

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
CENTRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Algoritmos de Otimização para Priorização da Modernização da Proteção em Redes Elétricas

Ramon Lacerda Marques

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Eduardo Gontijo Carrano

Co-orientador: Prof. Rodney Saldanha Rezende

Belo Horizonte, Julho de 2016

Resumo

Neste trabalho é apresentado um conjunto de ferramentas que tem por finalidade avaliar o impacto da substituição de relés direcionais de sobrecorrente em redes de distribuição e transmissão. O desempenho da proteção do sistema no estado atual (caso base) é utilizado como referência para a avaliação de condições hipotéticas, considerando a substituição de alguns dos dispositivos por outros mais eficientes. Para tal, foi proposta uma ferramenta de coordenação rápida e três algoritmos de otimização capazes de gerar boas soluções para o problema. Estes algoritmos visam a minimização do tempo total de atuação dos equipamentos ao longo da rede, garantindo melhor tempo de resposta frente à presença de faltas. Também foi avaliada a robustez da rede antes e após a adoção das soluções propostas. Os resultados obtidos para três instâncias da literatura demonstram que as soluções propostas são capazes de auxiliar o projetista na tomada de decisão acerca da substituição dos relés presentes na rede elétrica.

Abstract

This thesis proposes a set of algorithms and methods to evaluate the impact of replacing directional overcurrent relays in distribution and transmission networks. The performance of the protection under the current system state (reference case) is assumed as the benchmark for testing alternative situations, considering the replacement of some devices by more efficient ones. A fast coordination tool and three optimization algorithms were proposed to generate suitable solutions to the problem. These algorithms were designed to minimize the total operation time of the relays, in order to ensure better response in the presence of faults. The robustness of the network before and after the adoption of the proposed solutions is also evaluated. The results for three literature instances demonstrate that the proposed methods can assist the protection engineer on making decisions with regard to the replacement of power system relays.

Agradecimentos

Agradeço, antes de tudo, a Deus, criador de toda ciência e todo conhecimento, por ter me proporcionado mais esta oportunidade de ampliar meus conhecimentos e ter me capacitado em todos os momentos ao longo deste curso.

À minha família, em especial minha esposa e filha, Ana Larissa e Ana Luísa, pelo amor, compreensão, carinho, paciência e companheirismo durante essa jornada; aos meus pais, Wilson e Riulsa, verdadeiras inspirações, e fonte de motivação e ensinamentos que perduram desde minha infância; e minha irmã Renata pelo incentivo e motivação.

Agradeço aos meus orientadores, Eduardo Carrano e Rodney Rezende, pela dedicação e pelo direcionamento que resultaram neste trabalho, sem obviamente esquecer a participação ativa nas soluções propostas.

Não poderia deixar de agradecer à Axxiom Soluções Tecnológicas S.A pela autorização para cursar o mestrado, em especial deixo meus agradecimentos ao meu coordenador, Wagner Tavares, pelo incentivo e compreensão, além de todos os meus colegas de trabalho.

Por fim gostaria de agradecer aos meus amigos que com suas palavras sempre me incentivaram a persistir, mesmo diante de todas as dificuldades, cujos nomes não citarei a fim de evitar cometer qualquer injustiça. Sintam-se todos vocês também agradecidos.

Concluo tributando toda honra, glória e louvor a Deus, criador de todas as leis que regem este planeta, em busca do conhecimento das quais prossigo.

Sumário

Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	vii
Lista de Acrônimos	viii
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	2
1.2 Estrutura do Texto	3
2 Descrição do Problema	4
2.1 Coordenação de Relés Direcionais de Sobrecorrente	4
2.1.1 Modelagem Matemática	5
2.1.2 Coordenação Robusta	7
2.2 Modernização da Proteção	8
2.2.1 Modelagem Matemática	8
2.2.2 Revisão Bibliográfica	10
3 Algoritmos de Otimização	12
3.1 Algoritmo $P\epsilon$ -Restrito	12
3.2 Método Heurístico Guloso	13
3.3 Algoritmo Genético	15
3.3.1 Conceitos Básicos dos Algoritmos Genéticos	16
3.4 Variable Neighborhood Search	16
3.5 Variable Neighborhood Descendent	18
4 Ferramenta Proposta	20
4.1 Ferramenta de Coordenação Rápida	20
4.1.1 Passo 1: Definição dos valores iniciais de MC	21
4.1.2 Passo 2: Aprimoramento de MC por par de relés	24
4.1.3 Passo 3: Aprimoramento de MC por relé individual	25
4.1.4 Variantes do Algoritmo de Coordenação Rápida	26
4.2 Algoritmo $P\epsilon$ -restrito	26

4.3	Método Heurístico Guloso	27
4.4	Algoritmo Genético	28
4.4.1	Representação das Soluções	28
4.4.2	Inicialização e Seleção	28
4.4.3	Avaliação dos Indivíduos	29
4.4.4	Cruzamento	29
4.4.5	Mutação	31
4.5	Variable Neighborhood Search	31
5	Resultados	34
5.1	Instâncias	34
5.2	Algoritmos e Parâmetros	35
5.3	Validação da Ferramenta de Coordenação Rápida	38
5.4	Sistema 1	39
5.5	Sistema 2	41
5.6	Sistema 3	42
5.7	Sistema 3 - Análise de Robustez	43
6	Conclusões e Propostas de Continuidade	47
6.1	Propostas de Continuidade	48
	Referências Bibliográficas	49
A	Resultados dos Experimentos Realizados	52
A.1	Sistema 1	52
A.2	Sistema 2	52
A.3	Sistema 3	52
B	Planos de Priorização dos Experimentos Realizados	56
B.1	Sistema 1	56
B.2	Sistema 2	56
B.3	Sistema 3	60

Lista de Figuras

4.1	Exemplo de uma solução do AG ou VNS	28
4.2	Cruzamento de dois indivíduos – $N_{reles} = 10$, $N_{relesSubstituidos} = 4$ e $u = 2$	30
4.3	Mutação de um indivíduo	31
5.1	Sistema 1	35
5.2	Sistema 2. Na representação DG indica as unidades de geração distribuída e EG indica uma conexão com o grid externo.	36
5.3	Sistema 3	37
5.4	Sistema 1 – Aproximações da fronteira Pareto	40
5.5	Sistema 1 – Tempo de execução dos algoritmos	41
5.6	Sistema 2 – Aproximações da fronteira Pareto	42
5.7	Sistema 2 – Tempo de execução dos algoritmos	43
5.8	Sistema 3 – Aproximações da fronteira Pareto	44
5.9	Sistema 3 – Tempo de execução dos algoritmos	44
5.10	Análise de Robustez - Sistema 3	45
B.1	Sistema 1 - Plano de Priorização - Algoritmo Guloso	57
B.2	Sistema 1 - Plano de Priorização - VNS	57
B.3	Sistema 2 - Plano de Priorização - Algoritmo Guloso	58
B.4	Sistema 2 - Plano de Priorização - VNS	59
B.5	Sistema 3 - Plano de Priorização - Algoritmo Guloso	60

Lista de Tabelas

5.1	Comparativo Estratégias de Coordenação	38
A.1	Sistema 1 - Coordenação para a substituição de dois relés - Valor da função-objetivo para os algoritmos avaliados	53
A.2	Sistema 2 - Coordenação para a substituição de dois relés - Valor da função-objetivo para os algoritmos avaliados	54
A.3	Sistema 3 - Coordenação para a substituição de dois relés - Valor da função-objetivo para os algoritmos avaliados	55

Lista de Acrônimos

AE: algoritmo evolucionário

AG: algoritmo genético

GA: genetic algorithm

OE: otimização evolucionária

RDS: relé direcional de sobrecorrente

Capítulo 1

Introdução

Os sistemas elétricos de potência (SEP) têm a função precípua de fornecer energia elétrica aos usuários, grandes ou pequenos, com a qualidade adequada, no instante em que for solicitada.

Segundo [20], os sistemas de energia elétrica são frequentemente expostos a condições extremas de funcionamento, tais como sobrecargas, grandes variações no consumo, exposição a fatores ambientais desfavoráveis, vulnerabilidade a descargas atmosféricas, além de estarem sujeitos a erros humanos e falhas de equipamentos.

Um sistema de proteção eficiente deve, em condição de falta, promover a manutenção da continuidade do fornecimento de energia na porção não atingida pela falta (estabilidade), isolar somente a porção do sistema sob condição de falta (seletividade), detectar qualquer condição anormal do sistema (sensibilidade) e parar de operar rapidamente evitando a propagação dos danos (agilidade). Os diversos dispositivos de proteção espalhados pelo sistema devem estar relacionados uns com os outros, criando diferentes zonas de proteção nas quais são definidos pares de proteção principal e de retaguarda (backup). Com isso, a proteção deve ser coordenada de modo que, caso uma proteção falhe, haverá outra em uma zona de proteção diferente que agirá como retaguarda da principal. Dois dispositivos estão coordenados se seus ajustes permitem que o mais afastado da falta possa eliminar o problema caso o mais próximo da falta falhe, mas que esse nunca atue antes do primário em condições normais [20].

A natureza combinatória do problema de realocar ou substituir dispositivos de proteção da rede elétrica, seja ela de transmissão ou distribuição, implica em um número muito grande de soluções possíveis, número esse que cresce exponencialmente com a dimensão do problema. Além disso, a natureza discreta imposta por este tipo de problema geralmente causa severas descontinuidades no espaço onde as variáveis de decisão estão definidas, o que faz com que não exista um conjunto de soluções factíveis no qual se possa caminhar facilmente, sem saltos no espaço. Estes aspectos restringem consideravelmente os métodos que podem ser aplicados na solução deste tipo de problema. A utilização de métodos determinísticos, voltados à otimização não-linear de espaços contínuos, se torna impossível, uma vez que os mesmos dependem de cálculos de derivadas que, por definição, não existem no espaço discreto onde os sistemas de proteção são definidos [8].

Este trabalho propõe ferramentas de análise e algoritmos de otimização aplicados ao problema de priorização da modernização da proteção, isto é, a identificação de quais relés devem ser substituídos a fim de maximizar o desempenho do sistema de proteção como um todo. Tais algoritmos foram implementados e validados em três sistemas anteriormente propostos na literatura.

1.1 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é propor algoritmos de otimização que sejam capazes de priorizar a substituição de relés direcionais de sobrecorrente (RDS) já existentes na rede elétrica. Esses algoritmos devem auxiliar a concessionária na escolha de quais relés analógicos devem ser substituídos por digitais, com o intuito de melhorar o desempenho da proteção como um todo e maximizar o ganho obtido por esse investimento.

Para alcançar este objetivo primário, foram traçados alguns objetivos específicos:

- Modelagem das características da rede elétrica necessárias para simulação do desempenho da proteção.

- Elaboração de um algoritmo de coordenação que seja rápido o suficiente para ser utilizado na avaliação das soluções encontradas durante a execução dos algoritmos de otimização.
- Proposição e avaliação de performance de alguns algoritmos de otimização dedicados à solução do problema em questão.
- Análise de robustez das soluções encontradas.

1.2 Estrutura do Texto

O capítulo 2 a seguir apresenta a descrição do problema tratado por este trabalho. No capítulo 3 é apresentado um breve referencial teórico sobre os métodos e algoritmos de otimização tratados neste trabalho. O capítulo 4 dedica-se a apresentar as ferramentas propostas para simulação de cenários e otimização da substituição de relés direcionais de sobrecorrente. No capítulo 5 são descritos os resultados obtidos em três instâncias da literatura, que contemplam dois sistemas de transmissão e um de distribuição. Por fim, o capítulo 6 apresenta as conclusões decorrentes dos experimentos realizados, além de apresentar propostas de continuidade deste trabalho.

Capítulo 2

Descrição do Problema

Neste capítulo é descrito o problema tratado neste trabalho, que se concentra na definição dos equipamentos de proteção a serem priorizados na substituição para melhoria de desempenho do sistema de proteção. Como parte integrante deste problema está o problema de coordenação da proteção, que deve ser resolvido para que as soluções propostas sejam devidamente avaliadas.

2.1 Coordenação de Relés Direcionais de Sobrecorrente

Os sistemas elétricos estão suscetíveis a faltas que podem ser temporárias ou permanentes. As faltas temporárias são aquelas cuja duração é limitada ao período necessário para restabelecer o serviço através da operação automática do equipamento de proteção que desligou o circuito ou parte dele. As faltas permanentes são todas as interrupções não classificadas como temporárias ou programadas [29].

De acordo com [29], são tomadas várias ações preventivas visando reduzir a ocorrência de faltas em redes elétricas, dentre as quais destacam-se a instalação de pára-raios, podas de árvores, instalação de proteção contra animais e manutenção de equipamentos. Tais medidas preventivas não são capazes de eliminar todas as ocorrências, fazendo-se necessária a instalação de dispositivos de proteção para detectar e isolar as faltas. Tais equipamentos minimizam os riscos para equipamentos do sistema, melhoram a confi-

abilidade e a qualidade do serviço prestado aos consumidores, protegem os usuários e aumentam o faturamento para a concessionária de energia elétrica.

A confiabilidade de um sistema de energia está intimamente ligada ao desempenho de sua proteção [17]. Os dispositivos de proteção devem satisfazer os seguintes objetivos:

- Prevenir ou minimizar riscos a equipamentos, eliminando condições anormais de operação.
- Melhorar a confiabilidade do serviço, removendo o menor trecho possível do circuito para uma dada falta.
- Aumentar a segurança da população e equipes quanto a eventuais acidentes.

Garantir a coordenação e a seletividade da proteção em um SEP não é uma tarefa simples. Para que isto ocorra, é necessário que os equipamentos trabalhem rápido e em uma sequência adequada, que depende da topologia do sistema. Por exemplo, dois elementos de proteção dispostos em série só estarão coordenados se seus ajustes permitirem ao elemento de proteção mais próximo do defeito (primário) atuar prioritariamente para eliminá-lo. Caso este elemento falhe, o próximo dispositivo de proteção (conhecido como secundário, backup ou retaguarda) deve atuar subsequentemente [15].

A modelagem matemática do problema de coordenação da proteção é discutida a seguir.

2.1.1 Modelagem Matemática

Para a coordenação da proteção é necessário garantir o tempo de espera para a atuação do segundo elemento de proteção. Esse tempo é conhecido como Intervalo de Tempo de Coordenação (*ITC*), sendo necessária sua observância como descrito na equação (2.1):

$$T_s - T_p \geq ITC_{min} \quad (2.1)$$

em que:

T_s : Tempo de atuação do relé secundário (Rs).

T_p : Tempo de atuação do relé primário (Rp).

ITC_{min} : Intervalo de Tempo de Coordenação mínimo.

O limite mínimo de ITC depende das características individuais de cada relé. Tipicamente, o ITC mínimo usado para relés eletromecânicos é de 0,3 a 0,4 segundos, enquanto que para relés de proteção baseados em microcontroladores este é da ordem de 0,2 segundos [18]. A busca por uma coordenação de qualidade deve respeitar os limites de ajustes dos dispositivos, limitações de coordenação prefixadas por normatizações e desempenho dos dispositivos de proteção e dos elementos protegidos.

As equações (2.2) e (2.3) a seguir definem o tempo de atuação de um relé i atuando como primário e um relé j atuando como secundário de i respectivamente.

$$T_i = TMS_i \left[\alpha + \frac{\beta}{\left(\frac{I_i^{cc}}{MC_i \cdot RTC_i} \right)^\gamma - 1} \right] \quad (2.2)$$

$$T_{ij} = TMS_j \left[\alpha + \frac{\beta}{\left(\frac{I_{ij}^{cc}}{MC_j \cdot RTC_j} \right)^\gamma - 1} \right] \quad (2.3)$$

em que:

T_i : Tempo de atuação do relé i atuando como primário.

T_{ij} : Tempo de atuação do relé j quando este atua como secundário do relé i .

TMS_i : Múltiplo do ajuste de tempo do relé i .

I_i^{cc} : Corrente vista pelo relé primário i quando ocorre uma falta próxima a ele.

I_{ij}^{cc} : Corrente vista pelo relé j quando este atua como backup do relé primário i .

α, β, γ : Constantes da curva de coordenação do relé.

MC_i : Multiplicador de corrente do relé i .

O modelo matemático do problema de coordenação da proteção é apresentado nas

equações (2.4), (2.5), (2.6) e (2.7). O objetivo nesse caso é a minimização do tempo de atuação da proteção para faltas próximas a cada um dos relés.

$$f = \min \sum_{i=1}^n T_i \quad (2.4)$$

sujeito a:

$$T_{ij} - T_i \geq ITC_{min}, \forall i \in 1, \dots, n, \forall j \in \mathcal{R}_i \quad (2.5)$$

$$TMS_i \in TMS_i^{vals}, \forall i \in 1, \dots, n \quad (2.6)$$

$$MC_i \in MC_i^{vals}, \forall i \in 1, \dots, n \quad (2.7)$$

em que:

ITC_{min} : Intervalo de coordenação mínimo.

\mathcal{R}_i : Conjunto de relés que atuam como secundário do relé i .

O modelo acima descrito é comumente utilizado na literatura, como pode ser visto em [2, 3, 4, 5, 6, 10, 12, 14, 19, 23, 33].

2.1.2 Coordenação Robusta

O princípio de coordenação robusta baseia-se na capacidade de um sistema de proteção atuar adequadamente mesmo diante de alterações na rede, como variações de carga ou topológicas [9]. Logo, considerando-se eventuais variações nas características da rede, faz-se necessário avaliar a robustez de uma dada configuração proposta a fim de garantir que o sistema de proteção atue em cenários diferentes do inicialmente previsto.

A análise de robustez prevê o estudo de modificações no sistema considerado durante a otimização e qual o efeito dessas modificações nas soluções encontradas. Modificações como alterações topológicas, perdas de linhas, variação de cargas, entre outras podem ser consideradas [12]. Com essa avaliação é possível verificar se alguma das restrições de coordenação é violada. Essa informação pode ser utilizada como critério de decisão por

parte do projetista. Nesse caso, o usuário pode escolher, dentre as soluções possíveis, aquela que suporte a maior quantidade de alterações ou as mais prováveis.

Neste trabalho é relevante avaliar a robustez da rede tanto no cenário atual (sem a substituição de relés) quanto nos cenários propostos, uma vez que é desejável obter-se, além dos ganhos de performance para a situação planejada da rede, melhorias na capacidade da rede de manter o sistema coordenado mesmo diante de situações adversas.

2.2 Modernização da Proteção

O sistema de proteção deve dar ênfase à continuidade do fornecimento de energia, evitando que a falta tenha impacto muito grande em termos de consumidores atingidos [7]. Além disso, uma proteção bem coordenada reduz os tempos de localização das faltas. Devido a isso, a alocação adequada de dispositivos de proteção tem forte potencial de melhorar os índices de confiabilidade do sistema.

Em geral, redes elétricas, tanto de distribuição quanto de transmissão, são muito antigas e heterogêneas, possuindo dispositivos novos e antigos atuando conjuntamente. A modernização do sistema de proteção consiste na substituição de dispositivos de proteção antigos por equipamentos mais modernos, com o intuito de melhorar o desempenho da proteção como um todo. Uma vez que esse processo é paulatino, em virtude dos altos investimentos financeiros envolvidos, a priorização da substituição dos dispositivos de proteção mostra-se extremamente necessária. Essa priorização é o objetivo central deste trabalho.

A seguir é apresentada a modelagem matemática proposta para o problema de priorização da modernização da proteção.

2.2.1 Modelagem Matemática

A fim de garantir a seletividade e tempos de resposta baixos do sistema de proteção, é desejável que os tempos de atuação T_i de cada um dos relés do circuito sejam os

menores possíveis. Investimentos na substituição de RDS eletromecânicos por relés digitais são capazes de garantir melhoria no desempenho do sistema proteção, uma vez que relés digitais possuem maiores intervalos para configuração dos parâmetros de ajuste, permitindo assim ajustes mais flexíveis. A seguir é apresentada a modelagem matemática para o problema de modernização da proteção considerado neste trabalho.

As equações (2.8) e (2.9) modelam os dois objetivos considerados: (i) minimização do número de relés a serem substituídos, e; (ii) minimização do somatório dos tempos de atuação dos relés do circuito. Esses dois objetivos são claramente contraditórios, uma vez que quanto maior o número de relés digitais presentes na rede, maior será a capacidade de ajuste dos parâmetros de configuração dos relés e, portanto, menores serão os tempos de atuação. Isto faz deste um problema de otimização multiobjetivo.

$$f_1 = \min N_{RelésSubstituidos} \quad (2.8)$$

$$f_2 = \min \sum_{i=1}^n T_i \quad (2.9)$$

sujeito a:

$$T_{ij} - T_i \geq ITC_{min}, \forall i \in 1, \dots, n, \forall j \in \beta_i \quad (2.10)$$

$$TMS_i \in TMS_i^{vals}, \forall i \in 1, \dots, n \quad (2.11)$$

$$MC_i \in MC_i^{vals}, \forall i \in 1, \dots, n \quad (2.12)$$

Nesse modelo a equação (2.8) tem por objetivo reduzir os investimentos, uma vez que o aumento no número de relés a serem substituídos implica em um maior investimento de aquisição. Já na equação (2.9), T_i corresponde ao tempo de atuação de cada um dos relés após a coordenação do sistema. Sendo assim, espera-se que, com a minimização de f_2 , o sistema tenha ganho de performance ao reagir mais rápido diante da detecção de correntes de curto-circuito.

Uma solução para este problema compreende a configuração de todos os relés que

fazem parte do sistema de proteção, com suas configurações de fábrica e seus ajustes definidos (*TMS* e *MC*), sejam eles originais ou novos (substituídos). Para obtenção dos melhores ajustes, a partir de uma solução, o sistema deve ser coordenado de maneira a minimizar a função objetivo 2. Este é um complicador significativo para este trabalho, uma vez que o problema de coordenação é um problema de otimização não-linear de alta complexidade.

2.2.2 Revisão Bibliográfica

A seguir é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o tema modernização da proteção. Nas pesquisas realizadas foram encontrados trabalhos com foco na alocação de novos dispositivos ao longo da rede, mas não especificamente tratando apenas o problema de substituição de relés.

Em [7], é proposta uma ferramenta voltada a alocar equipamentos de proteção e unidades de geração distribuída (GD) em redes de distribuição. No modelo considerado, busca-se minimizar a energia não suprida pelo sistema de distribuição quando este opera sob situações de contingências. São observadas restrições de natureza técnica, relacionadas à coordenação dos dispositivos de proteção e a topologia do sistema, além de restrições de natureza econômica, relacionadas aos custos de instalação e operação dos dispositivos de proteção, capacidade nominal e quantidade de GDs disponível para alocação, natureza e importância da carga. O problema foi formulado como um problema de programação não linear inteiro mista (PNLIM) e, para sua resolução, foi implementado um algoritmo genético a fim de determinar os melhores pontos para alocação de dispositivos de proteção e unidades de geração distribuída. Os resultados demonstraram melhoria nos índices de confiabilidade dos alimentadores utilizados.

Outro exemplo é a referência [30], onde Silva et al. apresentam uma metodologia para alocação e/ou realocação de dispositivos de controle e proteção em redes de distribuição, objetivando melhorar os índices de qualidade do serviço. É apresentado um modelo de programação não linear binária (PNLB) para o problema de alocação e/ou

realocação de chaves seccionadoras e dispositivos de proteção em alimentadores radiais aéreos de distribuição. Para solução desse problema foi proposto um algoritmo de Busca Tabu Reativo. Os resultados obtidos por meio de simulações de circuitos encontrados na literatura e de um circuito real comprovam a eficiência da metodologia proposta para a redução do tempo de interrupção e do número de clientes afetados pela incidência de faltas, melhorando os índices de confiabilidade dos alimentadores de distribuição.

Neste trabalho é proposta uma metodologia, baseada em algoritmos de otimização, para priorização da modernização do sistema de proteção no que tange à substituição dos relés direcionais de sobrecorrente já instalados na rede. São avaliados os impactos técnicos gerados pela substituição de relés eletromecânicos por digitais, a saber, o tempo de atuação, além dos impactos financeiros, representados pelos investimentos na aquisição de novos equipamentos. Por fim, busca-se obter como resultado final a ordenação de relés a serem priorizados, a fim de maximizar o benefício técnico.

Capítulo 3

Algoritmos de Otimização

Ao longo deste capítulo é apresentado um referencial teórico acerca das técnicas e métodos utilizados na realização desta pesquisa. Todo este arcabouço teórico serviu de base para a concepção e construção das ferramentas propostas neste trabalho.

3.1 Algoritmo P_{ϵ} -Restrito

De acordo com [32], uma técnica alternativa para a geração de soluções eficientes é o método P_{ϵ} -Restrito, que consiste em, dado um problema com dois ou mais objetivos, por exemplo, transformar todas as funções-objetivo, exceto uma, em restrições, tornando o problema em um problema de otimização mono-objetivo restrito, conforme exposto nas equações 3.1 e 3.2.

Conclui-se então que, variando-se parametricamente ϵ_j , é possível gerar o conjunto de soluções eficientes do problema.

Esse método possui a característica de não ser computacionalmente simples no caso de problemas com objetivos não-lineares, pois esse se tornam restrições não-lineares. Com isso, os problemas gerados passam a ter uma estrutura de restrições mais complexa que o problema multi-objetivo original [32].

$$\min f_i(x) \tag{3.1}$$

sujeito a:

$$f_i(x) \leq \epsilon_j, j = 1, \dots, m, j \neq i \quad (3.2)$$

A respeito da formulação proposta pelo método, [32], observa-se que:

- Como boa parte dos problemas mono-objetivo assim gerados deverá ter região factível pequena, há uma grande chance de que o algoritmo desenvolva parte de sua busca em regiões inactíveis. Isto significa que o mecanismo de otimização que vier a ser empregado deve necessariamente ser adequado para realizar parte da busca dentro de regiões inactíveis.
- A estrutura de restrições do problema original fica bastante alterada. Em particular, algumas propriedades que poderiam estar presentes nas restrições originais, tais como a linearidade ou a convexidade, muito dificilmente serão preservadas.
- A maneira de transformar funcionais-objetivo em restrições também pode potencialmente definir aspectos importantes do problema mono-objetivo resultante. Alguns métodos de implementação dessa transformação causam, por exemplo, a perda das propriedades de diferenciabilidade e/ou de continuidade dos funcionais.

Na sequência são apresentados os algoritmos de otimização propostos e as ferramentas necessárias para uso destes algoritmos.

3.2 Método Heurístico Guloso

De acordo com [24], um método heurístico guloso, partindo da iteração zero em que o conjunto solução é vazio, incorpora a cada iteração $t = 1, 2, \dots$ um novo elemento ao conjunto solução, de maneira que o ganho com a incorporação deste elemento seja máximo.

De forma geral, os algoritmos gulosos e os problemas por eles resolvidos são caracterizados por [26]:

- Há um problema a ser resolvido e para construir a solução existe um conjunto de candidatos.
- Durante a execução do algoritmo são criados dois conjuntos: um contém os elementos que foram avaliados e rejeitados e outro os elementos que foram analisados e escolhidos.
- Há uma função que verifica se um conjunto de candidatos produz uma solução para o problema. Neste momento, questões de otimalidade não são levadas em consideração.
- Uma segunda função é responsável por verificar a viabilidade do conjunto de candidatos, ou seja, se é ou não possível adicionar mais candidatos a este conjunto de tal forma que pelo menos uma solução seja obtida. Assim como no item anterior, não há preocupação com otimalidade.
- Uma terceira função, denominada função de seleção, busca identificar qual dos candidatos restantes (isto é, que ainda não foram analisados e enviados ou para o conjunto dos rejeitados ou dos aceitos) é o melhor (o conceito de melhor dependerá do contexto do problema).
- Por fim, existe a função objetivo, a qual retorna o valor da solução encontrada.

A seguir é apresentado o pseudo-código de um Algoritmo Guloso genérico, que segue os passos descritos acima.

Algoritmo Guloso genérico (extraído de [26])

- 1: $S \leftarrow 0$;
- 2: **while** $C \neq 0$ and não solução(S) **do**
- 3: $x \leftarrow \text{seleciona}C$;
- 4: $C \leftarrow C(x)$;

```
5:  if é viável  $S \cup \{x\}$  then
6:     $S \leftarrow S \cup \{x\}$ ;
7:  end if
8: end while
9: if solução(S) then
10:  retorne S;
11: else
12:  retorne "Não existe solução!";
13: end if
```

3.3 Algoritmo Genético

Os Algoritmos Evolucionários (AE's) constituem uma família de métodos estocásticos de busca mono-objetivo e multiobjetivo baseados no processo de evolução natural. Segundo [21], os AE's têm como vantagens sua grande capacidade de encontrar ótimos globais de funções com alto grau de complexidade e o fato de não exigirem o cálculo de derivadas. Além disso, no caso específico da busca multiobjetivo, o emprego de algoritmos evolucionários tem ainda como vantagem o fato de que seus métodos geralmente trabalham com um conjunto de pontos a cada iteração, permitindo que várias amostras da fronteira Pareto sejam obtidas em uma única execução do algoritmo.

Dentro da Otimização Evolucionária merecem destaque os Algoritmos Genéticos (AGs), que têm como inspiração também a genética. Estes são populares por sua larga aplicabilidade, além de fácil utilização [11, 21].

Vale destacar que, no contexto de otimização combinatória, não se conhecem métodos exatos para solução de problemas do tipo *NP-difícil* em tempo polinomial. Isso faz com que a obtenção de boas soluções em tempo aceitável geralmente só seja possível através de algoritmos que empregam algum tipo de randomização. Os algoritmos

evolucionários constituem portanto boas alternativas para tratar estes problemas, uma vez que estes utilizam estratégias estruturadas de randomização sempre voltadas para o aprimoramento das soluções candidatas [8].

3.3.1 Conceitos Básicos dos Algoritmos Genéticos

Para compreender o funcionamento dos AG's, faz-se necessário realizar uma analogia ao mecanismo de evolução das espécies, como segue [28]:

- Inicialmente é formada uma população formada por um conjunto aleatório de indivíduos, que podem ser vistos como possíveis soluções do problema.
- Durante o processo evolutivo, esta população é avaliada, sendo que para cada indivíduo é atribuída uma nota, ou índice, que reflete sua habilidade de adaptação ao ambiente (*fitness*).
- Uma parte dos indivíduos é mantida, enquanto os outros são descartados. Indivíduos mais aptos têm maiores chances de sobreviver.
- Os membros mantidos pela seleção podem sofrer modificações em suas características fundamentais por meio de cruzamentos e mutações, gerando descendentes para a próxima geração. Este processo, chamado de reprodução, é repetido até que uma solução satisfatória seja encontrada.

Embora possam parecer simplistas do ponto de vista biológico, estes algoritmos são suficientemente complexos para fornecer mecanismos de busca adaptativos poderosos e robustos [28].

3.4 Variable Neighborhood Search

Segundo [16], o Variable Neighborhood Search (VNS) é uma plataforma para construção de heurísticas que explora sistematicamente a ideia de mudança de vizinhanças,

tanto na descida até um mínimo local, quanto para escapar dos vales que os contém. Contrariamente a outras meta-heurísticas, baseadas em métodos de busca local, o método VNS não segue uma trajetória, mas sim explora vizinhanças gradativamente mais distantes da solução corrente e focaliza a busca em torno de uma nova solução se, e somente se, um movimento de melhora é realizado. O método inclui também um procedimento de busca local a ser aplicado sobre a solução corrente. Esta rotina de busca local também pode usar diferentes estruturas de vizinhança [25].

Um algoritmo de busca local define, para cada solução, uma vizinhança composta por um conjunto de soluções com características muito próximas. Dada uma solução corrente, uma das formas de implementar um algoritmo de busca local é percorrer a vizinhança dessa solução em busca de outra com valor menor (para um problema de minimização). Se tal solução vizinha for encontrada, torna-se a nova solução corrente e o algoritmo continua. Caso contrário, a solução corrente é um ótimo local em relação à vizinhança adotada [22].

O algoritmo a seguir demonstra um pseudo-código do VNS extraído de [31]. Na sequência dessa seção é discutido o Variable Neighborhood Descendent (VND), que é um dos métodos mais utilizados para busca local dentro do VNS.

Estrutura Básica do VNS

- 1: Seja s_0 uma solução inicial e R o número de estruturas diferentes de vizinhança;
- 2: $x \leftarrow s_0$;
- 3: **while** Critério de parada o satisfeito **do**
- 4: $k \leftarrow 1$;
- 5: **while** $k \leq r$ **do**
- 6: Gere um vizinho qualquer $s' \in N^{(k)}(s)$;
- 7: $s'' \leftarrow BuscaLocal(s')$;
- 8: **if** $f(s'') < f(s)$ **then**

```
9:       $s \leftarrow s''$ ;  
10:      $k \leftarrow 1$ ;  
11:     else  
12:      $k \leftarrow k + 1$ ;  
13:     end if  
14:   end while  
15: end while
```

3.5 Variable Neighborhood Descendent

O Variable Neighborhood Descendent (VND) é uma estratégia de melhoria local que é comumente utilizada na implementação do VNS e de outras metaheurísticas.

O VND consiste em, a partir de uma solução inicial x , encontrar uma direção de descida de x , dentro da vizinhança $N(x)$, e mover para o mínimo de $f(x)$ dentro de $N(x)$ naquela direção. Se não há direção de descida, a heurística para. Caso contrário ela é iterada [16]. Esta estrutura é ilustrada no algoritmo 3.5.

Estrutura Básica do VND

```
1:  $x \leftarrow$  solução inicial;  
2:  $N(x) \leftarrow$  estrutura de vizinhança;  
3:  $continue \leftarrow true$ ;  
4: while  $continue$  do  
5:   encontrar  $x' = argmin_{N(x)} f(x)$ ;  
6:   if  $f(x') < f(x)$  then  
7:      $x \leftarrow x'$ ;  
8:      $f(x) \leftarrow f(x')$ ;  
9:   else  
10:     $continue \leftarrow false$ ;
```

11: **end if**

12: **end while**

Capítulo 4

Ferramenta Proposta

A ferramenta proposta neste trabalho compreende um conjunto de algoritmos de otimização que trabalham de forma integrada, a fim de determinar a priorização de substituição de relés em redes de distribuição e transmissão. Inicialmente foi implementada uma ferramenta rápida para coordenação da proteção, necessária para avaliação das soluções candidatas. Com base nessa ferramenta foram desenvolvidos um algoritmo genético e dois algoritmos de busca local baseados em vizinhança para determinação dos melhores relés a serem substituídos tendo como objetivo a melhoria do desempenho da proteção. Esses dois últimos algoritmos são um método heurístico baseado em uma lógica gulosa e um algoritmo VNS.

4.1 Ferramenta de Coordenação Rápida

Como forma de avaliar o impacto da substituição de relés eletromecânicos por digitais, fez-se necessária a implementação de um algoritmo capaz de realizar a coordenação da proteção neste novo cenário. Uma vez que o algoritmo de coordenação da proteção será executado a cada avaliação de uma nova solução gerada, é importante que este seja executado em baixo tempo computacional ou, caso contrário, a ferramenta de otimização se tornará impraticável sob o ponto de vista prático. Para atender a esta necessidade, foi proposta uma ferramenta de coordenação rápida composta por três passos básicos.

- Passo 1: Definição dos valores iniciais de MC .
- Passo 2: Aprimoramento de MC por par de relés.
- Passo 3: Aprimoramento de MC por relé individual.

Essa ferramenta assume como premissa que o ajuste de TMS dos relés é contínuo dentro do intervalo do modelo. No entanto, vale destacar que essa premissa não é forte, uma vez que relés eletromecânicos geralmente tem ajuste contínuo de TMS e os relés digitais geralmente apresentam uma resolução alta tanto para TMS quanto para MC .

É esperada, como resposta final, uma boa solução para a coordenação do sistema de proteção, ainda que esta não seja ótima. Isto tornará factível a comparação entre as configurações propostas pelos algoritmos de priorização da substituição de relés.

Cada um dos passos dessa ferramenta é discutido na sequência.

4.1.1 Passo 1: Definição dos valores iniciais de MC

Este passo inicial tem como objetivo reduzir o espaço de busca dentro dos intervalos possíveis para o multiplicador de corrente (MC) e, dentro destes intervalos reduzidos, definir bons valores iniciais para MC em cada relé.

Redução do Espaço de Busca de MC

O intervalo de possíveis valores para o multiplicador de corrente de cada relé digital é, geralmente, muito grande, o que resulta em um espaço de busca também extenso. Porém, é possível reduzir este intervalo por meio da eliminação de regiões que gerariam tempos de atuação necessariamente ineficazes. Sabe-se que o tempo de operação de cada relé é calculado conforme as equações (4.1) e (4.2), para atuação como primário

ou secundário, respectivamente.

$$T_i = TMS \left[\alpha + \frac{\beta}{\left(\frac{I_i^{cc}}{MC_i \cdot RTC_i} \right)^\gamma - 1} \right] \quad (4.1)$$

$$T_{ji} = TMS \left[\alpha + \frac{\beta}{\left(\frac{I_{ji}^{cc}}{MC_i \cdot RTC_i} \right)^\gamma - 1} \right] \quad (4.2)$$

Com base nessas equações, é possível notar que as seguintes inequações devem ser garantidas:

$$\left(\frac{I_i^{cc}}{MC_i \cdot RTC_i} \right)^\gamma - 1 > 0 \quad (4.3)$$

$$\left(\frac{I_{ji}^{cc}}{MC_i \cdot RTC_i} \right)^\gamma - 1 > 0 \quad (4.4)$$

Logo, o valor de MC de um relé, quando este atua como primário, deve ser limitado a:

$$MC_i < \frac{I_i^{cc}}{RTC_i} \quad (4.5)$$

e quando este atua como secundário:

$$MC_i < \frac{I_{ji}^{cc}}{RTC_i} \quad \forall j \mid i \in \mathcal{R}_j \quad (4.6)$$

Para estabelecer o limite superior de MC , deve-se considerar o menor valor obtido entre (4.5) e (4.6), quando calculadas para o mesmo relé. É possível que um relé apareça como backup em mais de um par primário/secundário. Nesse caso, deve-se calcular (4.6) para cada par em que o relé é a proteção secundária e assumir como limite o menor valor observado.

É importante notar que o valor de MC geralmente será limitado por (4.6), uma vez que I_{ji}^{cc} é, na maior parte dos casos, consideravelmente menor que I_i^{cc} . Além disso,

esse procedimento não afeta a possibilidade de se encontrar a solução ótima para o problema de coordenação, uma vez que ele só exclui soluções candidatas que seriam necessariamente inefectíveis.

Definição inicial de MC

Após a redução dos intervalos possíveis de MC , são definidos os valores iniciais de MC para cada relé. Estes valores são definidos com base na solução de um problema de otimização de uma variável $K \in [0, 1]$, que indica um valor a ser usado dentro do conjunto de valores admissíveis para MC em cada relé, como apresentado em (4.7)

$$MC_i = \mathcal{M}_i^{red}(K \cdot |\mathcal{M}_i^{red}|) \quad (4.7)$$

em que: \mathcal{M}_i^{red} é o conjunto de valores de MC admissíveis para o relé i , após a redução, e; $\mathcal{M}(i)$ retorna o i -ésimo elemento do conjunto \mathcal{M} .

Essa estrutura indexa os valores de MC com base nas dimensões das listas de valores admissíveis para cada relé. Também foi testada uma estrutura onde a variável K indexava um valor com base nos valores limites da lista, ao invés do tamanho. Porém, essa estrutura foi abandonada por apresentar piores resultados e por não convergir em alguns dos casos testados.

Dado um valor de K , e com base na modelagem proposta no Cap. 2, é construído o modelo apresentado de (4.8) a (4.13). Esse modelo pode ser resolvido por meio de programação linear, uma vez que todos os parâmetros são conhecidos, exceto TMS . Neste trabalho foi utilizado o Algoritmo de Pontos Interiores, implementado na versão acadêmica do software Gurobi Optimization 6.0 ¹.

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^n T_i(K, TMS_i) \quad (4.8)$$

sujeito a:

¹Reference: www.gurobi.com

$$T_{ij}(K, TMS_j) - T_i(K, TMS_i) \geq ITC_{min}, \forall i \in 1, \dots, n, \forall j \in \beta_i \quad (4.9)$$

$$TMS_i \in TMS_i^{vals}, \forall i \in 1, \dots, n \quad (4.10)$$

$$MC_i \in MC_i^{vals}, \forall i \in 1, \dots, n \quad (4.11)$$

onde:

$$T_i(K, TMS_i) = TMS_i \left[\alpha + \frac{\beta}{\frac{I_i^{cc}}{\mathcal{M}_i^{red}(K \cdot |\mathcal{M}_i^{red}|) \cdot RTC_i} \gamma} - 1 \right] \quad (4.12)$$

$$T_{ij}(K, TMS_j) = TMS_j \left[\alpha + \frac{\beta}{\frac{I_{ij}^{cc}}{\mathcal{M}_j^{red}(K \cdot |\mathcal{M}_j^{red}|) \cdot RTC_j} \gamma} - 1 \right] \quad (4.13)$$

O conjunto inicial de valores de MC é obtido por meio da minimização unidimensional da função (4.8), realizada em função da variável K . Os valores de TMS e restrições não são considerados nesse processo de otimização uma vez que estes são obtidos (e garantidos) pelo problema de programação linear. Por fim, a otimização unidimensional é realizada utilizando o Algoritmo de Seção Áurea [27].

4.1.2 Passo 2: Aprimoramento de MC por par de relés

Após a definição dos valores iniciais de MC_i , com base em um único K , é feito um novo procedimento de ajuste das soluções, onde agora cada par de relés primário / secundário pode assumir um valor de K distinto. Esse procedimento é feito conforme o algoritmo 4.1.2.

Estrutura Básica do Algoritmo de Cálculo de MC por Par de Relés

- 1: ordenar todos os relés por T_i ;
- 2: **for** $i = 1$ até $N_{relés}$ **do**

```

3:  for  $j = 1$  até  $N_{reles}$  do
4:    if  $rele_j$  é secundário de  $rele_i$  then
5:      executar passo 1 apenas para relés  $i$  e  $j$ , mantendo-se os demais  $MC'$ s fixos;
6:    end if
7:  end for
8: end for

```

A obtenção dos valores de K para cada par r_p/r_s é feita por meio da aplicação do Algoritmo de Seção Áurea para solução do problema de otimização posto nas equações de (4.8) a (4.13), de maneira análoga ao procedimento descrito na Seção 4.1.1.

4.1.3 Passo 3: Aprimoramento de MC por relé individual

A solução do passo 2 é utilizada como condição inicial da última etapa. Nessa etapa é encontrado um valor de K_i para cada um dos relés, conforme apresentado no algoritmo 4.1.3.

Estrutura Básica do Algoritmo de Cálculo de MC por Relé

```

1: ordenar todos os relés por  $T_i$ ;
2: for  $i = 1$  até  $N_{reles}$  do
3:   executar passo 1 apenas para relé  $i$ , mantendo-se os demais  $MC'$ s fixos;
4: end for

```

Esse procedimento é bem similar ao executado no passo 2. A única diferença é que aqui a seção áurea é utilizada para encontrar um valor de K para cada relé ao invés de um valor de K para cada par primário/secundário.

Espera-se que a solução obtida ao fim desse passo aproxime de forma adequada a melhor solução que poderia ser obtida por meio da solução do problema de coordenação de forma completa, considerando todas as suas características, iterações e restrições.

4.1.4 Variantes do Algoritmo de Coordenação Rápida

Foram propostos duas versões para a ferramenta de coordenação rápida, sendo uma iterativa e uma não-iterativa, mais rápida porém com resultados menos precisos.

A versão iterativa se difere da não-iterativa pelo fato de que os passos 2 e 3, detalhados nas seções 4.1.2 e 4.1.3, respectivamente, são executados em loop até que os valores de K obtidos estabilizem dentro de uma tolerância. Na versão não-iterativa os valores de K , por par de relés e por relé individual, são calculados uma única vez.

4.2 Algoritmo P_ε -restrito

Nos casos de troca de apenas um relé ($N_{relesSubstituidos} = 1$) ou de todos os relés menos um ($N_{relesSubstituidos} = N_{reles} - 1$), é possível resolver o problema considerado por meio de busca exaustiva, em tempo polinomial, devido a baixa complexidade de avaliação.

Já nos casos intermediários ($2 \leq N_{relesSubstituidos} \leq N_{reles} - 2$) foi utilizado o algoritmo P_ε -restrito, com a variável $N_{relesSubstituidos}$ sendo incrementada em uma unidade ao fim de cada execução do algoritmo. Essa estrutura, ilustrada no algoritmo 4.2 a seguir, foi aplicada a todos os algoritmos de otimização propostos.

Estrutura do Algoritmo P_ε -restrito

- 1: **for** $N_{relesSubstituidos} = 1$ até $N_{reles} - 1$ **do**
 - 2: $i \leftarrow N_{relesSubstituidos}$
 - 3: $f_{gulosos,i} \leftarrow AlgoritmoGuloso(N_{relesSubstituidos});$
 - 4: **if** $N_{relesSubstituidos} > 1$ AND $N_{relesSubstituidos} < N_{reles} - 1$ **then**
 $f_i \leftarrow AlgoritmoOtimizacao(N_{relesSubstituidos});$
 - 5: **end if**
 - 6: **end for**
-

A seguir serão apresentados os algoritmos propostos para otimização mono-objetivo para cada valor de $N_{relesSubstituidos}$.

4.3 Método Heurístico Guloso

Foi implementado um método heurístico guloso a fim de gerar boas soluções com ordem de complexidade linear, variando-se o número de relés substituídos de um relé até todos os relés da rede. Para cada caso são avaliadas todas as possibilidades de substituição de apenas um relé.

Nota-se que a solução ótima para a substituição de um único relé pode ser encontrada com complexidade $O(n)$, assim como a solução para $N_{reles} - 1$ substituídos. A partir de $N_{relesSubstituidos} = 2$ o algoritmo parte da melhor alternativa obtida na iteração anterior ($N_{relesSubstituidos} - 1$) considerando a substituição de um relé. São avaliadas todas as possibilidades de substituição de um único relé, mantendo-se todas as alterações observadas em iterações anteriores.

Este algoritmo foi implementado em dois passos, sendo um direto e um reverso. O primeiro avalia, para cada valor de $N_{relesSubstituidos}$ variando entre 1 até $N_{reles} - 1$, todas as alternativas para inclusão de um novo relé no conjunto de relés a serem substituídos obtido no passo anterior. O segundo passo, chamado guloso reverso, realiza o mesmo procedimento porém de forma decrescente, ou seja, variando-se o número de relés substituídos de $N_{reles} - 1$ a 1. A melhor solução para cada valor de $N_{relesSubstituidos}$ é então adotada como a melhor solução gulosa para aquele ponto da fronteira.

Uma vez que este algoritmo possui ordem de complexidade linear, é esperado um tempo de processamento reduzido. No entanto, ele apresenta convergência para o ótimo local mais próximo de sua vizinhança.

Por fim, foram também avaliadas duas estratégias gulosas, tendo como princípio a ordenação dos relés por tempo de atuação (crescente e decrescente) ao invés de avaliar todos os relés para cada passo. Essas alternativas foram descontinuadas por terem

apresentados resultados consideravelmente inferiores ao algoritmo guloso acima descrito.

O conjunto de soluções obtidas pelo algoritmo guloso serviram de solução inicial para o VNS e constituíram indivíduos da população inicial do Algoritmo Genético.

4.4 Algoritmo Genético

Nesta seção é apresentado o Algoritmo Genético elaborado neste trabalho, com especial enfoque nos operadores genéticos desenvolvidos para tratar o problema proposto.

4.4.1 Representação das Soluções

Cada indivíduo do AG e do VNS foi modelado como uma permutação dos $N_{relés}$ instalados na rede, onde as primeiras $N_{relésSubstituidos}$ posições indicam os relés que deveriam ser substituídos naquela solução. Um exemplo de indivíduo é apresentado na figura 4.1. Nesse caso, $N_{relés} = 10$, $N_{relésSubstituidos} = 2$ e o indivíduo indica a troca dos relés 2 e 8.



Figura 4.1: Exemplo de uma solução do AG ou VNS

4.4.2 Inicialização e Seleção

A solução obtida pelo Método Heurístico (guloso) para $N_{relésSubstituidos}$ relés substituídos é introduzida como o primeiro indivíduo da população do AG. As demais soluções da população são permutações aleatórias, geradas seguindo distribuição uniforme.

A seleção dos indivíduos foi feita por meio do método do operador de Roleta Estocástica e elitismo [13]. Não foram adotados mecanismos de escalonamento da função

objetivo neste problema, pois estes se mostraram prejudiciais para a convergência do método.

4.4.3 Avaliação dos Indivíduos

A avaliação de cada indivíduo é feita utilizando a ferramenta de coordenação rápida proposta (seção 4.1). Dado o conjunto de relés para substituição, esta ferramenta retorna o tempo de atuação da proteção na solução (função f_2 , que mede o desempenho da proteção), além dos valores de TMS e MC a serem adotados.

4.4.4 Cruzamento

O operador de cruzamento proposto é baseado no cruzamento com um ponto de corte [13], mas adaptado para lidar com as particularidades dos indivíduos (permutações com parte ativa e inativa). Este funciona com base nos seguintes passos:

1. Inicialmente são geradas duas permutações aleatórias, uma por indivíduo, cobrindo apenas a parte ativa dos indivíduos (relés que serão substituídos).
2. É gerado um número aleatório u de 1 a $N_{relésSubstituidos} - 1$. Esse número u é o ponto de corte dos vetores de permutação gerados no passo anterior.
3. Os conteúdos correspondentes às posições indicadas pelos índices compreendidos entre 1 e u dos vetores de permutação nos dois indivíduos são trocados.
4. Em seguida, os identificadores de relés removidos da codificação são recolocados nas posições que armazenavam os novos valores inseridos, evitando assim repetição e ausências de relés, garantindo que a solução gerada é válida.

Um exemplo de cruzamento é apresentado na figura 4.2. Nesse caso $N_{relésSubstituidos} = 4$ e $u = 2$, o que significa que as duas primeiras posições dos vetores de permutação são permutadas entre os dois indivíduos. Logo os conteúdos das posições 4 e 1 do

primeiro indivíduo são trocados com os conteúdos das posições 3 e 2 do segundo, respectivamente. Por fim, são realizadas as trocas necessárias para garantir que ambos os indivíduos permaneçam permutações válidas. No exemplo: (i) no primeiro indivíduo o valor 8 (segunda posição) aparece duas vezes, e é substituído por 2, que estava ausente na permutação; (ii) no segundo indivíduo o valor 2 (sexta posição) é substituído por 8.

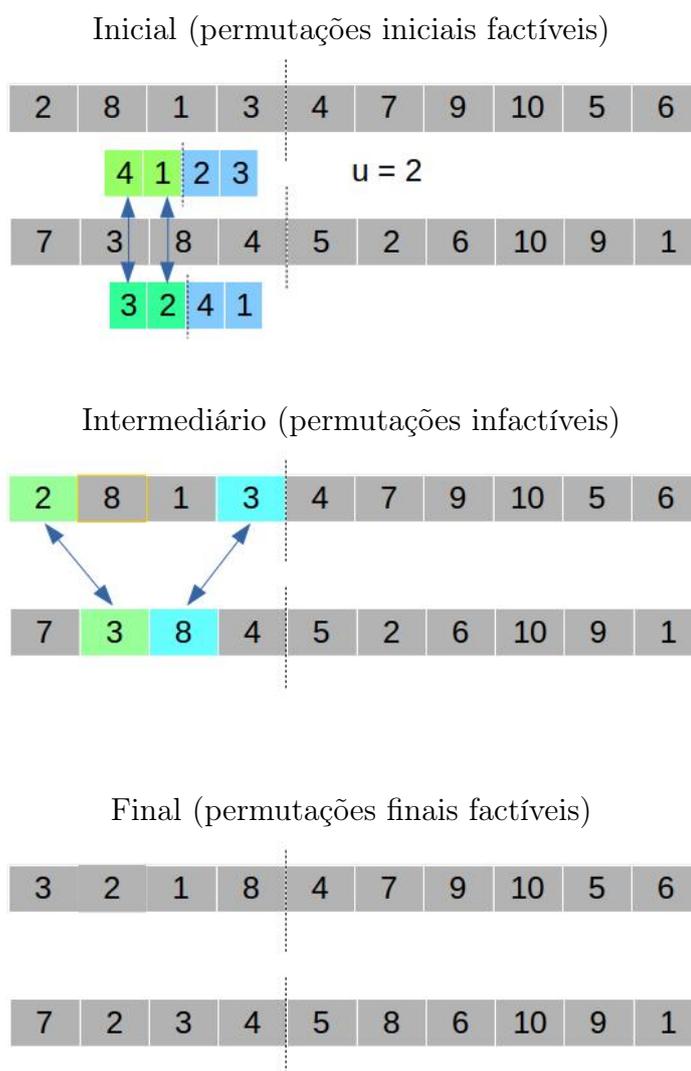


Figura 4.2: Cruzamento de dois indivíduos – $N_{reles} = 10$, $N_{relesSubstituidos} = 4$ e $u = 2$

4.4.5 Mutação

O operador de mutação adotado é inspirado no operador de *swap*, comumente adotado para permutações. Nesse operador, duas posições distintas da permutação são sorteadas e trocadas, de tal forma que o indivíduo permaneça factível. A única diferença entre o operador adotado e o *swap* clássico, é que o operador de mutação considerado garante que uma das posições para troca é escolhida na parte ativa do indivíduo, que compreende os relés que serão substituídos, e a outra na parte inativa. Nesse caso, garante-se não só factibilidade, mas também a variação da solução de entrada sob o ponto de vista prático.

Um exemplo de uso desse operador de mutação é apresentado na figura 4.3. Neste exemplo foram escolhidas as posições 2 e 5, das regiões ativa e inativa respectivamente. O indivíduo mutado passou então a indicar a troca dos relés 2 e 4 ao invés de 2 e 8 no indivíduo original.

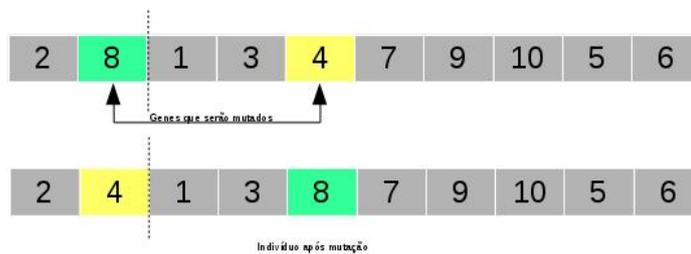


Figura 4.3: Mutação de um indivíduo

4.5 Variable Neighborhood Search

A implementação do Variable Neighborhood Search seguiu a estrutura proposta na seção 3.4. Foram consideradas duas funções de vizinhança. A primeira delas consistiu em uma operação de swap simples, na qual um relé que seria substituído na é trocado de posição com um relé que não seria substituído, assim como o operador de mutação

do AG. Já a segunda função de vizinhança consiste no swap de um par de relés da parte útil do indivíduo (região de relés a serem substituídos) por um par de relés primário/secundário da parte não útil. O objetivo deste segundo procedimento é forçar a inclusão de pares de relés na região útil do indivíduo.

A seguir é apresentada a estrutura básica do algoritmo implementado.

Estrutura do Algoritmo VNS Implementado

- 1: escolher uma vizinhança $k = 1$;
 - 2: escolher uma solução inicial s ($f_2(s) = f$), pertencente à vizinhança k ;
 - 3: **while** $k < 3$ **do**
 - 4: $s' \leftarrow$ gerar uma perturbação em s com função de vizinhança k ;
 - 5: $f' \leftarrow VND(s')$;
 - 6: **if** $f' \leq f$ **then**
 - 7: $s \leftarrow s'$;
 - 8: $f \leftarrow f'$;
 - 9: $k \leftarrow 1$;
 - 10: **else**
 - 11: $k \leftarrow k + 1$;
 - 12: **end if**
 - 13: **end while**
-

Após a perturbação, provocada por uma das funções de vizinhança, é executado o algoritmo VND (vide seção 3.5), com o papel de mecanismo de busca local. A versão do VND implementada é baseada em uma estratégia de *best improvement*, onde toda a vizinhança é avaliada para identificação da solução que irá substituir a solução atual. O procedimento do algoritmo é descrito a seguir.

Estrutura do Algoritmo VND Implementado

```

1: escolher uma solução inicial  $s$  com função-objetivo  $f$ ;
2:  $x = 1$ ;
3:  $fo \leftarrow f$ ;
4: for  $k = N_{relesSubstituidos} - x$  até 1 do
5:    $s' \leftarrow s$ ;
6:    $s'[k - x; k] \leftarrow s[k + 1; k + x + 1]$ ;
7:    $s'[k + 1; k + x + 1] \leftarrow s[k - x; k]$ ;
8:    $f' \leftarrow AlgoritmoGuloso(s')$ ;
9:   if  $f' < f$  then
10:      $s \leftarrow s'$ ;
11:      $f \leftarrow f'$ ;
12:      $k = k - 1$ ;
13:   end if
14:   if  $k = 1$  and  $f < fo$  then
15:      $k = N_{relesSubstituidos} - 1$ ;
16:      $fo \leftarrow f$ ;
17:   else
18:     if  $x > N_{relesSubstituidos}/2$  then
19:        $x = x + 1$ ;
20:     end if
21:   end if
22: end for

```

Por fim, o algoritmo VNS é executado até que não haja melhora na solução após três perturbações consecutivas (critério de parada).

Capítulo 5

Resultados

Com o intuito de validar a metodologia proposta, foram utilizadas três instâncias da literatura, sendo dois sistemas de transmissão e uma rede de distribuição. Os algoritmos propostos foram executados com objetivo de obter as melhores aproximações possíveis da fronteira de Pareto para cada sistema.

5.1 Instâncias

Foram utilizados três sistemas malhados obtidos na literatura, sendo duas redes de transmissão e uma de distribuição com geração distribuída.

O primeiro sistema teste (Sistema 1), extraído de [1], consiste em uma rede de transmissão com 14 relés apresentada na figura 5.1. Neste problema, as variáveis TMS variam de forma contínua no intervalo $[0,1; 1,1]$ e as variáveis MC podem assumir qualquer valor discreto no conjunto $\{0,5; 0,6; 0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5\}$. Assim como na referência, assumiu-se $ITC_{min} = 0,3s$.

O Sistema 2, também proposto por [1], é uma rede de distribuição malhada, com 15 barras, 42 relés e grande penetração de geração distribuída (6 geradores), conforme representado na figura 5.2. Neste sistema, os valores de TMS variam de forma contínua no intervalo $[0,1; 3,2]$, e MC pode assumir um dos valores $\{0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5\}$. Para o algoritmo de coordenação assumiu-se ITC_{min} como $0,2s$, uma vez que este foi o valor utilizado originalmente.

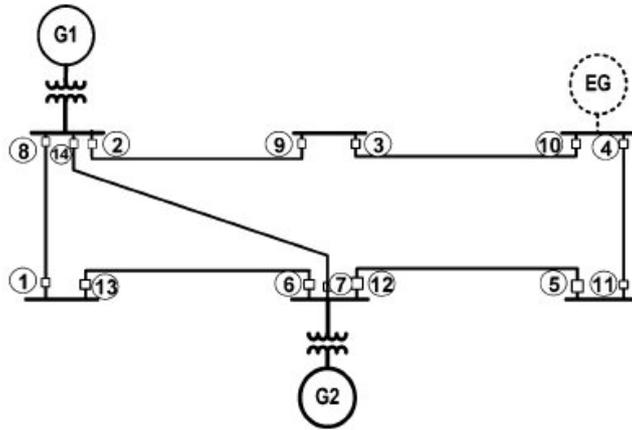


Figura 5.1: Sistema 1

Por fim, o Sistema 3 consiste em uma rede de transmissão equivalente, com 19 barras, 11 linhas de transmissão e 22 relés. Este sistema foi proposto em [6] e é apresentado na figura 5.3. Os valores de TMS e MC variam de forma discreta em passos de 0,01, em intervalos específicos para cada equipamento (vide referência para maiores detalhes). Foi definido $ITC_{min} = 0,3s$ para todos os pares de relés.

Todos os sistemas consideram relés ajustados com curva normalmente inversa. Foi utilizado como relé candidato para instalação o SR750/760 da marca GE. Este relé possui os seguintes conjuntos de ajustes possíveis:

- $\mathcal{T} = \{0,05; 0,06; \dots; 19,99; 20,00\}$
- $\mathcal{M} = \{0,05; 0,06; \dots; 99,99; 100,00\}$

5.2 Algoritmos e Parâmetros

A ferramenta de coordenação rápida foi implementada em Matlab R2010¹, com os problemas de programação linear sendo resolvidos com a API Matlab da versão acadêmica do software Gurobi Optimization 6.0. Os algoritmos de otimização foram implementados integralmente em Matlab R2010, de forma serial.

¹Referencia: www.mathworks.com/products/matlab/

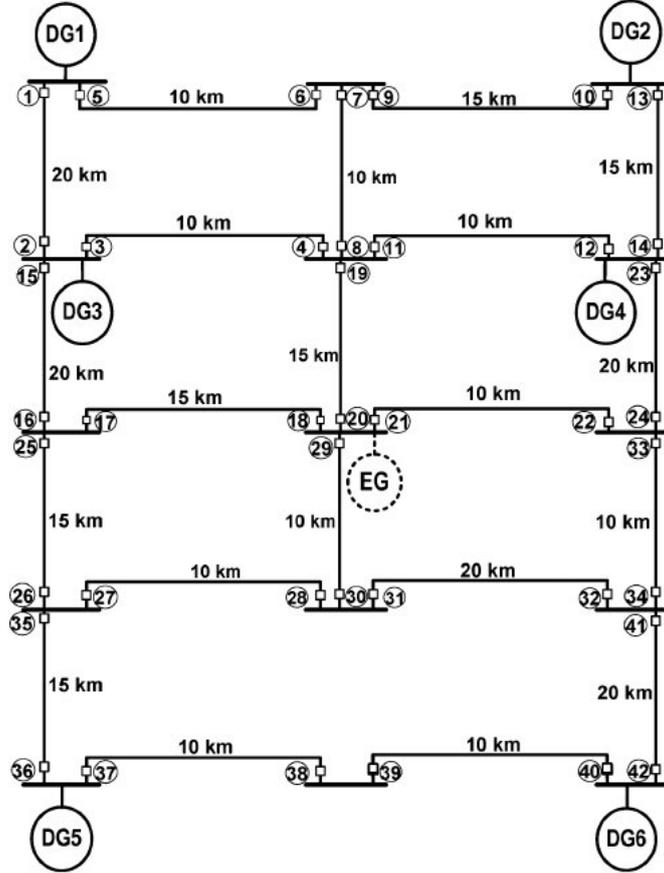


Figura 5.2: Sistema 2. Na representação DG indica as unidades de geração distribuída e EG indica uma conexão com o grid externo.

Para cada instância utilizada foram executados os algoritmos propostos para determinação dos relés a serem substituídos para $N_{relesSubstituidos}$ variando no intervalo de $[1; N_{reles}]$. O caso base ($N_{reles} = 0$) também foi coordenado e avaliado para servir como referência.

Para avaliação de cada uma das instâncias, inicialmente foi executado o Método Heurístico, para todos os possíveis valores de $N_{relesSubstituidos}$. A partir dessa execução obteve-se a melhor resposta da heurística gulosa para cada valor de $N_{relesSubstituidos}$. Esses valores foram utilizados na inicialização dos demais algoritmos.

Uma vez que, para $N_{relesSubstituidos} = 1$ e $N_{relesSubstituidos} = N_{reles} - 1$ a solução gulosa é garantidamente ótima, as implementações do Algoritmo Genético e do VNS não foram

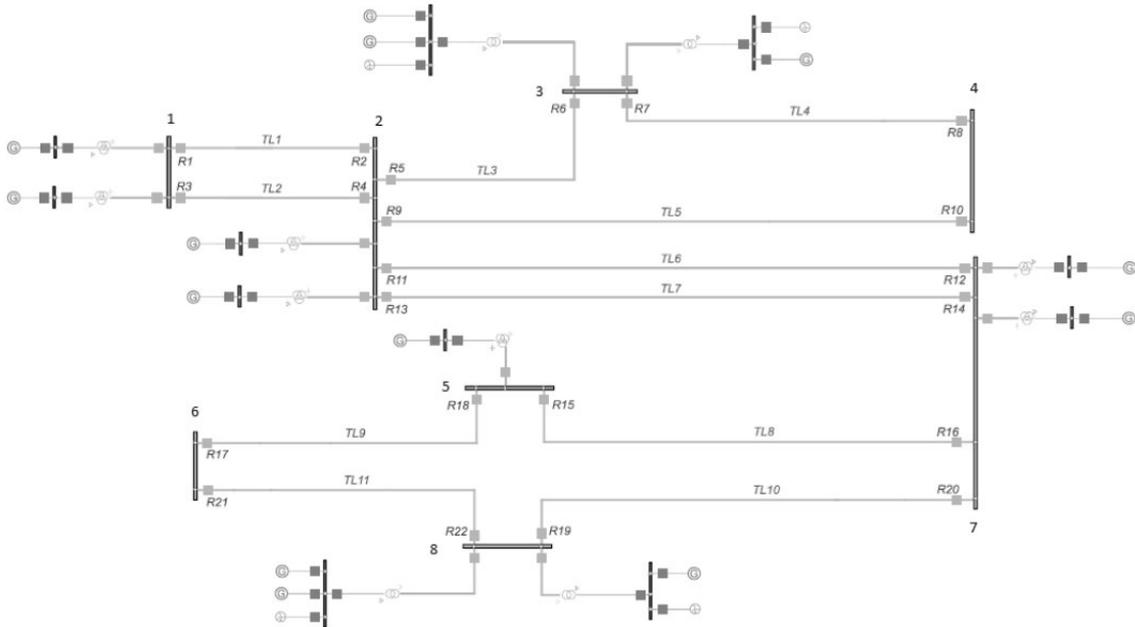


Figura 5.3: Sistema 3

executadas estes casos. Quando todos os relés foram substituídos ($N_{relesSubstituidos} = N_{reles}$), nenhum dos algoritmos foi executado, uma vez que a solução do problema é óbvia. Com isso, foi aplicada apenas a ferramenta de coordenação da proteção para avaliação da função objetivo 2.

O Algoritmo Genético foi inicializado com os seguintes parâmetros:

- $N_{pop} = 8$
- $Taxa_{cruzamento} = 0,5$
- $Taxa_{mutacao} = 1 - Taxa_{cruzamento}$
- $Tempo_{execucao} = 300$ s (critério de parada)

Já o VNS não possui parâmetros adicionais para ajuste, e foi executado até a ocorrência de três perturbações na solução corrente sem melhoria da solução. Todos os parâmetros relatados foram obtidos por meio de experimentação.

Por fim, os testes foram realizados em um computador portátil Ubuntu Linux 15.04 (64 bits), 8 GB de memória RAM e processador Intel Core i5 3317U de 2.0 GHz.

5.3 Validação da Ferramenta de Coordenação Rápida

Como forma de validar a ferramenta de coordenação rápida proposta, esta foi executada juntamente com um algoritmo genético para coordenação da proteção nas três instâncias descritas na seção 5.1. Esse algoritmo genético já havia sido validado anteriormente e se mostrou capaz de encontrar boas soluções para todas as instâncias consideradas: as soluções encontradas pelo algoritmo foram iguais ou superiores às melhores relatadas na literatura.

A tabela 5.3 a seguir demonstra os valores obtidos para cada uma das instâncias e algoritmos utilizados. As colunas f_2 e T correspondem, respectivamente, ao valor da função-objetivo, conforme (2.9), e o tempo de processamento. As peculiaridades dos métodos iterativo e não-iterativos foram detalhadas na seção 4.1.4 do capítulo 4. Para os três casos, o AG levou cerca de um minuto para encontrar a solução.

Tabela 5.1: Comparativo Estratégias de Coordenação

	GA	Iterativo		Não-Iterativo	
Sistema	f_2	f_2	T	f_2	T
1	8,4271	8,4271	0,3291	8,4271	0,1840
2	11,5517	11,5547	3,0950	11,5555	1,0657
3	12,2149	12,3803	1,2054	12,3803	0,5995

Analisando-se os valores apresentados na tabela 5.3 e comparando-se a ferramenta proposta com o GA, pode-se concluir que tanto o método iterativo como o não-iterativo apresentam boa precisão nos resultados obtidos para f_2 . Optou-se, portanto, por utilizar a estratégia não-iterativa no restante deste trabalho, uma vez que esta leva a resultados confiáveis, muito próximos dos obtidos pela versão iterativa, porém em um tempo computacional consideravelmente menor (geralmente a metade do tempo). Esse baixo tempo será importante nos testes, uma vez que essa ferramenta será executada

centenas, ou até milhares, de vezes por instância.

5.4 Sistema 1

As aproximações das fronteiras Pareto obtidas para o sistema 1 são apresentadas na figura 5.4. Nessa figura o eixo x representa o número de relés substituídos (f_1) e o eixo y representa a soma dos tempos de atuação dos relés primários (f_2) para faltas trifásicas próximas a estes relés. A posição $x = 0$ no gráfico corresponde à coordenação do sistema com a configuração atual, ou seja, sem a substituição de nenhum RDS. De forma análoga, a solução $x = 14$ ilustra o caso em que todos os relés foram substituídos. Para $x = 1$ e $x = 13$ foi executado apenas o algoritmo guloso. Para todos os outros casos foram aplicados os três algoritmos propostos.

Com base na figura é possível notar que o algoritmo guloso aproxima bem a fronteira Pareto com baixo custo computacional. Os ganhos proporcionados pelo AG e o VNS são, em geral, pequenos. É importante também notar que os algoritmos mais onerosos (AG e VNS) conseguem ganhos principalmente no meio da fronteira Pareto. Isso se justifica pelo fato da premissa de estágios separáveis, assumida pelo algoritmo guloso, ser menos restritiva nas pontas que no centro da fronteira (menor número de estágios fixos). Por fim, a substituição de mais relés sempre implica em soluções superiores às que seriam obtidas com a substituição de um número menor de dispositivos, o que era esperado. Os resultados obtidos por cada um dos algoritmos podem ser encontrados no Apêndice A, seção A.1.

A figura 5.5 apresenta os tempos de processamento de cada um dos algoritmos em função do número de relés a serem substituídos. O tempo gasto pelo Algoritmo Genético é praticamente constante, uma vez que este é o critério de parada desse algoritmo. Os outros métodos (Guloso e VNS) foram executados até estabilização. Como já era esperado, o Algoritmo Guloso, que possui ordem de complexidade linear, mostrou-se muito mais rápido que as demais estratégias. No entanto, em alguns casos, a solução

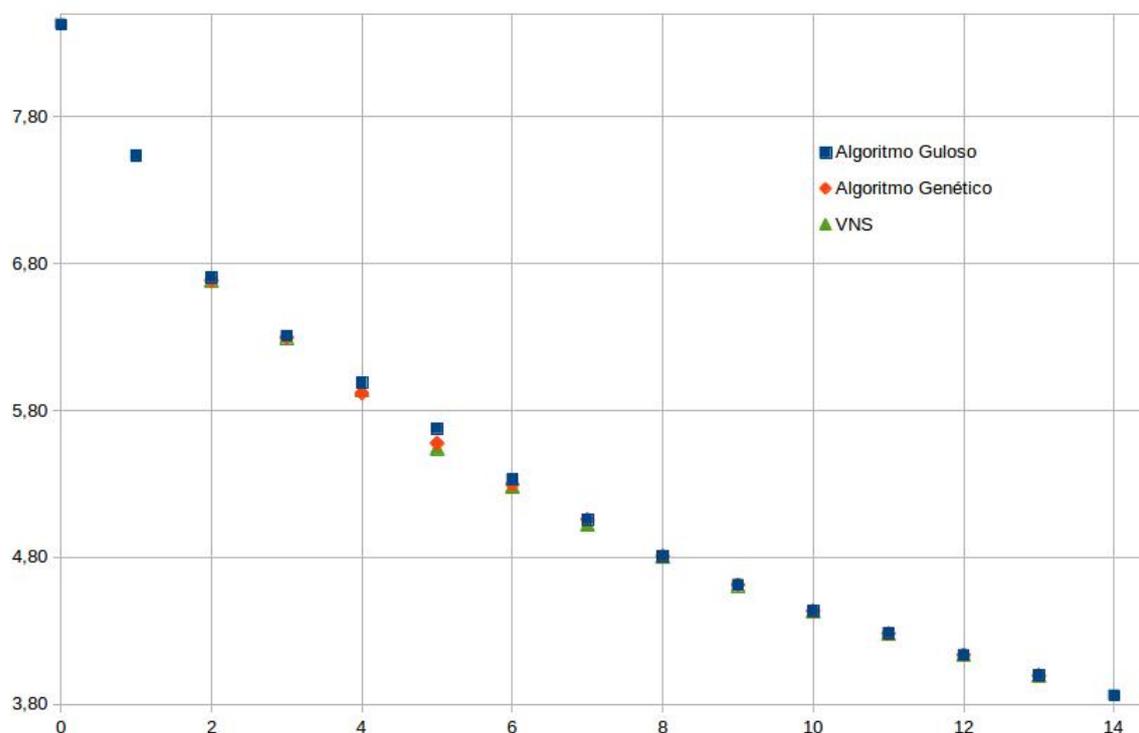


Figura 5.4: Sistema 1 – Aproximações da fronteira Pareto

do Algoritmo Guloso se mostrou inferior às soluções obtidas pelos demais algoritmos. O VNS é o método mais afetado pelo número de relés a serem substituídos, uma vez que a variação desse parâmetro aumenta ou diminui as cardinalidades das vizinhanças a serem exploradas.

Vale destacar que estes tempos são perfeitamente adequados para a aplicação, uma vez que se trata de um problema de planejamento, onde o tempo de execução não é restrição primordial. Além disso, a ferramenta proposta poderia ser acelerada se fosse implementada em linguagem compilada (C ou C++ por exemplo) de forma paralela.

É importante notar que a escolha entre os métodos aqui não pode ser feita de forma objetiva. O método que leva aos melhores resultados (VNS) também é o que gasta o maior tempo de processamento. A solução intermediária em termos de convergência (AG) demanda mais tempo que o algoritmo guloso e menos tempo que o VNS. Por fim, o algoritmo guloso demanda o menor tempo computacional, mas apresenta soluções

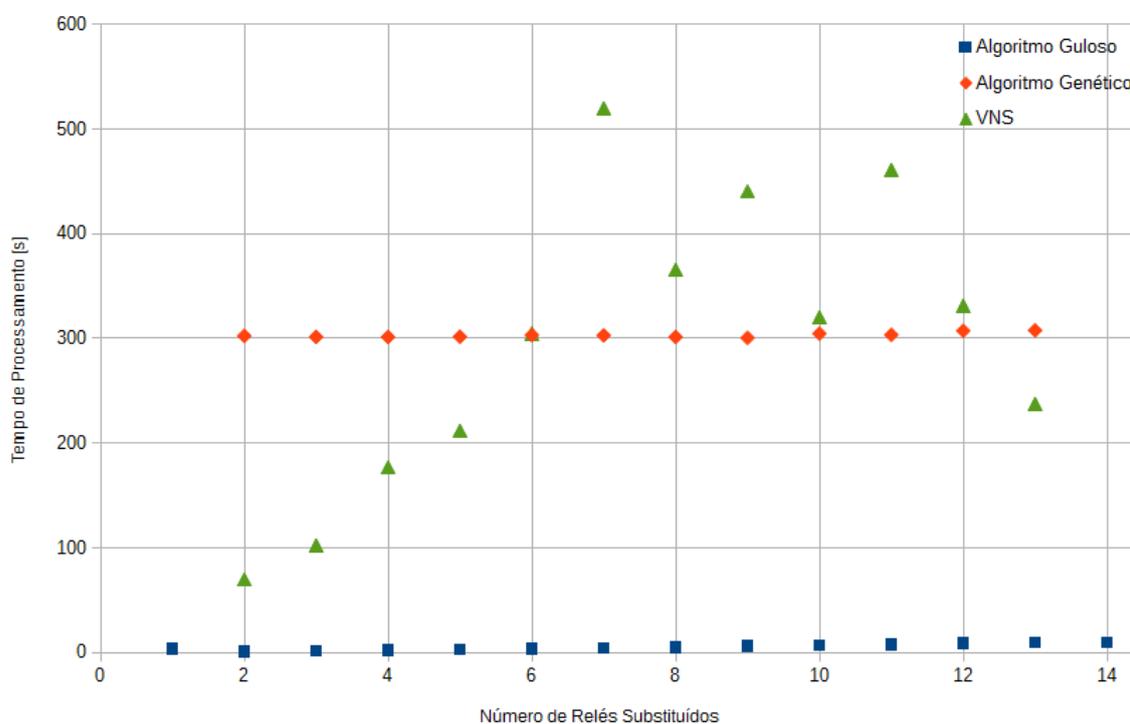


Figura 5.5: Sistema 1 – Tempo de execução dos algoritmos

menos eficientes para alguns pontos do Pareto.

Os planos de priorização obtidos para este sistema encontram-se no apêndice B.

5.5 Sistema 2

A mesma estrutura de execução dos algoritmos do sistema 1 foi também adotada para o sistema 2. Os algoritmos levaram às aproximações de fronteira Pareto indicadas na figura 5.6. Assim como no caso 1, o algoritmo guloso foi capaz de entregar uma boa aproximação da fronteira, mas o AG e o VNS foram capazes de proporcionar pequenas melhorias em vários pontos do Pareto.

Os tempos de execução dos algoritmos para cada ponto da fronteira são apresentados na figura 5.7. É possível notar que o VNS foi, mais uma vez, a ferramenta que demandou maior tempo computacional. Porém foi observado um pequeno ganho em relação às

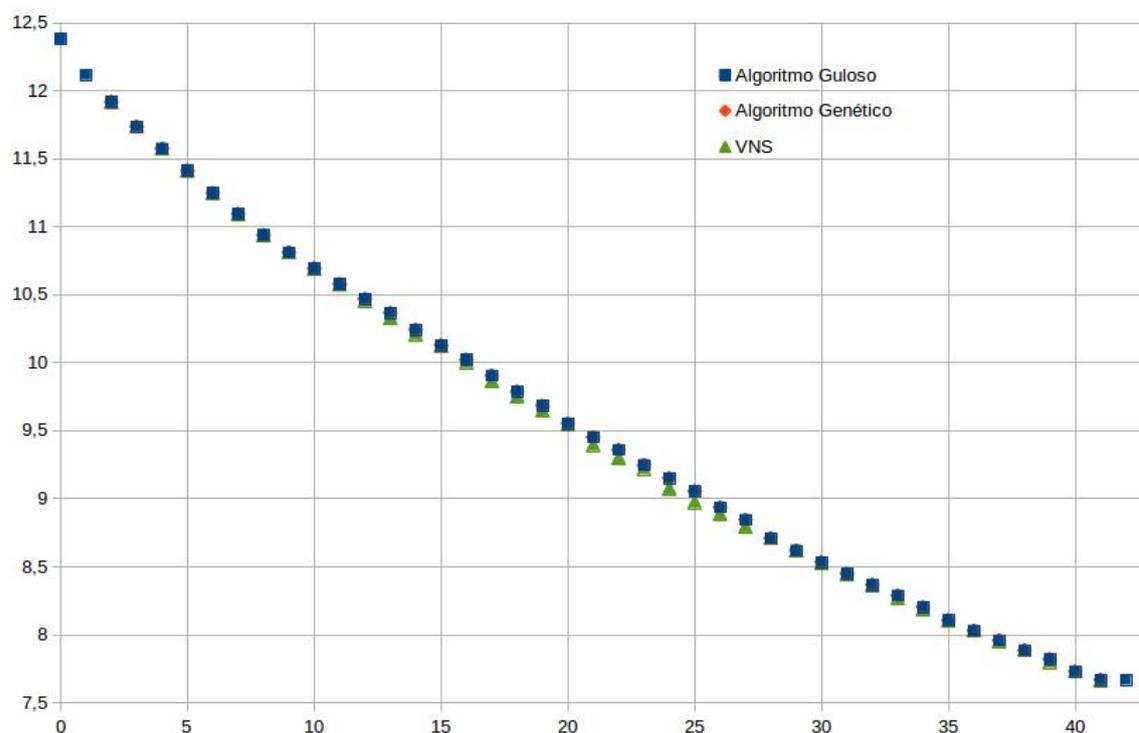


Figura 5.6: Sistema 2 – Aproximações da fronteira Pareto

outras ferramentas.

Assim como no caso anterior, os tempos observados são compatíveis com uma ferramenta de planejamento e a decisão entre os algoritmos permanece subjetiva.

5.6 Sistema 3

As aproximações das fronteiras Pareto obtidas para o sistema 3 são apresentadas na figura 5.8. Nesse caso todos os algoritmos levaram a soluções idênticas para todos os pontos da fronteira.

Os tempos de processamento dos métodos são apresentados na figura 5.9. O perfil dos tempos é similar ao apresentado nos casos anteriores, onde observa-se que o VNS demanda maior tempo de processamento. Apesar disso, não foram observados ganhos na aproximação da curva de Pareto em relação ao Algoritmo Guloso e ao AG.

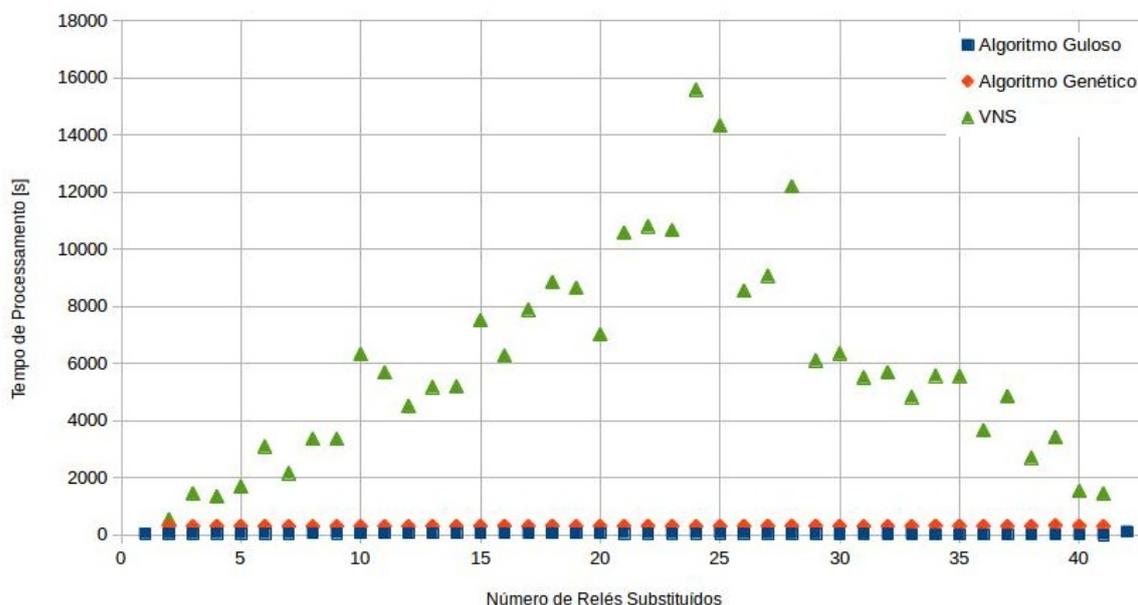


Figura 5.7: Sistema 2 – Tempo de execução dos algoritmos

Por fim, é possível notar que neste caso o algoritmo guloso é a ferramenta mais adequada, uma vez que ele leva às mesmas soluções dos outros métodos em um tempo computacional inferior.

5.7 Sistema 3 - Análise de Robustez

Além da situação planejada das redes elétricas, utilizada nas simulações realizadas nas seções anteriores, é importante avaliar o comportamento da proteção diante de variações na topologia da rede através de cenários que possam ocorrer durante a operação. A análise de robustez tem como objetivo a avaliação de uma solução frente à variações de cenários, ou seja, a determinação se uma dada solução é adequada mesmo diante de alterações nas características do sistema. No caso particular deste trabalho, uma solução é dita robusta se, mesmo diante de variações na topologia da rede, esta mantém a proteção do sistema coordenada. Foi proposta então uma análise de robustez afim de avaliar as soluções propostas quando sujeitas a situações de perda de linhas.

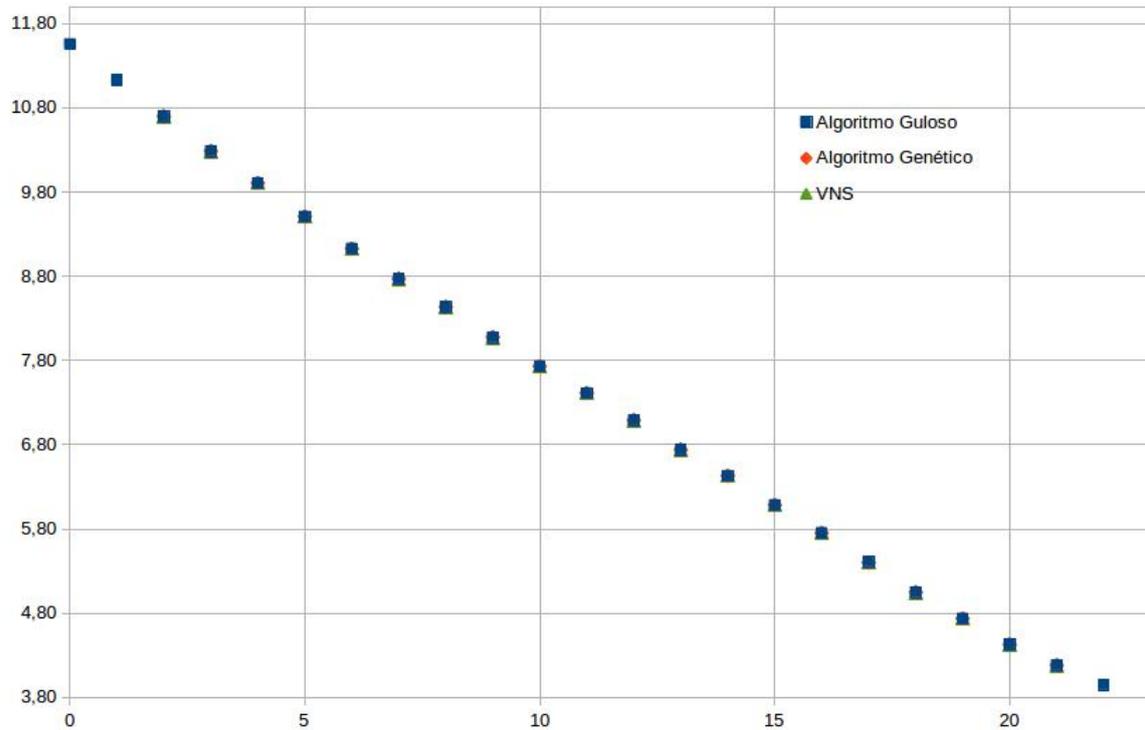


Figura 5.8: Sistema 3 – Aproximações da fronteira Pareto

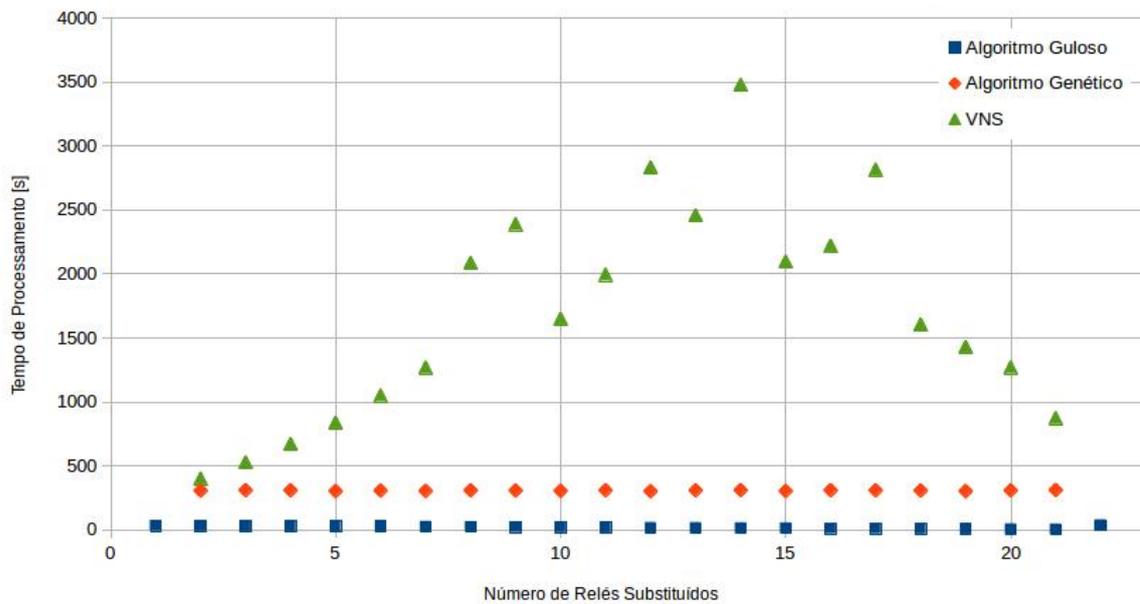


Figura 5.9: Sistema 3 – Tempo de execução dos algoritmos

Para avaliar a robustez das soluções encontradas para o Sistema 3, foi proposto um experimento baseado no estudo de 11 topologias alternativas definidas por [6]. Essas topologias consideram a remoção individual de cada uma das 11 linhas presentes no sistema.

NrelésSubstituídos	Cenário											TOTAL
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
0	S	S	-	-	S	S	S	S	S	S	S	9
1	S	S	-	-	S	S	S	S	S	S	S	9
2	S	S	-	-	S	S	S	S	S	S	S	9
3	S	S	-	-	S	S	S	S	S	S	S	9
4	S	S	-	-	S	S	S	S	S	S	S	9
5	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	11
6	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	11
7	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	11
8	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	11
9	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	11
10	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	11
11	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	11
12	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	11
13	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	11
14	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	11
15	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	11
16	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	11
17	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	11
18	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	11
19	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	11
20	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	11
21	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	11
22	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	11

Figura 5.10: Análise de Robustez - Sistema 3

Neste experimento foi aplicada a análise de robustez para a melhor solução encontrada para cada valor de $N_{relesSubstituidos}$, a partir dos cenários propostos. Essas soluções foram coordenadas utilizando-se um algoritmo de coordenação robusta proposto por [12]. A figura 5.10 contempla os resultados das análises realizadas assumindo-se a ausência de cada uma das 11 linhas do circuito, em que *sim* indica que o sistema permanece coordenado mesmo após a queda de uma das linhas de transmissão, e *não*

o contrário. No caso base (situação atual da rede) a coordenação só não se mostrava robusta para os cenários 3 e 4, que contemplava a remoção das linhas de transmissão 3 e 4, respectivamente. Para todos os demais cenários a rede se mostrou coordenada mesmo após a remoção de uma linha. Esta situação se manteve inalterada até a substituição de 4 relés. A partir de 5 relés substituídos a rede já se mostrou coordenada para todas os cenários de remoção de uma linha.

Capítulo 6

Conclusões e Propostas de Continuidade

Os altos custos envolvidos na instalação dos dispositivos de proteção e a complexidade inerente ao planejamento da operação de sistemas elétricos demandam o uso de técnicas de otimização que possam auxiliar na tomada de decisão por parte das concessionárias de energia elétrica.

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que o conjunto de ferramentas proposto mostrou-se útil na avaliação dos impactos da substituição de relés direcionais eletromecânicos por digitais na eficiência da proteção do sistema. Além disso, foi observado também um ganho em robustez na rede, com a substituição de relés analógicos por digitais, conforme demonstrado na seção 5.7.

A adoção da abordagem proposta por este trabalho permitirá que a equipe de planejamento da proteção tenha maior assertividade na tomada de decisão a respeito de quais equipamentos substituir prioritariamente em redes de transmissão e distribuição, inclusive mensurando os impactos técnicos do investimento.

Por fim, devem ser destacadas como contribuições originais deste trabalho:

- A proposição, implementação e validação de uma ferramenta de coordenação rápida capaz de levar a soluções aceitáveis para o problema de coordenação da proteção da rede em um tempo computacional muito baixo.
- A construção de um modelo de otimização para priorização da modernização da

proteção que considera a coordenação da proteção como uma restrição intrínseca ao problema. A coordenação da proteção não era normalmente considerada em trabalhos anteriores, provavelmente pela impossibilidade de avaliá-la em tempo computacional aceitável para muitas soluções.

- A proposição de três algoritmos de otimização para o problema, sendo um deles de execução mais rápida e de menor precisão, e os dois outros capazes de obter melhores resultados ao custo de um maior tempo de processamento.
- A validação e comparação das três estratégias de otimização propostas em instâncias disponíveis na literatura.

6.1 Propostas de Continuidade

Como continuidade deste trabalho sugere-se:

- Implementar os algoritmos de forma paralela.
- Considerar a alocação de dispositivos de proteção em novos pontos da rede.
- Avaliar outros equipamentos de proteção além dos RDS.
- Modelar uma função-objetivo associada ao custo de implantação e retorno da solução em uma abordagem multi-critério (viabilidade econômica).

Referências Bibliográficas

- [1] Amraee, T. (2012). Coordination of directional overcurrent relays using seeker algorithm. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27:1415–1422.
- [2] Asadi, M. and Kouhsari, S. M. (2009). Optimal overcurrent relays coordination using particle-swarm-optimization algorithm. In *Power Systems Conference and Exposition*, pages 1–7.
- [3] Bansal, J. C. and K., D. (2008). Optimization of directional overcurrent relay times by particle swarm optimization. In *Swarm Intelligence Symposium*, pages 1–7.
- [4] Bashir, M., Taghizadeh, M., J. Sadeh, J., and Mashhadi, H. (2010). A new hybrid particle swarm optimization for optimal coordination of over current relay. In *Power System Technology (POWERCON), 2010 International Conference on*, pages 1–6.
- [5] Bedekar, P. P. and Bhide, S. R. (2011). Optimum coordination of overcurrent relay timing using continuous genetic algorithm. pages 11286–11292.
- [6] Bottura, F. B. (2013). *Algoritmo de otimização híbrido para a coordenação de relés direcionais de sobrecorrente em um sistema elétrico malhado*. PhD thesis, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brazil.
- [7] Campitelli, E. M. (2007). *Análises e Estudos para Alocação e Ajustes de Dispositivos de Proteção em Redes de Média Tensão de Energia Elétrica com Geração Distribuída*. PhD thesis, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, Brazil.
- [8] Carrano, E. G. (2007). *Algoritmos Evolucionários Eficientes para Otimização de Redes*. PhD thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil.
- [9] Chaves, R. C. P. and Leão, F. B. (2014). Sistema de proteção adaptativo para redes de distribuição com inserção de geradores distribuídos. In *Congresso Brasileiro de Automática*, pages 2338–2345, Belo Horizonte, Brazil.
- [10] Correa, R., Obregon, C. L., Morais, A. P., Santos, E. M., and Farias, P. E. (2010a). Coordenação ótima de relés de sobrecorrente por meio de um algoritmo genético que incorpora programação linear. In *III Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, pages 1–6.

- [11] Costa, L. A. A. F. (2003). *Algoritmos Evolucionários em Optimização Uni e Multi-objetivo*. PhD thesis, Universidade de Minho, Braga, Portugal.
- [12] Costa, M. H. (2015). *Otimização Multiobjetivo do Ajuste de Parâmetros de Relés de Sobrecorrente Direcionais*. PhD thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil.
- [13] Cunha, A. G., Takahashi, R., and Antunes, C. H. (2012). *Computação Evolutiva e Meta Heurística*. Editora UFMG, 1st edition.
- [14] Ghaffarzadeh, N. and Heydari, S. (2015). Optimal coordination of digital overcurrent relays using black hole algorithm. *TI Journals – World Applied Programming*, 5:50–55.
- [15] Grainger, J. and Stevenson, W. D. (1994). *Power System Analysis*.
- [16] Hansen, P. and Mladenovic, N. (2010). *Search Metodologies*. Springer US.
- [17] Luiz, C. M. (2012). *Avaliação dos Impactos da Geração Distribuída para Proteção do Sistema Elétrico*. PhD thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil.
- [18] Mansour, M. M., Mekhamer, S. F., and El-Kharbawe, N. E. (2007a). A modified particle swarm optimizer for coordination of directional overcurrent relays. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22:1400–1410.
- [19] Mansour, M. M., Mekhamer, S. F., and El-Kharbawe, N. E. (2007b). A novel problem formulation for directional overcurrent relay coordination. In *IEEE Transactions on Power Delivery*, pages 1400–1410.
- [20] Negrão, D. L. A. and Jr., J. C. M. V. (2014). Metodologia para a coordenação de relés direcionais de sobrecorrente através do melhor ajuste local. In *Congresso Brasileiro de Automática*, pages 2664–2671, Belo Horizonte, Brazil.
- [21] Parreiras, R. O. (2006). *Algoritmos Evolucionários e Técnicas de Tomada de Decisão em Análise Multicritério*. PhD thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil.
- [22] Pereira, E. G. (2014). *O Problema do Hiker Dice em Tabuleiro Compacto: Um estudo algorítmico*. PhD thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brazil.
- [23] Razavi, F., Abyaneh, H. A., Al-Dabbagh, M., Mohammadi, R., and Torkaman, H. (2008). A new comprehensive genetic algorithm method for optimal overcurrent relays coordination. *Electric Power Systems Research*, 78:713–720.

- [24] Reeves, C. R. (1993). *Modern heuristic techniques for combinatorial problems*. John Willey & Sons.
- [25] Reis, J. V. A. and Cunha, C. B. (2015). Uma meta-heurística de busca decomposta em vizinhança variável para o problema bidimensional de agrupamento de entregas em veículos de uma frota heterogênea. *The Journal of Transport Literature*, 9:40–44.
- [26] Rocha, A. and Dorini, L. B. (2004). Algoritmos gulosos: definições e aplicações. Technical report, Universidade Estadual de Campinas. Available in: <http://www.ic.unicamp.br/~rocha/msc/complex/algoritmosGulososFinal.pdf>.
- [27] Rosa, A. C. (2016). *Uma Introdução a Problemas de Otimização Utilizando Método de Seção Áurea e Algoritmos Genéticos*. PhD thesis, Universidade Federal de Goiás, Catalão, Brazil.
- [28] Rosa, T. O. and Luz, H. S. (2009). Conceitos básicos de algoritmos genéticos: Teoria e prática. *Encontro de Estudantes de Informática do Tocantins*, pages 27–37.
- [29] Silva, L. G. W. (2002). *Alocação Otimizada de Dispositivos de Proteção em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*. PhD thesis, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, Brazil.
- [30] Silva, L. G. W., Pereira, R. A. F., and Mantovani, J. R. S. (2010). Alocação otimizada de dispositivos de controle e proteção em redes de distribuição. *Revista Controle e Automação*, 21:294–307.
- [31] Souza, M. J. F., Martins, A. X., Araújo, C. R., and Costa, F. W. A. (2002). Métodos de pesquisa em vizinhança variável aplicados ao problema de alocação de salas. In *XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção*.
- [32] Takahashi, R. H. C. (2004). Otimização Escalar e Vetorial - Notas de Aula. Technical report, Universidade Federal de Minas Gerais, Dept. de Matemática. Available in: <http://www.mat.ufmg.br/~taka/Download/OTEV-Vol13.pdf>.
- [33] Zeienldin, H., El-Saadany, E. F., and Salama, M. (2004). A novel problem formulation for directional overcurrent relay coordination. In *Power Engineering, 2004. LESCOPE 04. 2004 Large Engineering systems Conference on*, pages 48–52.

Apêndice A

Resultados dos Experimentos Realizados

A seguir são apresentados os resultados obtidos nas simulações executadas no capítulo 5. Os valores apresentados nas tabelas representam o valor da função-objetivo 2, descrita em 2.9, obtida para a melhor solução encontrada por cada um dos três algoritmos.

A.1 Sistema 1

Esta seção contém os valores das melhores soluções obtidas para o sistema 1.

A.2 Sistema 2

Esta seção contém os valores das funções-objetivo propostas para o sistema 2.

A.3 Sistema 3

A tabela a seguir apresenta os valores obtidos para a aproximação da fronteira de pareto do sistema 3.

Tabela A.1: Sistema 1 - Coordenação para a substituição de dois relés - Valor da função-objetivo para os algoritmos avaliados

$N_{relesSubstituidos}$	Guloso	Genético	VNS
0	8,4271		
1	7,5329		
2	6,706	6,6853	6,6853
3	6,308	6,2972	6,2972
4	5,9881	5,9356	5,918
5	5,7193	5,5405	5,5405
6	5,4019	5,304	5,2969
7	5,0585	5,0585	5,0218
8	4,8366	4,8339	4,8037
9	4,614	4,614	4,6091
10	4,4362	4,4362	4,4362
11	4,2845	4,2845	4,2823
12	4,1362	4,1362	4,1362
13	3,9973		
14	3,8605		

Tabela A.2: Sistema 2 - Coordenação para a substituição de dois relés - Valor da função-objetivo para os algoritmos avaliados

$N_{relésSubstituidos}$	Guloso	Genético	VNS
0	12,3803		
1	12,1149		
2	11,9181	11,9181	11,9181
3	11,7356	11,7356	11,7356
4	11,5744	11,5744	11,5744
5	11,4123	11,4123	11,4123
6	11,2469	11,2469	11,2469
7	11,0939	11,0939	11,0939
8	10,9382	10,9382	10,9382
9	10,811	10,811	10,811
10	10,6925	10,6925	10,6925
11	10,5775	10,5775	10,5775
12	10,4689	10,4689	10,4555
13	10,3651	10,3651	10,3278
14	10,2418	10,2418	10,2082
15	10,1273	10,1273	10,1273
16	10,0223	10,0223	10,0032
17	9,9052	9,9052	9,8608
18	9,7869	9,7869	9,7475
19	9,683	9,683	9,6457
20	9,5524	9,5524	9,5458
21	9,4525	9,4525	9,3954
22	9,3578	9,3578	9,2981
23	9,2475	9,2475	9,2222
24	9,1504	9,1504	9,0742
25	9,0544	9,0544	8,9745
26	8,9353	8,9353	8,8858
27	8,8441	8,8441	8,7958
28	8,7091	8,7091	8,7077
29	8,6194	8,6194	8,6194
30	8,5324	8,5324	8,5324
31	8,4484	8,4484	8,4484
32	8,3666	8,3666	8,3666
33	8,2878	8,2878	8,2676
34	8,2023	8,2023	8,1865
35	8,1064	8,1064	8,1064
36	8,0299	8,0299	8,0299
37	7,9577	7,9577	7,9492
38	7,8858	7,8858	7,8858
39	7,8194	7,8194	7,8004
40	7,7296	7,7296	7,7296
41	7,6675		
42	7,6674		

Tabela A.3: Sistema 3 - Coordenação para a substituição de dois relés - Valor da função-objetivo para os algoritmos avaliados

$N_{relésSubstituidos}$	Guloso	Genético	VNS
0	11,5555		
1	11,1267		
2	10,6979	10,6979	10,6979
3	10,2853	10,2853	10,2853
4	9,9054	9,9054	9,9054
5	9,5082	9,5082	9,5082
6	9,1284	9,1284	9,1284
7	8,7693	8,7693	8,7693
8	8,4354	8,4335	8,4335
9	8,0756	8,0725	8,0725
10	7,7305	7,7305	7,7305
11	7,4112	7,4112	7,4112
12	7,0898	7,0898	7,0898
13	6,7403	6,7403	6,7403
14	6,4293	6,4293	6,4289
15	6,0829	6,0829	6,0829
16	5,7524	5,7524	5,7524
17	5,4119	5,4119	5,3985
18	5,0465	5,0465	5,0465
19	4,7356	4,7356	4,7356
20	4,427	4,427	4,427
21	4,18		
22	3,945		

Apêndice B

Planos de Priorização dos Experimentos Realizados

A seguir são apresentados os planos de priorização obtidos nas simulações executadas no capítulo 5. Os relés indicados nas tabelas a seguir representam os relés a serem priorizados na substituição para a melhor solução encontrada pelo Método Heurístico (guloso) e pelo VNS.

B.1 Sistema 1

As tabelas B.1 e B.2 apresentam os dispositivos a serem priorizados para cada número de relés substituídos.

B.2 Sistema 2

As tabelas B.3 e B.4 apresentam os dispositivos a serem priorizados para cada número de relés substituídos.

Algoritmo Guloso	Relés Priorizados													
NRelésSubstituídos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1											X			
2			X								X			
3			X						X		X			
4			X		X				X		X			
5		X	X						X		✓	X	X	
6	X	X	X						X			X	X	
7	X	X	X		X				X			X	X	
8	X	X	X		X				X		X	X	X	
9	X	X	X		X				X		X	X	X	X
10	X	X	X		X		X		X		X	X	X	X
11	X	X	X	X	X		X		X		X	X	X	X
12	X	X	X	X	X		X		X	X	X	X	X	X
13	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X
14	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Figura B.1: Sistema 1 - Plano de Priorização - Algoritmo Guloso

VNS	Relés Priorizados													
NRelésSubstituídos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1											X			
2			X									X		
3			X						X			X		
4		X						X				X		X
5	X	X		X									X	X
6		X	X					X		X		X		X
7		X	X		X			X		X		X		X
8		X		X		X	X	X		X		X		X
9	X	X	X		X			X	X		X	X		X
10	X	X	X		X		X	X	X		X	X		X
11	X	X	X	X	X		X		X		X	X	X	X
12	X	X	X	X	X		X		X	X	X	X	X	X
13	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X
14	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Figura B.2: Sistema 1 - Plano de Priorização - VNS

		Relés Priorizados																																																							
Algoritmo Guloso		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42														
Relés Substituídos	1																																																								
	2	X																																																							
	3	X																																																							
	4	X																																																							
	5	X																																																							
	6	X																																																							
	7	X																																																							
	8	X																																																							
	9	X																																																							
	10	X																																																							
	11	X																																																							
	12	X																																																							
	13	X																																																							
	14	X																																																							
	15	X																																																							
	16	X																																																							
	17	X																																																							
	18	X																																																							
	19	X																																																							
	20	X																																																							
	21	X																																																							
	22	X																																																							
	23	X																																																							
	24	X																																																							
	25	X																																																							
	26	X																																																							
	27	X																																																							
	28	X																																																							
	29	X																																																							
	30	X																																																							
	31	X																																																							
	32	X																																																							
	33	X																																																							
	34	X																																																							
	35	X																																																							
	36	X																																																							
	37	X																																																							
	38	X																																																							
	39	X																																																							
	40	X																																																							
	41	X																																																							
	42	X																																																							

Figura B.3: Sistema 2 - Plano de Priorização - Algoritmo Guloso

B.3 Sistema 3

As tabelas B.5 apresenta os dispositivos a serem priorizados para cada número de relés substituídos obtido pelo algoritmo guloso. As soluções obtidas pelo VNS são as mesmas.

Algoritmo Guloso	Relés Priorizados																					
NRelés Substituídos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1	X																					
2	X	X																				
3	X	X	X																			X
4	X	X	X	X																		X
5	X	X	X							X												X
6	X	X	X	X						X												X
7	X	X	X	X						X							X					X
8	X	X	X	X				X		X							X					X
9	X	X	X	X				X	X	X							X					X
10	X	X	X	X				X	X	X					X	X	X					X
11	X	X	X	X				X	X	X				X	X	X	X					X
12	X	X	X	X				X	X	X	X		X		X	X	X					X
13	X	X	X	X				X	X	X	X	X		X	X	X	X			X	X	X
14	X	X	X	X				X	X	X	X	X		X	X	X	X		X	X	X	X
15	X	X	X	X				X	X	X	X	X		X	X	X	X		X	X	X	X
16	X	X	X	X				X	X	X	X	X		X	X	X	X		X	X	X	X
17	X	X	X	X				X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
18	X	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
19	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
20	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
21	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
22	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Figura B.5: Sistema 3 - Plano de Priorização - Algoritmo Guloso