

Priorização da Modernização da Proteção de Sistemas Elétricos Utilizando Otimização Multiobjetivo

Ramon L. Marques
PPGEE
Universidade Federal
de Minas Gerais
Belo Horizonte, MG 30332-0250
Email: ramonlmarques@ufmg.br

Eduardo G. Carrano
DEE / PPGEE
Universidade Federal
de Minas Gerais
Belo Horizonte, MG 30332-0250
Email: egcarrano@ufmg.br

Rodney R. Saldanha
DEE / PPGEE
Universidade Federal
de Minas Gerais
Belo Horizonte, MG 30332-0250
Email: rodney@cpdee.ufmg.br

Resumo—Neste trabalho são propostos algoritmos de otimização para a avaliação do impacto da substituição de relés direcionais de sobrecorrente em redes de distribuição e transmissão de energia elétrica, com o intuito de auxiliar na priorização dos investimentos por parte da concessionária. Dois objetivos são considerados para construção dos planos de priorização: minimização do número de relés substituídos e minimização do tempo de operação da proteção (maximização da eficiência). Os resultados obtidos em duas 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.

I. INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de potência (SEP) são frequentemente expostos a condições extremas de funcionamento, tais como sobrecargas, variações abruptas de consumo, exposição a fatores ambientais desfavoráveis e descargas atmosféricas, etc [1].

A natureza combinatória do problema de realocar ou substituir dispositivos de proteção em redes elétricas implica em um número muito grande de possíveis soluções, que cresce exponencialmente com a dimensão do problema. Isso faz com que a aplicação de métodos exatos, baseados em enumeração implícita ou explícita, se torne inviável para resolução de instâncias de médio e grande porte.

Este trabalho tem por objetivo 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 devem ser substituídos, com o intuito de melhorar o desempenho da proteção como um todo. São consi-

derados dois objetivos de otimização: (i) minimização do número de relés substituídos, e; (ii) maximização da eficiência da proteção, por meio da minimização do tempo de resposta as faltas. Os resultados obtidos mostram que este tipo de ferramenta é capaz de indicar pontos chave do sistema, onde a substituição de poucos dispositivos por relés digitais leva a um desempenho consideravelmente superior.

II. COORDENAÇÃO DA PROTEÇÃO

A confiabilidade de um sistema de energia está intimamente ligada ao desempenho de seu sistema de proteção [2]. Segundo [3], dispositivos de proteção alocados nos alimentadores primários são destinados a proteger o sistema elétrico contra faltas permanentes ou temporárias.

Garantir a coordenação e seletividade da proteção de um SEP não é uma tarefa simples. Para isto é necessário que os equipamentos atuem o mais rápido possível, porém mantendo uma sequência de operação adequada [4, 5]. É necessário garantir um intervalo entre a operação dos relés primário e secundário (*ITC*), para evitar que o backup atue antes da proteção principal de forma equivocada.

O sistema de proteção deve dar ênfase ao aspecto da continuidade do suprimento, além de reduzir os tempos de localização dessa falta [6]. Devido a isso a alocação de dispositivos de proteção em pontos estratégicos dos circuitos de distribuição tem forte potencial de melhorar os índices de confiabilidade. Existem alguns trabalhos que lidam com este problema utilizando algoritmos de otimização, como pode ser visto nos próximos parágrafos.

Em [6] é proposta uma ferramenta voltada a alocar equipamentos de proteção e unidades de geração distribuída (GD) em redes de distribuição. O algoritmo evolucionário proposto trata o problema de minimização da energia não suprida pelo sistema de distribuição quando este opera sob 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.

Outro exemplo é a referência [3], 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 binário (PNLB) para o problema de alocação 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 algoritmos de otimização propostos nesse trabalho são apresentados na próxima seção.

III. ALGORITMOS PROPOSTOS

Este trabalho tem por objetivo apoiar o processo de priorização da substituição de relés direcionais de sobrecorrente eletromecânicos por relés digitais em redes de distribuição e transmissão. Essa priorização tem como base duas linhas de análise: o viés econômico, com a minimização do número de equipamentos substituídos, e; o viés técnico, visando aumentar a eficiência (velocidade de atuação) da proteção. Esses objetivos são claramente conflitantes, uma vez que cada troca de relé geralmente implica em ganho de desempenho do sistema de proteção.

Foi proposta uma estratégia de otimização multi-objetivo baseada no algoritmo $P\epsilon$ -Restrito [7], a partir da qual todo conjunto de possíveis valores do número de relés substituídos é avaliado utilizando-se para isto os algoritmos mono-objetivo propostos. Na sequência são apresentados os algoritmos de otimização propostos e as ferramentas necessárias para uso destes algoritmos.

A. Ferramenta de Coordenação Rápida

Os planos de substituição obtidos pelos algoritmos de otimização devem ser avaliados para a escolha do mais adequado. Essa avaliação depende da coordenação da

proteção do sistema, para que sua eficiência possa ser mensurada.

O problema de coordenação da proteção também deve ser formulado como um problema de otimização, como apresentado em (1), (2), (3), (4), (5) e (6).

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

sujeito a:

$$T_{ij} - T_i \geq ITC, \forall i \in 1, \dots, n, \forall j \in \beta_i \quad (2)$$

$$TMS_i \in \mathcal{T}_i, \forall i \in 1, \dots, n \quad (3)$$

$$MC_i \in \mathcal{M}_i, \forall i \in 1, \dots, n \quad (4)$$

em que:

$$T_i = TMS_i \left(\alpha + \frac{\beta}{\frac{I_i^{cc}}{MC_i * RTC_i} \gamma - 1} \right) \quad (5)$$

$$T_{ij} = TMS_j \left(\alpha + \frac{\beta}{\frac{I_{ij}^{cc}}{MC_j * RTC_j} \gamma - 1} \right) \quad (6)$$

T_i é o tempo de atuação do relé i , atuando como primário, para falta próxima ao relé; T_{ij} é o tempo de atuação do relé j , quando este atua como secundário de i ; TMS_i é o multiplicador de tempo ajustado para o relé i ; MC_i é o multiplicador de corrente ajustado para o relé i ; I_i^{cc} é a corrente vista pelo relé primário i para uma falta próxima; I_{ij}^{cc} é a corrente vista pelo relé secundário j quando ocorre uma falta próxima ao relé primário i ; $\mathcal{T}$ e $\mathcal{M}$ são os conjuntos de valores que podem ser utilizados para TMS e MC respectivamente, e; α , β e γ são constantes do relé.

O modelo de otimização do problema acaba por ser não-linear e altamente restrito em que duas configurações (TMS e MC) de cada relé são considerados como variáveis de decisão; a soma dos tempos de atuação de todos os relés primários, os quais se espera que operarem a fim de eliminar as falhas de suas zonas de atuação correspondentes, é considerado como uma função objetivo [8]. Com isso, não existem algoritmos polinomiais capazes de resolvê-lo de forma exata.

Nos algoritmos propostos, a ferramenta de coordenação da proteção pode vir a ser executada milhares de vezes. Logo, essa ferramenta não pode demandar muito tempo. Devido a isso, foi proposta uma ferramenta

rápida para realizar a coordenação do sistema de forma aproximada. Essa ferramenta funciona com base em três passos:

- 1) Ajuste os valores de MC para o valor médio do intervalo e encontre os valores ótimos para TMS , utilizando Programação Linear (PL) [9].
- 2) Ajuste os valores de MC utilizando o algoritmo de Seção Áurea [10].
- 3) Encontre novamente os valores ótimos de TMS utilizando PL.

O primeiro passo tem por objetivo definir o valor médio de MC para cada relé, dentro do intervalo de valores permissíveis. A partir deste valor obtém-se a melhor configuração (valores de TMS) para este cenário.

Nos passos seguintes o objetivo é obter o melhor ajuste para cada relé (valores de MC e TMS) a partir da definição do MC por seção áurea e TMS por PL.

Ao final do processo ter-se-á uma boa coordenação para o sistema de proteção de maneira rápida. Análises comparativas demonstraram que o uso dessa estratégia tem baixo tempo de processamento e erros considerados aceitáveis.

B. Algoritmo Genético

A fim de gerar boas soluções para o problema de substituição de relés direcionais propôs-se um algoritmo genético (GA).

No caso de otimização combinatória, como é o problema de priorização da substituição de relés, geralmente não se conhecem métodos exatos para solução de problemas NP-difícil em tempo polinomial. Os algoritmos evolucionários, em especial os algoritmos genéticos, constituem portanto boas alternativas para tratar estes problemas. Uma grande vantagem que se espera obter dos algoritmos evolucionários é a facilidade de sua adaptação a problemas com estruturas complexas. [7]

A figura 1 apresenta a estrutura básica do algoritmo genético proposto, **que consiste em uma implementação mono-objetivo**. A seleção é feita utilizando o operador da Roleta Estocástica [11]. O critério de parada utilizado foi o tempo de execução. Cada uma das partes do algoritmo que foi adaptada é discutida na sequência.

1) *Codificação*: Os indivíduos são representados por meio de permutações, onde a ordem na permutação indica a prioridade de substituição. Um exemplo dessa representação é apresentado na Figura 2.

Dado o número de relés que devem ser substituídos ($N_{relesSubstituidos}$), a solução deve ser decodificada como segue:

Estrutura Básica do Algoritmo Genético Proposto

```

1:  $pop_0 \leftarrow$  gerar população inicial( $popSize$ );
2:  $pop_0 \leftarrow$  substituir os  $n$  primeiros relés pelo relé candidato;
3:  $pop_0 \leftarrow$  coordenar a proteção de  $pop_0$  conforme descrito em na seção anterior;
4:  $conv \leftarrow false$ ;
5:  $ger \leftarrow 1$ ;
6:  $pop \leftarrow pop_0$ ;
7: while  $conv = false$  do
8:    $f \leftarrow$  avaliar( $pop$ );
9:    $fit \leftarrow$  calcular  $fitness(f)$ ;
10:   $k \leftarrow 1$ ;
11:  while  $k \leq popSize$  do
12:    if  $random \leq prob_{seleção}$  then
13:       $ind_1 \leftarrow$  seleção( $pop, fit$ );
14:       $ind_2 \leftarrow$  seleção( $pop, fit$ );
15:       $(filho_k, filho_{k+1}) \leftarrow$  cruzamento( $ind_1, ind_2$ );
16:       $filho_k \leftarrow$  coordenar a proteção de  $filho_k$ ;
17:       $filho_{k+1} \leftarrow$  coordenar a proteção de  $filho_{k+1}$ ;
18:       $k \leftarrow k + 2$ ;
19:    else
20:       $ind_1 \leftarrow$  seleção( $pop, fit$ );
21:       $filho_k \leftarrow$  mutação( $ind_1$ );
22:       $filho_k \leftarrow$  coordenar a proteção de  $filho_k$ ;
23:       $k \leftarrow k + 1$ ;
24:    end if
25:     $f_{filho} \leftarrow$  avaliar( $filho$ );
26:     $fit_{filho} \leftarrow$  calcular  $fitness(f_{filho})$ ;
27:     $filho \leftarrow$  elitismo( $pop, filho$ );
28:     $pop \leftarrow filho$ 
29:    if convergiu then
30:       $conv \leftarrow true$ ;
31:    else
32:       $ger \leftarrow ger + 1$ ;
33:    end if
34:  end while
35: end while

```

Figura 1. Pseudo-código do Algoritmo Genético proposto



Figura 2. Codificação Genética do Indivíduo

- Posições de 1 a $N_{relesSubstituidos}$: relés que serão substituídos;
- Posições de $N_{relesSubstituidos} + 1$ até N_{reles} : relés que não serão substituídos.

Para o exemplo da Figura 2, os relés 2 e 8 seriam substituídos, enquanto os outros 8 relés não seriam afetados.

Na estrutura proposta, o GA é executado $N_{reles} - 2$

vezes, com $N_{relesSubstituidos}$ sendo variado de 2 a $N_{reles} - 1$. Ao final das execuções obtém-se uma aproximação do conjunto Pareto-Ótimo.

2) *Cruzamento*: Foi proposto um novo operador de cruzamento para o problema, necessário devido a estrutura do problema, que é uma mescla dos problemas de separação de conjuntos e de sequenciamento, porém distinto de ambos.

Outros operadores também foram testados, porém estes levaram aos melhores resultados.

- 1) É escolhida aleatoriamente uma posição da parte ativa (relés que devem ser substituídos) do indivíduo 1.
- 2) É escolhido aleatoriamente uma posição da parte ativa do indivíduo 2.
- 3) Os conteúdos dessas posições são trocados.
- 4) Os indivíduos (permutações) são corrigidos por meio da troca das posições correspondentes.

Um exemplo desse operador, considerando a troca de dois relés, é apresentado nas figuras 3 e 4. Nesse exemplo as posições 2 e 1, dos indivíduos 1 e 2 respectivamente, foram escolhidas e trocadas. Para corrigir as permutações, que se tornaram infactíveis ao final do passo 3, o valor 7 do indivíduo 1 (posição 6) foi trocado com o valor 8 do indivíduo 2 (posição 3), gerando dois indivíduos válidos como soluções finais.

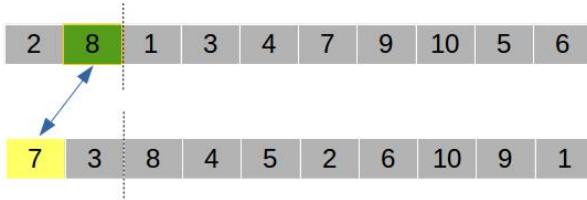


Figura 3. Processo de cruzamento de dois indivíduos

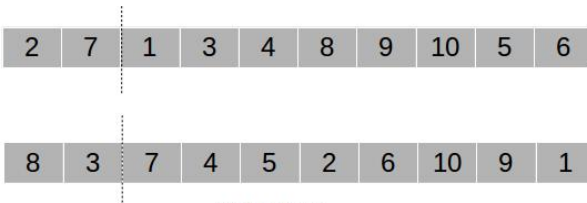


Figura 4. Indivíduos após cruzamento

3) *Mutação*: A tradicional operação de mutação de *swap* foi adaptada com o intuito de funcionar adequadamente no problema proposto. Nessa modificação, a troca entre posições da permutação sempre acontece entre uma posição da parte ativa e uma posição da parte

inativa, gerando uma alteração na solução decodificada. Essa operação é ilustrada na figura 5. Nesse exemplo, o relé 4 passaria a ser prioritário, em detrimento do 8.

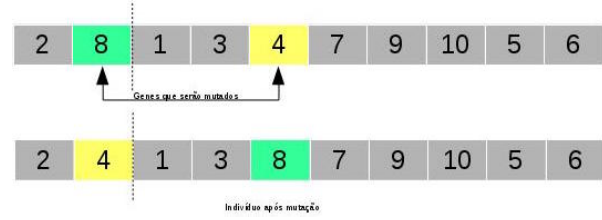


Figura 5. Processo de mutação de um indivíduo

C. Algoritmo Guloso

Foi proposto um algoritmo guloso para solução problema de priorização da substituição de relés. Dada uma rede de entrada, que pode ser a rede inicial ou já ter sofrido substituição de relés, este algoritmo funciona em 2 passos:

- 1) Avalie todas as possibilidades para substituição de um único relé, i.e. troque cada um dos relés individualmente e avalie o desempenho da proteção após a troca.
- 2) Escolha para substituição o relé que levou ao melhor desempenho.

O problema tratado por este algoritmo consiste na avaliação da substituição de um único relé e, logo, tem complexidade $O(n)$ avaliações de coordenação. Assim como o GA, este algoritmo também é executado de forma sequencial, variando $N_{relesSubstituidos}$ de 1 até $N_{reles} - 1$. Porém, nesse caso, a solução obtida na execução anterior do algoritmo é sempre utilizada como rede inicial da próxima execução.

Devido a sua estrutura, espera-se que este algoritmo seja capaz de entregar uma aproximação do conjunto de Pareto em tempo computacional reduzido.

IV. RESULTADOS

Foram utilizados dois sistemas de transmissão malhados da literatura para validar os algoritmos propostos. Estes sistemas, sendo um com 14 e outro com 42 relés, foram extraídos de [12].

Os algoritmos foram implementados em Matlab R2012¹ e os problemas de PL da ferramenta de coordenação rápida foram resolvidos utilizando a versão acadêmica do Gurobi Optimization 6.0². Os testes foram executados em um computador portátil rodando Ubuntu

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

²Referência: www.gurobi.com

Linux 15.04 (64 bits), com 8 GB de memória RAM e processador Intel Core i5 3317U de 2.0 GHz.

Para cada instância foram executados os dois algoritmos propostos, com $N_{relesSubstituidos}$ variando no intervalo $[2; N_{reles} - 1]$. O caso base (rede original) também foi coordenado e utilizado como referência. Apenas o Algoritmo Guloso foi executado na primeira iteração de cada instância ($N_{relesSubstituidos} = 1$), uma vez que este algoritmo encontra uma solução ótima, visto que todas as possibilidades de substituição dos relés são avaliadas. Além disso, os algoritmos não são executados para o caso $N_{relesSubstituidos} = N_{reles}$, uma vez que a solução deste problema é óbvia: todos os relés são substituídos. No entanto a coordenação também é executada nesse caso, que pode ser utilizado como referência.

O Algoritmo Genético foi ajustado com os parâmetros a seguir, que, apesar de pouco usuais, foram os que melhor se ajustaram para este problema.

- $N_{pop} = 8$
- $Taxa_{cruzamento} = 0,5$
- $Taxa_{mutacao} = 1 - Taxa_{cruzamento}$
- $Tempo_{execucao} = 300$ s

Todos os parâmetros foram estimados com base em testes empíricos.

Todos os relés possuem curva normalmente inversa ($\alpha = 0,00$, $\beta = 0,14$ e $\gamma = 0,02$). O relé SR750/760 da marca GE foi utilizado como relé candidato para substituir os relés eletromecânicos. Este relé possui os seguintes parâmetros:

- $\mathcal{T} \in [0,05; 20]$ em passos de 0,01;
- $\mathcal{M} \in [0,05; 100]$ em passos de 0,01.

A. Estudo de Caso 1

O primeiro sistema teste utilizado consiste em uma rede malhada com 14 relés, 8 barras e 7 linhas. Este sistema foi obtido de [12]. Neste problema, os valores de TMS variam de forma contínua no intervalo $[0,1; 1,1]$. Já as variáveis MC devem assumir algum valor do conjunto $\{0,5; 0,6; 0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5\}$. Assim como em [12], assumiu-se $ITC = 0,3$ s para todas as relações entre os pares de relés. Todos os detalhes necessários para simulação deste sistema podem ser encontrados na referência original.

As aproximações da fronteira Pareto obtidas pelos dois algoritmos propostos podem ser vistas na figura 6. Nessa figura o eixo x representa o número de relés substituídos e o eixo y representa o somatório dos tempos de atuação dos relés para faltas individuais bem próximas a eles. A posição $x = 0$ no gráfico corresponde à

coordenação do sistema com a configuração atual, ou seja, sem a substituição de nenhum RDS.

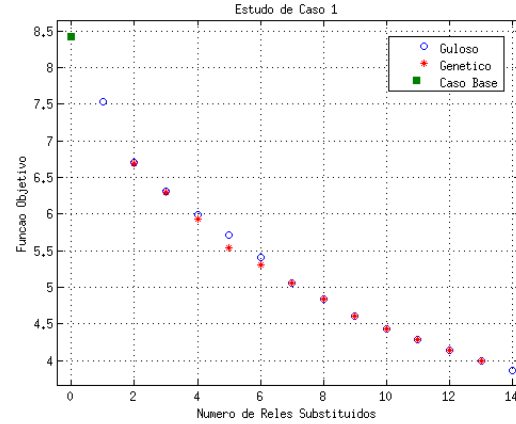


Figura 6. Estudo de Caso 1 – Aproximação da Fronteira Pareto

Em todos os casos a melhoria causada pela substituição de um relé manteve sua ordenação esperada, ou seja, independentemente do algoritmo adotado (guloso ou genético), a solução com N relés substituídos é sempre melhor que a solução com $N - 1$. Também é possível notar que o sistema manteve-se coordenável em todos os casos, apresentando ainda redução significativa nos tempos de atuação dos relés. Como exemplo, a soma dos tempos de atuação reduz-se de 8,5 para 6 segundos após a substituição de 4 relés na rede (relés 12, 3, 9 e 7).

No geral, o AG e o algoritmo guloso levaram a soluções bem próximas. No entanto o AG obteve resultados ligeiramente superiores em alguns cenários: 1 relé substituído (-0,31%), 2 relés (-0,17 %), 3 relés (-0,88 %), 4 relés (-3,13 %), 5 relés (-1,81 %), 7 relés (-0,06 %). Não houve aprimoramento da solução gulosa para os casos a partir de 8 relés substituídos.

B. Estudo de Caso 2

O segundo sistema, também extraído de [12] é uma rede malhada com 42 relés, 15 barras e 21 linhas. Neste caso, os valores de TMS variam continuamente no intervalo $[0,1; 3,2]$ e MC deve assumir um valor discreto do conjunto $\{0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5\}$. Para o algoritmo de coordenação assumiu-se $ITC = 0,2$ s para todas as relações entre os pares de relés, assim como na referência original. Todos os dados necessários para simulação podem ser encontrados em [12].

As aproximações da fronteira Pareto obtida podem ser vistas na figura 7. É possível notar um comportamento muito similar ao observado no Estudo de Caso

1. No entanto, nesse caso, não houveram diferenças perceptíveis entre o AG e o algoritmo guloso.

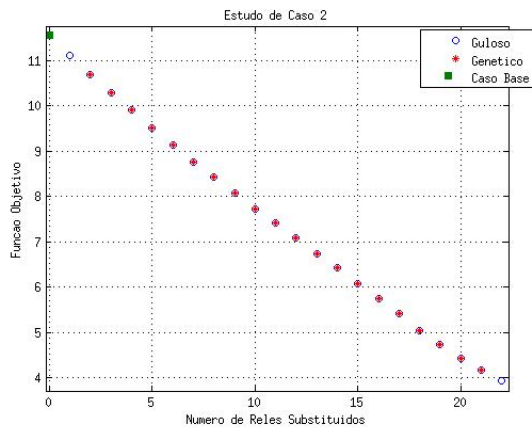


Figura 7. Estudo de Caso 2 – Aproximação da Fronteira Pareto

V. CONCLUSÃO

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

A partir dos resultados apresentados na seção IV, é possível notar que as ferramentas propostas podem ser extremamente úteis na priorização da substituição de relés eletromecânicos por RDS digitais. Em todos os casos tratados foi possível aumentar a eficiência da proteção com a substituição de apenas uma fração dos relés existentes.

A adoção da abordagem proposta por este trabalho permitirá que as equipes de planejamento e planejamento da operação tenham maior assertividade na tomada de decisão, inclusive mensurando os impactos técnicos do investimento.

Como continuidade deste trabalho sugere-se os seguintes temas:

- Implementação dos algoritmos de forma paralela.
- Alocação de dispositivos de proteção em novos pontos da rede.
- Avaliação de outros equipamentos de proteção além dos Relés Direcionais de Sobrecorrente.

VI. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio financeiro da CAPES - Brasil. Os autores agradecem as

agências de fomento CAPES, CNPq e FAPEMIG pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] D. L. A. Negrão and J. C. M. Vieira Jr. 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, 2014.
- [2] C. M. Luiz. *Avaliação dos Impactos da Geração Distribuída para Proteção do Sistema Elétrico*. Dissertação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil, 2012.
- [3] L. G. W. Silva, R. A. F. Pereira, and J. R. S. Mantovani. Alocação otimizada de dispositivos de controle e proteção em redes de distribuição. *Revista Controle e Automação*, 21:294–307, 2010.
- [4] M. H. Costa. *Otimização Multiobjetivo do Ajuste de Parâmetros de Relés de Sobrecorrente Direcionais*. Tese, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil, 2015.
- [5] J. Grainger and W. D. Stevenson. *Power System Analysis*. 1994.
- [6] E. M. Campitelli. *Análises e Estudos para Alocação e Ajustes de Dispositivos de Proteção em Redes de Média Tensão de Energia Elétrica com Geração Distribuída*. Dissertação, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, Brazil, 2007.
- [7] E. G. Carrano. *Algoritmos Evolucionários Eficientes para Otimização de Redes*. PhD thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil, 2007.
- [8] R. Thangaraj, M. Pant, and K. Deep. Optimal coordination of over-current relays using modified differential evolution algorithms. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 23:820–829, 2010.
- [9] P. Feofiloff. *Algoritmos de Programação Linear: Programação Linear Concreta*. Universidade de São Paulo, 3rd edition, 2005.
- [10] T. M. U. Araujo. *Métodos Híbridos Baseados em Continuous-GRASP Aplicados à Otimização Global Contínua*. Dissertação, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brazil, 2009.
- [11] D. E. Goldberg. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley, 1989.
- [12] T. Amraee. Coordination of directional overcurrent relays using seeker algorithm. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27:1415–1422, 2012.