhor a qualidade do indivíduo. Para isto utiliza-se a FFP (79), que transforma um problema de minimização em um problema de maximização.

Para avaliação dos indivíduos, calcula-se, para cada relé de fase e neutro, os tempos de operação como proteção primária e de retaguarda, baseados nos valores contidos nos genes, obtendo-se então os valores de coordenação e penalidades correspondentes as equações (72) a (77). Finaliza-se o processo determinando-se as funções objetivos penalizadas e as respectivas funções *fitness* penalizadas correspondentes as equações (78) e (79).

Figura 14 – Pseudocódigo do algoritmo AG**Algoritmo:** AG para coordenação otimizada

Input: $N_{Gen}, S_{Pop}, R_{Rec}, R_{Mut}^{Max}, R_{Mut}^{Min}, \gamma, \delta, \sigma, \rho, I_{Load}^{Max}, I_{CC}, N_{Rls}, C_{Cft}, S_{Chr}$.

- 1: calcule: $I_{Pkp_{min}}^{51P}, I_{Pkp_{max}}^{51P}, I_{Pkp_{min}}^{51N}, I_{Pkp_{max}}^{51N}, I_{F_{min}}^{Elo}$
- 2: população corrente = população inicial ($S_{Chr}, I_{Load}^{Max}, I_{F_{min}}^{Elo}$
- 3: $I_{Pkp_{min}}^{51P}, I_{Pkp_{max}}^{51P}, I_{Pkp_{min}}^{51N}, I_{Pkp_{max}}^{51N}$)
- 4: $fitness$ = Avaliação (população corrente, S_{Chr}, N_{Rls} ,
- 5: C_{Cft}, S_{Pop})
- 6: **while** ($C_{Gen} < N_{Gen}$) **do**
- 7: **while** ($C_{Pop} < S_{Pop}$) **do**
- 8: pais = Seleção ($fitness$, população corrente,
- 9: S_{Chr})
- 10: filho = Crossover (pais, $S_{Chr}, N_{Rls}, C_{Cft}, I_{sc}$)
- 11: indivíduo = Mutação (filho, $S_{Chr}, I_{Load}^{Max}, I_{Pkp_{min}}^{51P}$,
- 12: $I_{Pkp_{max}}^{51P}, I_{Pkp_{min}}^{51N}, I_{Pkp_{max}}^{51N}$)
- 13: nova população $\leftarrow$ indivíduo
- 14: $C_{Pop} = C_{Pop} + 1$
- 15: **end while**
- 16: População corrente = nova população
- 17: ($FO_{51F}, FO_{51N}, fitness, I_{Pkp}^{51N}, I_{Pkp}^{51F}, TMS_F, TMS_N$,
- 18: $TCC_{OCR}^F, TCC_{OCR}^N, t_R^{51F}{}_{pmr}, t_R^{51F}{}_{bkr}, t_R^{51N}{}_{pmr}$,
- 19: $t_R^{51N}{}_{bkr}, I_F^{Elo}, TCC_{elo}$) = Avaliação (população corrente, S_{Chr} ,
- 20: $N_{Rls}, C_{Cft}, S_{Pop}$)
- 21: $C_{Gen} = C_{Gen} + 1$
- 22: **end while**

Output: $FO_{51F}, FO_{51N}, fitness, I_{Pkp}^{51N}, I_{Pkp}^{51F}, TMS_F, TMS_N, TCC_{OCR}^F, TCC_{OCR}^N, t_R^{51F}{}_{pmr}$,

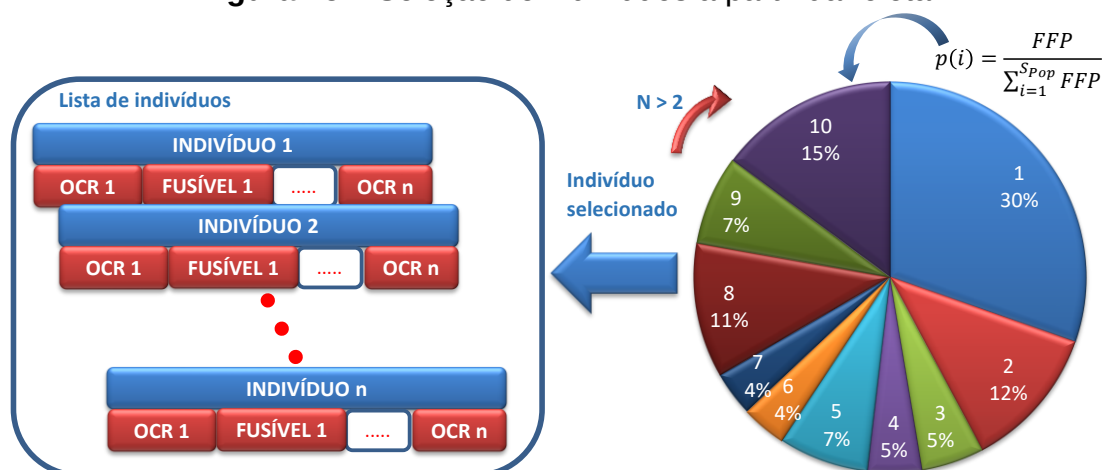
$t_R^{51F}{}_{bkr}, t_R^{51N}{}_{pmr}, t_R^{51N}{}_{bkr}, I_F^{Elo}, TCC_{elo}$

Fonte: Elaboração do autor

Na linha 8, aplica-se o operador de seleção que é baseado em uma roleta, onde inicialmente, calcula-se a probabilidade (80) de cada indivíduo na roleta, onde os indivíduos mais aptos possuem maior probabilidade de serem sorteados.

$$p(i) = \frac{FFP}{\sum_{i=1}^{S_{Pop}} FFP} \quad (80)$$

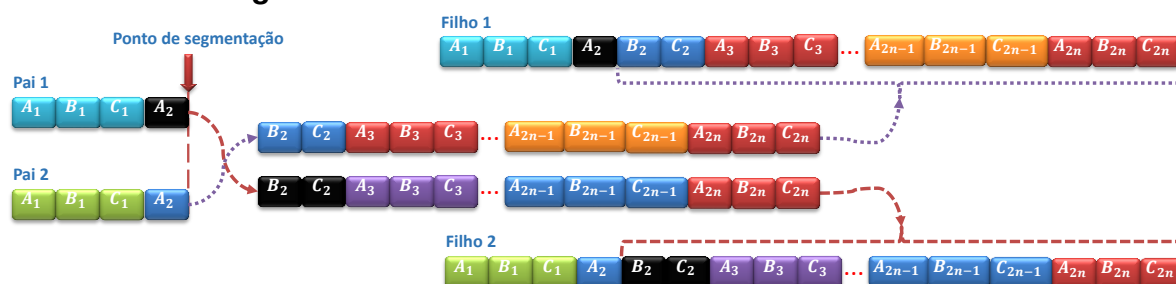
Gira-se a roleta $N > 2$ vezes, e a cada giro, um indivíduo é sorteado e vai para uma lista, como se pode observar na **Figura 15**, onde são escolhidos aleatoriamente dois indivíduos ou pais.

Figura 15 – Seleção de indivíduos a partir da roleta

Fonte: Elaboração do autor

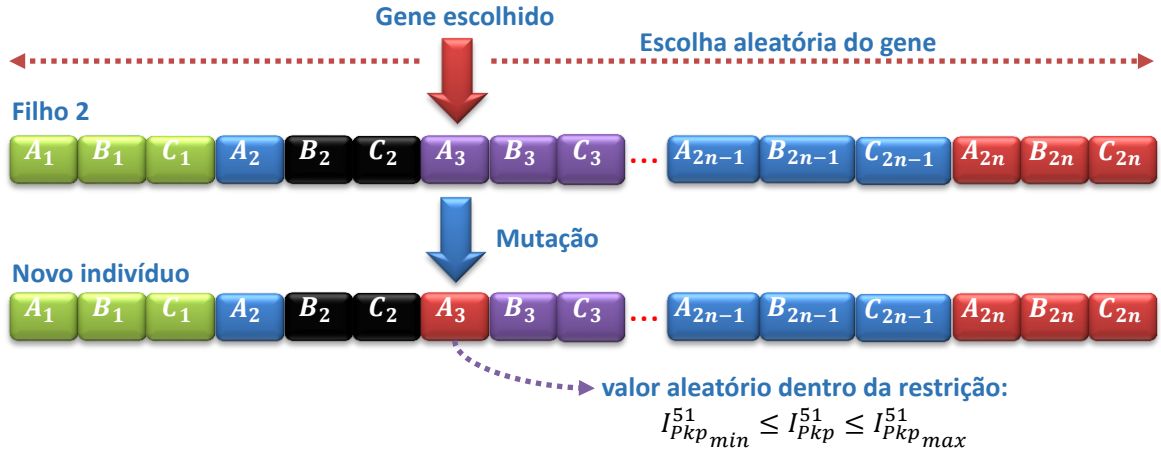
Na linha 10, quando a taxa de recombinação (R_{Rec}) é satisfeita, ocorre o *crossover*, onde há troca de segmentos dos cromossomos pais, selecionados na linha 8, gerando dois filhos com constituição genética distinta dos pais. Esta etapa é a mais importante, pois permite gerar indivíduos com diversidade genética, atribuído as altas taxas de recombinação.

Para isto, escolhe-se aleatoriamente um ponto de segmentação entre os genes dos pais, e a partir deste ponto ocorre troca de segmento cromossômico entre os dois, gerando filhos com códigos genéticos distintos de seus pais, conforme representado na **Figura 16**. Estes são avaliados, obtendo-se (79), e finalmente o mais apto é selecionado.

Figura 16 – Processo de *crossover* entre indivíduos

Fonte: Elaboração do autor

Na linha 11, quando a taxa de mutação é satisfeita, um gene do indivíduo é escolhido aleatoriamente e uma leve alteração é aplicada, respeitando as restrições do gene. Como resultado, um indivíduo com uma nova aptidão é obtido, podendo ser mais apto ou não que o indivíduo original, como representado na **Figura 17**.

Figura 17 – Processo de mutação entre indivíduos

Fonte: Elaboração do autor

Nesta etapa, implementa-se uma taxa de mutação reativa (81) (Reiz; Leite, 2022), que se inicia com uma taxa máxima de mutação (R_{Mut}^{Max}) nas gerações iniciais, e conforme o número de indivíduos semelhantes (N_{Sml}) se eleva em relação ao tamanho da população (S_{Pop}), a taxa de mutação reativa vai decrescendo até tornar-se mínima (R_{Mut}^{Min}), esta é uma forma de impedir uma saturação precoce da população, prolongando o espaço de busca.

$$R_{Mut} = R_{Mut}^{Max} - \frac{N_{Sml}}{S_{Pop}} \cdot (R_{Mut}^{Max} - R_{Mut}^{Min}) \quad (81)$$

Na linha 13, o indivíduo da etapa de mutação é inserido em uma nova população e não diretamente na população corrente, isto evita uma busca apenas na vizinhança, minimizando o descarte de boas soluções que venham aparecer pelas operações de recombinação e mutação. Portanto, apenas após terminado o ciclo populacional, linhas 7 e 15, é que a nova população substitui a população corrente, linha 16.

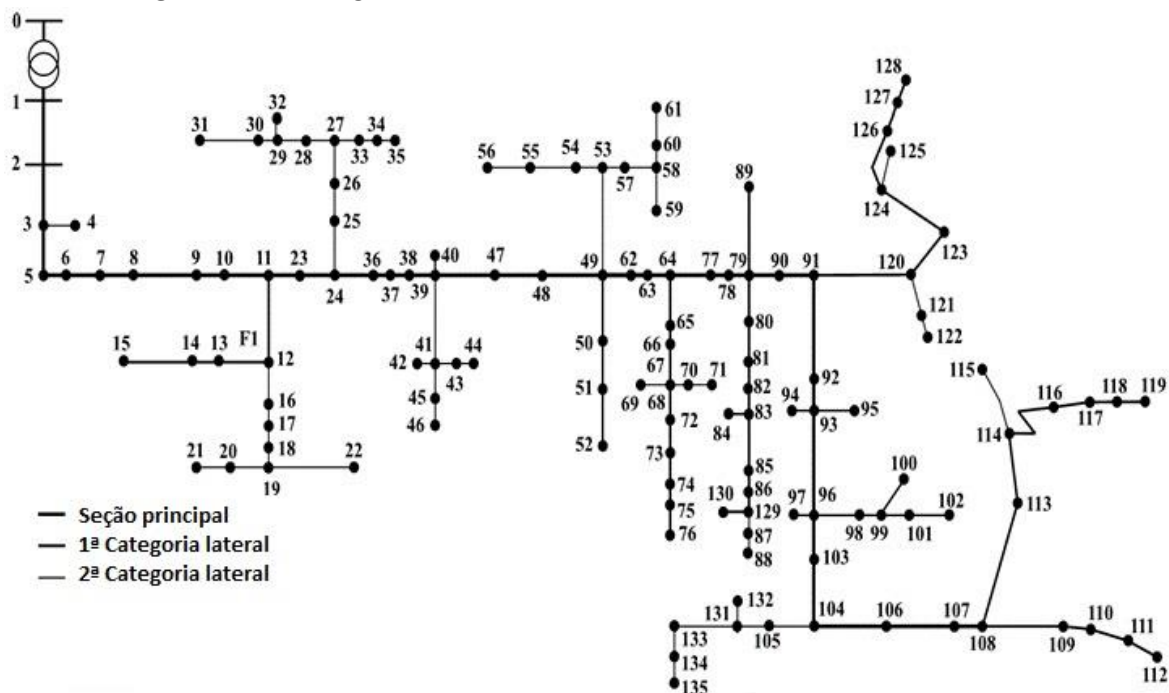
Nas linhas 6 e 22, caso o contador de gerações (C_{Gen}) tenha atingido o seu limite (N_{Gen}), o processo termina com a última população da geração contendo os indivíduos mais aptos e com os menores tempos de operação e portanto menores FOs.

Portanto, na saída do algoritmo temos a FO, a corrente de *pick-up*, o TMS, as TCCs, os tempos de operação da proteção primária e retaguarda, e a coordenação dos dispositivos Δt^{51} e Δt_i^F para cada OCR e elo-fusível do SDEE.

4 RESULTADOS

Na avaliação dos métodos e modelos matemáticos apresentados neste trabalho, é utilizado um SDEE trifásico desequilibrado real de 135 barras como apresentado na **Figura 18**. Os dados desse sistema podem ser encontrados no site do Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica – LaPSEE (Unesp-Feis-DEE-LaPSEE, 2023). O SDEE real de 135 barras é aéreo, trifásico, desbalanceado, com tensão nominal de 13,8 kV e transformador da subestação em conexão triângulo-estrela aterrada (Reiz, 2023). O SDEE foi testado em quatro tipos de sistemas de proteção, na operação do tipo *fuse blowing*, correspondentes a quatro, cinco e seis OCRs na seção principal e finalmente com quatro OCRs na seção principal e treze elos fusíveis nos ramos laterais onde foram simuladas faltas, em barras escolhidas aleatoriamente nas zonas de abrangência de cada dispositivo de proteção atuando como proteção primária. Nesta situação são feitas análises do método GRG para faltas monofásicas e trifásicas para capacidade de coordenação dos dispositivos e tempos de operação otimizados e os resultados obtidos foram comparados com os tempos de operação otimizados gerados pelo método AG.

Figura 18 – Diagrama do SDEE com 135 barras – caso de estudo



Fonte: adaptado (Unesp-Feis-DEE-LaPSEE, 2023)

A metodologia proposta foi implementada na linguagem de programação C#, com o desempenho e velocidades semelhantes ao C/C++. O computador utilizado possui processador Intel® Core™ i7-8700 @ 3,20 GHz 6 Núcleos, 12 Processadores Lógicos com 16 GB de RAM.

4.1 CONFIGURAÇÃO GERAL DOS ALGORITMOS

Para as análises realizadas neste trabalho, é necessário definir os parâmetros das restrições utilizados em ambos os algoritmos.

Para os valores de tempo de coordenação entre relés na função 51 adotou-se um valor médio de 0,3, este também é o mesmo valor utilizado para o tempo de coordenação entre relés e elos fusíveis considerando dados da **Tabela 5**. O valor de K_2 para a função 51F pode chegar até o seu limite máximo de 200% em casos emergenciais, mas neste trabalho adotou-se um valor de 150% em condições de regime normal de funcionamento da rede (Gers; Holmes, 2021). Na **Tabela 6** tem-se um resumo dos valores adotados para parametrização dos relés.

Para a parametrização do AG, definiu-se que os parâmetros como taxa de recombinação, taxa de mutação máxima e mínima são fixos e testou-se sete tamanhos de população e de gerações somente para o primeiro sistema de proteção para avaliar a qualidade das respostas.

Tabela 6 – Parâmetros de ajuste das restrições

Função	$K_1(\%)$	$K_2(\%)$	TMS_{min}	TMS_{max}	$t_{CD}^{51-51} (s)$	t_{CD}^{51-TC}
51F	120	150	0,05	1,00	0,3	0,3
51N	10	30				

Fonte: (Gers; Holmes, 2021) (Reiz; Leite, 2022)

Para os testes dos demais sistemas de proteção utilizou-se duas populações/gerações, uma que apresentou menor tempo de execução com desvio padrão dentro de um limite especificado aceitável e outra que apresentou a menor média e desvio padrão. Este procedimento permite avaliar adequadamente a influência destes ajustes na resposta de saída para os tempos de operação do AG para uma análise comparativa mais ampla com o GRG. Os valores dos coeficientes

γ , δ , σ e ρ foram ajustados de modo a tornar as soluções com a melhor FO e coordenação possível.

Devido a taxa de mutação reativa, verificou-se que quanto maior a taxa de mutação máxima, melhor o resultado das amostras, obteve-se um desempenho aceitável para o valor de 70%. Para a taxa de mutação mínima o valor deve ser o menor possível, obteve-se um desempenho aceitável para o valor de 0,1%. A taxa de recombinação de 80% foi considerada satisfatória, não saturando a população precocemente. Na **Tabela 7** tem-se um resumo das parametrizações adequadas para o AG.

Tabela 7 – Parâmetros de ajuste do AG

<i>Sistema de proteção</i>		<i>Pop.</i>	<i>Ger.</i>	<i>Rec. (%)</i>	<i>Mut. Máx. (%)</i>	<i>Mut. Mín. (%)</i>	γ	δ	σ	ρ
<i>OCRs</i>	<i>fusível</i>									
4	-	150	320	80	70	0,1	40	140	-	-
		300	320							
		600	320							
		600	640							
		1200	640							
		1200	1280							
		2400	1280							
5	-	300	320	80	70	0,1	5	140	-	-
		2400	1280							
6	-	300	320	80	70	0,1	3	90	-	-
		2400	1280				3,7	90	-	-
4	13	300	320	80	70	0,1	20	140	140	-
		2400	1280							

Fonte: Elaboração do autor

Para o GRG, adotou-se como limite máximo de iterações N_{itr} o valor de 2×10^6 e como critério de convergência ε o valor de 1×10^{-5} .

Um arquivo xml contendo os dados da rede, são processados por um algoritmo de cálculo de fluxo de potência e curtos-circuitos implementadas em C# (Reiz, 2019), cujas correntes de pré-falta e falta geradas são acessadas de forma automática tanto pelo algoritmo GRG, quanto pelo AG. Já as posições dos OCRs e elos fusíveis nas barras, também contidas no arquivo xml, são processadas diretamente pelo algoritmo GRG e AG. As correntes de falta e pré-falta geradas para o SDEE da **Figura 18**, são apresentadas na **Tabela 8** para cada sistema de proteção em teste.

Tabela 8 – Correntes de falta e pré-falta do SDEE de 135 barras

Sistema de proteção		Barras de falta	Dispositivo de proteção			I_{cc} (kA)		I_{Load}^{Max} (A)
OCRs	Elos fusíveis		ramo	Nº	tipo	3Ø	1Ø	
4	-	10	1-2	1	OCR	8,24	4,44	311,82
		48	24-36	2	OCR	5,67	3,22	220,12
		92	64-77	3	OCR	4,59	2,59	130,99
		117	96-103	4	OCR	2,35	1,55	55,05
5	-	10	1-2	1	OCR	8,24	4,44	311,82
		48	24-36	2	OCR	5,67	3,22	220,12
		92	64-77	3	OCR	4,59	2,59	130,99
		135	96-103	4	OCR	3,43	2,01	55,05
		117	107-108	5	OCR	2,33	1,53	23,53
6	-	10	1-2	1	OCR	8,24	4,44	311,82
		48	24-36	2	OCR	5,67	3,22	220,12
		79	49-62	3	OCR	5,02	2,84	162,15
		96	90-91	4	OCR	4,25	2,43	88,18
		106	96-103	5	OCR	3,87	2,24	55,05
		117	107-108	6	OCR	2,33	1,53	23,53
4	13	10	1-2	1	OCR	8,24	4,44	311,82
		15	12-13	12	Fusível	5,14	3,18	6,94
		22	12-16	15	Fusível	5,79	3,44	24,95
		31	24-25	24	Fusível	4,99	3,02	35,08
		48	24-36	2	OCR	5,67	3,22	220,12
		46	39-41	40	Fusível	5,37	3,1	16,85
		52	49-50	49	Fusível	4,92	2,76	13,25
		61	49-53	52	Fusível	4,53	2,69	17,23
		76	64-65	64	Fusível	4,42	2,56	30,79
		92	64-77	3	OCR	4,59	2,59	130,99
		88	79-80	79	Fusível	4,11	2,37	30,92
		102	96-98	98	Fusível	3,70	2,17	9,64
		108	96-103	4	OCR	3,47	2,06	55,05
		135	104-105	105	Fusível	3,41	1,99	18,35
		119	108-113	113	Fusível	2,21	1,45	8,69
		122	120-121	121	Fusível	3,92	2,28	3,77
		128	120-123	123	Fusível	4,07	2,34	8,36

Fonte: Elaboração do autor

4.2 ANÁLISE DO GRG

Uma avaliação sobre o desempenho, comportamento e resultados fornecidos pelo GRG são discutidos nesta Seção. Após a execução do algoritmo, os resultados são analisados para avaliar sua qualidade, precisão e eficiência. Incluindo a verificação da convergência do algoritmo, e a identificação de problemas ou limitações

encontradas durante a execução. Esta etapa serve como uma primeira avaliação do desempenho e aplicabilidade desse método para resolver o problema em questão. Com base nos resultados dessa análise, são realizados ajustes adicionais no algoritmo antes de prosseguir para uma análise mais aprofundada.

4.2.1 Análise de desempenho do algoritmo GRG

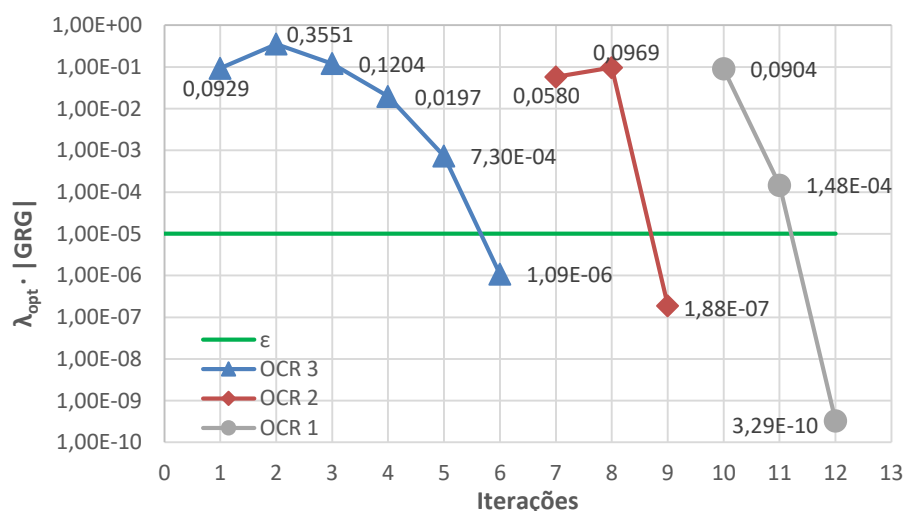
Esta seção faz uma análise detalhada do desempenho do algoritmo GRG para as funções 51F/N para as principais variáveis características, como convergência, direções de busca, passos, *TMS* e corrente de *pick-up*, assim como o seu desempenho computacional para as iterações e tempo de execução.

Na seção 4.2.1.1 analisou-se um sistema de proteção com quatro OCRs em relação as características principais do GRG. A partir da corrente de falta trifásica obteve-se os resultados de ajustes para os OCRs 51F, para as correntes de falta monofásica obteve-se os resultados para os OCRs 51N e as correntes de pré-falta são utilizadas para restrições de ambas as funções 51F/N.

Na seção 4.2.1.2 analisou-se o desempenho computacional do GRG para os quatro sistemas de proteção (4 OCRs, 5 OCRs, 6 OCRs e 4 OCRs com 13 fusíveis), como quantidade de iterações totais para cada OCR assim como os tempos de execução do algoritmo.

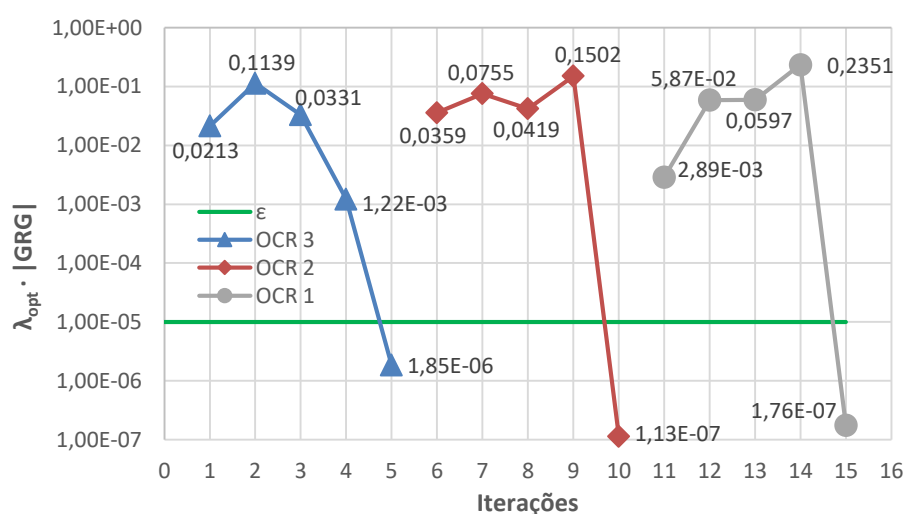
4.2.1.1 Desempenho das variáveis características do GRG

Para o critério de convergência ε de 1×10^{-5} pode-se observar pela **Figura 19** que na função 51F o OCR 3 requer 6 iterações para convergir e os OCRs 1 e 2 requerem 3 iterações para convergência, no total o algoritmo requer 12 iterações para uma solução de coordenação ótima completa. Para o OCR 3, a primeira iteração parte com valor inicial de 0,0929 crescendo até 0,3551 e decrescendo até convergir com valor de $1,09 \times 10^{-6}$. Para o OCR 2, o valor inicial é de 0,058 crescendo até 0,0969 e decrescendo até convergir com valor de $1,88 \times 10^{-7}$ e finalmente para o OCR 1, o valor inicial é de 0,0904 decrescendo até convergir com valor de $3,29 \times 10^{-10}$.

Figura 19 – Convergência do GRG em cada iteração para OCRs 51F

Fonte: Elaboração do autor

Na **Figura 20** cada OCR operando na função 51N requer 5 iterações para convergir. No total o algoritmo requer 15 iterações para encontrar a solução completa otimizada. Para o OCR 3, a primeira iteração parte com valor inicial de 0,0213 crescendo até 0,1139 e decrescendo até convergir com valor de $1,85 \times 10^{-6}$. Para o OCR 2, o valor inicial é de 0,0359 crescendo até 0,1502 e decrescendo até convergir com valor de $1,13 \times 10^{-7}$ e finalmente para o OCR 1, o valor inicial é de $2,89 \times 10^{-3}$ crescendo até 0,2351 e decrescendo até convergir com valor de $1,76 \times 10^{-7}$.

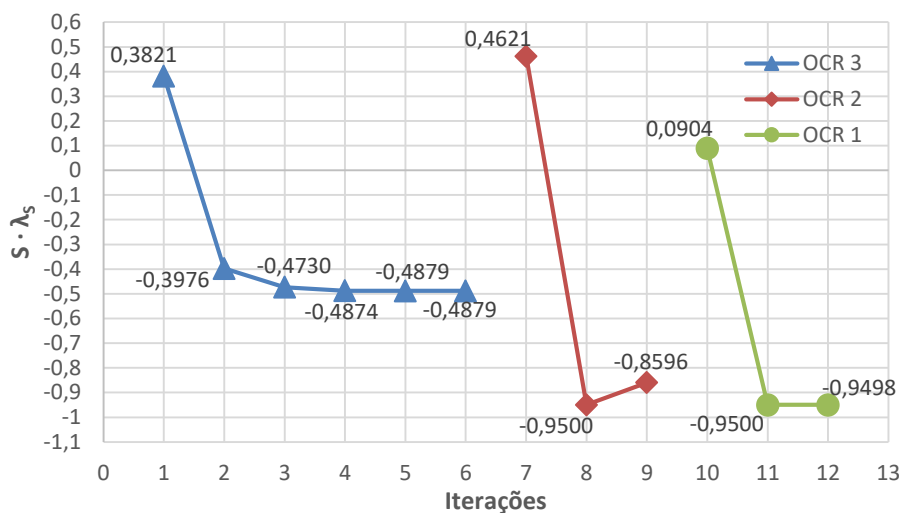
Figura 20 – Convergência do GRG em cada iteração para OCRs 51N

Fonte: Elaboração do autor

Na **Figura 21** para os OCRs operando na função 51F, o comportamento de $S \cdot \lambda_s$ para TMS^{New} do OCR 3 se inicia em 0,3821 decrescendo até convergir com valor

de -0,4879. Para o OCR 2, se inicia em -0,4621 até convergir com valor de -0,8596. Para o OCR 1, se inicia em 0,0904 e decresce até convergir com valor de -0,9498.

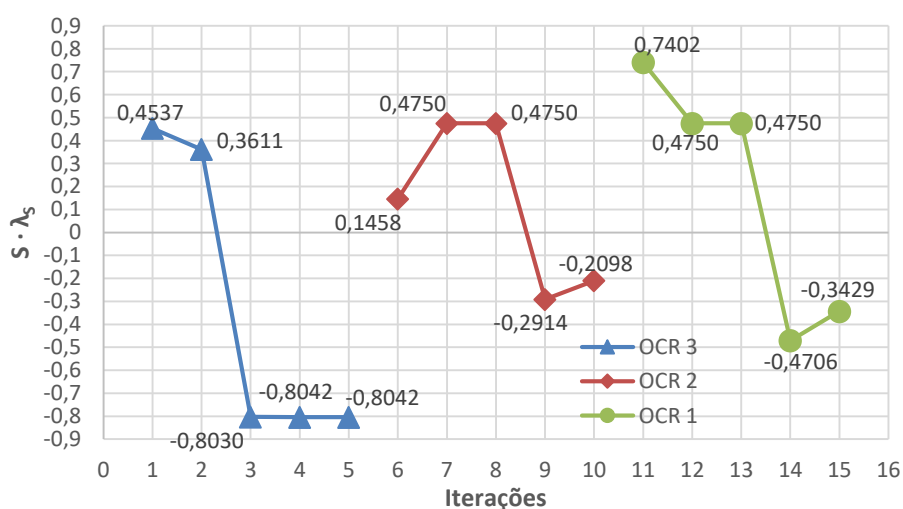
Figura 21 – Produto $S \cdot \lambda_s$ em cada iteração para OCRs 51F



Fonte: Elaboração do autor

Na **Figura 22**, para operação na função 51N, o OCR 3 se inicia em 0,4537 até convergir com valor de -0,8042. Para o OCR 2, se inicia em 0,1458 até convergir com valor de -0,2098 e finalmente para o OCR 1, se inicia em 0,7402 e decresce até convergir com valor de -0,3429.

Figura 22 – Produto $S \cdot \lambda_s$ em cada iteração para OCRs 51N

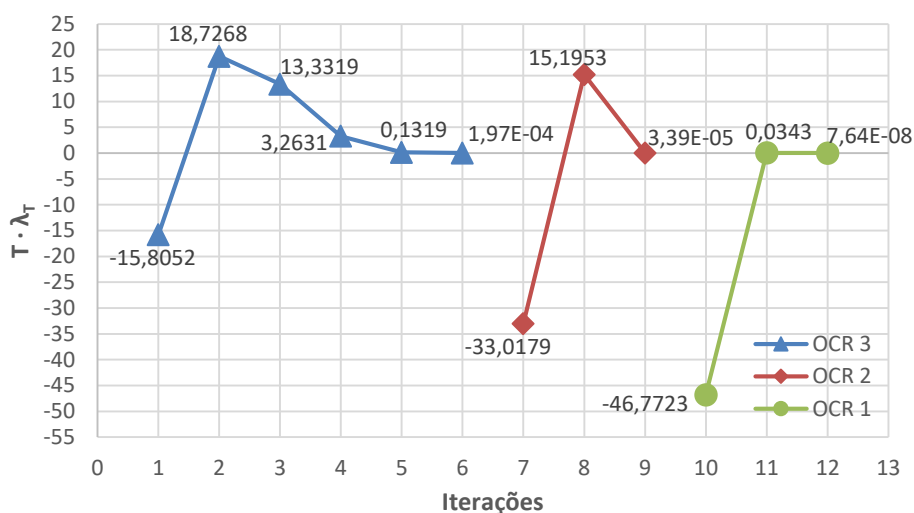


Fonte: Elaboração do autor

Na **Figura 23**, tem-se o comportamento de $T \cdot \lambda_T$ para a $I_{pkp}^{51\text{New}}$ na função 51F onde para os 3 OCRs, todos iniciam com valores negativos convergindo com valores

positivos e muito próximos de zero. Para o OCR 3 inicia-se com valor de -15,8052 até convergir com valor de $1,97 \times 10^{-4}$, para o OCR 2 inicia com valor de -33,0179 até convergir com valor de $3,39 \times 10^{-5}$ e para o OCR 1 inicia com valor de -46,7723 até convergir com valor de $7,64 \times 10^{-8}$.

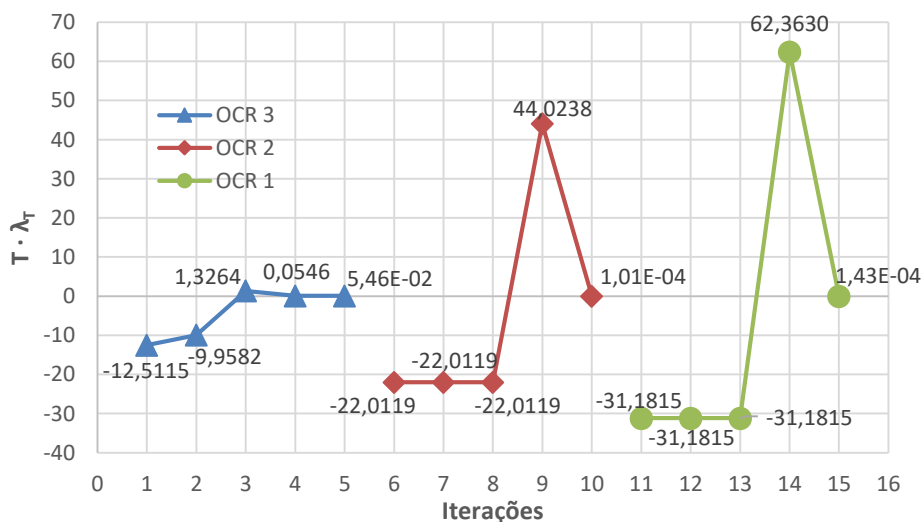
Figura 23 – Produto $T \cdot \lambda_T$ em cada iteração para OCRs 51F



Fonte: Elaboração do autor

Na **Figura 24**, tem-se o comportamento de $T \cdot \lambda_T$ para a função 51N. Todos os valores iniciam negativamente convergindo com valores muito próximos de zero, para o OCR 3 inicia-se com -12,5115 até convergir com valor de $5,46 \times 10^{-2}$, para o OCR 2 inicia-se com -22,0119 até convergir com valor de $1,01 \times 10^{-4}$ e finalmente para o OCR 1 inicia-se com -31,1815 até convergir com valor de $1,43 \times 10^{-4}$.

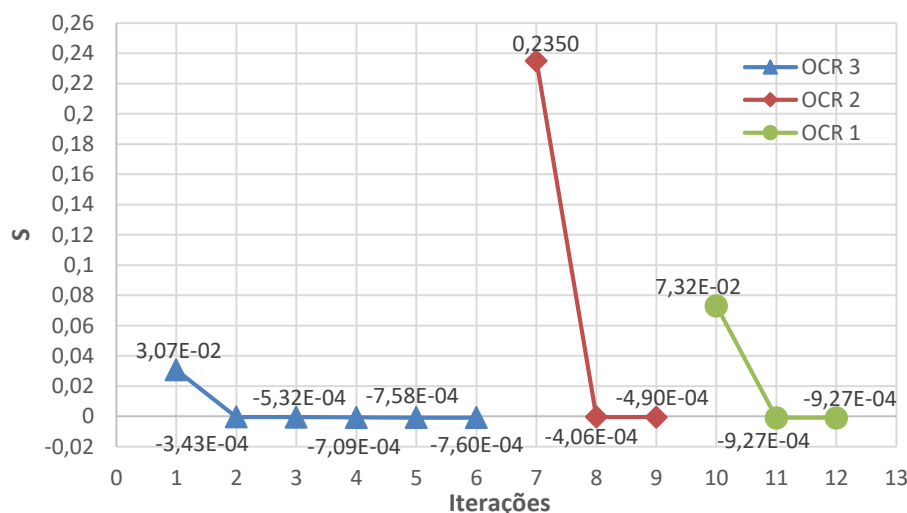
Figura 24 – Produto $T \cdot \lambda_T$ em cada iteração para OCRs 51N



Fonte: Elaboração do autor

Na **Figura 25**, para a função 51F, tem-se a direção de busca **S** para TMS^{New} . O OCR 3 se inicia em $3,07 \times 10^{-2}$ decrescendo até convergir com $-7,60 \times 10^{-4}$, o OCR 2 se inicia em 0,2350 decrescendo até convergir com valor de $-4,90 \times 10^{-4}$ e finalmente o OCR 1 se inicia em $7,32 \times 10^{-2}$ decrescendo até convergir com valor de $-9,27 \times 10^{-4}$.

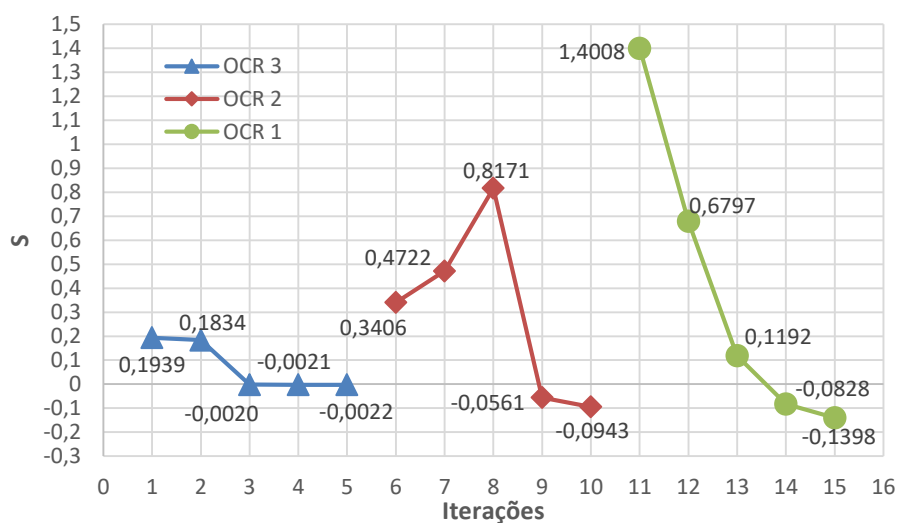
Figura 25 – Direção de **S** em cada iteração para OCRs 51F



Fonte: Elaboração do autor

Na **Figura 26**, para a função 51N, a direção de busca **S** para o OCR 3 se inicia em 0,1939 decrescendo até a convergência em -0,0022, o OCR 2 se inicia em 0,3406 crescendo até a terceira iteração em 0,8171 e decrescendo até convergir com -0,0943. Para o OCR 1, se inicia em 1,4008 decrescendo até convergir com -0,1398.

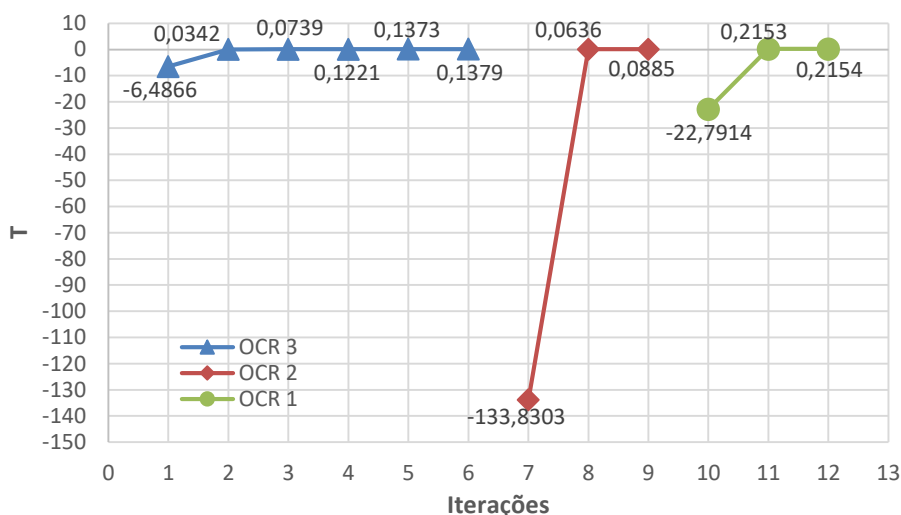
Figura 26 – Direção de **S** em cada iteração para OCRs 51N



Fonte: Elaboração do autor

Na **Figura 27**, tem-se a direção de busca T para $I_{pkp}^{51\text{ New}}$ na função 51F. O OCR 3 parte de -6,4888 e cresce até a convergência com 0,1379. Para o OCR 2, se inicia em -133,8303 crescendo até 0,0885. Para o OCR 1, se inicia em -22,7914 crescendo até a convergência com 0,2154.

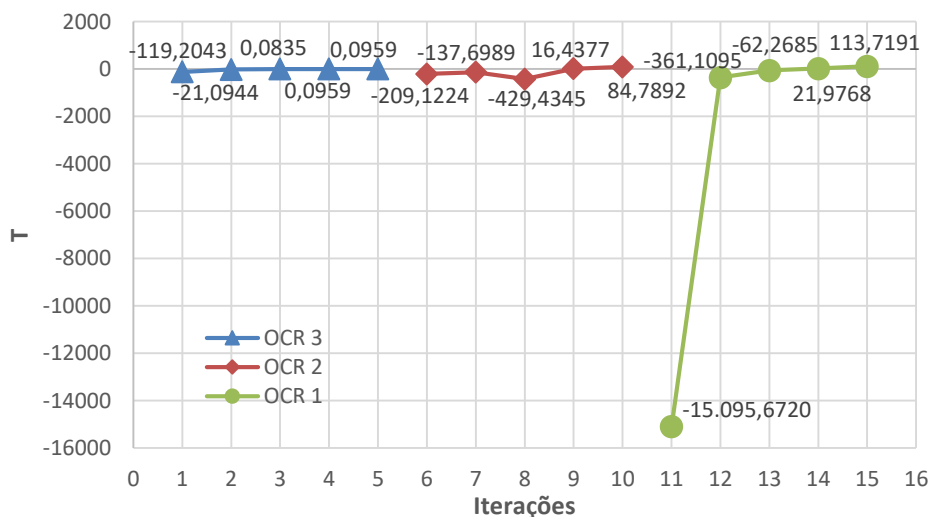
Figura 27 – Direção de T em cada iteração para OCRs 51F



Fonte: Elaboração do autor

Na **Figura 28**, para a direção de busca T na função 51N, o OCR 3 parte de -119,2043 e cresce até a convergência com 0,0959. Para OCR 2, se inicia em -209,1224 crescendo até a convergência com 84,7892. Para o OCR 1, se inicia em -15.095,6720 crescendo até a convergência com 113,7191.

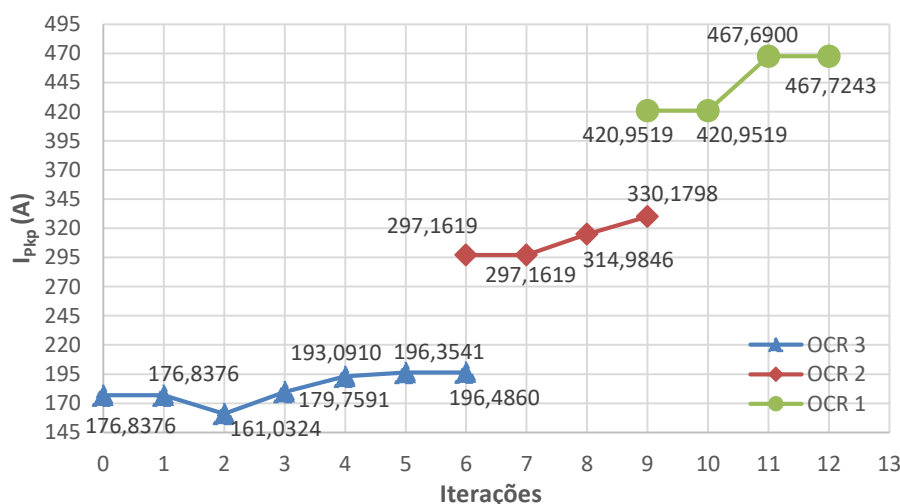
Figura 28 – Direção de T em cada iteração para OCRs 51N



Fonte: Elaboração do autor

Na **Figura 29**, para a $I_{Pkp}^{51\ New}$ na função 51F, o OCR 3 se inicia em 176,84 A decresce até 161,03 A e então cresce até a convergência com 196,49 A. Para o OCR 2, se inicia em 297,16 A e cresce até a convergência com 330,18 A. Para o OCR 1, se inicia em 420,95 A e cresce até a convergência com 467,72 A.

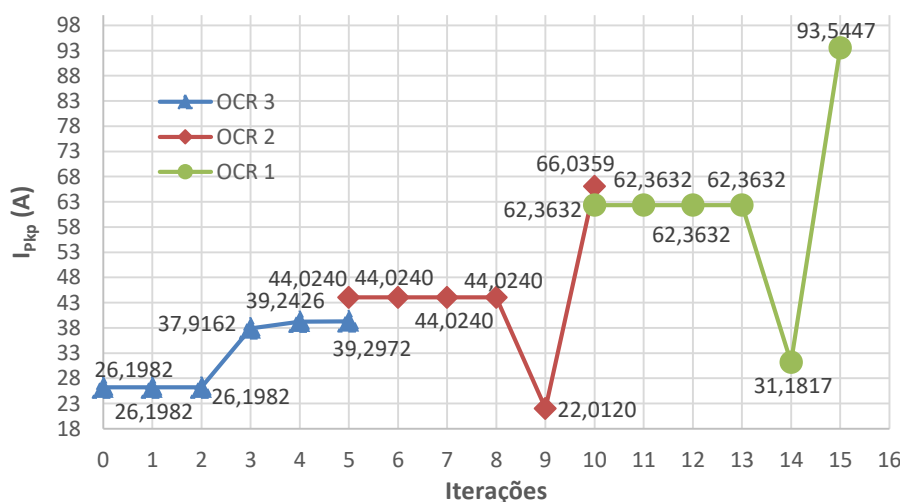
Figura 29 – Corrente de *pick-up* em cada iteração para OCRs 51F



Fonte: Elaboração do autor

Na **Figura 30**, para a $I_{Pkp}^{51\ New}$ na função 51N, o OCR 3 se inicia em 26,20 A e cresce até a convergência em 39,30 A. Para o OCR 2, se inicia em 44,02 A decrescendo até 22,01 A e cresce até a convergência com 66,04 A. Para o OCR 1, se inicia em 62,36 A decrescendo até 31,18 A e cresce até a convergência com 93,54 A.

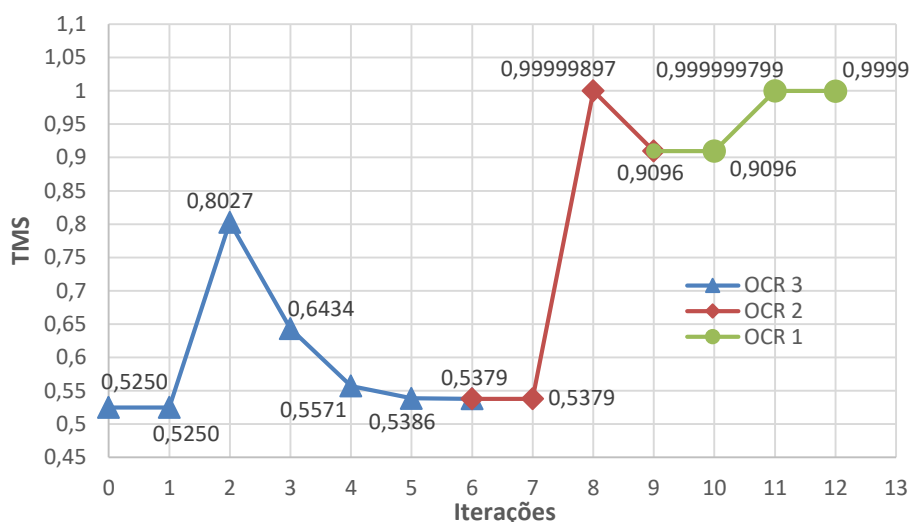
Figura 30 – Corrente de *pick-up* em cada iteração para OCRs 51N



Fonte: Elaboração do autor

Na **Figura 31**, para a TMS^{New} na função 51F, o OCR 3 se inicia em 0,525 e cresce até 0,8027 decrescendo em seguida até a convergência com 0,5379. Para o OCR 2, se inicia em 0,5379 crescendo até 0,9999 e decresce até a convergência com 0,9096. Para o OCR 1, se inicia em 0,9096 e cresce até a convergência com 0,9999.

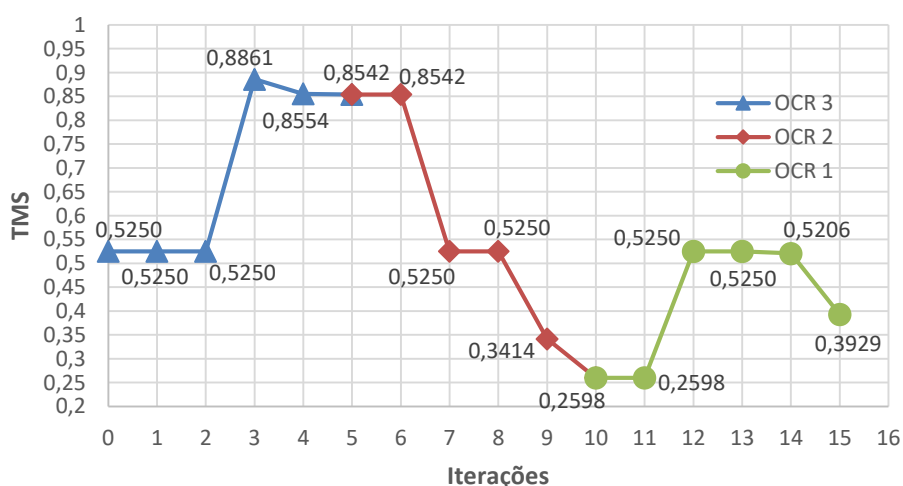
Figura 31 – TMS em cada iteração para OCRs 51F



Fonte: Elaboração do autor

Na **Figura 32**, para a TMS^{New} na função 51N, o OCR 3 se inicia em 0,525 cresce até 0,8861 na terceira iteração e decresce até a convergência em 0,8542. Para o OCR 2, se inicia em 0,8542 e decresce até 0,2598 na primeira iteração. Para o OCR 1, se inicia em 0,2598 e cresce até 0,525 decrescendo e convergindo em 0,3929.

Figura 32 – TMS em cada iteração para OCRs 51N

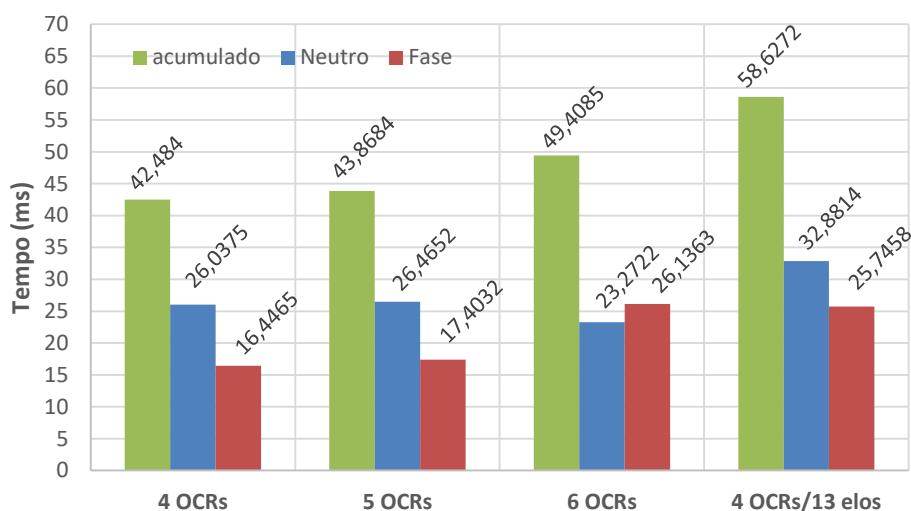


Fonte: Elaboração do autor

4.2.1.2 Desempenho computacional

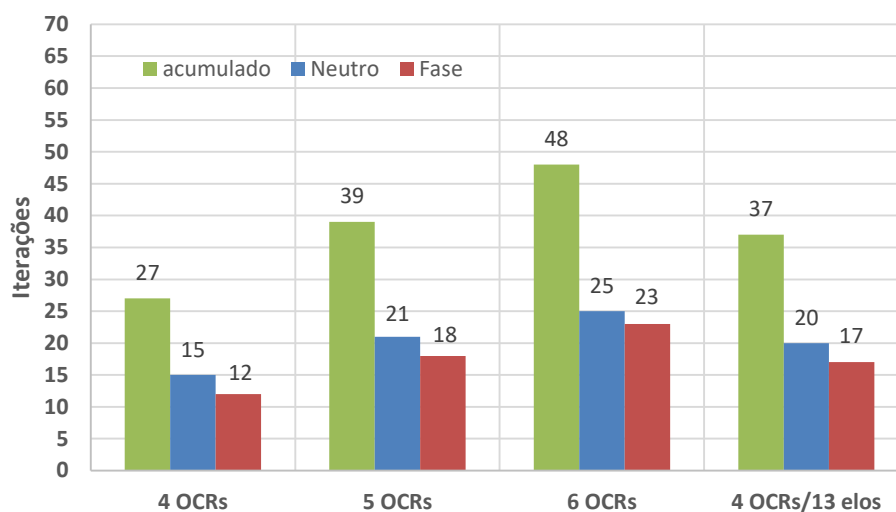
O tempo de execução do algoritmo GRG pode ser verificado na **Figura 33**. Para uma solução de neutro o tempo de execução máximo é de 32,9 ms no sistema de proteção com 4 OCRs e 13 fusíveis. Para o de fase o tempo de execução máximo é de 26,1 ms para o sistema de proteção com 6 OCRs. Para uma solução completa de fase e neutro o tempo máximo de execução é de 58,6 ms para o sistema de proteção com 4 OCRs e 13 fusíveis.

Figura 33 – Tempo de execução do GRG para os sistemas testados



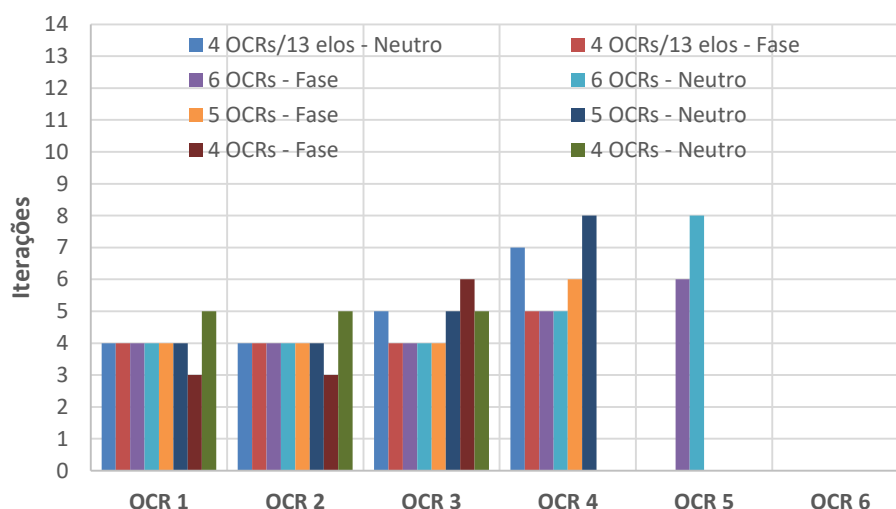
Fonte: Elaboração do autor

O número de iterações também pode ser verificado na **Figura 34**, onde o maior número de iterações ocorre para o sistema de proteção com 6 OCRs, totalizando 23 iterações de fase, 25 iterações de neutro e 48 iterações para uma solução completa de fase e neutro. Pode-se verificar que a presença de elos fusíveis na rede com quatro OCRs aumentou em 5 iterações de fase e neutro, representando um aumento aproximado de 41,67% no número de iterações de fase e 33,33% no de neutro. Este aumento se deve ao algoritmo GRG iniciar não pelo OCR 3, mas sim pelo OCR 4 que leva em consideração o tempo de operação do fusível 105, excluindo a necessidade de sugerir um tempo de operação para o OCR 3. Quando em um sistema de proteção com somente 4 OCRs, tem-se um tempo de operação sugerido para o OCR 3 que é menor que o tempo apresentado pelo fusível 105 quando o sistema de proteção é de 4 OCRs e 13 fusíveis.

Figura 34 – Número de iterações do GRG para os sistemas testados

Fonte: Elaboração do autor

Ainda como parte das análises de iterações, pode-se verificar pela **Figura 35** o número de iterações que o algoritmo GRG necessita para otimizar cada OCR de fase ou neutro no sistema de proteção em teste. Verifica-se que os OCRs mais extremos na rede exigem maior número de iterações devido ao processo de aprendizado do fator de passo F_{Stp} que até a convergência busca ajustar automaticamente o fator de passo para o ótimo, permanecendo com este valor ótimo fixo na otimização dos demais OCRs. O número máximo de iterações encontrado por OCR não superou a quantidade de 8 iterações.

Figura 35 – Número de iterações do GRG por OCR para os sistemas testados

Fonte: Elaboração do autor

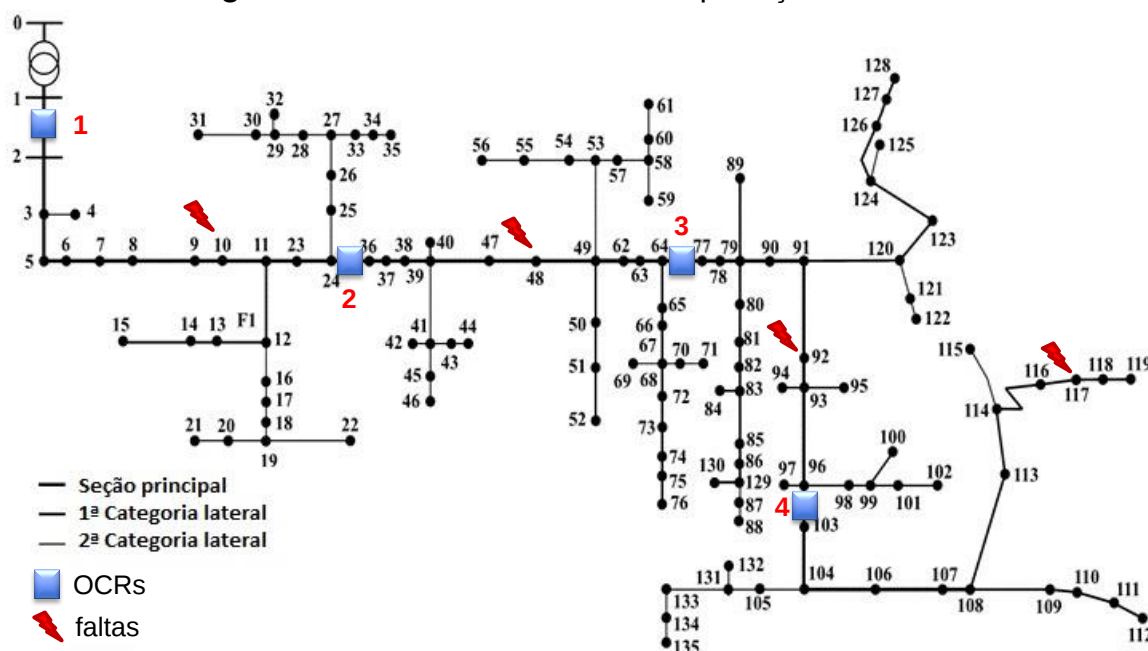
4.2.2 Análise da coordenação otimizada do GRG

Neste tópico são analisadas a capacidade de coordenação do GRG bem como sua capacidade de gerar tempos de operação ótimos. Foram testadas a capacidade de otimização para quatro sistemas de proteção, sendo eles: 4 OCRs, 5 OCRs, 6 OCRs e 4 OCRs com 13 fusíveis. Em todos eles são analisados a qualidade dos dados como os ajustes para parametrização dos OCRs e a coordenação gerada, bem como os coordenogramas para análises visuais das coordenações entre OCRs e OCRs e fusíveis.

4.2.2.1 Sistema de proteção com 4 OCRs

Na **Figura 36** tem-se o sistema de proteção com quatro OCRs para o SDEE em estudo com as respectivas barras de faltas nas zonas de abrangência de cada proteção, com valores de falta relacionados na **Tabela 8**.

Figura 36 – SDEE com sistema de proteção de 4 OCRs



Fonte: adaptado (Unesp-Feis-DEE-LaPSEE, 2023)

Na **Tabela 9**, tem-se os ajustes obtidos pelo GRG para os 4 OCRs na função 51F. Pode-se verificar que todos os ajustes respeitam as respectivas restrições, com todas as TCCs mais rápidas dentre as quatro possíveis para a função 51F.

Tabela 9 – Ajustes do sistema de proteção de fase com 4 OCRs obtidos pelo GRG

OCR	$I_{\min} (A)$	$I_{Pkp}^{51} (A)$	$I_{\max} (A)$	$TMS_{\min}$	TMS	$TMS_{\max}$	TCC	C_1	C_2
1	374,1794	467,7243	467,7243	0,05	0,9999	1	EI	80	2
2	264,1439	330,1798	330,1799	0,05	0,9096	1	EI	80	2
3	157,189	196,4860	196,4862	0,05	0,5379	1	EI	80	2
4	66,0556	66,0556	82,5695	0,05	0,0500	1	EI	80	2

Fonte: Elaboração do autor

Na **Tabela 10**, tem-se os ajustes obtidos pelo GRG para os quatro OCRs na função 51N. Pode-se verificar que todos os ajustes respeitam as respectivas restrições e as TCCs são escolhidas da mais rápida para o OCR 4 para mais lentas nos OCRs iniciais.

Tabela 10 – Ajustes do sistema de proteção de neutro com 4 OCRs obtidos pelo GRG

OCR	$I_{\min} (A)$	$I_{Pkp}^{51} (A)$	$I_{\max} (A)$	$TMS_{\min}$	TMS	$TMS_{\max}$	TCC	C_1	C_2
1	31,1816	93,5447	93,5449	0,05	0,3929	1	SI	0,14	0,02
2	22,0112	66,0359	66,0360	0,05	0,2598	1	SI	0,14	0,02
3	13,0991	39,2972	39,2972	0,05	0,8542	1	VI	13,5	1
4	5,5046	5,5058	16,5139	0,05	0,0500	1	EI	80	2

Fonte: Elaboração do autor

Na **Tabela 11**, tem-se a coordenação ótima obtida pelo GRG e os tempos de operação otimizado como proteção primária para as funções 51F com uma FO de 0,5883 s. Pode-se verificar que todos os OCRs estão coordenados e suas proteções primárias protegem adequadamente o SDEE.

Tabela 11 – Coordenação do sistema de proteção de fase com 4 OCRs obtidos pelo GRG

Proteção de backup	$t_{R\ bkp}^{51} (s)$	Proteção primária	$t_{R\ pmr}^{51} (s)$	Coordenação $\Delta t (s) \geq 0$
		1	0,2587	
1	0,5473	2	0,2473	0
2	0,3791	3	0,0791	0
3	0,3032	4	0,0032	0

Fonte: Elaboração do autor

Na **Tabela 12**, tem-se a coordenação ótima obtida pelo GRG e os tempos de operação otimizado como proteção primária para as funções 51N com uma FO de 1,3130 s. Pode-se verificar que todos os OCRs estão coordenados e suas proteções primárias protegem adequadamente o SDEE.

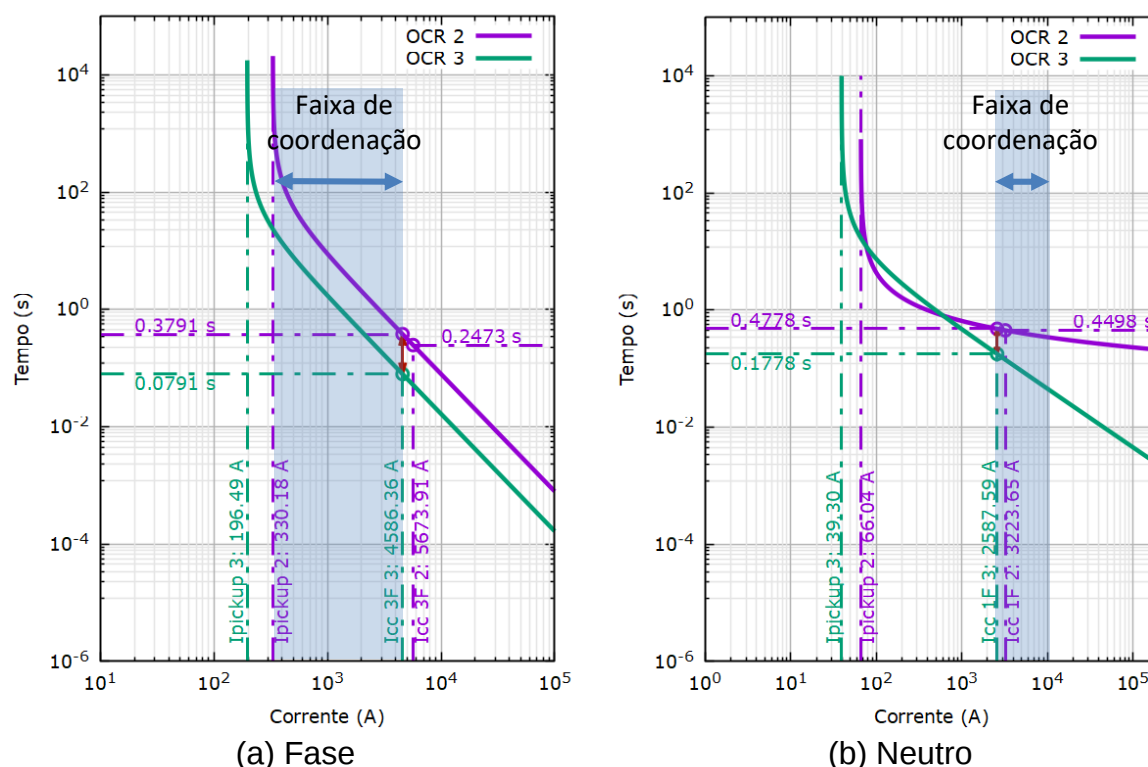
Tabela 12 – Coordenação do sistema de proteção de neutro com 4 OCRs obtidos pelo GRG

<i>Proteção de backup</i>	$t_{R\ bkp}^{51} (s)$	<i>Proteção primária</i>	$t_{R\ pmr}^{51} (s)$	<i>Coordenação</i> $\Delta t (s) \geq 0$
		1	0,6853	
1	0,7498	2	0,4498	0
2	0,4778	3	0,1778	0
3	0,3001	4	0,0001	0

Fonte: Elaboração do autor

Na **Figura 37** (a) e (b), tem-se os exemplos dos coordenogramas de dois pares de proteção consecutivos nas funções 51F e 51N respectivamente, correspondentes aos valores dos ajustes obtidos pelo GRG e seus respectivos tempos de coordenação.

Figura 37 – Coordenogramas do sistema de proteção com 4 OCRs obtidos pelo GRG



Fonte: Elaboração do autor

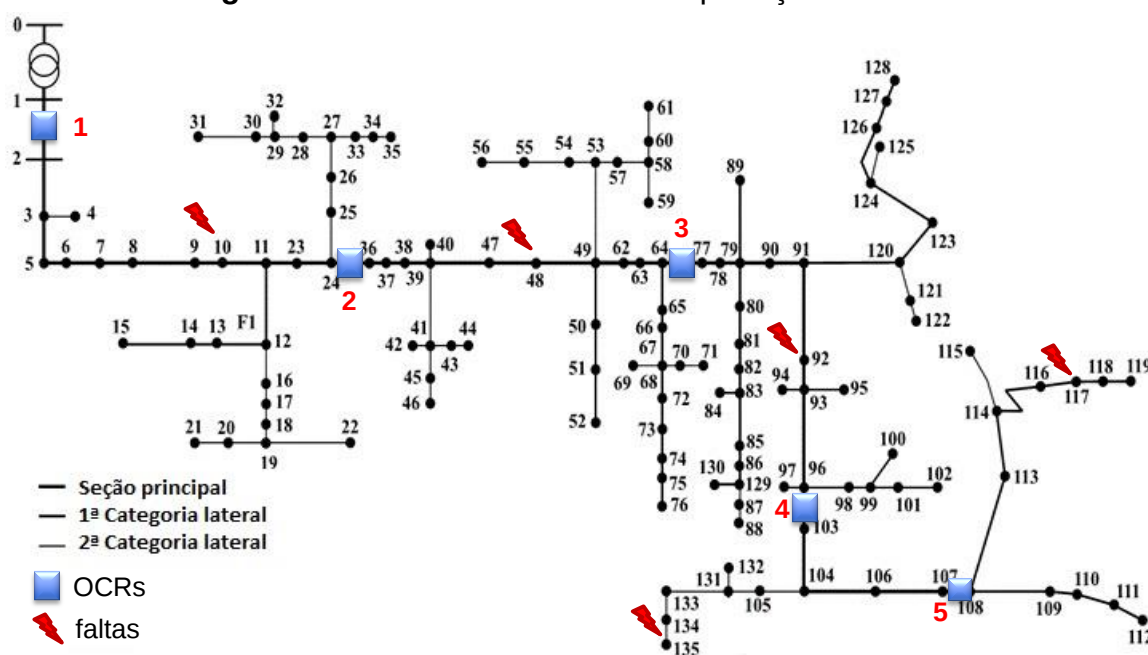
Pode-se verificar pelo coordenograma da função de fase (a), que o OCR 3 estará coordenado para toda a faixa correspondente a área sombreada nos limites de corrente entre 330,18 A e 4,6 kA, coordenando para faltas com impedância de falta maiores ou iguais a zero na barra de referência de falta 92. Também se encontra coordenado para faltas ocorridas em barras a jusante da barra de referência 92 até o limite mínimo de 330,18 A, onde apresentam maior comprimento elétrico das linhas e, conseqüentemente, correntes de falta menores.

Pelo coordenograma da função de neutro (b), pode-se verificar que o OCR 3 estará coordenado para toda a faixa correspondente a área sombreada nos limites de corrente entre 2,6 kA e 10 kA. Coordenando para faltas ocorridas em barras a montante da barra de referência 92 até o limite máximo de 10 kA, onde apresentam menor comprimento elétrico das linhas e, conseqüentemente, correntes de falta maiores.

4.2.2.2 Sistema de proteção com 5 OCRs

Na **Figura 38** tem-se o sistema de proteção com 5 OCRs para o SDEE com as respectivas barras de faltas nas zonas de abrangência de cada proteção.

Figura 38 – SDEE com sistema de proteção de 5 OCRs



Fonte: adaptado (Unesp-Feis-DEE-LaPSEE, 2023)

Na **Tabela 13**, tem-se os ajustes obtidos pelo GRG para os 5 OCRs na função 51F. Pode-se verificar que todos os ajustes respeitam as respectivas restrições. As TCCs são escolhidas da mais rápida para o OCR 5 para as mais lentas para os demais OCRs.

Tabela 13 – Ajustes do sistema de proteção de fase com 5 OCRs obtidos pelo GRG

OCR	$I_{\min}$ (A)	I_{Pkp}^{51} (A)	$I_{\max}$ (A)	$TMS_{\min}$	TMS	$TMS_{\max}$	TCC	C_1	C_2
1	374,1794	467,7233	467,7243	0,05	0,6870	1	VI	13,5	1
2	264,1439	330,1792	330,1799	0,05	0,6393	1	VI	13,5	1
3	157,1890	196,4858	196,4862	0,05	0,6115	1	VI	13,5	1
4	66,0556	82,5687	82,5695	0,05	0,6054	1	VI	13,5	1
5	28,2399	28,2409	35,2999	0,05	0,0500	1	EI	80	2

Fonte: Elaboração do autor

Na **Tabela 14**, tem-se os ajustes obtidos pelo GRG para os 5 OCRs na função 51N. Pode-se verificar que todos os ajustes respeitam as respectivas restrições. As TCCs são escolhidas da mais rápida para o OCR 5 para as mais lentas para os demais OCRs.

Tabela 14 – Ajustes do sistema de proteção de neutro com 5 OCRs obtidos pelo GRG

OCR	$I_{\min}$ (A)	I_{Pkp}^{51} (A)	$I_{\max}$ (A)	$TMS_{\min}$	TMS	$TMS_{\max}$	TCC	C_1	C_2
1	31,1816	93,5449	93,5449	0,05	0,5743	1	SI	0,14	0,02
2	22,0120	66,0360	66,0360	0,05	0,4597	1	SI	0,14	0,02
3	13,0991	39,2972	39,2972	0,05	0,3404	1	SI	0,14	0,02
4	5,5046	16,5139	16,5139	0,05	0,2032	1	SI	0,14	0,02
5	2,3533	2,3578	7,0600	0,05	0,05	1	EI	80	2

Fonte: Elaboração do autor

Na **Tabela 15**, tem-se a coordenação ótima de fase obtida pelo GRG e os tempos de operação otimizado como proteção primária com uma FO de 1,6632 s.

Pode-se verificar que todos os OCRs estão coordenados e suas proteções primárias protegem adequadamente o SDEE.

Tabela 15 – Coordenação do sistema de proteção de fase com 5 OCRs obtidos pelo GRG

<i>Proteção de backup</i>	$t_{R_{bkp}}^{51} (s)$	<i>Proteção primária</i>	$t_{R_{pmr}}^{51} (s)$	<i>Coordenação</i> $\Delta t (s) \geq 0$
		1	0,5582	
1	0,8332	2	0,5332	0
2	0,6695	3	0,3695	0
3	0,5016	4	0,2016	0
4	0,3006	5	0,0006	0

Fonte: Elaboração do autor

Na **Tabela 16**, tem-se a coordenação ótima obtida de neutro pelo GRG e os tempos de operação otimizado como proteção primária com uma FO de 2,6255 s. Pode-se verificar que todos os OCRs estão coordenados e suas proteções primárias protegem adequadamente o SDEE. Verifica-se que o tempo de operação do OCR 1 como proteção primária atingiu o limite considerado seguro para proteção do SDEE em estudo.

Tabela 16 – Coordenação do sistema de proteção de neutro com 5 OCRs obtidos pelo GRG

<i>Proteção de backup</i>	$t_{R_{bkp}}^{51} (s)$	<i>Proteção primária</i>	$t_{R_{pmr}}^{51} (s)$	<i>Coordenação</i> $\Delta t (s) \geq 0$
		1	1,0017	
1	1,0960	2	0,7960	0
2	0,8455	3	0,5455	0
3	0,5823	4	0,2823	0
4	0,3000095	5	9,50E-06	0

Fonte: Elaboração do autor

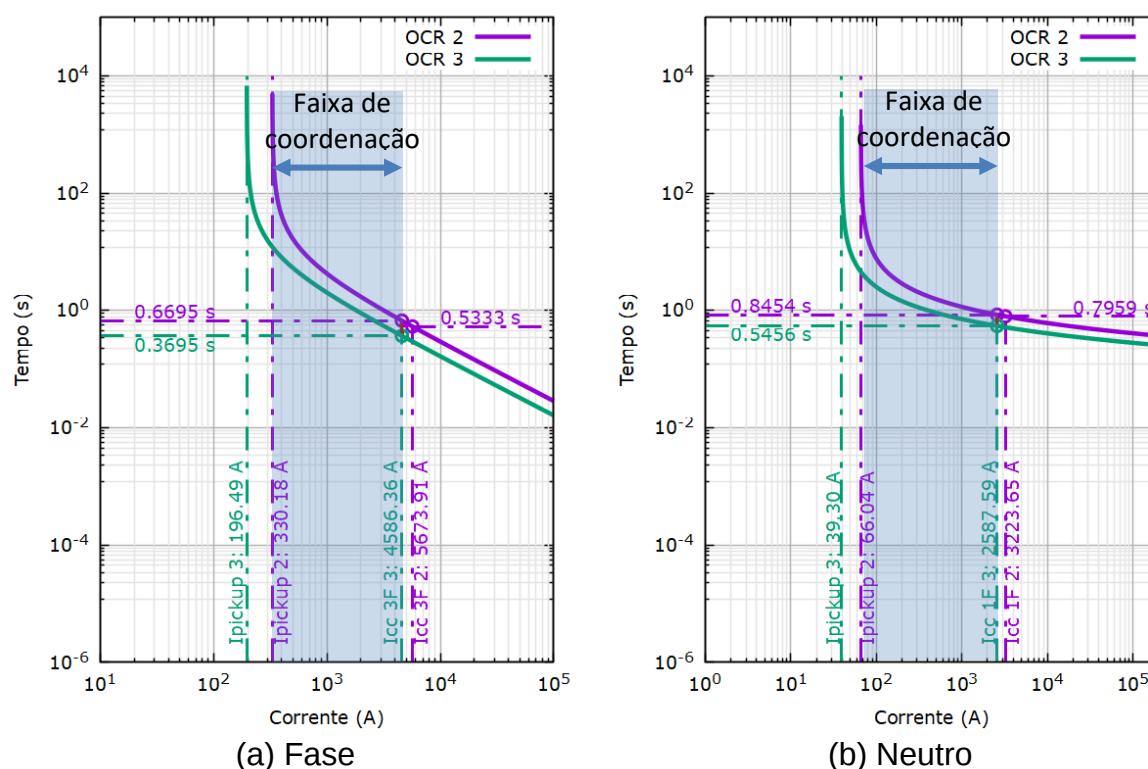
Na **Figura 39** (a) e (b), tem-se os exemplos dos coordenogramas de dois pares de proteção consecutivos nas funções 51F e 51N respectivamente, correspondentes aos valores dos ajustes obtidos e os tempos de operação de backup e primária.

Pode-se verificar pelo coordenograma da função de fase (a), que o OCR 3 estará coordenado para toda a faixa correspondente a área sombreada nos limites de corrente entre 330,18 A e 4,6 kA, coordenando para faltas com impedância de falta maiores ou iguais a zero na barra de referência de falta 92. Também se encontra coordenado para faltas ocorridas em barras a jusante da barra de referência 92 até o

limite mínimo de 330,18 A, onde o comprimento elétrico das linhas é maior e, consequentemente, correntes de falta menores.

Para a função de neutro (b) o OCR 3 estará coordenado para toda a faixa correspondente a área sombreada nos limites de corrente entre 66,04 A e 2,6 kA, coordenando para faltas com impedância de falta maiores ou iguais a zero na barra de referência de falta 92. Também se encontra coordenado para faltas ocorridas em barras a jusante da barra de referência 92 até o limite mínimo de 66,04 A, onde o comprimento elétrico das linhas é maior e, consequentemente, correntes de falta menores.

Figura 39 – Coordenogramas do sistema de proteção com 5 OCRs obtidos pelo GRG

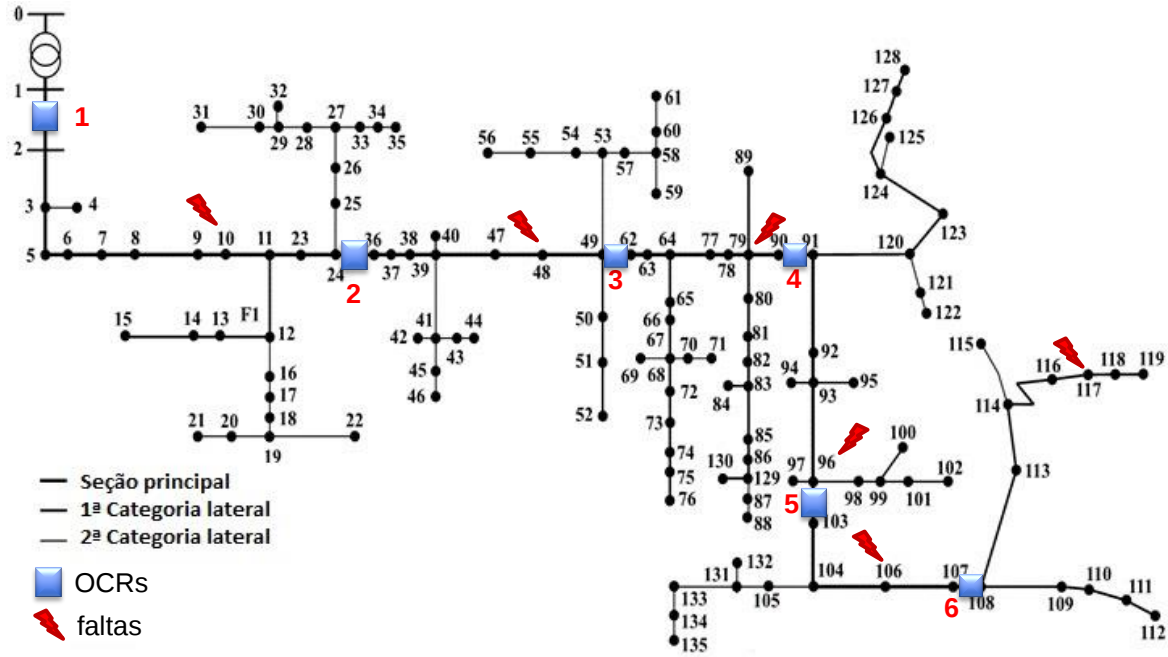


Fonte: Elaboração do autor

4.2.2.3 Sistema de proteção com 6 OCRs

Na **Figura 40** tem-se o sistema de proteção com 6 OCRs para o SDEE em estudo com as respectivas barras de faltas nas zonas de abrangência de cada proteção, com valores de falta relacionados na **Tabela 8**.

Figura 40 – SDEE com sistema de proteção de 6 OCRs



Fonte: adaptado (Unesp-Feis-DEE-LaPSEE, 2023)

Na **Tabela 17**, tem-se os ajustes obtidos pelo GRG para os 6 OCRs na função 51F. Pode-se verificar que todos os ajustes respeitam as respectivas restrições.

Tabela 17 – Ajustes do sistema de proteção de fase com 6 OCRs obtidos pelo GRG

OCR	$I_{\min}$ (A)	I_{Pkp}^{51} (A)	$I_{\max}$ (A)	$TMS_{\min}$	TMS	$TMS_{\max}$	TCC	C_1	C_2
1	374,1794	467,7240	467,7243	0,05	0,9291	1	VI	13,5	1
2	264,1439	330,1799	330,1799	0,05	0,9912	1	VI	13,5	1
3	194,5831	243,2288	243,2289	0,05	0,934	1	VI	13,5	1
4	105,8217	132,2768	132,2771	0,05	0,2386	1	SI	0,14	0,02
5	66,0556	82,5687	82,5695	0,05	0,6054	1	VI	13,5	1
6	28,2399	28,2409	35,2999	0,05	0,05	1	EI	80	2

Fonte: Elaboração do autor

Na **Tabela 18**, tem-se os ajustes obtidos pelo GRG para os seis OCRs na função 51N. Pode-se verificar que todos os ajustes respeitam as respectivas restrições.

Tabela 18 – Ajustes do sistema de proteção de neutro com 6 OCRs obtidos pelo GRG

OCR	$I_{\min}$ (A)	I_{Pkp}^{51} (A)	$I_{\max}$ (A)	$TMS_{\min}$	TMS	$TMS_{\max}$	TCC	C_1	C_2
1	31,1816	93,5449	93,5449	0,05	0,7294	1	SI	0,14	0,02
2	22,0120	66,0360	66,0360	0,05	0,6307	1	SI	0,14	0,02
3	16,2153	48,6458	48,6458	0,05	0,5026	1	SI	0,14	0,02
4	8,8185	26,4554	26,4554	0,05	0,3816	1	SI	0,14	0,02
5	5,5046	16,5139	16,5139	0,05	0,2032	1	SI	0,14	0,02
6	2,3533	2,3578	7,0600	0,05	0,05	1	EI	80	2

Fonte: Elaboração do autor

Na **Tabela 19**, tem-se a coordenação ótima obtida pelo GRG e os tempos de operação ótimos como proteção primária para a função 51F com uma FO de 2,8671 s. Pode-se verificar que os OCRs estão coordenados, protegendo adequadamente o SDEE.

Tabela 19 – Coordenação do sistema de proteção de fase com 6 OCRs obtidos pelo GRG

Proteção de backup	$t_{R\ bkp}^{51}$ (s)	Proteção primária	$t_{R\ pmr}^{51}$ (s)	Coordenação Δt (s) ≥ 0
		1	0,7549	
1	1,1268	2	0,8268	0
2	0,9418	3	0,6418	0
3	0,7647	4	0,4647	0
4	0,4782	5	0,1782	0
5	0,3006	6	0,0006	0

Fonte: Elaboração do autor

Na **Tabela 20**, tem-se a coordenação ótima obtida pelo GRG e os tempos de operação ótimos como proteção primária para a função 51N com uma FO de 4,0351 s e pode-se verificar que os OCRs estão coordenados e portanto seletivos.

Verifica-se que para a proteção de neutro uma quantidade maior de OCRs eleva para acima de 1 s os tempos de operação como proteção primária dos OCRs 1

e 2, mostrando que pode não ser seguro a utilização de mais do que 5 OCRs em série para proteção de neutro do SDEE em estudo.

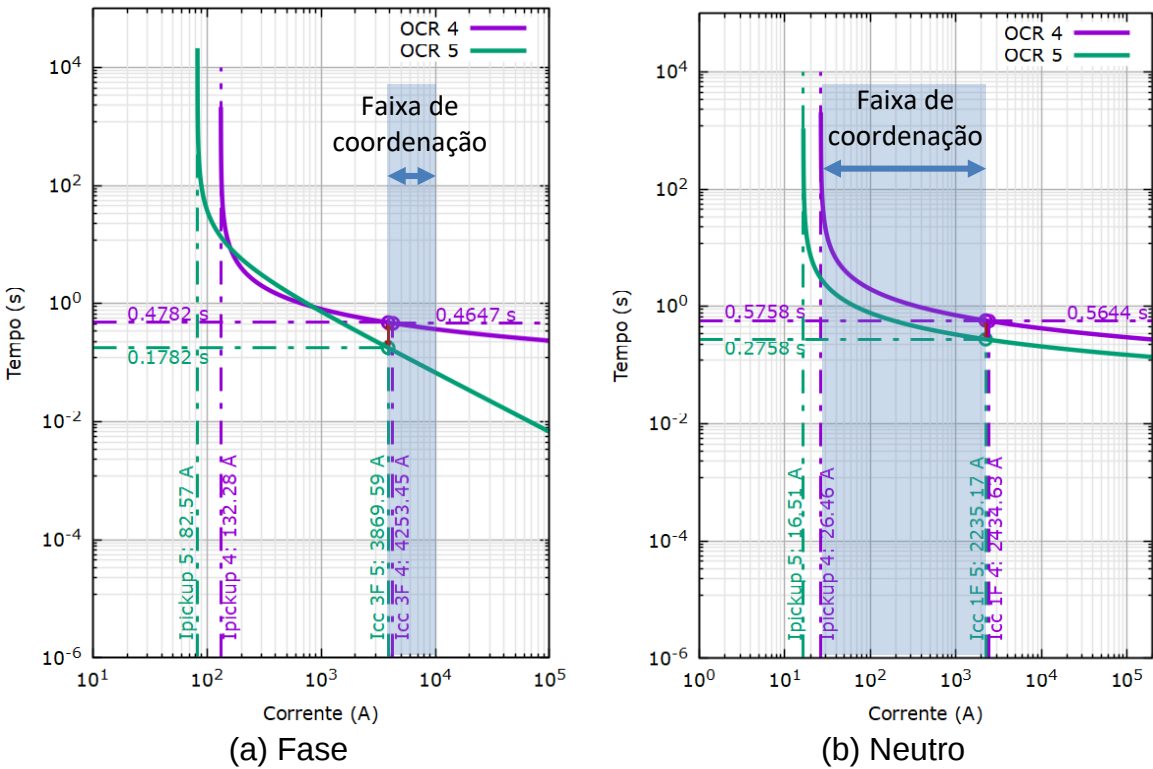
Tabela 20 – Coordenação do sistema de proteção de neutro com 6 OCRs obtidos pelo GRG

<i>Proteção de backup</i>	$t_{R\ bkp}^{51} (s)$	<i>Proteção primária</i>	$t_{R\ pmr}^{51} (s)$	<i>Coordenação</i> $\Delta t (s) \geq 0$
		1	1,2722	
1	1,3920	2	1,0920	0
2	1,1307	3	0,8307	0
3	0,8644	4	0,5644	0
4	0,5758	5	0,2758	0
5	0,3000095	6	9,50E-06	0

Fonte: Elaboração do autor

Na **Figura 41** (a) e (b), tem-se os exemplos dos coordenogramas de dois pares de proteção consecutivos nas funções 51F e 51N respectivamente, correspondentes aos valores dos ajustes e os tempos de operação de backup e primária.

Figura 41 – Coordenogramas do sistema de proteção com 6 OCRs obtidos pelo GRG



Fonte: Elaboração do autor

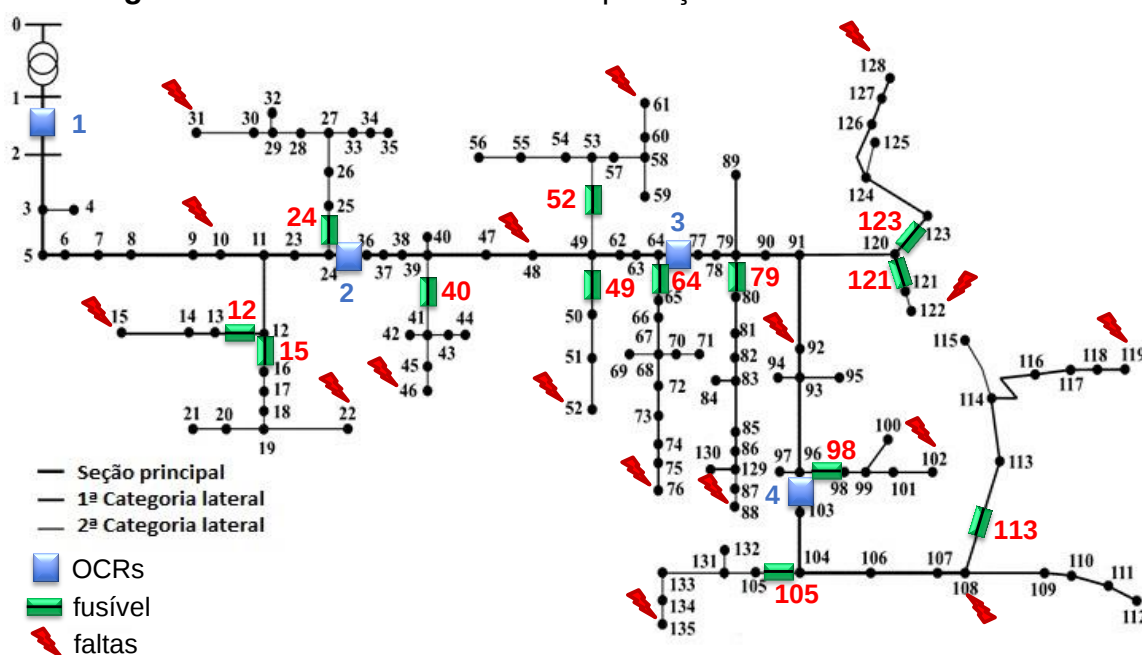
Para a função de fase (a) o OCR 5 estará coordenado para toda a faixa correspondente a área sombreada para correntes entre 3,87 kA e 10 kA, coordenando para faltas que venham ocorrer em barras a montante da barra de referência 106 até o limite máximo de 10 kA, onde o comprimento elétrico das linhas é menor e, conseqüentemente, correntes de falta maiores.

Pode-se verificar pelo coordenograma da função de neutro (b), que o OCR 5 estará coordenado para toda a faixa correspondente a área sombreada nos limites de corrente entre 26,46 A e 2,24 kA, coordenando para faltas com impedância de falta maiores ou iguais a zero na barra de referência de falta 106. Também se encontra coordenado para faltas ocorridas em barras a jusante da barra de referência 106 até o limite mínimo de 26,46 A, onde o comprimento elétrico das linhas é maior e, conseqüentemente, correntes de falta menores.

4.2.2.4 Sistema de proteção com 4 OCRs e 13 fusíveis

Na **Figura 42** tem-se o sistema de proteção com 4 OCRs e 13 fusíveis para o SDEE em estudo com as respectivas barras de faltas nas zonas de abrangência de cada proteção, com valores de falta relacionados na **Tabela 8**.

Figura 42 – SDEE com sistema de proteção de 4 OCRs e 13 fusíveis



Fonte: adaptado (Unesp-Feis-DEE-LaPSEE, 2023)

Na **Tabela 21** tem-se os respectivos ajustes de fase obtidos pelo GRG para os OCRs e fusíveis. Pode-se verificar que todos os ajustes dos OCRs respeitam as respectivas restrições, assim como as correntes nominais dos fusíveis também respeitam as restrições mínimas.

Todas as TCCs encontradas pelo GRG para os OCRs na função 51F são do tipo VI, o GRG leva em consideração o tempo de operação inicial do fusível 105 para iniciar a otimização do tempo de operação do OCR 4, o que eleva os tempos de operação de todos os OCRs na seção principal e conseqüentemente força uma mudança para uma curva mais lenta.

Tabela 21 – Ajustes do sistema de proteção de fase com 4 OCRs e 13 fusíveis obtidos pelo GRG

<i>Prot.</i>	$I_{mín} (A)$	$I_n/I_{p_{kp}}^{51} (A)$	$I_{máx} (A)$	TMS_{min}	TMS	$TMS_{máx}$	<i>TCC</i>	C_1	C_2
1	374,1794	467,7243	467,7243	0,05	0,7440	1	VI	13,5	1
12	10,4139	15	-	-	-	-	K	-	-
15	37,4290	40	-	-	-	-	K	-	-
24	52,6240	65	-	-	-	-	K	-	-
2	264,1439	330,1799	330,1799	0,05	0,7222	1	VI	13,5	1
40	25,2748	40	-	-	-	-	K	-	-
49	19,8754	25	-	-	-	-	K	-	-
52	25,8479	40	-	-	-	-	K	-	-
64	46,1794	65	-	-	-	-	K	-	-
3	157,1890	196,4862	196,4862	0,05	0,7552	1	VI	13,5	1
79	46,3832	65	-	-	-	-	K	-	-
98	14,4633	15	-	-	-	-	K	-	-
4	66,0556	82,5695	82,5695	0,05	0,9469	1	VI	13,5	1
105	27,5291	40	-	-	-	-	K	-	-
113	13,0274	15	-	-	-	-	K	-	-
121	5,6546	6	-	-	-	-	K	-	-
123	12,5412	15	-	-	-	-	K	-	-

Fonte: Elaboração do autor

Na **Tabela 22** tem-se os respectivos ajustes de neutro obtidos pelo GRG para os OCRs e fusíveis. Pode-se verificar que todos os ajustes dos OCRs respeitam as respectivas restrições, assim como as correntes nominais dos fusíveis também respeitam as restrições mínimas.

Na função 51N o GRG encontra TCCs do tipo SI e o efeito do tempo de operação do elo fusível 105 sobre a otimização do OCR 4 é semelhante ao da função 51F. Comparativamente ao sistema de proteção com 4 OCRs pode-se verificar que

as TCCs ficaram mais lentas para todos os OCRs na função 51F, e para a função 51N as TCCs dos OCRs 3 e 4 é que ficaram mais lentas.

Tabela 22 – Ajustes do sistema de proteção de neutro com 4 OCRs e 13 fusíveis obtidos pelo GRG

<i>Prot.</i>	$I_{mín} (A)$	$I_n/I_{p_{kp}}^{51} (A)$	$I_{máx} (A)$	TMS_{min}	TMS	$TMS_{máx}$	<i>TCC</i>	C_1	C_2
1	31,1816	93,5436	93,5449	0,05	0,5950	1	SI	0,14	0,02
12	10,4139	15	-	-	-	-	K	-	-
15	37,4290	40	-	-	-	-	K	-	-
24	52,6239	65	-	-	-	-	K	-	-
2	22,0120	66,0351	66,0360	0,05	0,4826	1	SI	0,14	0,02
40	25,2748	40	-	-	-	-	K	-	-
49	19,8754	25	-	-	-	-	K	-	-
52	25,8479	40	-	-	-	-	K	-	-
64	46,1794	65	-	-	-	-	K	-	-
3	13,0991	39,2961	39,2972	0,05	0,3666	1	SI	0,14	0,02
79	46,3832	65	-	-	-	-	K	-	-
98	14,4633	15	-	-	-	-	K	-	-
4	5,5046	16,5114	16,5139	0,05	0,2337	1	SI	0,14	0,02
105	27,5290	40	-	-	-	-	K	-	-
113	13,0274	15	-	-	-	-	K	-	-
121	5,6546	6	-	-	-	-	K	-	-
123	12,5412	15	-	-	-	-	K	-	-

Fonte: Elaboração do autor

Na **Tabela 23**, tem-se a coordenação ótima obtida pelo GRG e os tempos de operação ótimo como proteção primária para a função 51F com FO de 2,1753 s. Verifica-se que tanto a coordenação entre OCRs quanto OCRs e fusíveis ocorrem de forma satisfatória, protegendo adequadamente o SDEE.

Na **Tabela 24**, tem-se a coordenação ótima obtida pelo GRG e os tempos de operação ótimos como proteção primária para a função 51N com FO de 3,0409 s. Pode-se verificar que tanto a coordenação entre OCRs quanto OCRs e fusíveis ocorrem de forma satisfatória e seletiva.

Verifica-se para proteção de neutro que os tempos de operação dos OCRs são maiores em relação ao sistema de proteção contendo apenas quatro OCRs, devido a presença dos tempos de operação dos fusíveis. Este maior tempo de operação para o OCR 1, torna a proteção menos segura para faltas mais próximas a subestação pois o OCR estará operando no limite de tempo considerado seguro correspondente a 1 s.

Tabela 23 – Coordenação do sistema de proteção de fase com 4 OCRs e 13 fusíveis obtidos pelo GRG

<i>Proteção de backup</i>	$t_{R\ bkp}^{51} (s)$	<i>Proteção primária</i>	$t_{R\ pmr}^{51} (s)$	<i>Coordenação</i> $\Delta t (s) \geq 0$
		1	0,6046	
1	1,0048	12	0,0136	0,69128
1	0,8834	15	0,0146	0,56881
1	1,0403	24	0,0175	0,72284
1	0,9024	2	0,6024	0
2	0,6389	40	0,0148	0,32405
2	0,7013	49	0,0139	0,38738
2	0,7670	52	0,0154	0,45166
2	0,7881	64	0,0187	0,46941
2	0,7563	3	0,4563	0
3	0,5117	79	0,0197	0,192
3	0,5721	98	0,0137	0,25837
3	0,6112	4	0,3112	0
3	0,5381	121	0,0135	0,22469
3	0,5171	123	0,0136	0,20352
4	0,3170	105	0,0170	0
4	0,4956	113	0,0147	0,18084

Fonte: Elaboração do autor

Tabela 24 – Coordenação do sistema de proteção de neutro com 4 OCRs e 13 fusíveis obtidos pelo GRG

<i>Proteção de backup</i>	$t_{R\ bkp}^{51} (s)$	<i>Proteção primária</i>	$t_{R\ pmr}^{51} (s)$	<i>Coordenação</i> $\Delta t (s) \geq 0$
		1	1,0378	
1	1,1399	12	0,0139	0,82595
1	1,1147	15	0,0170	0,79777
1	1,1579	24	0,0255	0,83235
1	1,1355	2	0,8355	0
2	0,8443	40	0,0179	0,52637
2	0,8720	49	0,0157	0,55626
2	0,8783	52	0,0196	0,55865
2	0,8905	64	0,0302	0,56037
2	0,8876	3	0,5876	0
3	0,6005	79	0,0328	0,26768
3	0,6145	98	0,0148	0,29965
3	0,6229	4	0,3229	0
3	0,6065	121	0,0135	0,29297
3	0,6027	123	0,0146	0,28814
4	0,3252	105	0,0252	0
4	0,3492	113	0,0164	0,03282

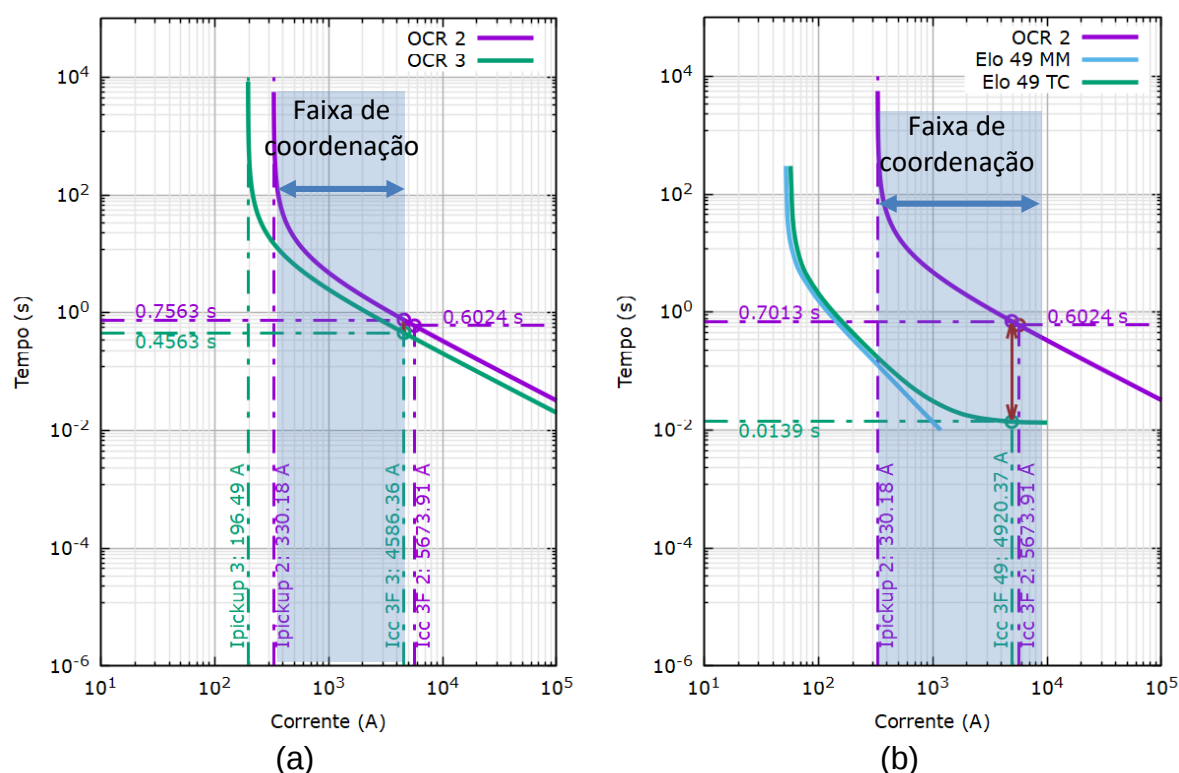
Fonte: Elaboração do autor

Na **Figura 43**, tem-se os exemplos dos coordenogramas de fase do par de OCRs (a) e par OCR e fusível (b) correspondentes aos valores dos ajustes e tempos de operação de backup e primária obtidos.

Pode-se verificar pelo coordenograma (a) que o OCR 3 estará coordenado com o OCR 2 para toda a faixa correspondente a área sombreada entre 330,18 A e 4,6 kA, coordenando para faltas com impedância de falta maiores ou iguais a zero na barra de referência de falta 92. Também se encontra coordenado para faltas ocorridas em barras a jusante da barra de referência 92 até o limite mínimo de 330,18 A, onde os comprimentos elétricos das linhas são maiores e, consequentemente, correntes de falta menores.

Para o coordenograma (b) o fusível 49 estará coordenado para toda a faixa correspondente a área sombreada entre 330,18 A e 9 kA, coordenando para faltas com impedância de falta maiores ou iguais a zero na barra de referência de falta 52. Também se encontra coordenado para faltas ocorridas a montante da barra de referência 52 até o limite máximo de 9 kA, com comprimentos elétricos menores e, consequentemente, correntes de faltas maiores.

Figura 43 – Coordenogramas do sistema de proteção de fase com 4 OCRs e 13 fusíveis obtidos pelo GRG



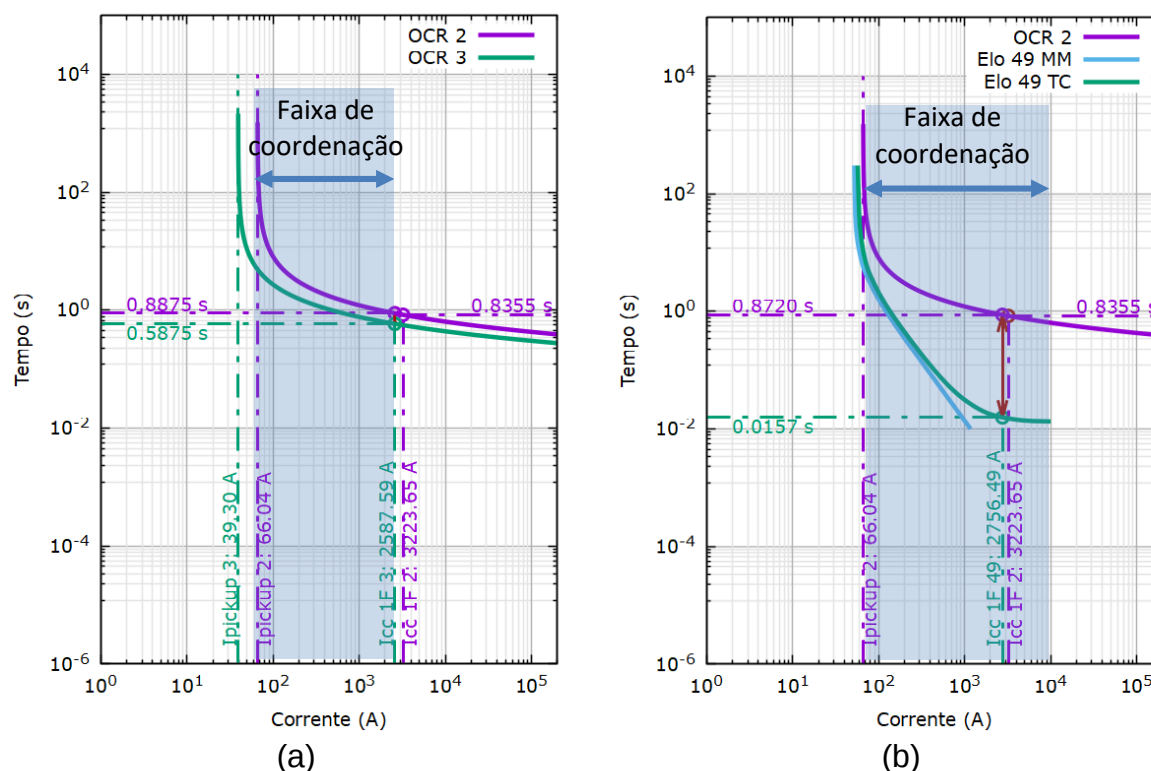
Fonte: Elaboração do autor

Na **Figura 44**, tem-se os exemplos dos coordenogramas de neutro do par de OCRs (a) e par OCR e fusível (b) correspondentes aos valores dos ajustes e os tempos de operação de backup e primária obtidos pelo GRG.

Pode-se verificar pelo coordenograma (a) que o OCR 3 estará coordenado com o OCR 2 para toda a faixa correspondente a área sombreada entre 66,04 A e 2,6 kA, coordenando para faltas com impedância de falta maiores ou iguais a zero na barra de referência de falta 92. Também se encontra coordenado para faltas ocorridas em barras a jusante da barra de referência 92 até o limite mínimo de 66,04 A, onde os comprimentos elétricos das linhas são maiores e, consequentemente, correntes de falta menores.

Para o coordenograma (b) o fusível 49 estará coordenado para toda a faixa correspondente a área sombreada entre 66,04 A e 9 kA, coordenando para faltas com impedância de falta maiores ou iguais a zero na barra de referência de falta 52. Também se encontra coordenado para faltas ocorridas a montante da barra de referência 52 até o limite máximo de 9 kA, com comprimento elétrico menores, e consequentemente, correntes de falta maiores.

Figura 44 – Coordenogramas do sistema de proteção de neutro com 4 OCRs e 13 fusíveis obtidos pelo GRG



Fonte: Elaboração do autor

Com todas as análises de desempenho e coordenação obtidas para o GRG, tem-se condições para uma análise comparativa com um algoritmo que possa fornecer resultados dentro das mesmas restrições e condições de testes, de modo a validar os resultados bem como se efetuar uma análise estatística detalhada. Com este propósito na próxima seção são realizadas análises comparativas com a MH do tipo evolutiva AG.

4.3 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O GRG E AG

Nesta seção é feita uma análise comparativa entre os resultados das FOs, tempos de operação, correntes de *pick-up*, TMS e desempenho computacional obtidas pelo GRG e AG e uma análise estatística é feita entre seus resultados. Obteve-se do AG entre 30 e 100 amostras factíveis e os resultados foram comparados com os obtidos na seção 4.2.2, nas funções 51F e 51N. Para o sistema de proteção com 4 OCRs foram testadas todas as populações e gerações da **Tabela 7** e para os demais sistemas de proteção foram considerados duas populações/gerações.

4.3.1 Sistema de proteção com 4 OCRs

Pelo AG obteve-se nas funções 51F e 51N 100 amostras factíveis para todas as populações e gerações testadas. Na **Tabela 25** são apresentados os dados comparativos entre o GRG e o AG para os menores FOs médios e as FOs mínimas e máximas, correspondendo as sequencias de TCCs VI, EI, EI e EI para a função 51F e TCCs SI, SI, VI e EI para a função 51N correspondentes aos OCRs 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

Pode-se verificar que a diferença percentual dos valores médios das FOs do AG em relação ao GRG estão entre 18% e 23% para a função 51F e entre 0,8% e 3,5% para a função 51N, ou seja, para a função 51N as diferenças percentuais são menores pois a sequência de TCCs encontradas pelo AG são as mesmas encontradas pelo GRG o que não ocorre com a função 51F que possui a TCC do OCR 1 mais lenta.

Pelos resultados pode-se considerar uma solução minimamente aceitável com o menor tempo de execução e desvio padrão com precisão de 10^{-3} a solução correspondente a uma população de 300 indivíduos e 320 gerações. Para dados com

alta precisão nas amostras e com o menor desvio padrão, a solução correspondente a uma população de 2400 indivíduos e 1280 gerações deve ser utilizada. Portanto para os demais sistemas as análises comparativas são concentradas nestas duas populações/gerações.

Tabela 25 – Comparativos das FOs com 4 OCRs

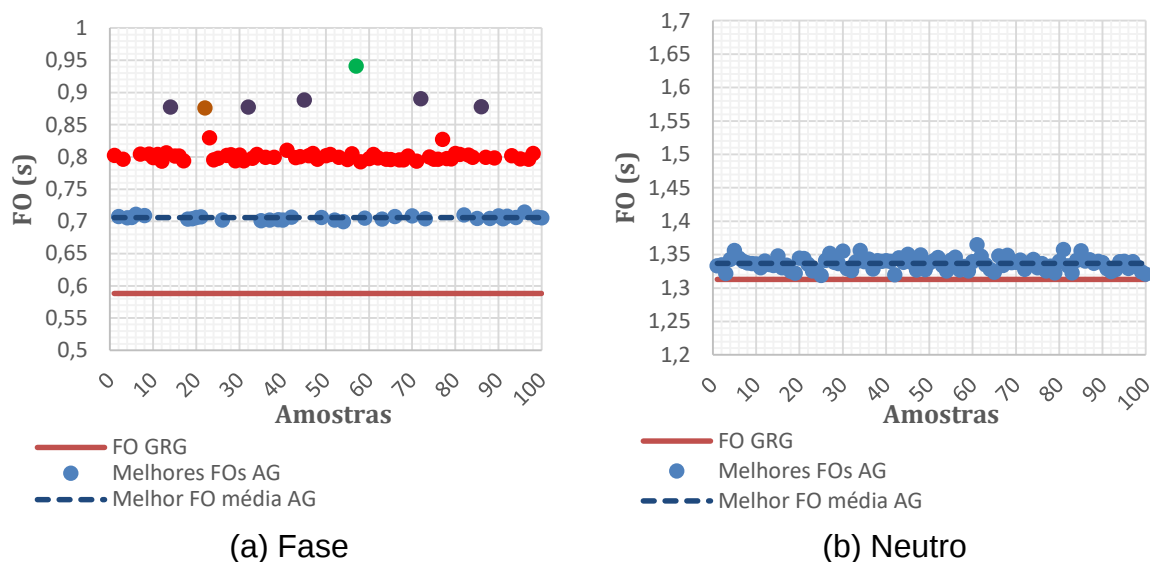
População/ Geração	Total de amostras	GRG	AG						
		FO (s)	FO média (s)	Dif. (%)	FO mínima (s)	Dif. (%)	FO máxima (s)	Dif. (%)	Desvio padrão (s)
F									
150/ 320	13		0,7235	23,00	0,6983	18,72	0,7527	27,97	0,0174
300/ 320	33		0,7056	19,96	0,6996	18,93	0,7144	21,45	0,0031
600/ 320	33		0,7026	19,45	0,6991	18,85	0,7088	20,50	0,0024
600/ 640	41	0,5882	0,7015	19,27	0,6988	18,80	0,7048	19,82	0,0016
1200/ 640	37		0,6999	18,99	0,6975	18,58	0,7039	19,67	0,0012
1200/ 1280	35		0,6995	18,92	0,6979	18,65	0,7008	19,14	0,0007
2400/ 1280	59		0,6988	18,80	0,6972	18,53	0,6999	18,99	0,0006
N									
150/ 320	91		1,3553	3,22	1,3265	1,03	1,4472	10,22	0,0209
300/ 320	100		1,3368	1,81	1,3187	0,43	1,3649	3,95	0,0094
600/ 320	98		1,3324	1,48	1,3147	0,13	1,3486	2,71	0,0069
600/ 640	100	1,3130	1,3319	1,44	1,3155	0,19	1,3550	3,20	0,0073
1200/ 640	100		1,3274	1,10	1,3167	0,28	1,3418	2,19	0,0052
1200/ 1280	100		1,3264	1,02	1,3165	0,27	1,3401	2,06	0,0055
2400/ 1280	100		1,3247	0,89	1,3161	0,24	1,3357	1,73	0,0047

Fonte: Elaboração do autor

Na **Figura 45** tem-se graficamente o comparativo entre os melhores valores apresentados pelo AG para a solução minimamente aceitável de população/geração

de 300/320 com FOs médios de 0,7056 s e 1,3368 s nas funções 51F e 51N respectivamente.

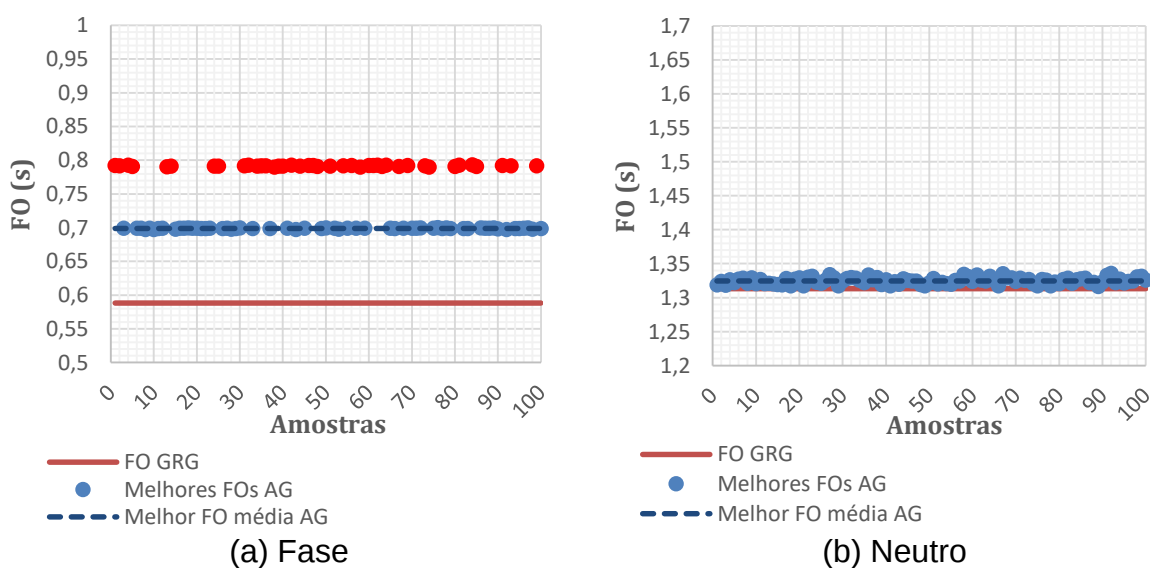
Figura 45 – Comparativos para Pop/Ger de 300/320 com 4 OCRs



Fonte: Elaboração do autor

Na **Figura 46** tem-se graficamente o comparativo entre os melhores valores apresentados pelo AG para a solução de menores desvios padrões de população/geração de 2400/1280 com FOs médios de 0,6988 s e 1,3247 s nas funções 51F e 51N respectivamente.

Figura 46 – Comparativos para Pop/Ger de 2400/1280 com 4 OCRs



Fonte: Elaboração do autor

As FOs mínimas encontradas pelo AG são de 0,6972 s e 1,3147 s com diferenças percentuais para o GRG de 18,53% e 0,13% para as funções 51F e 51N respectivamente e em todas as análises comparativas nenhum FO médio ou mínimo são menores que as FOs encontradas pelo GRG.

Na **Tabela 26**, tem-se os ajustes obtidos pelo AG para os quatro OCRs para as FOs mínimas.

Tabela 26 – Ajustes do sistema de proteção pelo AG com 4 OCRs

OCR	$I_{\min} (A)$	$I_{Pkp}^{51} (A)$	$I_{\max} (A)$	$TMS_{\min}$	TMS	$TMS_{\max}$	TCC	C_1	C_2
F									
1	374,1794	452,2116	467,7243	0,05	0,4685	1	VI	13,5	1
2	264,1439	322,3129	330,1799	0,05	0,9551	1	EI	80	2
3	157,189	170,8209	196,4862	0,05	0,7130	1	EI	80	2
4	66,0556	66,1973	82,5695	0,05	0,0505	1	EI	80	2
N									
1	31,1816	92,5580	93,5449	0,05	0,3945	1	SI	0,14	0,02
2	22,0112	65,2105	66,0360	0,05	0,2610	1	SI	0,14	0,02
3	13,0991	38,6271	39,2972	0,05	0,8707	1	VI	13,5	1
4	5,5046	5,6900	16,5139	0,05	0,0951	1	EI	80	2

Fonte: Elaboração do autor

Na **Tabela 27**, tem-se a coordenação otimizada obtida pelo AG e os tempos de operação otimizado como proteção primária para as funções 51F e 51N. Pode-se verificar que todos os OCRs estão coordenados e suas proteções primárias protegem adequadamente o SDEE.

Tabela 27 – Coordenação do sistema de proteção pelo AG com 4 OCRs

Proteção de backup	$t_{R\ bkp}^{51} (s)$	Proteção primária	$t_{R\ pmr}^{51} (s)$	Coordenação $\Delta t (s) \geq 0$
F				
		1	0,3674	
1	0,5478	2	0,2474	0,0004
2	0,3792	3	0,0792	0,0000
3	0,3032	4	0,0032	0,0000
N				
		1	0,6861	
1	0,7504	2	0,4504	0,0000
2	0,4783	3	0,1781	0,0002
3	0,3005	4	0,0001	0,0004

Fonte: Elaboração do autor

Na **Tabela 28** tem-se as diferenças percentuais entre os principais valores obtidos na coordenação. Pode-se verificar que na função 51F as diferenças percentuais mais significativas estão no tempo de operação primária do OCR 1, na corrente de *pick-up* do OCR 3 e nos TMS dos OCRs 1 e 3 que ultrapassam os 10% chegando até aproximadamente 53%. Na função 51N a diferença percentual mais significativa se encontra no TMS do OCR 4 com aproximadamente 90%.

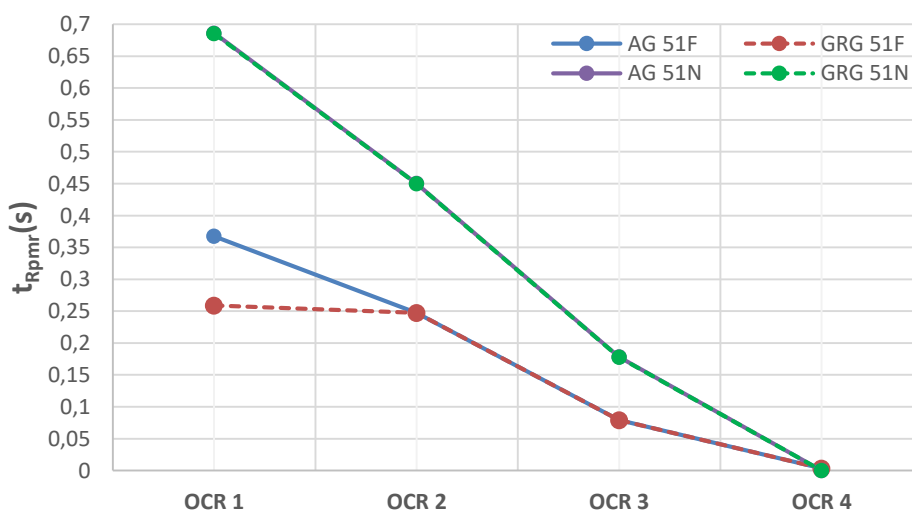
Na **Figura 47** pode-se verificar que os tempos de operação entre o AG e o GRG para a função 51N são muito próximos devido as diferenças percentuais estarem abaixo de 0,2%.

Tabela 28 – Comparativos dos tempos de operação, correntes de *pick-up* e TMS com 4 OCRs

OCR	GRG	AG	Dif. (%)	GRG	AG	Dif. (%)	GRG	AG	Dif. (%)
	t_R^{51} <i>pmr</i> (s)			I_{Pkp}^{51} (A)			<i>TMS</i>		
F									
1	0,2587	0,3674	42,02	467,72	452,21	3,32	0,9999	0,4685	53,15
2	0,2473	0,2474	0,04	330,18	322,31	2,38	0,9096	0,9551	5,00
3	0,0791	0,0792	0,13	196,49	170,82	13,06	0,5379	0,7130	32,55
4	0,0032	0,0032	0,00	66,06	66,20	0,21	0,0500	0,0505	1,00
N									
1	0,6853	0,6861	0,12	93,54	92,56	1,05	0,3929	0,3945	0,41
2	0,4498	0,4504	0,13	66,04	65,21	1,25	0,2598	0,2610	0,46
3	0,1778	0,1781	0,17	39,30	38,63	1,71	0,8542	0,8707	1,93
4	0,0001	0,0001	0,00	5,51	5,69	3,34	0,0500	0,0951	90,20

Fonte: Elaboração do autor

Figura 47 – Comparativos dos tempos de operação com 4 OCRs



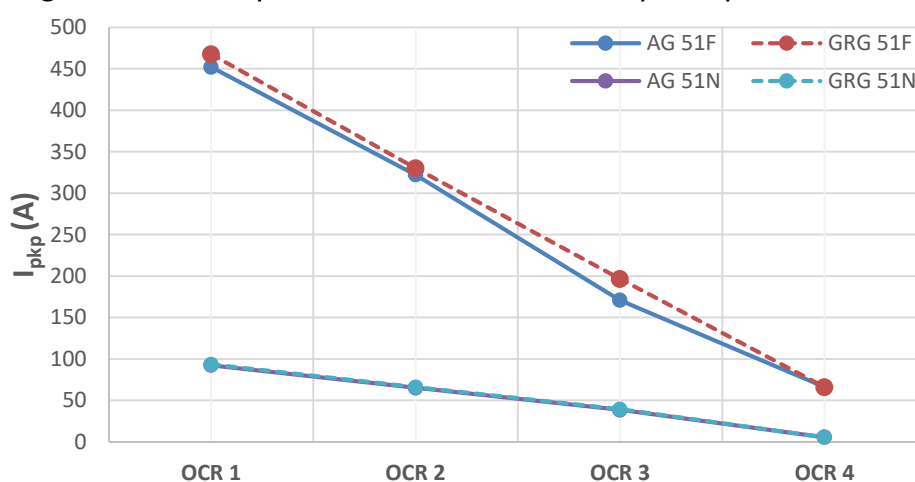
Fonte: Elaboração do autor

Para a função 51F eles são praticamente coincidentes com diferenças percentuais abaixo de 0,15%, com exceção do OCR1 com diferença percentual de aproximadamente 42% devido a mudança da TCC.

Na **Figura 48** pode-se verificar que as correntes de *pick-up* 51F possuem uma diferença percentual abaixo dos 4% com exceção do OCR 3 com aproximadamente 13% e para as correntes de *pick-up* 51N abaixo de 4%.

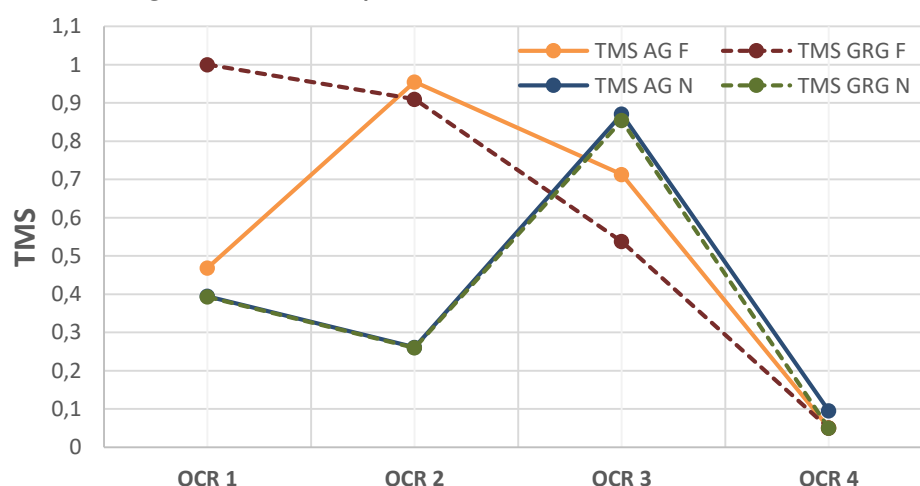
Na **Figura 49** tem-se a diferença percentual dos TMS onde pode-se verificar que para a função 51F elas são significativas, superando os 30% em metade dos OCRs do sistema de proteção. Na função 51N os TMS são muito próximos com diferenças percentuais abaixo de 2%, com exceção do OCR 4 com aproximadamente 90%.

Figura 48 – Comparativos das correntes de *pick-up* com 4 OCRs



Fonte: Elaboração do autor

Figura 49 – Comparativos das TMS com 4 OCRs



Fonte: Elaboração do autor

4.3.2 Sistema de proteção com 5 OCRs

Pelo AG obteve-se na função 51F 100 e 36 amostras factíveis para população/gerações de 300/320 e 2400/1280 respectivamente e na função 51N 30 e 35 amostras factíveis para população/gerações de 300/320 e 2400/1280 respectivamente.

Na **Tabela 29** são apresentados os dados comparativos entre o GRG e o AG para os menores FOs médios e as FOs mínimas e máximas, correspondendo as sequencias de TCCs VI, VI, VI, VI e EI para a função 51F e TCCs SI, SI, SI, SI e EI para a função 51N correspondentes aos OCRs 1, 2, 3, 4 e 5 respectivamente.

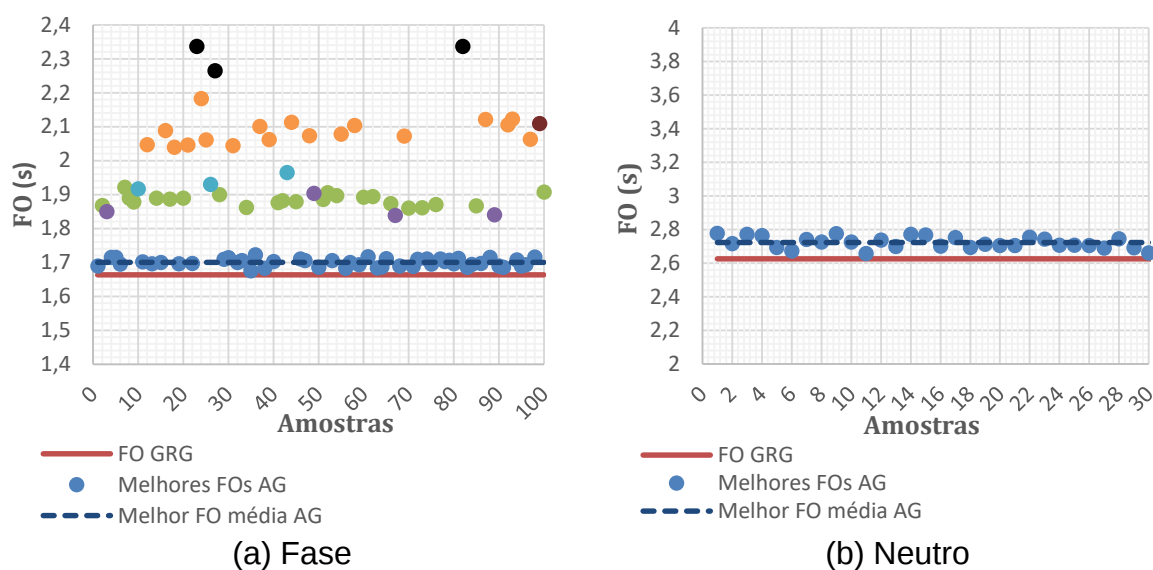
Pode-se verificar que a diferença percentual dos valores médios das FOs do AG em relação ao GRG são 0,57% e 2,19% para a função 51F e 1,48% e 3,69% para a função 51N, ou seja, a sequência de TCCs encontradas pelo AG são as mesmas encontradas pelo GRG para ambas as funções permitindo que os valores das amostras estejam relativamente muito próximos da FO do GRG.

Tabela 29 – Comparativos das FOs com 5 OCRs

População/ Geração	Total de amostras	GRG	AG						
		FO (s)	FO média (s)	Dif. (%)	FO mínima (s)	Dif. (%)	FO máxima (s)	Dif. (%)	Desvio padrão (s)
F									
300/ 320	48	1,6632	1,6997	2,19	1,6756	0,74	1,7223	3,55	0,0113
2400/ 1280	36		1,6728	0,57	1,6693	0,37	1,6762	0,78	0,0017
N									
300/ 320	30	2,6255	2,7224	3,69	2,6578	1,23	2,7780	5,81	0,0345
2400/ 1280	35		2,6644	1,48	2,6413	0,60	2,6865	2,32	0,0112

Fonte: Elaboração do autor

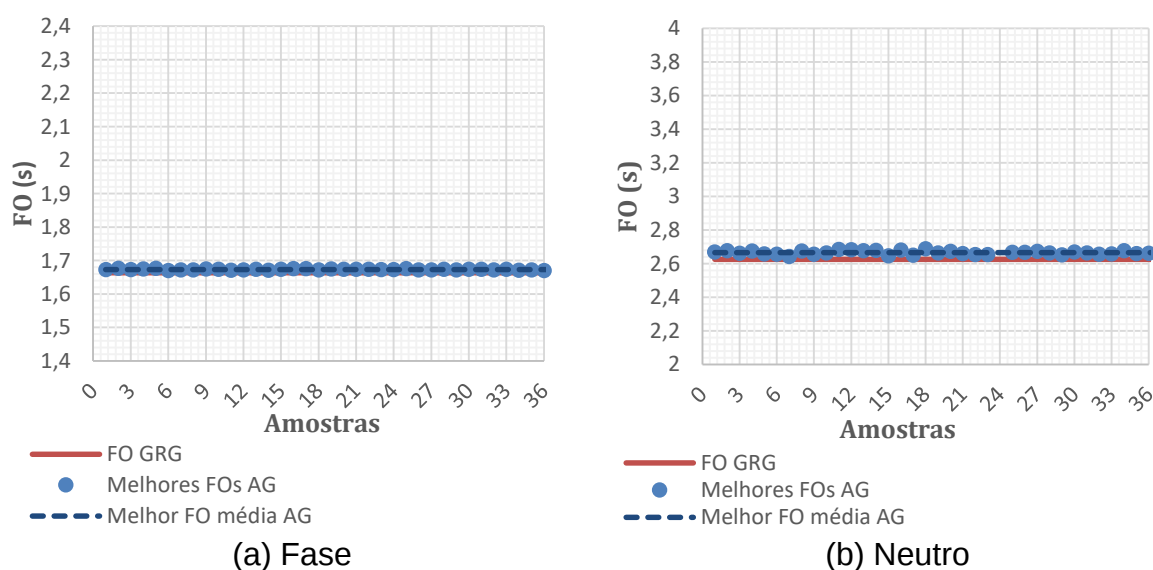
Na **Figura 50** tem-se graficamente o comparativo entre os melhores valores apresentados pelo AG para a solução minimamente aceitável com FOs médios de 1,6997 s e 2,7224 s para as funções 51F e 51N respectivamente.

Figura 50 – Comparativos para Pop/Ger de 300/320 com 5 OCRs

Fonte: Elaboração do autor

Na **Figura 51** tem-se graficamente o comparativo entre os melhores valores apresentados pelo AG para a solução de menores desvios padrões com FOs médios de 1,6728 s e 2,6644 s para as funções 51F e 51N respectivamente.

As FOs mínimas encontradas pelo AG são de 1,6693 s e 2,6413 s nas funções 51F e 51N respectivamente, com diferenças percentuais de 0,37% e 0,6% para as funções 51F e 51N respectivamente e em todas as análises comparativas nenhum FO médio e mínimos são menores que as FOs encontradas pelo GRG.

Figura 51 – Comparativos para Pop/Ger de 2400/1280 com 5 OCRs

Fonte: Elaboração do autor

Na **Tabela 30**, tem-se os ajustes obtidos pelo AG para os cinco OCRs para as FOs mínimas e na **Tabela 31**, tem-se a coordenação otimizada obtida pelo AG e os tempos de operação otimizado como proteção primária para as funções 51F e 51N.

Tabela 30 – Ajustes do sistema de proteção pelo AG com 5 OCRs

OCR	$I_{\min} (A)$	$I_{Pkp}^{51} (A)$	$I_{\max} (A)$	$TMS_{\min}$	TMS	$TMS_{\max}$	TCC	C_1	C_2
F									
1	374,1794	463,5978	467,7243	0,05	0,6960	1	VI	13,5	1
2	264,1439	289,3163	330,1799	0,05	0,7382	1	VI	13,5	1
3	157,1890	157,2654	196,4862	0,05	0,7740	1	VI	13,5	1
4	66,0556	76,2374	82,5695	0,05	0,6580	1	VI	13,5	1
5	28,2399	28,2510	35,2999	0,05	0,0513	1	EI	80	2
N									
1	31,1816	81,2198	93,5449	0,05	0,6012	1	SI	0,14	0,02
2	22,0120	56,8327	66,0360	0,05	0,4808	1	SI	0,14	0,02
3	13,0991	35,9087	39,2972	0,05	0,3493	1	SI	0,14	0,02
4	5,5046	12,5628	16,5139	0,05	0,216	1	SI	0,14	0,02
5	2,3533	2,3829	7,0600	0,05	0,052	1	EI	80	2

Fonte: Elaboração do autor

Pode-se verificar que todos os OCRs estão coordenados e suas proteções primárias protegem adequadamente o SDEE.

Tabela 31 – Coordenação do sistema de proteção pelo AG com 5 OCRs

Proteção de backup	$t_{R\ bkp}^{51} (s)$	Proteção primária	$t_{R\ pmr}^{51} (s)$	Coordenação $\Delta t (s) \geq 0$
F				
		1	0,5603	
1	0,8361	2	0,5355	0,0006
2	0,6710	3	0,3710	0,0000
3	0,5020	4	0,2019	0,0001
4	0,3008	5	0,0006	0,0002
N				
		1	1,0102	
1	1,1018	2	0,8003	0,0014
2	0,8483	3	0,5476	0,0007
3	0,5836	4	0,2832	0,0004
4	0,30002	5	0,00001	0,00001

Fonte: Elaboração do autor

Na **Tabela 32** tem-se as diferenças percentuais entre os principais valores obtidos na coordenação, onde pode-se verificar que na função 51F as diferenças

percentuais mais significativas estão na corrente de *pick-up* dos OCRs 2 e 3 e nos TMS dos OCRs 2 e 3 que ultrapassam os 12% podendo atingir os 27%. Na função 51N as diferenças percentuais mais significativas se encontram na corrente de *pick-up* para os OCRs 1, 2 e 3 que ultrapassam os 13% podendo atingir os 24%.

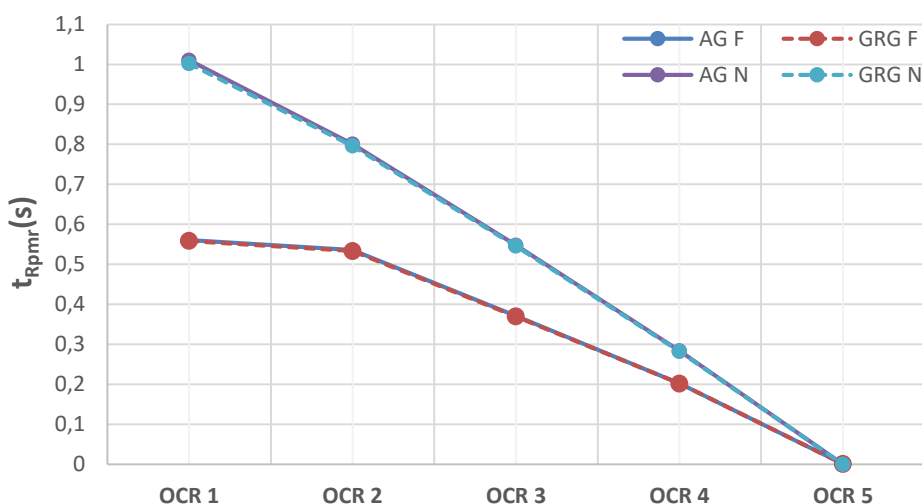
Tabela 32 – Comparativos dos tempos de operação, correntes de *pick-up* e TMS com 5 OCRs

OCR	GRG	AG	Dif. (%)	GRG	AG	Dif. (%)	GRG	AG	Dif. (%)
	t_R^{51}	t_{pmr} (s)		I_{pkp}^{51} (A)	TMS				
F									
1	0,5582	0,5603	0,38	467,72	463,60	0,88	0,6870	0,6960	1,31
2	0,5332	0,5355	0,43	330,18	289,32	12,38	0,6393	0,7382	15,47
3	0,3695	0,3710	0,41	196,49	157,27	19,96	0,6115	0,7740	26,57
4	0,2016	0,2019	0,15	82,57	76,24	7,67	0,6054	0,6580	8,69
5	0,0006	0,0006	0,00	28,24	28,25	0,04	0,0500	0,0513	2,60
N									
1	1,0017	1,0102	0,85	93,54	81,22	13,18	0,5743	0,6012	4,68
2	0,7960	0,8003	0,54	66,04	56,83	13,94	0,4597	0,4808	4,59
3	0,5455	0,5476	0,38	39,30	35,91	8,62	0,3404	0,3493	2,61
4	0,2823	0,2832	0,32	16,51	12,56	23,93	0,2032	0,216	6,30
5	9,5E-6	0,00001	5,26	2,36	2,38	1,06	0,05	0,052	4,00

Fonte: Elaboração do autor

Na **Figura 52** pode-se verificar que os tempos de operação entre o AG e o GRG para 51N e 51F são praticamente coincidentes pois as diferenças percentuais estão abaixo de 0,9% e possuem a mesma sequência de curvas.

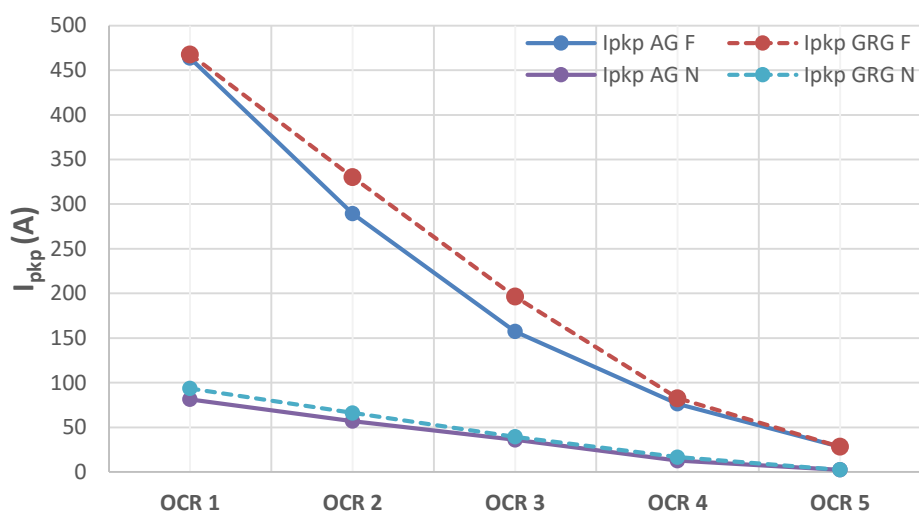
Figura 52 – Comparativos dos tempos de operação com 5 OCRs



Fonte: Elaboração do autor

Na **Figura 53** pode-se verificar que as corrente de *pick-up* na função 51F possuem diferenças percentuais significativas para os OCRs 2 e 3 superando os 12% mas abaixo dos 20%. Para as correntes de *pick-up* na função 51N as diferenças percentuais são mais evidentes para os OCRs 1, 2 e 4, com máxima de aproximadamente 24%.

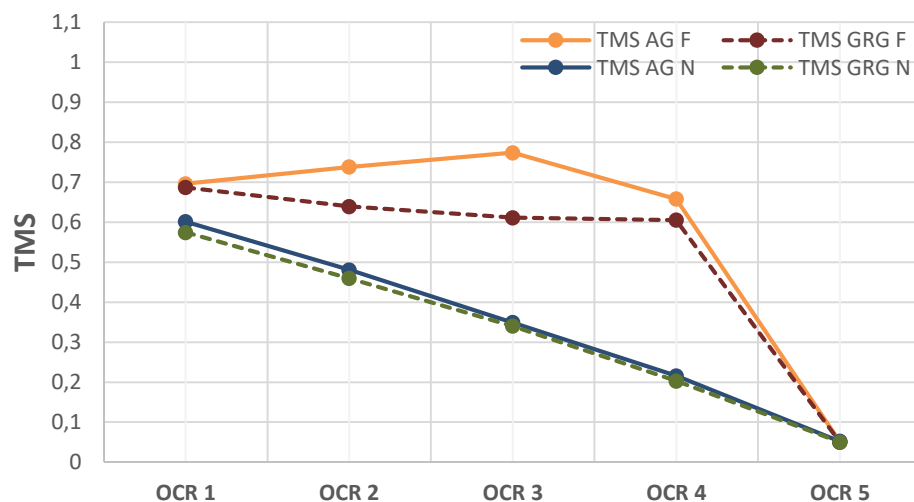
Figura 53 – Comparativos das correntes de *pick-up* com 5 OCRs



Fonte: Elaboração do autor

Na **Figura 54** pode-se verificar que as TMS na função 51N possuem diferenças percentuais abaixo dos 7%, com diferenças mais relevante nos OCRs 1, 2 e 4, e para as funções 51F as diferenças percentuais são significativamente importantes chegando a 27%, com diferenças mais significativas nos OCRs 2 e 3.

Figura 54 – Comparativos das TMS com 5 OCRs



Fonte: Elaboração do autor

4.3.3 Sistema de proteção com 6 OCRs

Pelo AG obteve-se na função 51F 100 e 58 amostras factíveis para populações/gerações de 300/320 e 2400/1280 respectivamente e na função 51N 40 e 100 amostras factíveis para população/gerações de 300/320 e 2400/1280 respectivamente.

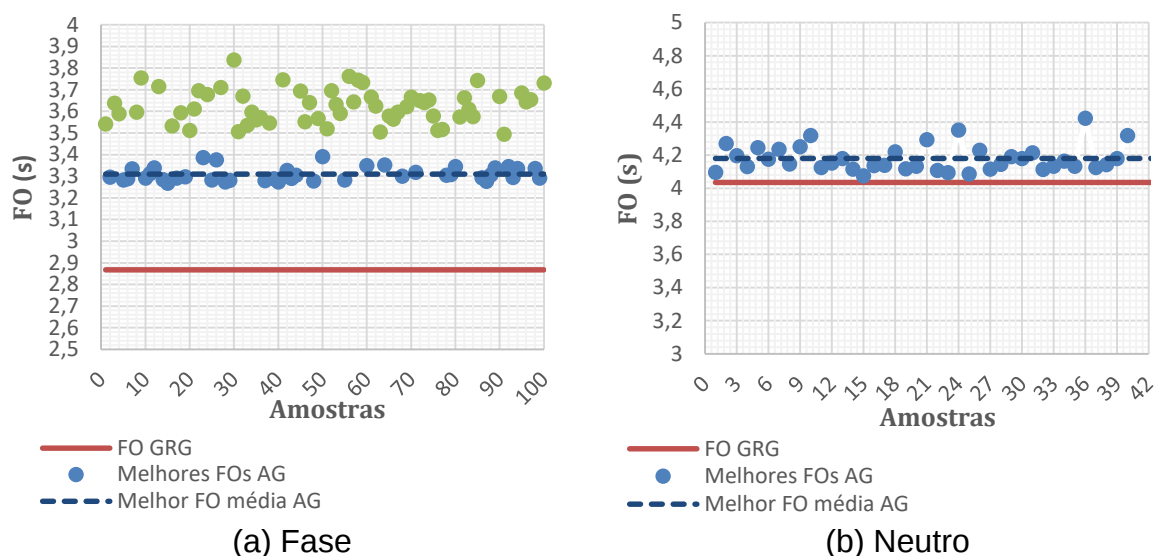
Na **Tabela 33** são apresentados os dados comparativos entre o GRG e o AG para os menores FOs médios com as FOs mínimas e máximas, nas sequencias de TCCs SI, SI, VI, SI, VI e EI para a função 51F e SI, SI, SI, SI, SI e EI para a função 51N, correspondentes aos OCRs 1, 2, 3, 4, 5 e 6 respectivamente.

Tabela 33 – Comparativos das FOs com 6 OCRs

População/ Geração	Total de amostras	GRG	AG						
		FO (s)	FO média (s)	Dif. (%)	FO mínima (s)	Dif. (%)	FO máxima (s)	Dif. (%)	Desvio padrão (s)
F									
300/ 320	59	2,8671	3,3095	15,43	3,2679	13,98	3,3910	18,27	0,0320
2400/ 1280	30		3,2479	13,28	3,2341	12,80	3,2705	14,07	0,0071
N									
300/ 320	40	4,0351	4,1794	3,57	4,0745	0,98	4,4220	9,59	0,0794
2400/ 1280	100		4,0712	0,90	4,0463	0,28	4,1041	1,71	0,0135

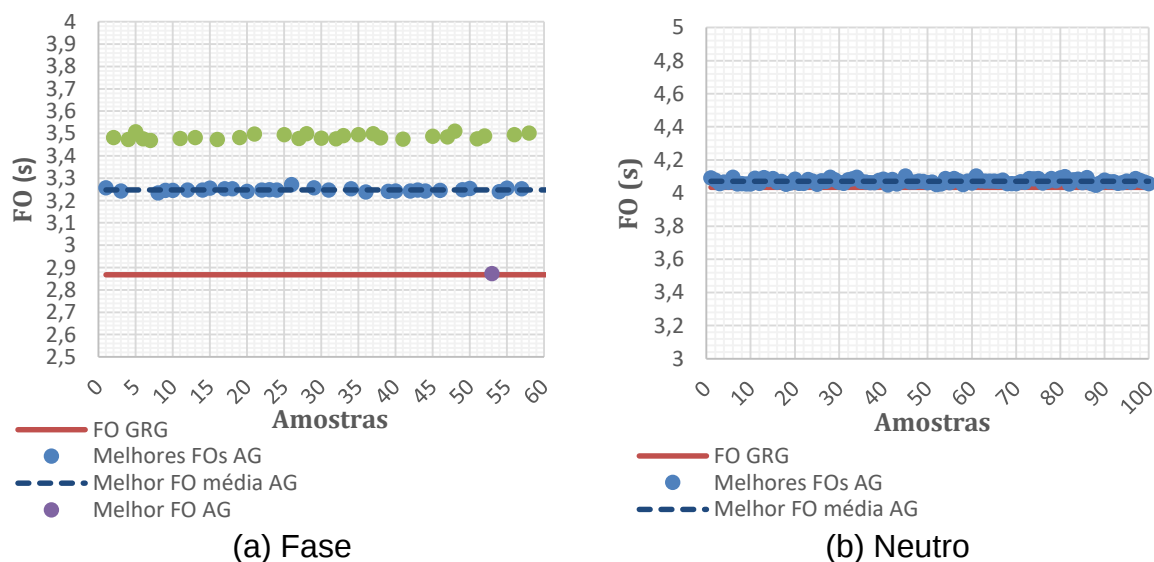
Fonte: Elaboração do autor

Pode-se verificar que as diferenças percentuais dos valores médios das FOs do AG em relação ao GRG são de 13,28% e 15,43% na função 51F e 0,90% e 3,57% na função 51N, ou seja, na função 51N a sequência de TCCs encontradas pelo AG são as mesmas encontradas pelo GRG permitindo que os valores das amostras estejam relativamente muito próximos do GRG, e para a função 51F os valores encontram-se relativamente afastados devido as mudanças de TCCs para os OCRs 1 e 2. Na **Figura 55** tem-se graficamente o comparativo entre os melhores valores apresentados pelo AG para a população/geração de 300/320 com FOs médios de 3,3095 s e 4,1794 s para as funções 51F e 51N, respectivamente.

Figura 55 – Comparativos para Pop/Ger de 300/320 com 6 OCRs

Fonte: Elaboração do autor

Na **Figura 56** tem-se graficamente o comparativo entre os melhores valores apresentados pelo AG para a população/geração de 2400/1280 com FOs médios de 3,2479 s e 4,0712 s para as funções 51F e 51N respectivamente.

Figura 56 – Comparativos para Pop/Ger de 2400/1280 com 6 OCRs

Fonte: Elaboração do autor

As menores FOs encontradas pelo AG são de 2,8724 s e 4,0463 s com diferenças percentuais de 0,18% e 0,28% nas funções 51F e 51N, respectivamente, cuja sequência de TCCs é a mesma encontrada pelo GRG. Em todas as análises comparativas nenhum dos FOs encontrados são menores que as FOs encontradas pelo GRG.

Na **Tabela 34**, tem-se os ajustes obtidos pelo AG para os seis OCRs nas menores FOs e na **Tabela 35**, tem-se a coordenação otimizada obtida pelo AG e os tempos de operação otimizado como proteção primária para as funções 51F e 51N. Pode-se verificar que todos os OCRs estão coordenados e suas proteções primárias protegem adequadamente o SDEE.

Tabela 34 – Ajustes do sistema de proteção pelo AG com 6 OCRs

OCR	$I_{\min} (A)$	$I_{Pkp}^{51} (A)$	$I_{\max} (A)$	$TMS_{\min}$	TMS	$TMS_{\max}$	TCC	C_1	C_2
F									
1	374,1794	442,7696	467,7243	0,05	0,9881	1	VI	13,5	1
2	264,1439	328,3251	330,1799	0,05	0,9992	1	VI	13,5	1
3	194,5831	242,4009	243,2289	0,05	0,9382	1	VI	13,5	1
4	105,8217	130,1043	132,2771	0,05	0,2399	1	SI	0,14	0,02
5	66,0556	81,8247	82,5695	0,05	0,6114	1	VI	13,5	1
6	28,2399	28,2415	35,2999	0,05	0,0504	1	EI	80	2
N									
1	31,1816	76,1900	93,5449	0,05	0,7751	1	SI	0,14	0,02
2	22,0120	65,2320	66,0360	0,05	0,6337	1	SI	0,14	0,02
3	16,2153	48,4373	48,6458	0,05	0,5035	1	SI	0,14	0,02
4	8,8185	26,0487	26,4554	0,05	0,3831	1	SI	0,14	0,02
5	5,5046	16,1748	16,5139	0,05	0,2042	1	SI	0,14	0,02
6	2,3533	2,3617	7,06000	0,05	0,0502	1	EI	80	2

Fonte: Elaboração do autor

Tabela 35 – Coordenação do sistema de proteção pelo AG com 6 OCRs

Proteção de backup	$t_R^{51}{}_{bkp} (s)$	Proteção primária	$t_R^{51}{}_{pmr} (s)$	Coordenação $\Delta t (s) \geq 0$
F				
		1	0,7577	
1	1,1291	2	0,8285	0,0006
2	0,9437	3	0,6424	0,0013
3	0,7654	4	0,4650	0,0004
4	0,4784	5	0,1783	0,0001
5	0,3007	6	0,0006	0,0001
N				
		1	1,2810	
1	1,3952	2	1,0935	0,0017
2	1,1321	3	0,8313	0,0008
3	0,8650	4	0,5646	0,0004
4	0,5760	5	0,2759	0,0001
5	0,30004	6	0,00001	0,00003

Fonte: Elaboração do autor

Na **Tabela 36** tem-se as diferenças percentuais entre os principais valores obtidos na coordenação.

Pode-se verificar que na função 51F as diferenças percentuais mais significativas não ultrapassam os 10%, como nas correntes de *pick-up* que chegam a 5% e nos TMS que podem chegar a 6%.

Na função 51N a diferenças percentual mais significativa se encontra na corrente de *pick-up* que pode chegar a 18% e para os tempos de operação e TMS não ultrapassam os 10%.

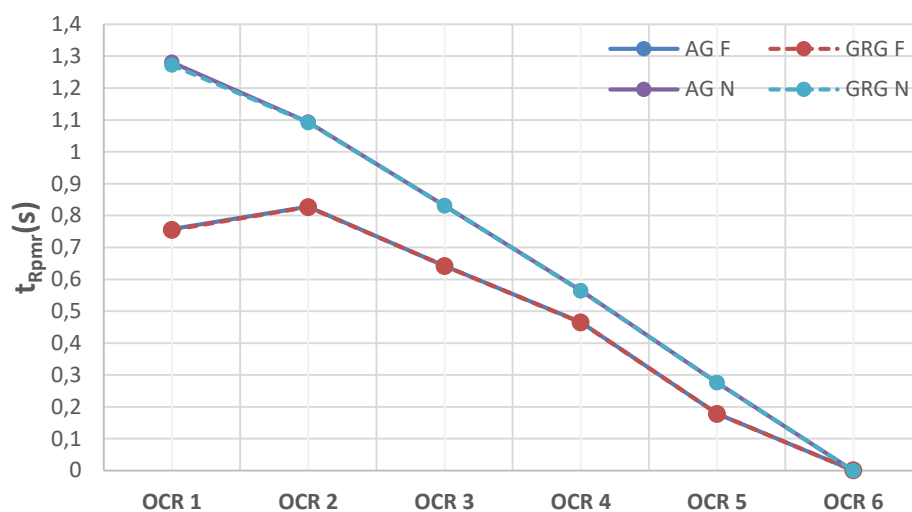
Tabela 36 – Comparativos dos tempos de operação, correntes de *pick-up* e TMS com 6 OCRs

OCR	GRG	AG	Dif. (%)	GRG	AG	Dif. (%)	GRG	AG	Dif. (%)
	t_R^{51} t_{pmr} (s)			I_{Pkp}^{51} (A)			TMS		
F									
1	0,7549	0,7577	0,37	467,72	442,77	5,33	0,9291	0,9881	6,35
2	0,8268	0,8285	0,21	330,18	328,32	0,56	0,9912	0,9992	0,81
3	0,6418	0,6424	0,09	243,23	242,40	0,34	0,934	0,9382	0,45
4	0,4647	0,4650	0,06	132,28	130,10	1,65	0,2386	0,2399	0,54
5	0,1782	0,1783	0,06	82,57	81,82	0,91	0,6054	0,6114	0,99
6	0,0006	0,0006	0,00	28,24	28,24	0,00	0,05	0,0504	0,80
N									
1	1,2722	1,2810	0,69	93,54	76,19	18,55	0,7294	0,7751	6,27
2	1,092	1,0935	0,14	66,04	65,23	1,23	0,6307	0,6337	0,48
3	0,8307	0,8313	0,07	48,65	48,44	0,43	0,5026	0,5035	0,18
4	0,5644	0,5646	0,04	26,46	26,05	1,55	0,3816	0,3831	0,39
5	0,2758	0,2759	0,04	16,51	16,18	2,00	0,2032	0,2042	0,49
6	9,5E-6	0,00001	5,26	2,36	2,36	0,00	0,05	0,0502	0,40

Fonte: Elaboração do autor

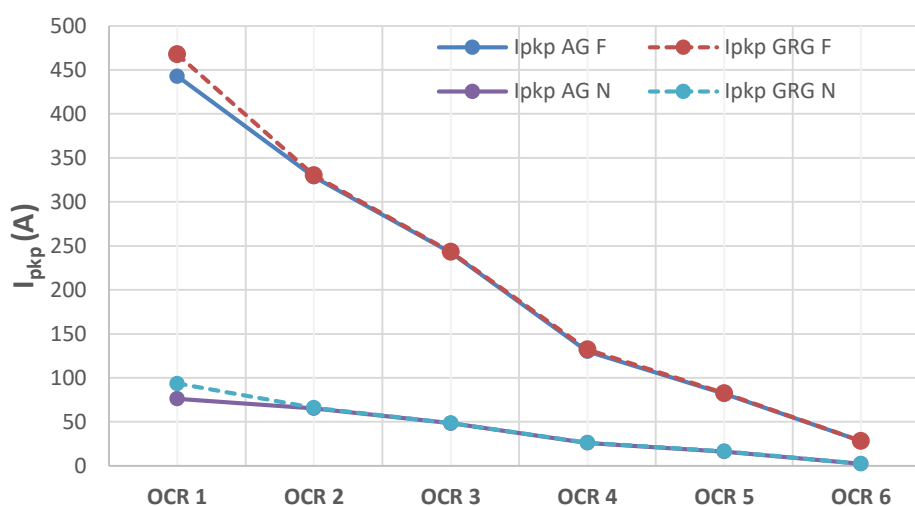
Na **Figura 57** tem-se o comportamento dos tempos de operação nas funções 51F e 51N para os seis OCRs.

Pode-se verificar que os tempos de operação entre o AG e o GRG para as funções 51F e 51N são praticamente idênticas pois as diferenças percentuais estão abaixo de 5% e possuem a mesma sequência de TCCs.

Figura 57 – Comparativos dos tempos de operação com 6 OCRs

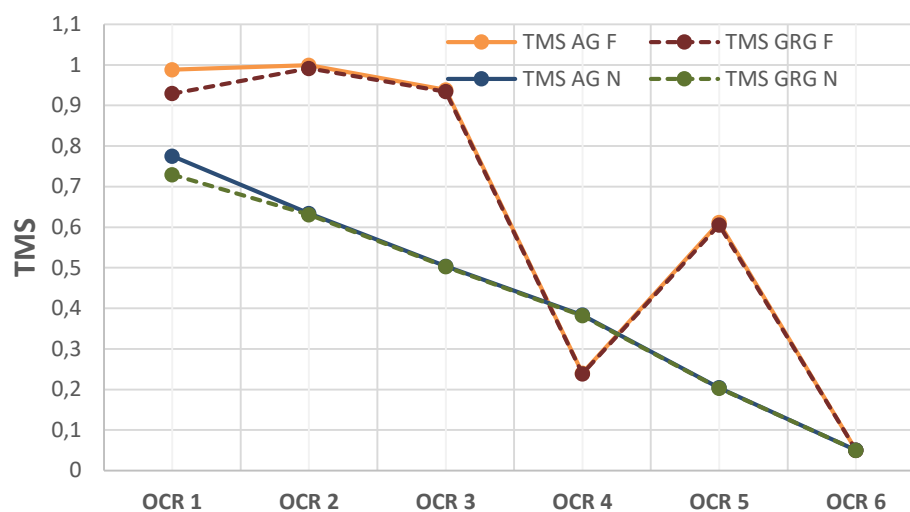
Fonte: Elaboração do autor

Na **Figura 58** tem-se o comportamento das correntes de *pick-up* para as funções 51F e 51N onde na função 51F possui diferença percentual significativa apenas para o OCR 1, mesmo assim abaixo dos 6% e para a função 51N a diferença percentual no OCR 1 atinge os 19% devido ao baixo valor da corrente.

Figura 58 – Comparativos das correntes de *pick-up* com 6 OCRs

Fonte: Elaboração do autor

Na **Figura 59** tem-se o comportamento das TMS para as funções 51F e 51N onde pode-se verificar que as TMS possuem diferenças percentuais mais significativas no OCRs 1 ainda assim menores que 7%, ou seja, devido as sequências de TCCs serem as mesmas, as diferenças percentuais são pouco significativas para as variáveis de corrente de *pick-up*, TMS e tempos de operação.

Figura 59 – Comparativos das TMS com 6 OCRs

Fonte: Elaboração do autor

4.3.4 Sistema de proteção com 4 OCRs e 13 fusíveis

Pelo AG obteve-se nas funções 51F e 51N 100 amostras factíveis para população/gerações de 300/320 e para população/gerações de 2400/1280 obteve-se 40 e 43 amostras factíveis para as funções 51F e 51N respectivamente. Na **Tabela 37** são apresentados os dados comparativos entre o GRG e o AG para os menores FOs médios e as FOs mínimas e máximas.

Tabela 37 – Comparativos das FOs com 4 OCRs e 13 fusíveis

População / Geração	Total de amostras	GRG	AG						
		FO (s)	FO média (s)	Dif. (%)	FO mínima (s)	Dif. (%)	FO máxima (s)	Dif. (%)	Desvio padrão (s)
F									
300/ 320	38	2,1753	2,2111	1,64	2,1862	0,50	2,2611	3,94	0,0140
2400/ 1280	32		2,1843	0,41	2,1807	0,25	2,1889	0,62	0,0021
N									
300/ 320	100	3,0409	3,2044	5,38	3,0796	1,27	3,4425	13,21	0,0739
2400/ 1280	43		3,0881	1,55	3,0675	0,88	3,1189	2,56	0,0111

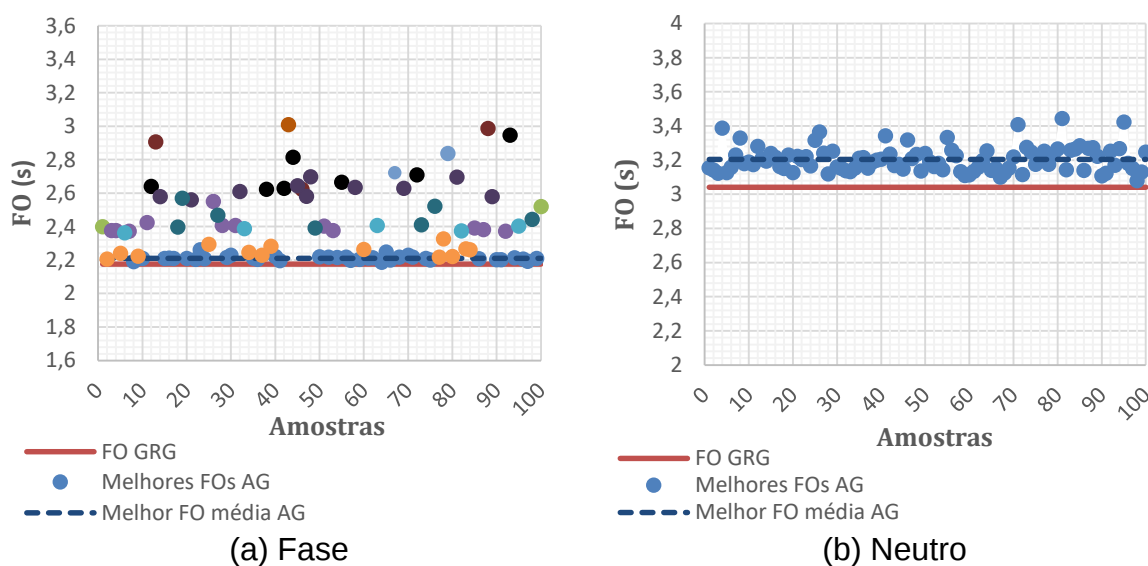
Fonte: Elaboração do autor

Para os menores FOs médios e as FOs mínimas e máximas as sequencias de TCCs dos OCRs para a função 51F são VI, VI, VI e VI e para a função 51N são SI, SI, SI e SI, correspondentes aos OCRs 1, 2, 3 e 4 respectivamente.

Pode-se verificar que as diferenças percentuais dos valores médios das FOs do AG em relação ao GRG são de 0,41% e 1,64% na função 51F e 1,55% e 5,38% na função 51N, ou seja, nas duas funções a sequência de TCCs encontradas pelo AG são as mesmas encontradas pelo GRG permitindo que os valores das amostras estejam relativamente muito próximos do GRG.

Na **Figura 60** tem-se graficamente o comparativo entre os melhores valores apresentados pelo AG para população/geração de 300/320 com FOs médios de 2,2111 s e 3,2044 s para as funções 51F e 51N respectivamente.

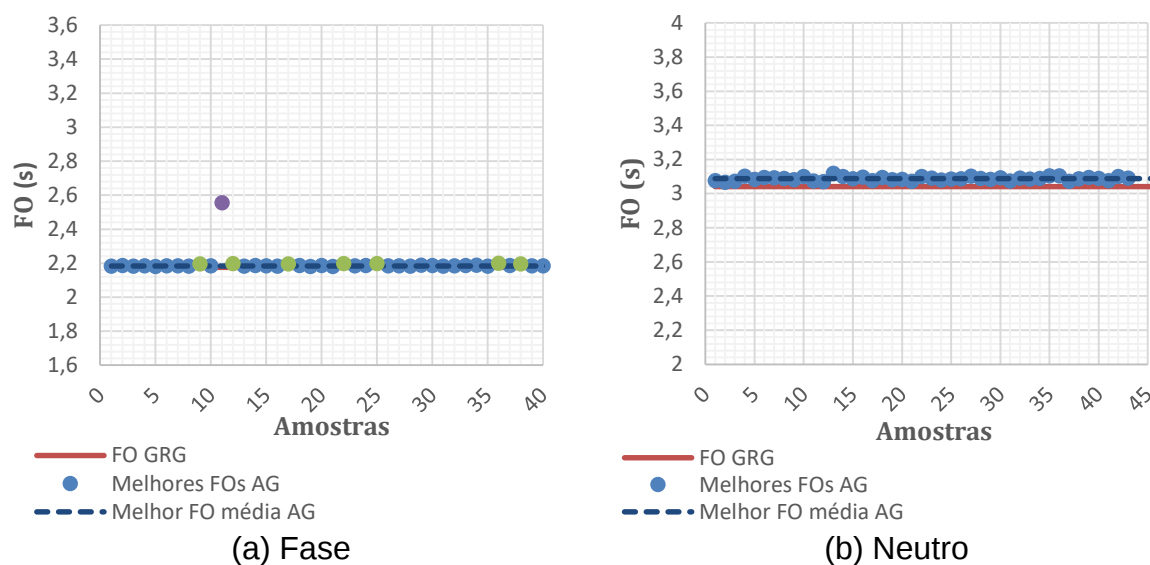
Figura 60 – Comparativos para Pop/Ger de 300/320 com 4 OCRs e 13 fusíveis



Fonte: Elaboração do autor

Na **Figura 61** tem-se graficamente o comparativo entre os melhores valores apresentados pelo AG para população/geração de 2400/1280 com FOs médios de 2,1843 s e 3,0881 s para as funções 51F e 51N respectivamente.

As FOs mínimas encontradas pelo AG são de 2,1807 s e 3,0675 s nas funções 51F e 51N respectivamente, com diferenças percentuais de 0,25% e 0,88% para as funções 51F e 51N respectivamente e em todas as análises comparativas nenhum FO médio ou mínimos são menores que as FOs encontradas pelo GRG.

Figura 61 – Comparativos para Pop/Ger de 2400/1280 com 4 OCRs e 13 fusíveis

Fonte: Elaboração do autor

Na **Tabela 38** tem-se os ajustes do sistema de proteção de fase obtidos pelo AG na FO mínima.

Tabela 38 – Ajustes do sistema de proteção de fase pelo AG com 4 OCRs e 13 fusíveis

Prot.	$I_{\min}$ (A)	I_n/I_{Pkp}^{51} (A)	$I_{\max}$ (A)	$TMS_{\min}$	TMS	$TMS_{\max}$	TCC	C_1	C_2
F									
1	374,1794	422,7888	467,7243	0,05	0,8327	1	VI	13,5	1
12	10,4139	15	-	0,05	-	1	K	-	-
15	37,4290	40	-	0,05	-	1	K	-	-
24	52,6239	65	-	0,05	-	1	K	-	-
2	264,1439	315,0607	330,1799	0,05	0,7607	1	VI	13,5	1
40	25,2748	40	-	0,05	-	1	K	-	-
49	19,8754	25	-	0,05	-	1	K	-	-
52	25,8479	40	-	0,05	-	1	K	-	-
64	46,1794	65	-	0,05	-	1	K	-	-
79	46,3832	65	-	0,05	-	1	K	-	-
3	157,1890	190,1599	196,4862	0,05	0,7825	1	VI	13,5	1
98	14,4633	15	-	0,05	-	1	K	-	-
4	66,0556	79,3796	82,5695	0,05	0,9859	1	VI	13,5	1
113	13,0274	15	-	0,05	-	1	K	-	-
121	5,6546	6	-	0,05	-	1	K	-	-
123	12,5412	15	-	0,05	-	1	K	-	-
105	27,5290	40	-	0,05	-	1	K	-	-

Fonte: Elaboração do autor

Na **Tabela 39** tem-se os ajustes do sistema de proteção de neutro obtidos pelo AG na FO mínima.

Tabela 39 – Ajustes do sistema de proteção de neutro pelo AG com 4 OCRs e 13 fusíveis

<i>Prot.</i>	$I_{\min}$ (A)	I_n/I_{Pkp}^{51} (A)	$I_{\max}$ (A)	$TMS_{\min}$	TMS	$TMS_{\max}$	TCC	C_1	C_2
N									
1	31,1816	46,6440	93,5449	0,05	0,7208	1	SI	0,14	0,02
12	10,4139	15	-	0,05	-	1	K	-	-
15	37,4290	40	-	0,05	-	1	K	-	-
24	52,6239	65	-	0,05	-	1	K	-	-
2	22,0120	59,8057	66,0360	0,05	0,4979	1	SI	0,14	0,02
40	25,2748	40	-	0,05	-	1	K	-	-
49	19,8754	25	-	0,05	-	1	K	-	-
52	25,8479	40	-	0,05	-	1	K	-	-
64	46,1794	65	-	0,05	-	1	K	-	-
79	46,3832	65	-	0,05	-	1	K	-	-
3	13,0991	31,8909	39,2972	0,05	0,3871	1	SI	0,14	0,02
98	14,4633	15	-	0,05	-	1	K	-	-
4	5,5046	9,7329	16,5139	0,05	0,261	1	SI	0,14	0,02
113	13,0274	15	-	0,05	-	1	K	-	-
121	5,6546	6	-	0,05	-	1	K	-	-
123	12,5412	15	-	0,05	-	1	K	-	-
105	27,5290	40	-	0,05	-	1	K	-	-

Fonte: Elaboração do autor

Pode-se verificar comparativamente que os elos fusíveis encontrados pelo AG possuem mesma configuração dos encontrados pelo GRG para as correntes nominais e curvas.

As TCCs dos OCRs também possuem as mesmas sequências, indicando que ambos os algoritmos encontram configurações idênticas com relação a este parâmetro.

Na **Tabela 40** tem-se a coordenação otimizada com os respectivos tempos de operação para proteção de fase e na **Tabela 41** os ajustes das proteções de neutro obtidas pelo AG nas FOs mínimas.

Pode-se verificar que as restrições de coordenação para todos os OCRs são respeitadas e suas proteções primárias protegem adequadamente o SDEE.

Tabela 40 – Coordenação de fase obtido pelo AG com 4 OCRs e 13 fusíveis

<i>Proteção de backup</i>	$t_R^{51}{}_{bkp} (s)$	<i>Proteção primária</i>	$t_R^{51}{}_{pmr} (s)$	<i>Coordenação</i> $\Delta t (s) \geq 0$
F				
		1	0,6081	
1	1,0068	12	0,0136	0,6933
1	0,8862	15	0,0146	0,5716
1	1,0420	24	0,0175	0,7245
1	0,9051	2	0,6037	0,0013
2	0,6402	40	0,0148	0,3254
2	0,7025	49	0,0139	0,3886
2	0,7682	52	0,0154	0,4528
2	0,7892	64	0,0187	0,4705
2	0,7575	3	0,4569	0,0005
3	0,5122	79	0,0197	0,1926
3	0,5726	98	0,0137	0,2589
3	0,6117	4	0,3113	0,0005
3	0,5387	121	0,0135	0,2253
3	0,5177	123	0,0136	0,2041
4	0,3170	105	0,0170	0,0000
4	0,4953	113	0,0147	0,1806

Fonte: Elaboração do autor

Tabela 41 – Coordenação de neutro obtido pelo AG com 4 OCRs e 13 fusíveis

<i>Proteção de backup</i>	$t_R^{51}{}_{bkp} (s)$	<i>Proteção primária</i>	$t_R^{51}{}_{pmr} (s)$	<i>Coordenação</i> $\Delta t (s) \geq 0$
N				
		1	1,0577	
1	1,1452	12	0,0139	0,83125
1	1,1239	15	0,0170	0,8069
1	1,1604	24	0,0255	0,8348
1	1,1415	2	0,8397	0,0018
2	0,8483	40	0,0179	0,5304
2	0,8754	49	0,0157	0,5597
2	0,8816	52	0,0196	0,5620
2	0,8936	64	0,0302	0,5634
2	0,8907	3	0,5897	0,0010
3	0,6020	79	0,0328	0,2693
3	0,6154	98	0,0148	0,3006
3	0,6234	4	0,3233	0,0002
3	0,6078	121	0,0135	0,2943
3	0,6042	123	0,0146	0,2896
4	0,3254	105	0,0252	0,0002
4	0,3470	113	0,0164	0,0306

Fonte: Elaboração do autor

Na **Tabela 42** tem-se as diferenças percentuais entre os principais valores obtidos na coordenação.

Tabela 42 – Comparativos dos tempos de operação, correntes de *pick-up* ou nominal e TMS com 4 OCRs e 13 fusíveis

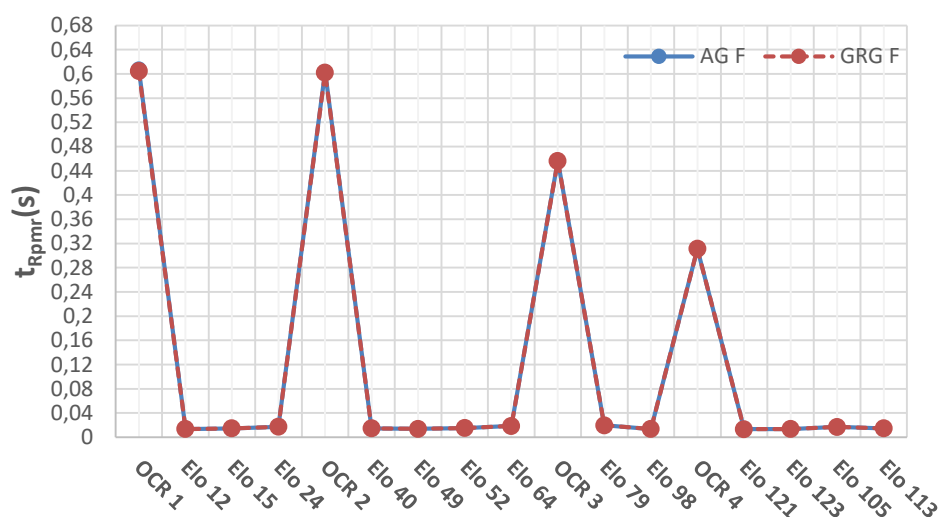
<i>Prot.</i>	<i>GRG</i> t_R^{51} <i>pmr</i> (s)	<i>AG</i>	<i>Dif.</i> (%)	<i>GRG</i> $I_n/I_{p_{kp}}^{51}$ (A)	<i>AG</i>	<i>Dif.</i> (%)	<i>GRG</i> <i>TMS</i>	<i>AG</i>	<i>Dif.</i> (%)
F									
1	0,6046	0,6081	0,58	467,72	422,79	9,61	0,7440	0,8327	11,92
12	0,0136	0,0136	0,00	15	15	0,00	-	-	-
15	0,0146	0,0146	0,00	40	40	0,00	-	-	-
24	0,0175	0,0175	0,00	65	65	0,00	-	-	-
2	0,6024	0,6037	0,22	330,18	315,06	4,58	0,7222	0,7607	5,33
40	0,0148	0,0148	0,00	40	40	0,00	-	-	-
49	0,0139	0,0139	0,00	25	25	0,00	-	-	-
52	0,0154	0,0154	0,00	40	40	0,00	-	-	-
64	0,0187	0,0187	0,00	65	65	0,00	-	-	-
3	0,4563	0,4569	0,13	196,49	190,16	3,22	0,7552	0,7825	3,61
79	0,0197	0,0197	0,00	65	65	0,00	-	-	-
98	0,0137	0,0137	0,00	15	15	0,00	-	-	-
4	0,3112	0,3113	0,03	82,57	79,38	3,86	0,9469	0,9859	4,12
121	0,0135	0,0135	0,00	6	6	0,00	-	-	-
123	0,0136	0,0136	0,00	15	15	0,00	-	-	-
105	0,0170	0,0170	0,00	40	40	0,00	-	-	-
113	0,0147	0,0147	0,00	15	15	0,00	-	-	-
N									
1	1,0378	1,0577	1,92	93,54	46,6440	50,14	0,5950	0,7208	21,14
12	0,0139	0,0139	0,00	15	15	0,00	-	-	-
15	0,0170	0,0170	0,00	40	40	0,00	-	-	-
24	0,0255	0,0255	0,00	65	65	0,00	-	-	-
2	0,8355	0,8397	0,50	66,04	59,8057	9,43	0,4826	0,4979	3,17
40	0,0179	0,0179	0,00	40	40	0,00	-	-	-
49	0,0157	0,0157	0,00	25	25	0,00	-	-	-
52	0,0196	0,0196	0,00	40	40	0,00	-	-	-
64	0,0302	0,0302	0,00	65	65	0,00	-	-	-
3	0,5876	0,5897	0,36	39,30	31,8909	18,84	0,3666	0,3871	5,59
79	0,0328	0,0328	0,00	65	65	0,00	-	-	-
98	0,0148	0,0148	0,00	15	15	0,00	-	-	-
4	0,3229	0,3233	0,13	16,51	9,7329	41,05	0,2337	0,2610	11,68
121	0,0135	0,0135	0,00	6	6	0,00	-	-	-
123	0,0146	0,0146	0,00	15	15	0,00	-	-	-
105	0,0252	0,0252	0,00	40	40	0,00	-	-	-
113	0,0164	0,0164	0,00	15	15	0,00	-	-	-

Fonte: Elaboração do autor

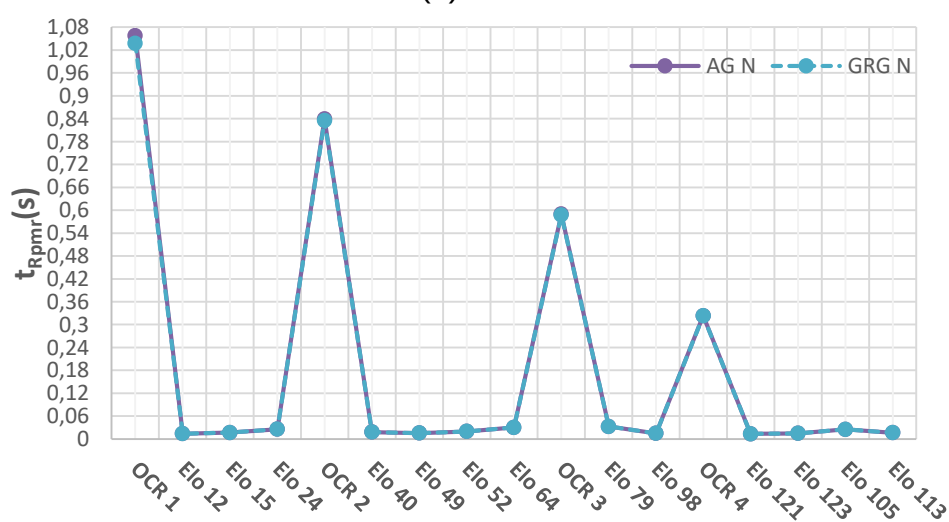
Pode-se verificar que na função 51F as diferenças percentuais mais significativas estão no TMS dos OCRs 1 que ultrapassa os 10%. Na função 51N as diferenças percentuais mais significativas se encontram na corrente de *pick-up* para três dos quatro OCRs ultrapassando os 18% podendo atingir até 50% e na TMS para o OCR 1 e 4 com aproximadamente 21% e 12% respectivamente.

Na **Figura 62** pode-se verificar que os tempos de operação entre o AG e o GRG para 51N e 51F são praticamente coincidentes devido as sequências de TCCs serem iguais, com diferenças percentuais nos tempos abaixo de 0,58% e 1,92% de fase e neutro respectivamente.

Figura 62 – Comparativos dos tempos de operação com 4 OCRs e 13 fusíveis



(a) Fase

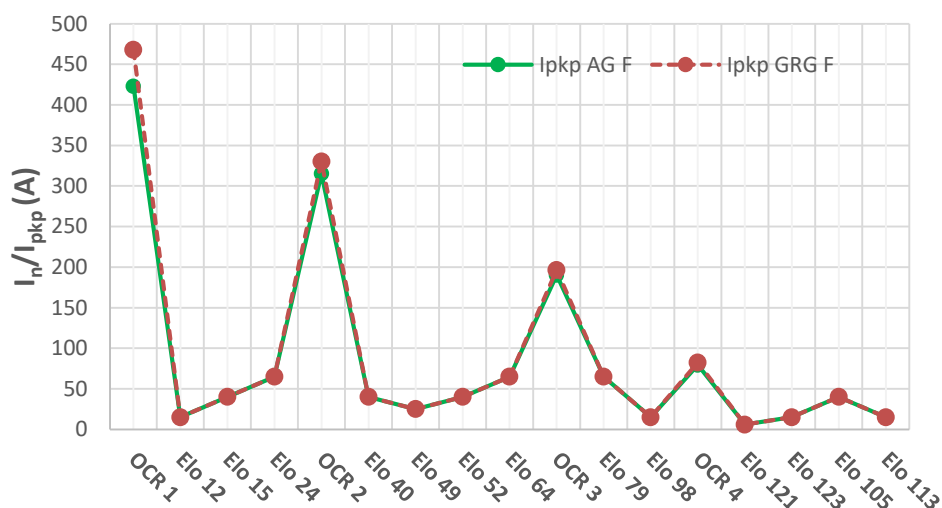


(b) Neutro

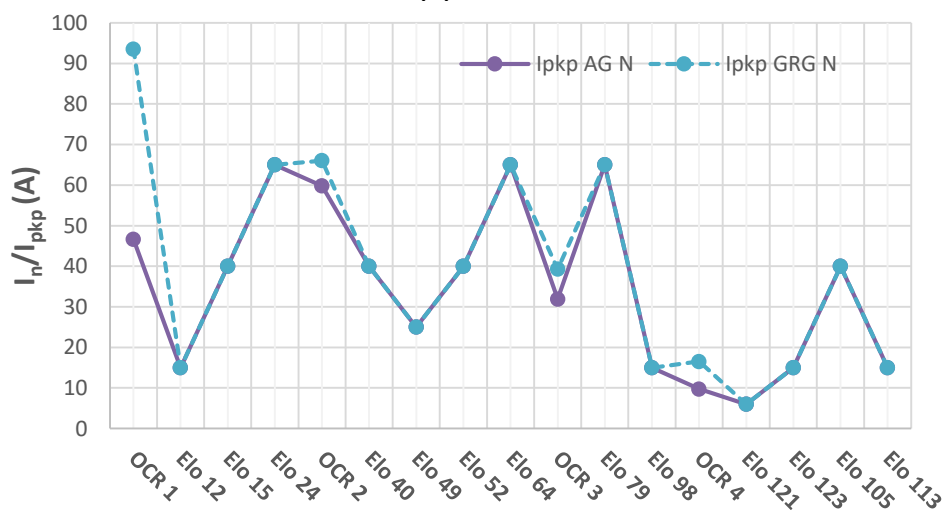
Fonte: Elaboração do autor

Na **Figura 63** pode-se verificar que as correntes de *pick-up* na função 51F dos OCRs possuem diferenças percentuais pequenas, abaixo dos 10%, mas para na função 51N as diferenças percentuais são significativas, principalmente para o OCR 1 atingindo aproximadamente 50%.

Figura 63 – Comparativos das correntes de *pick-up* ou nominal com 4 OCRs e 13 fusíveis



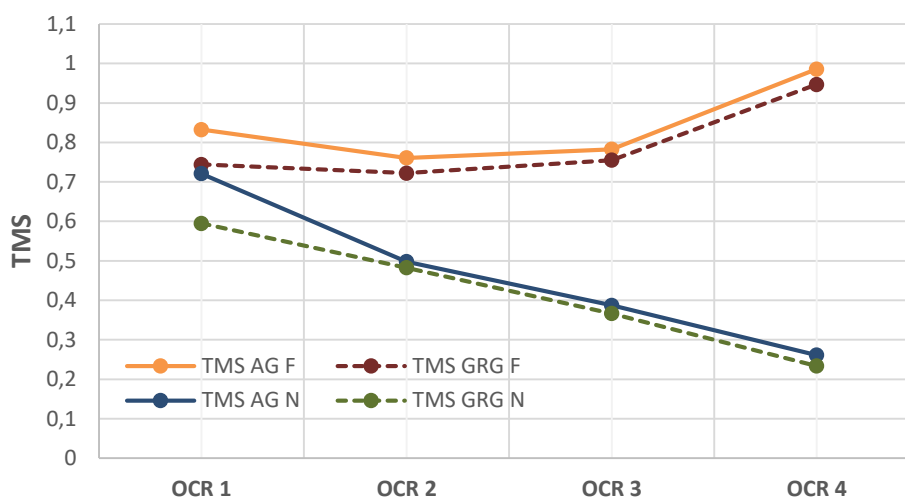
(a) Fase



(b) Neutro

Fonte: Elaboração do autor

Na **Figura 64** pode-se verificar que as diferenças percentuais mais relevantes se encontram para o OCR1 superando os 10%.

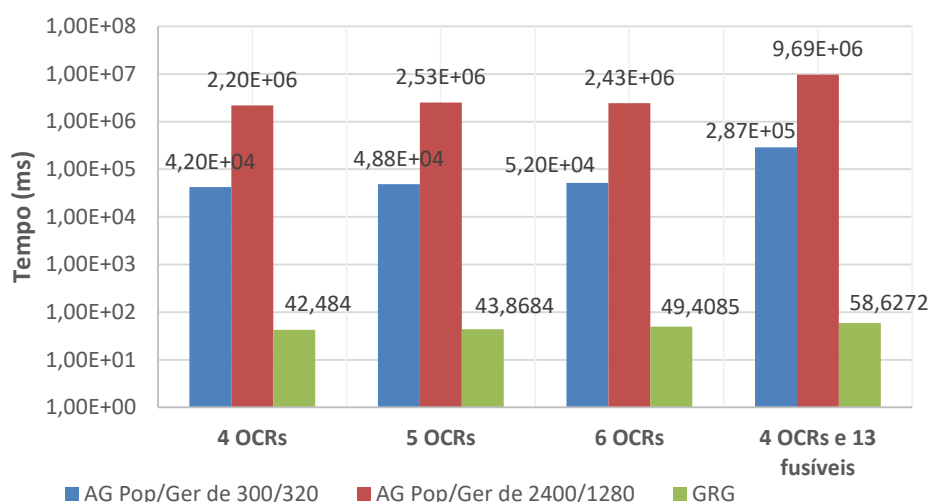
Figura 64 – Comparativos das TMS com 4 OCRs e 13 fusíveis

Fonte: Elaboração do autor

4.3.5 Desempenho computacional

Pelas análises, verificou-se que para o AG obter uma solução com diferenças percentuais abaixo de 1% em relação ao GRG é necessária uma população/geração de 2400/1280, produzindo um grande esforço computacional, como pode-se ver na **Figura 65**, e não garantindo, na função 51F, a obtenção de FOs próximas e melhores aos obtidos pelo GRG. Ao contrário da função 51F, o AG consegue obter a FO próxima do GRG, mesmo com pequenos valores de população/geração, mas em todos os casos de população/geração os valores obtidos pelo AG nunca são melhores que o obtido pelo GRG.

Para o sistema de proteção com a maior quantidade de dispositivos, pode-se verificar que o GRG requer no máximo 59 ms para entregar a solução completa de fase e neutro e o AG requer no máximo $9,7 \times 10^6$ ms (2 h e 41 min) e no mínimo $2,87 \times 10^5$ ms (4 min e 47 s) para entregar uma solução para o mesmo sistema de proteção, isto mostra que no mínimo o GRG é 4.864 vezes mais rápido que o AG para entregar uma solução completa. Considerando um sistema de proteção com a menor quantidade de dispositivos, pode-se verificar que o GRG requer no máximo 43 ms para entregar a solução completa de fase e neutro e o AG requer no máximo $2,2 \times 10^6$ ms (36 min) e no mínimo $4,2 \times 10^4$ ms (42 s) para entregar uma solução para o mesmo sistema de proteção, isto mostra que no mínimo o GRG é 977 vezes mais rápido que o AG para entregar uma solução completa.

Figura 65 – Comparativos entre os tempos de execução

Fonte: Elaboração do autor

O GRG por apresentar tempos muito abaixo de 1 s o qualifica para utilização em sistemas de proteção em tempo real e, portanto, em proteção adaptativa. Comparativamente, pode-se verificar que o menor tempo de entrega de resultados do AG chega a 42 s o que compromete sua utilização para este propósito. Para que o GRG possa efetivamente ser considerado para uma proteção em tempo real outras análises devem ser levadas em consideração como o tempo de execução dos algoritmos de fluxo de potência e curtos-circuitos bem como o tempo de processamento dos dispositivos remotos, análises estas que fogem dos objetivos deste trabalho.

4.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS

Pode-se considerar que os resultados obtidos atendem às expectativas, todas as análises pertinentes para validar o algoritmo GRG foram realizadas. Pode-se verificar que as melhores FOs médias encontradas pelo AG na função 51F para todos os sistemas de proteção testados, dois dos quatro sistemas de proteção testados possuem TCCs com sequências diferentes dos encontrados pelo GRG, o que afeta diretamente na diferença percentual dos valores das FOs e consequentemente nos tempos de operação dos OCRs com TCCs diferentes.

Na função 51F os sistemas de proteção com 5 OCRs e 4 OCRs com 13 fusíveis apresentaram pelo AG FOs médios com diferenças percentuais abaixo de 2%, FOs

mínimas abaixo de 1% e tempos de operação abaixo de 1%, devido as sequências de TCCs terem o mesmo padrão do GRG.

Para a função 51N todos os sistemas de proteção testados apresentaram FOs médios e tempos de operação abaixo de 5% e FOs mínimos abaixo de 1% devido as sequências de TCCs terem o mesmo padrão do GRG.

No sistema de proteção com 6 OCRs ocorre uma única amostra encontrada pelo AG na função 51F que possui o mesmo padrão de TCCs encontrado pelo GRG e FO com diferença percentual de 0,18%, ou seja, em 158 amostras coletadas apenas 1 amostra tinha o mesmo padrão encontrado pelo GRG, o que representa apenas 0,63% das amostras.

Para obtenção de diferenças percentuais abaixo de 1% necessita-se de grandes populações/gerações, reduzindo o desempenho computacional, com tempos que podem ser inadequados para determinadas aplicações.

Pode-se verificar que a mudança na curva de um OCR para característica mais lenta, proporcionada pelo AG, ocasionam comparativamente com o GRG um aumento no tempo de operação e, portanto, aumentando a FO e consequentemente aumentando a diferença percentual entre estas variáveis.

Do ponto de vista de desempenho computacional, o GRG mostra-se comparativamente com o AG ser muito superior, apresentando tempos de execução para os sistemas testados abaixo de 1 s e o AG apresenta tempos de execução que superam os 42 s.

Em relação a coordenação ótima, todos os parâmetros de ajuste dos OCRs encontrados pelo GRG respeitam as restrições impostas pelo modelo matemático proposto e encontram com sucesso a coordenação com tempos de operação ótimos e, portanto, alcançando a FO otimizada com tempos adequados para proteção de componentes do SDEE.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O SDEE possui características de proteções peculiares que devido à proximidade com os consumidores possui uma exigência quanto a continuidade do fornecimento. As características das redes de distribuição convencionais, como a aérea, exigem proteções mais especializadas como os religadores que permite manter a continuidade do fornecimento de energia para faltas temporárias que são estatisticamente mais frequentes, mantendo os índices de continuidade dentro de níveis aceitáveis pelas agências reguladoras. Portanto a importância dos OCRs na mitigação de faltas é fundamental para o funcionamento seguro e confiável do SDEE.

Os OCRs modernos com tecnologias microprocessadas permitem ajustes dinâmicos dos parâmetros de proteção, permitindo que propriedades adaptativas sejam exploradas tornando o sistema de proteção mais dinâmico, oferecendo uma proteção menos genérica e mais específica para alterações no SDEE ocasionadas como exemplo, por isolamentos de linhas em falha ou conexão de novas linhas através de remanejamento de cargas.

A coordenação entre dispositivos de proteção como os OCRs, pode ser obtida usando um modelo matemático de otimização genérico que pode ser aplicado em algoritmos do tipo MH, entre elas os algoritmos evolutivos como o AG, e este modelo foi adotado como base para obtenção de um modelo matemático dedicado para a solução do problema não linear de coordenação ótima de forma determinística. Para este modelo proposto utilizou-se técnicas de relaxamento do problema, considerando algumas variáveis como constantes e técnicas de programação não linear onde provou-se matematicamente, através das condições de KKT, a capacidade de produzir soluções de boa qualidade. Comprovou-se também a viabilidade do modelo matemático de produzir soluções de boa qualidade através da aplicação de uma técnica iterativa de programação não linear como o método do GRG. O algoritmo GRG em conjunto com o modelo matemático proposto não somente minimizou os tempos de operação de todas as proteções, como também obteve a coordenação mais adequada.

Os valores encontrados pelo GRG para os tempos de operação e FOs são melhores que os encontrados pelo AG que mostrou, para funções de fase, dificuldades para encontrar ajustes com o mesmo padrão de curvas, já para funções de neutro todos os ajustes possuem o mesmo padrão de curvas apresentados pelo

GRG. Este aspecto mostra as dificuldades de o AG trabalhar com restrições de variáveis reais para a corrente de *pick-up*, quanto maior este intervalo de restrição maior será a dificuldade do AG encontrar o mesmo padrão de curvas encontrado pelo GRG. A função de fase apresenta exatamente esta característica de maior intervalo de restrição para corrente de *pick-up* o que não ocorre com a função de neutro.

Quando o AG é ajustado para população/geração maiores, as soluções chegam a apresentar diferenças percentuais menores que 1% dos valores encontrados pelo GRG, porém com desempenho computacional extremamente elevado comparado ao GRG, ainda assim, o AG não deve ser descartado como algoritmo de coordenação ótima, limitando-se a aplicações de planejamento como em configurações *off-line* dos OCRs e estudos de proteção onde o intervalo de tempo para tomadas de decisão são maiores.

Os resultados com o GRG mostram que seu tempo de execução é muito menor em relação ao AG chegando a valores muito abaixo de 1 s. Este baixo tempo de execução mostra uma possível viabilidade para implementações em que o tempo de resposta é crítico como em sistemas de proteção adaptativas e aplicações em *smart-grids* onde o poder de decisão é dependente do tempo de operação dos dispositivos a ela conectados. Naturalmente que testes mais aprofundados devem ser realizados neste aspecto para garantir que o GRG possa efetivamente ser considerado para uma proteção em tempo real, como o tempo de execução dos algoritmos de fluxo de potência e curtos-circuitos bem como o tempo de processamento dos dispositivos remotos, ficando estas análises como sugestões para trabalhos futuros.

Também como propostas para trabalhos futuros estão a realização de análises comparativas com outros métodos de PNL e MHs e a obtenção de um modelo matemático para aplicações direcionais para redes de distribuição com presença de GDs, além de estender o modelo matemático para outros tipos de funções de proteção que possuem as curvas características não lineares para proteção do SDEE.

REFERÊNCIAS

- ALAE, P.; AMRAEE, T. Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays in Meshed Active Distribution Network Using Imperialistic Competition Algorithm. **Journal of Modern Power Systems and Clean Energy**, Nanjing, v. 9, n. 2, p. 416-422, março 2021.
- ALASALI, F.; EL-NAILY, N. et al. Highly sensitive and fast microgrid protection using optimal coordination scheme and nonstandard tripping characteristics. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Elmhurst, v. 128, p. 106756, Junho 2021.
- AL-BHADELY, F.; İNAN, A. Improving Directional Overcurrent Relay Coordination in Distribution Networks for Optimal Operation Using Hybrid Genetic Algorithm with Sequential Quadratic Programming. **Energies**, Basel, v. 16, n. 20, p. 7031, 2023.
- ALSTON GRID. **Network protection & automation guide: protective relays, measurement & control**. 5. ed. Saint Ouen: Alstom, 2011. 2.1 p.
- BOUCHEKARA, H. R. E. H.; SHAHRIAR, M. S. et al. A variable neighborhood search algorithm for optimal protection coordination of power systems. **Soft Computing**, Heidelberg, v. 25, p. 10863–10883, Abril 2021.
- BOUSSAÏD, I.; LEPAGNOT, J.; SIARRY, P. A survey on optimization metaheuristics. **Information Sciences**, Amsterdam, Julho 2013. 82-117.
- CHOUDHARY, P. K.; DAS, D. K. Optimal coordination of over-current relay in a power distribution network using opposition based learning fractional order class topper optimization (OBL-FOCTO) algorithm. **Applied Soft Computing**, Amsterdam, v. 113, p. 107916, dezembro 2021.
- CHOUDHARY, P. K.; DAS, D. K. Optimal coordination of over-current relay in a power distribution network using aggrandized class topper optimization (A-CTO) algorithm. **The Journal of Supercomputing**, New York, v. 78, p. 19296–19321, junho 2022.
- CONCEIÇÃO, K. P. D. **Uma nova metodologia para o desenvolvimento de projetos de proteção de redes ativas de distribuição de energia elétrica**. Tese de doutorado. Ilha Solteira: Unesp. 2018. p. 149.
- CPFL-ENERGIA. **Proteção de Redes Aéreas de Distribuição: sobrecorrente**. 1. ed. Campinas: CPFL, 2016. 98 p.
- ELETROBRÁS. **Proteção de sistemas aéreos de distribuição**. Rio de Janeiro: Campus, v. 2, 1982.

- ENERGISA. **Proteção da distribuição - Norma de distribuição unificada – NDU-017**. Energisa. Cataguases, p. 63. 2012.
- FILHO, J. M.; MAMEDE, D. R. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. 1. ed. Barueri: Grupo Gen-LTC, v. 2, 2020.
- GERS, J. M.; HOLMES, E. J. **Protection of electricity distribution networks**. 4. ed. Stevenage: IET, v. 47, 2021. 70-73 p.
- HABIB, K.; LAI, X. et al. Hybridization of PSO for the Optimal Coordination of Directional Overcurrent Protection Relays. **Electronics**, Benfleet, v. 11, p. 180, 2022.
- JARAMILLO-LEON, B.; LEITE, J. B. Multi-objective Optimization for Preventive Tree Trimming Scheduling in Overhead Electric Power Distribution Networks. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, Heidelberg, v. 33, p. 550-560, Abril 2022.
- JUNIOR, G. M. **Proteção e automação de sistemas elétricos de potência I**. notas de aula, DEEAE. São Paulo: USP. 2017.
- KHURSHAID, T.; WADOOD, A. et al. An Improved Optimal Solution for the Directional Overcurrent Relays Coordination Using Hybridized Whale Optimization Algorithm in Complex Power Systems. **IEEE Access**, Piscataway, v. 7, p. 90418-90435, Julho 2019.
- KIDA, A. A.; RIVAS, A. E. L.; GALLEGU, L. A. An improved simulated annealing–linear programming hybrid algorithm applied to the optimal coordination of directional overcurrent relays. **Electric Power Systems Research**, Amsterdam, v. 181, Abril 2020.
- KOTHARI, D. P.; DHILLON, J. S. **Evolutionary Programming for Generation Scheduling**. 2. ed. New Delhi: PHI Learning, 2011.
- MARCOLINO, M. H.; LEITE, J. B.; MANTOVANI, J. R. S. Optimal Coordination of Overcurrent Directional and Distance Relays in Meshed Networks Using Genetic Algorithm. **IEEE Latin America Transactions**, New York, v. 13, n. 9, p. 2975-2982, Setembro 2015.
- MELGAR-DOMINGUES, O. D.; POURAKBARI-KASMAEI, M.; MANTOVANI, J. R. S. Adaptive Robust Short-Term Planning of Electrical Distribution Systems Considering Siting and Sizing of Renewable Energy Based DG Units. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, New York, v. 10, p. 158-169, Janeiro 2019.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA-SEE. **Boletim mensal de monitoramento do sistema elétrico março-outubro/2023**. Ministério de Minas e Energia-SEE-DMSE. Brasília, p. 1. 2023.

RAMOS, M. J. S. **Metodologia para análise da coordenação e seletividade de dispositivos de proteção durante reconfigurações de redes de distribuição**. Dissertação de mestrado. Santa Maria: UFSM. 2014. p. 105.

RAO, S. S. **Engineering optimization: theory and practice**. 5. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, inc, 2019. 93-104, 412-422 p.

REIZ, C. **Análise de faltas e cálculo de curto-circuito em sistemas de distribuição de energia elétrica com fontes renováveis de geração de energia**. Dissertação de mestrado. Ilha Solteira: Unesp. 2019. p. 104.

REIZ, C. **Metodologia para solução do problema de planejamento do sistema de proteção e controle em sistemas de distribuição de energia elétrica com geração distribuída renovável**. Tese de doutorado. Ilha Solteira: Unesp. 2023.

REIZ, C.; LEITE, J. B. Optimal Coordination of Protection Devices in Distribution Networks With Distributed Energy Resources and Microgrids. **IEEE Access**, Piscataway, v. 10, p. 99584-99594, Setembro 2022.

REIZ, C.; PEREIRA, C. E. M.; LEITE, J. B. A Self-Healing Strategy for Modern Distribution Networks. **Energies**, Basel, v. 16, p. 5890, Agosto 2023.

ROJNIC, M.; PRENC, R. et al. A Comprehensive Assessment of Fundamental Overcurrent Relay Operation Optimization Function and Its Constraints. **Energies**, Basel, v. 15, p. 1271, Fevereiro 2022.

ROJNIC, M.; PRENC, R. et al. Overcurrent relay optimization in a radial distribution network considering different fault locations. **Electrical Engineering**, Heidelberg, v. 105, p. 1093-1109, Janeiro 2023.

SAAD, S. M.; EL-NAILY, N.; MOHAMED, F. A. A new constraint considering maximum PSM of industrial over-current relays to enhance the performance of the optimization techniques for microgrid protection schemes. **Sustainable Cities and Society**, Amsterdam, v. 44, p. 445-457, Janeiro 2019.

SALDARRIAGA-ZULUAGA, S. D.; LÓPEZ-LEZAMA, J. M.; MUNOZ-GALEANO, N. An Approach for Optimal Coordination of Over-Current Relays in Microgrids with Distributed Generation. **Electronics**, Basel, v. 9, n. 10, p. 1740, Outubro 2020.

SARWAGYA, K.; NAYAK, P. K.; RANJAN, S. Optimal coordination of directional overcurrent relays in complex distribution networks using sine cosine algorithm. **Electric Power Systems Research**, Amsterdam, v. 187, p. 106435, Outubro 2020.

SHORT, T. A. **Electric power distribution handbook**. Boca Raton: CRC Press, 2004.

TENG, J. H.; LIU, Y. H. A novel ACS-based optimum switch relocation method. **IEEE Transaction on Power Systems**, New York, v. 18, p. 113-120, 2003.

THURNER, L.; BRAUN, M. Vectorized calculation of short circuit currents considering distributed generation: an open source implementation of IEC 60909. **IEEE pes innovative smart grid technologies conference europe (ISGT-Europe)**, 2018. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1802.01502>.

UNESP-FEIS-DEE-LAPSEE. Sistema prático de 135 barras. **LaPSEE**, 2023. Disponível em: <<https://www.feis.unesp.br/#!/departamentos/engenharia-eletrica/pesquisas-e-projetos/lapsee/downloads/materiais-de-cursos1193/>>. Acesso em: 16 Outubro 2023.

USAMA, M.; MOGHAVVEMI, M. et al. Optimal Protection Coordination Scheme for Radial Distribution Network Considering ON/OFF-Grid. **IEEE Access**, Piscataway, v. 9, p. 34921-34937, janeiro 2021.