

Coordenação Robusta de Relés Direcionais de Sobrecorrente via uma Heurística Matemática

1st Dárcio M. B. Silva

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Minas Gerais
Belo Horizonte, Brasil
darcioops@gmail.com

2nd Henrique A. Barbosa

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Minas Gerais
Belo Horizonte, Brasil
henrique2204barbosa@gmail.com

3rd Rodney Rezende Saldanha

Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Minas Gerais
Belo Horizonte, Brasil
rodney@cpdee.ufmg.br

4th Lucas S. Batista

Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Minas Gerais
Belo Horizonte, Brasil
lusoba@ufmg.br

5th Michel Bessani

Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Minas Gerais
Belo Horizonte, Brasil
mbessani@ufmg.br

Resumo—Este artigo propõe uma abordagem híbrida multi-objetivo aplicada à coordenação de relés direcionais de sobrecorrente (DOCRs) em Sistemas Elétricos de Potência (SEPs). O intuito principal é minimizar, simultaneamente, o tempo de atuação da proteção principal e o intervalo entre essa proteção e a de retaguarda, aumentando a seletividade e a robustez da proteção. A ferramenta de otimização híbrida proposta combina programação matemática com a meta-heurística SPEA2. Essencialmente, o método ϵ -restrito é utilizado para a solução de uma aproximação linear do problema original via programação matemática, obtendo assim um conjunto de soluções iniciais; a partir dessas soluções, o SPEA2 é usado para a otimização do problema original não linear e o refinamento da fronteira Pareto estimada. A abordagem proposta foi validada em dois sistemas teste, um de 8 barras e outro de 9 barras, evidenciando a eficácia da estratégia híbrida em melhorar o desempenho das proteções em termos de tempo e coordenação.

Index Terms—Heurística matemática, SPEA2, Relés direcionais de sobrecorrente (DOCRs), Sistemas elétricos de potência (SEPs)

I. INTRODUÇÃO

Sistemas Elétricos de Potência (SEPs) possuem diferentes elementos, que conectados entre si formam um grande e complexo sistema dinâmico [1]. Devido à grande quantidade de elementos, um altíssimo número de contingências é possível: algumas que afetam os elementos individualmente, e outras que perturbam o sistema como um todo. Mesmo que submetido a uma perturbação, um SEP deve ter a capacidade de se manter em condições operativas, independente da natureza do distúrbio, seja uma pequena variação de carga ou um evento disruptivo. Neste contexto, o sistema de proteção precisa ser projetado para suportar perturbações graves sem levar o

sistema ao colapso e manter a sua integridade física, enquanto garante o fornecimento de energia contínuo e confiável ao maior número possível de consumidores [2].

Em redes malhadas a proteção de sobrecorrente direcional é necessária para fazer com que o relé atue em caso de faltas em apenas uma direção, pois, dependendo da localização da falta, a corrente de curto-circuito pode fluir na direção direta ou reversa [3]. A proteção direcional é utilizada para garantir a coordenação entre os relés que detectam uma mesma falta. O objetivo da coordenação de relés de sobrecorrente direcionais (DOCRs, *Directional Overcurrent Relays*) é minimizar o tempo de atuação de todos os relés do sistema para as faltas ocorridas na sua zona de proteção, respeitando-se um tempo de coordenação entre eles.

Muitas ferramentas de otimização foram desenvolvidas para tratar o problema de coordenação de DOCRs. Inicialmente, abordagens determinísticas foram propostas para resolver o problema, incluindo programação linear (LP) e programação linear inteira mista (MILP) [4]–[7], e programação não-linear (NLP) e programação não-linear inteira mista (MINLP) [8]–[10]. A maior vantagem desses métodos está na simplicidade e velocidade na solução do problema; no entanto, podem requerer valores iniciais definidos por especialistas para chegar a resultados ótimos (ou próximos dos ótimos). Além disso, enfrentam dificuldades a medida que a cardinalidade do problema aumenta.

Por outro lado, várias meta-heurísticas também têm sido utilizadas para abordar o problema de coordenação de DOCRs; esses algoritmos atraíram o interesse da comunidade científica pela sua habilidade de tratar o problema completo. Em [12], os autores utilizam um algoritmo genético (GA) para a coordenação de relés de distância e de sobrecorrente, apresentando resultados eficientes e com um menor número de iterações (i.e., avaliação de soluções) se comparado a outros algoritmos meta-heurísticos da literatura. Em [13], uma técnica de programação linear (LP) é empregada, junto a

Este trabalho recebeu suporte das agências brasileiras FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais), CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), e foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. O Professor Lucas S. Batista é bolsista FAPEMIG-CNPQ (processo APQ-06716-24).

um GA, para otimização local do modelo; dessa forma, foi possível obter soluções com uma eficiência computacional superior à otimização por um GA convencional. A otimização por enxame de partículas (PSO, *Particle Swarm Optimization*) é outra meta-heurística bastante empregada. Em [14] a otimização do problema de coordenação é realizada com um PSO, considerando faltas em diferentes localizações da linha. Em [15] uma modificação do PSO foi implementada e apresentou resultados que convergiram em tempo bem próximo à solução por meio de LP. Além desses métodos tradicionais, várias outras meta-heurísticas são utilizadas na solução desse problema [16]–[22].

Enquanto o problema de coordenação é usualmente formulado como um problema restrito mono-objetivo, formulações multiobjetivo são propostas para representar situações conflitantes na realidade da coordenação [23]. Várias abordagens buscam, ao mesmo tempo, minimizar o tempo de operação e minimizar o intervalo de atuação entre a proteção principal e a de retaguarda [24]. Essa modelagem consegue equilibrar a rápida atuação dos relés com a confiabilidade da coordenação [24]–[26]. Em [27] é feito um estudo comparativo entre as formulações mono-objetivo e multiobjetivo, em que se tem como objetivo adicional minimizar o tempo de atuação da proteção de retaguarda; os resultados mostraram que o tempo total de operação foi elevado, entretanto, o intervalo de tempo entre a proteção principal e a de retaguarda foi reduzido. Da mesma forma, em [28] foi proposta a minimização do tempo de operação da proteção de retaguarda simultaneamente à minimização do tempo de operação da proteção principal utilizando o algoritmo SPEA2, o que resultou na redução do tempo de coordenação entre os pares.

Neste trabalho, tem-se como foco uma formulação multiobjetivo do problema de coordenação, levando em consideração, além da minimização do tempo da proteção principal, a minimização do intervalo de tempo entre a proteção principal e a de retaguarda. Para o tratamento desse problema, propõe-se uma heurística matemática, i.e., um algoritmo híbrido que utiliza tanto técnicas de programação matemática quanto meta-heurísticas. Os algoritmos foram combinados de forma a englobar as vantagens de cada uma das abordagens para estimar uma fronteira Pareto eficiente para os objetivos conflitantes considerados. A otimização da aproximação linear do problema foi realizada de forma exata com o auxílio da estratégia ϵ -restrito; essa etapa foi fundamental para a obtenção de soluções iniciais de boa qualidade. Essas soluções iniciais alimentaram o algoritmo SPEA2 [34], o qual foi usado para a otimização do problema original (não-linear); com isso, foram obtidas soluções de compromisso bem distribuídas ao longo da fronteira Pareto do problema original. Durante os experimentos foram considerados dois sistemas teste, um de 8 e outro de 9 barras. Para avaliar os resultados, foram analisados os melhores resultados de tempo de operação da proteção principal, de tempo de operação da proteção de retaguarda e do intervalo de coordenação, para cada uma das funções objetivo. Assim, o trabalho avança o estado da arte ao evidenciar que a integração sistemática de métodos exatos e evolutivos pode

conduzir a soluções superiores para a coordenação de DOCRs em redes malhadas.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma: na Seção II, são apresentadas as principais variáveis e restrições que caracterizam o problema de coordenação de relés de sobrecorrente direcionais, bem como a proposta de modelagem multiobjetivo. Na Seção III, é descrita a metodologia híbrida que combina programação matemática, a estratégia ϵ -restrito e o algoritmo SPEA2. Na Seção IV, discute-se o sistema teste e analisam-se as soluções obtidas, bem como os resultados propiciados pela abordagem multiobjetivo proposta. Finalmente, na Seção V, são apresentadas as conclusões obtidas e apontam-se perspectivas para pesquisas futuras.

II. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

A. Proteção de Sistemas Elétricos

A proteção de sistemas elétricos é essencial para manter a integridade física do sistema elétrico quando submetido a perturbações, enquanto garante o fornecimento de energia contínuo e confiável ao maior número possível de consumidores [2]. A identificação e o isolamento rápido dos componentes defeituosos são os principais objetivos da proteção, minimizando o impacto negativo da falta no restante do sistema. A proteção contra faltas é uma necessidade básica no planejamento e na concepção de sistemas elétricos. As redes elétricas incluem dispositivos de proteção, como fusíveis, religadores, relés e disjuntores. Esses dispositivos desempenham um papel essencial na proteção da rede contra faltas, isolando a seção defeituosa da rede do restante. No entanto, uma limitação desses dispositivos é a incapacidade de determinar com precisão a direção da corrente. Para contornar isso, os relés direcionais de sobrecorrente (DOCRs) são utilizados para garantir uma operação segura, confiável e eficiente do sistema [30].

B. Relé de Sobrecorrente Direcional (DOCR)

Os relés de sobrecorrente operam, em sua maioria, com característica de tempo definido, tempo instantâneo e tempo inverso. O relé com uma característica de tempo inverso atua com maior rapidez (menor tempo) à medida em que o nível de corrente aumenta. Há quatro tipos de curva que se enquadram na característica de tempo inverso, classificadas como: inverso padrão, muito inverso, extremamente padrão e tempo extenso. Segundo [31], a relação entre a corrente e o tempo dessas curvas pode ser expressa a partir de (1):

$$t_{op,j} = \frac{a_j \cdot TMS_j}{\left(\frac{I_{CC,j}}{I_{A,j}}\right)^{n_j} - 1}, \quad \forall j \in \{1, \dots, nr\} \quad (1)$$

em que $t_{op,j}$ é o tempo de operação, TMS_j é o fator multiplicativo de tempo, $I_{CC,j}$ é a corrente de curto-circuito que sensibiliza o relé e $I_{A,j}$ é a corrente de ajuste do relé j até o total de relés do sistema, nr . Os fatores restantes a_j e n_j são dados na Tabela I, e caracterizam o tipo de curva dos relés de sobrecorrente de tempo inverso definidos pela norma IEC 60255-151 [31].

Relés de sobrecorrente padrões têm sua sensibilidade limitada à magnitude de corrente e atuam para um ajuste definido

Tabela I
VALORES DE a E n SEGUNDO A NORMA IEC 60255-151 [31].

Tipo	a	n
Extremamente inverso	80	2
Muito inverso	13.5	1
Inverso padrão	0.14	0.02
Tempo extenso	120	1

sem considerar o fluxo em que a corrente está fluindo. Em redes malhadas é necessário que o relé seja sensível tanto à magnitude de corrente quanto à sua direção. Operando com o elemento diferencial, o relé pode aumentar a sua sensibilidade e confiabilidade na proteção do sistema.

C. Problema de Otimização da Coordenação

A coordenação ótima de DOCRs tem como objetivo minimizar o tempo de operação entre todos os relés do sistema elétrico analisado. A função objetivo (f_1) pode ser descrita através de um problema de minimização, na forma:

$$\min f_1 = \sum_{j=1}^{nr} t_{op,j}^p \quad (2)$$

onde nr é o número de relés do sistema e $t_{op,j}^p$ é o tempo de operação do relé j atuando como proteção principal. As variáveis que compõem o tempo de operação do relé $t_{op,j}$, conforme (1), são o fator multiplicativo de tempo (TMS_j), a corrente de ajuste ($I_{A,j}$), a corrente de curto-circuito ($I_{CC,j}$) e o tipo de curva (a, n). Então, o tempo de operação é uma função multivariável, conforme (3):

$$t_{op,j}(TMS_j, I_{A,j}, I_{CC,j}, a_j, n_j) . \quad (3)$$

Assumindo que a corrente de curto-circuito e o tipo de curva sejam conhecidos, então o espaço de solução passa a depender somente das variáveis TMS_j e $I_{A,j}$, i.e., $t_{op}(TMS, I_A)$. Essa função pode ser representada por uma superfície, conforme a Figura 1. Neste exemplo, o tipo de curva é uma IEC normal inversa, a corrente de curto-circuito é igual a 600 A, e o intervalo de soluções de t_{op} é $0,05 \leq TMS \leq 1$ e $100 \text{ A} \leq I_A \leq 500 \text{ A}$.

Para completar o problema de otimização e obter uma coordenação otimizada dos relés de sobrecorrente direcionais, precisam-se definir as restrições. Em uma rede malhada, cada relé é responsável por proteger uma zona primária e deve caracterizar a retaguarda de outro relé em caso de falta da proteção principal. A partir do conceito de seletividade, entre a proteção principal e de retaguarda, pode-se definir o conjunto de restrições:

$$\sum_{j=1}^{nr} r_{ij} t_{op,j}^r - \sum_{j=1}^{nr} p_{ij} t_{op,j}^p \geq CTI_i, \quad \forall i \in \{1, \dots, np\} \quad (4)$$

em que r_{ij} é o termo relacionado à proteção de retaguarda, p_{ij} é o termo relacionado à proteção principal, $t_{op,j}^p$ o tempo de operação do relé j de proteção principal, $t_{op,j}^r$ o tempo de operação do relé j de proteção de retaguarda e CTI_i o

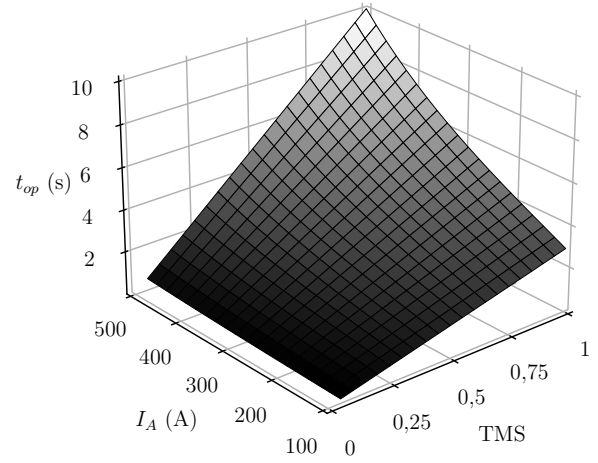


Figura 1. Função $t_{op}(TMS, I_A)$ de um relé de sobrecorrente direcional. Neste caso, o tipo de curva é uma IEC normal inversa e a corrente de curto-circuito é igual a 600 A.

atraso temporal desejado, entre a proteção principal e a de retaguarda para cada um dos pares i até o número total de pares do sistema, np . A partir de (4) obtém-se as equações que limitam os valores de TMS_j . Assim, o problema é sujeito, para cada relé j , às seguintes restrições:

$$TMS_j^{min} \leq TMS_j \leq TMS_j^{max} \quad (5)$$

$$I_{A,j}^{min} \leq I_{A,j} \leq I_{A,j}^{max} \quad (6)$$

D. Modelagem Multiobjetivo

O problema escalar definido na subseção anterior pode ser tratado como um problema multiobjetivo, a partir da consideração das restrições em (4) como uma segunda função objetivo (f_2):

$$\min f_2 = \sup_{i \in \{1, \dots, np\}} \left(\sum_{j=1}^{nr} r_{ij} t_{op,j}^r - \sum_{j=1}^{nr} p_{ij} t_{op,j}^p \right) \quad (7)$$

em que a função f_2 garante que o máximo intervalo de atuação entre a proteção principal e de retaguarda seja minimizado; por outro lado, pode levar ao aumento do tempo de atuação do relé como proteção principal. Essa abordagem pode ser interpretada como uma otimização do pior caso, uma estratégia comum para problemas sob incerteza [32]. Logo, f_1 e f_2 são conflitantes, o que leva a uma análise de *trade-off*.

III. METODOLOGIA PROPOSTA

A. Otimização do Problema Linearizado

A linearização adotada neste trabalho envolve a decomposição da função $t_{op,j}$ em duas partes, sendo obtidos a constante k_j e o fator multiplicativo de tempo TMS_j [33]. Com isso, o tempo de operação tem TMS_j como sua única variável (8), representando uma função linear. Em (9), tem-se a parcela que possui as variáveis iniciais do

sistema, i.e., $I_{CC,j}^p$, $I_{A,j}$ e os parâmetros da curva (a e n), assumidos como conhecidos nesta linearização.

$$t_{op,j} = k_j \cdot TMS_j \quad (8)$$

$$k_j = \frac{a}{\left(\frac{I_{CC,j}}{I_{A,j}}\right)^n - 1} \quad (9)$$

Para a resolução dessa linearização do problema de otimização multiobjetivo, utilizou-se o método ϵ -restrito, assumindo f_1 como função objetivo e f_2 como restrição adicional, obtendo assim um conjunto de problemas escalares a partir dos valores atribuídos a ϵ . Neste trabalho, aplicou-se as quatro configurações possíveis (definidas de acordo com os valores de a e n , conforme Tabela I); e para cada uma dessas configurações considerou-se 500 valores de ϵ gerados arbitrariamente por meio de uma distribuição uniforme.

B. Otimização do Problema Original

Conforme pode-se observar em (9), a consideração do parâmetro $I_{A,j}$ como uma variável de decisão remove a linearidade do problema, sendo que, para a otimização do problema, torna-se necessária uma abordagem capaz de tratar problemas não lineares.

De forma a tornar a otimização mais próxima da realidade do problema de coordenação da proteção, é possível permitir que cada um dos relés possua uma configuração específica, conforme Tabela I, a ser definida pelo processo de otimização. Então, diferentemente do proposto para o problema linear, em que são consideradas as quatro configurações possíveis para cada um dos relés da rede, neste caso, a e n , presentes em (9), são definidos de acordo com as quatro configurações descritas na Tabela I, via o processo de otimização.

O algoritmo utilizado no processo de otimização do problema original foi uma meta-heurística *Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2* (SPEA2) [34], a qual apresenta uma forte capacidade de manutenção da diversidade das soluções durante o processo de otimização. Este algoritmo apresentou um trade-off fortuito entre capacidade de convergência e exploração rápida do espaço de busca, sendo que mesmo no caso com gerações iniciais aleatórias foi capaz de rapidamente encontrar uma fronteira aproximada.

Além da otimização pelo SPEA2 por meio de indivíduos puramente aleatórios, foi utilizada outra abordagem, neste caso uma abordagem híbrida, em que foram utilizadas as soluções adquiridas a partir do processo de otimização linear juntamente com soluções advindas da abordagem linear com pequenas variações. Os indivíduos com variações gerados advêm das soluções encontradas no processo de otimização linear, sendo que cada variável foi somada com um valor gerado por uma variável aleatória seguindo uma distribuição normal com $\mu = 0$ e σ sendo 25% do próprio valor. Os parâmetros e configurações adicionais utilizados no algoritmo foram escolhidos baseados em valores padrões para a literatura, tais quais os presentes como *default* na biblioteca utilizada [40].

IV. DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção serão discutidos os dois sistemas utilizados na avaliação da abordagem híbrida proposta, assim como sua comparação com o método linear e o uso do SPEA2 sem a hibridização. Para o SPEA2, temos os seguintes hiperparâmetros utilizados nos processos de otimização:

- População: 1500 indivíduos;
- Seleção: Torneio Binário [37];
- Crossover: Crossover Binário Simulado [38];
- Mutação: Mutação Polinomial [39].

A. Sistema de 8 barras

O sistema teste de 8 barras, apresentado na Figura 2, apresenta um cenário em que um relé possui mais de uma proteção de retaguarda. O sistema possui 14 relés e 20 pares de proteção [35].

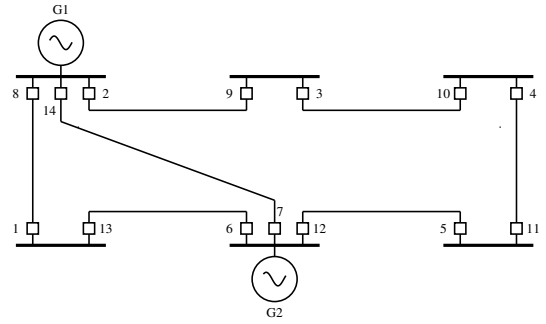


Figura 2. Sistema teste de 8 barras

Ao ser executada a otimização utilizando a abordagem linear, duas das configurações possibilitaram que todas as soluções geradas fossem não dominadas (Muito Inverso e Extremamente Inverso). Por outro lado, as outras duas configurações tiveram todas as soluções dominadas.

Ao executarmos a abordagem híbrida com a permissão de variação de $I_{A,j}$ no processo de otimização, e a inserção de diversidade conforme especificado na subseção III-B, a fronteira aproximada apresentou melhora significativa. Esta melhora ocorreu principalmente devido à permissão de alteração da variável $I_{A,j}$ e à inserção de variedade pela geração de soluções iniciais aleatórias, permitindo que o otimizador escapasse de mínimos locais existentes para cada configuração.

As três abordagens consideradas são comparadas, i.e., programação matemática, meta-heurística pura e abordagem híbrida. Para isso, gerou-se um gráfico com ambas as fronteiras Pareto aproximadas, conforme pode ser visto na Figura 3. Cabe destacar que a meta-heurística pura considera uma população inicial gerada aleatoriamente, sem a influência das soluções obtidas da resolução do problema linearizado. No contexto das meta-heurísticas, foram utilizados os mesmos hiperparâmetros para os algoritmos.

A partir das fronteiras apresentadas na Figura 3, é possível compreender a eficiência da abordagem proposta em encontrar soluções de melhor qualidade. Também é notável a eficiência da aplicação da abordagem híbrida, aliando boas soluções

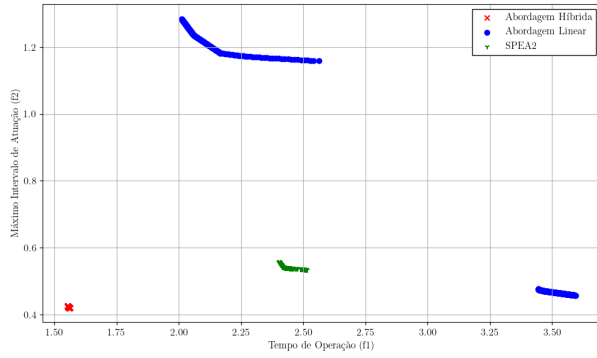


Figura 3. Comparação das Fronteiras Pareto Aproximadas do sistema teste de 8 barras.

iniciais com uma maior capacidade de exploração do espaço de busca, permitindo também a utilização de variáveis anteriormente fixadas para a otimização pela abordagem linearizada.

Para a análise, foram selecionadas duas soluções, advindas da abordagem híbrida: a “Melhor f_1 ” ($f_1 = 1,554$, $f_2 = 0,424$) e a “Melhor f_2 ” ($f_1 = 1,563$, $f_2 = 0,420$). Podemos observar a partir das Figuras 4 e 5 que essas soluções apresentaram os melhores resultados para os objetivos f_1 e f_2 , respectivamente; doravante a simplicidade do sistema, ambas as soluções apresentaram tempos de operação similares para todos os relés.

Para ambas as soluções, todos os relés se encontraram na configuração Extremamente Inversa, mostrando que esta configuração se apresenta benéfica para o caso em questão.

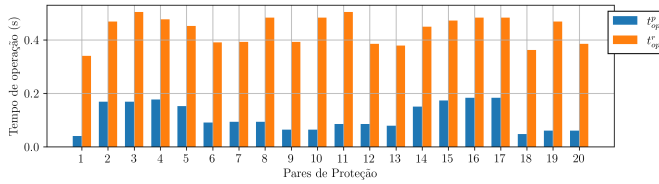


Figura 4. Comparação entre os tempos de operação de retaguarda (t_{op}^r) e de proteção principal (t_{op}^p) obtidos para escolha da melhor f_1 , por par do sistema de 8 barras.

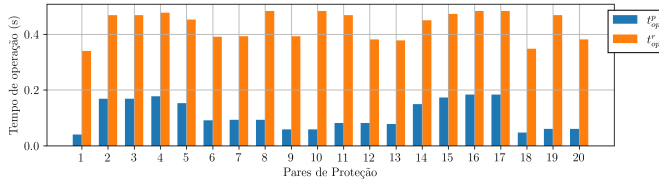


Figura 5. Comparação entre os tempos de operação de retaguarda (t_{op}^r) e de proteção principal (t_{op}^p) obtidos para escolha da melhor f_2 , por par do sistema de 8 barras.

Na Figura 6, pode-se visualizar o atraso temporal de atuação entre a proteção principal e de retaguarda, considerando as soluções “melhor f_1 ” (Figura 4) e “melhor f_2 ” (Figura 5). Para alguns pares há uma diferença no atraso; esse comportamento se dá pela alta relação entre as variáveis do problema. Então,

uma pequena variação para uma das relações (restrição de seletividade) altera o comportamento entre o relé e os demais. Os valores de atraso temporal para a solução “Melhor f_2 ” se mostraram reduzidos; embora tenha o mesmo número de picos que a outra solução, nenhum dos pares atingiu atraso temporal superior a 0,5s, demonstrando um ganho de robustez em alguns pares sem perda na função objetivo (de 1,554 para 1,601 no objetivo f_1).

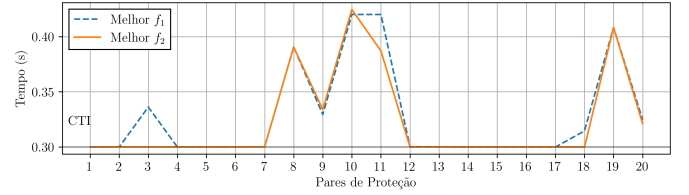


Figura 6. Atraso temporal entre a proteção de retaguarda (t_{op}^r) e proteção principal (t_{op}^p) obtidos para escolha da melhor f_1 e da melhor f_2 , por par do sistema de 8 barras.

B. Sistema de 9 barras

O sistema teste de 9 barras, ilustrado na Figura 7, apresenta novamente um cenário em que um relé possui mais de uma proteção de retaguarda. Neste caso, o sistema possui 24 relés e 38 pares de proteção [36], apresentando um espaço de busca e uma quantidade de restrições significativamente superior ao apresentado na subseção IV-A.

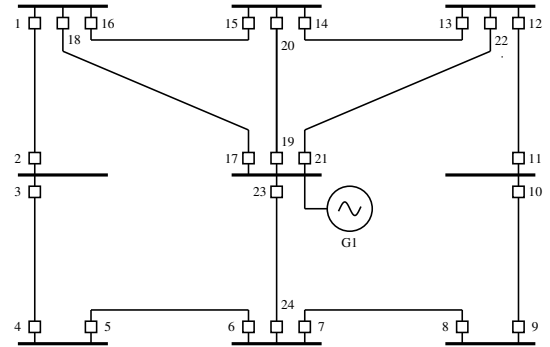


Figura 7. Sistema teste de 9 barras

Novamente, apenas duas das configurações geraram soluções não dominadas (Muito Inverso e Inverso Padrão), sendo que as soluções geradas pela configuração Muito Inverso se mantiveram no conjunto de soluções não dominadas. Repetindo a aplicação da abordagem híbrida, foi possível notar uma melhoria geral das soluções, tal como pode ser visto na comparação presente na Figura 8. Vale notar que o trecho de fronteira à direita, obtido pela abordagem linear, não foi mapeado pela abordagem híbrida; entretanto, esse fato não apresenta um problema prático, pois as soluções encontradas pela abordagem proposta apresentam um melhor *trade-off* entre as funções objetivo, i.e., caracterizam um tempo de operação um pouco maior, mas a um custo total muito inferior.

Foram selecionadas para análise duas das soluções, as mais extremas na fronteira Pareto aproximada: a “Melhor f_1 ”

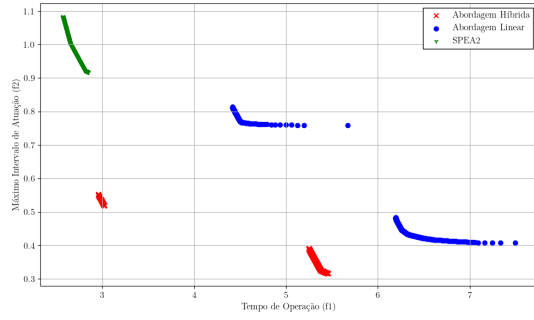


Figura 8. Comparação das Fronteiras Pareto Aproximadas do sistema teste de 9 barras.

($f_1 = 2,957$, $f_2 = 0,552$) e a “Melhor f_2 ” ($f_1 = 5,459$, $f_2 = 0,317$). Podemos analisar a partir das Figuras 9 e 10 que as soluções apresentaram bons resultados para ambos os objetivos; diferentemente do sistema mais simples de 8 barras, conseguimos ver claramente que a solução com o melhor objetivo f_1 possui uma maior constância nos tempos de operação dos relés atuantes como proteção principal, porém não possui a melhor atuação possível no tempo de resposta dos relés de retaguarda. O contrário ocorre em relação à solução com o melhor objetivo f_2 , em que temos um menor tempo de atuação geral dos relés secundários, sendo que o tempo de atuação total dos relés principais é superior.

Neste caso, houve uma mudança das configurações definidas para os relés dependendo da solução presente na fronteira Pareto aproximada, sendo que esta mudança justifica o fato de a fronteira apresentar-se desconexa. A solução com o menor valor de f_1 teve todos os seus relés presentes na configuração Muito Inverso, enquanto a solução com o maior valor de f_1 teve todos os relés presentes na configuração Inverso Padrão.

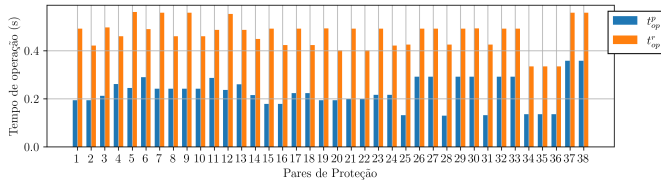


Figura 9. Comparação entre os tempos de operação de retaguarda (t_{op}^r) e de proteção principal (t_{op}^p) obtidos para escolha da melhor f_1 , por par do sistema de 9 barras.

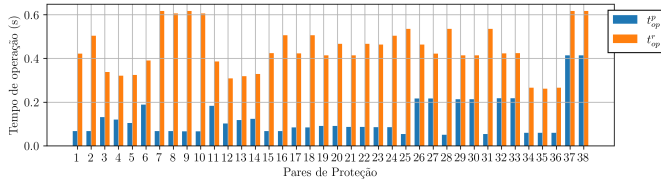


Figura 10. Comparação entre os tempos de operação de retaguarda (t_{op}^r) e de proteção principal (t_{op}^p) obtidos para escolha da melhor f_2 , por par do sistema de 9 barras.

Na Figura 11, podemos replicar a análise realizada no

sistema de 9 barras. A solução “melhor f_1 ” apresentou um maior número de picos que a solução “melhor f_2 ”. Em contrapartida, a solução “melhor f_2 ” apresentou tempos de atraso mais semelhantes, porém superiores, entre os diferentes pares.

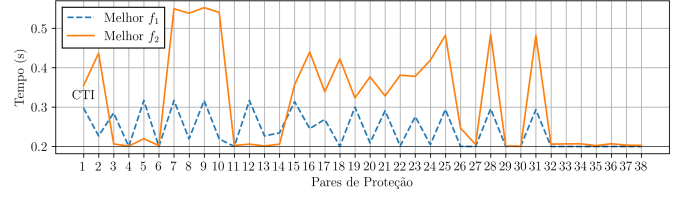


Figura 11. Atraso temporal entre a proteção de retaguarda (t_{op}^r) e proteção principal (t_{op}^p) obtidos para escolha da melhor f_1 e da melhor f_2 , por par do sistema de 9 barras.

V. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma modelagem multiobjetivo para o problema de coordenação de relés direcionais de sobre-corrente. Além da minimização do tempo de atuação dos relés, considerou-se também o conceito de seletividade. Essa propriedade garante que o sistema de proteção atue com maior robustez, sendo mais confiável em caso de falta da proteção principal. Os dois objetivos se mostraram conflitantes, como pôde ser visto a partir das fronteiras de Pareto estimadas, sendo necessária uma análise de *trade-off* para definir qual o melhor ajuste em cada situação.

A abordagem híbrida proposta, em que uma linearização para a geração das soluções iniciais é seguida do uso de uma meta-heurística para a busca em um espaço de projetos mais abrangente, mostrou-se extremamente fortuita, sendo capaz de refinar as soluções de maneira superior à aplicação do SPEA2 diretamente.

Esta abordagem mostrou-se capaz de escalar para sistemas com um número maior de pares de proteção em relação aos casos mais simples, sendo que esta técnica evidencia um potencial de aplicação em situações práticas cuja cardinalidade de relés e pares de proteção seja superior aos exemplos discutidos neste artigo.

Algumas propostas de continuidade desta pesquisa incluem:

- 1) Aperfeiçoamento dos otimizadores da metodologia proposta: a meta-heurística utilizada pode ser refinada, de forma a encontrar hiperparâmetros mais otimizados para este problema em específico.
- 2) Investigação de uma heurística matemática para atuação junto ao processo de otimização da meta-heurística, por exemplo, para a realização de buscas locais eficientes, viabilizando assim lidar com problemas de maior cardinalidade.
- 3) Inserção de variabilidade estocástica: diversos parâmetros existentes no problema de coordenação estão sujeitos à variações por erros de fabricação e intempéries climáticas, sendo que um processo de otimização robusta permitiria encontrar soluções que melhor se ajustassem à estas variações estocásticas.

Os autores gostariam de agradecer a todos os revisores por seus comentários construtivos.

REFERÊNCIAS

- [1] J. Machowski, Z. Lubosny, J. W. Bialek, and J. R. Bumby, Power system dynamics: stability and control. John Wiley & Sons, 2020.
- [2] P. M. Anderson, C. F. Henville, R. Rifaat, B. Johnson, and S. Meliopoulos, Power system protection. John Wiley & Sons, 2022.
- [3] A. R. Al-Roomi, "Directional Overcurrent Relays and the Importance of Relay Coordination", in Optimal Coordination of Power Protective Devices with Illustrative Examples, 2022, pp. 139–167.
- [4] A. J. Urdaneta, H. Restrepo, S. Marquez and J. Sanchez, "Coordination of directional overcurrent relay timing using linear programming," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, no. 1, pp. 122-129, Jan. 1996, doi: 10.1109/61.484008.
- [5] A. S. Braga and J. Tome Saraiva, "Coordination of overcurrent directional relays in meshed networks using the Simplex method," Proceedings of 8th Mediterranean Electrotechnical Conference on Industrial Applications in Power Systems, Computer Science and Telecommunications (MELECON 96), Bari, Italy, 1996, pp. 1535-1538 vol.3, doi: 10.1109/MELCON.1996.551243.
- [6] P. P. Bedekar, S. R. Bhide and V. S. Kale, "Coordination of overcurrent relays in distribution system using linear programming technique," 2009 International Conference on Control, Automation, Communication and Energy Conservation, Perundurai, India, 2009, pp. 1-4.
- [7] A. R. Al-Roomi and M. E. El-Hawary, "Mathematical Schemes to Linearize Operating Times of Overcurrent Relays by Sequentially Fixing Plug Settings and Time Multiplier Settings", in 2020 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2020, pp. 1–6.
- [8] D. Birla, R. P. Maheshwari and H. O. Gupta, "A new nonlinear directional overcurrent relay coordination technique, and banes and boons of near-end faults based approach," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 21, no. 3, pp. 1176-1182, July 2006, doi: 10.1109/TPWRD.2005.861325.
- [9] Birla, Dinesh, Maheshwari, Rudra Prakash, Gupta, Hari Om, Deep, Kusum and Thakur, Manoj. "Application of Random Search Technique in Directional Overcurrent Relay Coordination" International Journal of Emerging Electric Power Systems, vol. 7, no. 1, 2006. <https://doi.org/10.2202/1553-779X.1271>
- [10] H. A. Abyaneh, M. Al-Dabbagh, H. K. Karegar, S. H. H. Sadeghi and R. A. J. Khan, "A new optimal approach for coordination of overcurrent relays in interconnected power systems," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, no. 2, pp. 430-435, April 2003, doi: 10.1109/TPWRD.2002.803754.
- [11] A. J. Urdaneta, R. Nadira and L. G. Perez Jimenez, "Optimal coordination of directional overcurrent relays in interconnected power systems," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 3, no. 3, pp. 903-911, July 1988, doi: 10.1109/61.193867.
- [12] R. S. F. Ferraz, R. S. F. Ferraz, R. C. D. de Lima, L. G. R. Tonini, A. C. Rueda-Medina and O. E. Batista, "Genetic Optimization-based Overcurrent Relay Coordination in a Feeder with High Distributed Generation Integration," 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America), Gramado, Brazil, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISGT-LA.2019.8894961.
- [13] A. S. Noghabi, J. Sadeh and H. R. Mashhadi, "Considering Different Network Topologies in Optimal Overcurrent Relay Coordination Using a Hybrid GA," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 24, no. 4, pp. 1857-1863, Oct. 2009, doi: 10.1109/TPWRD.2009.2029057.
- [14] H. A. Tresnadi, T. A. Nugroho, M. Abdillah and N. I. Pertiwi, "Coordination of Directional Overcurrent Relay Using PSO-DE Algorithm," 2021 International Conference on Technology and Policy in Energy and Electric Power (ICT-PEP), Jakarta, Indonesia, 2021, pp. 412-417, doi: 10.1109/ICT-PEP53949.2021.9601118.
- [15] M. M. Mansour, S. F. Mekhamer and N. El-Kharbawe, "A Modified Particle Swarm Optimizer for the Coordination of Directional Overcurrent Relays," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 3, pp. 1400-1410, July 2007, doi: 10.1109/TPWRD.2007.899259.
- [16] T. Khurshaid, A. Wadood, S. Gholami Farkoush, J. Yu, C. -H. Kim and S. -B. Rhee, "An Improved Optimal Solution for the Directional Overcurrent Relays Coordination Using Hybridized Whale Optimization Algorithm in Complex Power Systems," in IEEE Access, vol. 7, pp. 90418-90435, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2925822.
- [17] A. Korashy, S. Kamel, T. Alquthami and F. Jurado, "Optimal Coordination of Standard and Non-Standard Direction Overcurrent Relays Using an Improved Moth-Flame Optimization," in IEEE Access, vol. 8, pp. 87378-87392, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2992566.
- [18] P. Alaei and T. Amraee, "Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays in Meshed Active Distribution Network Using Imperialistic Competition Algorithm," in Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, vol. 9, no. 2, pp. 416-422, March 2021, doi: 10.35833/MPCE.2019.000184.
- [19] N. Mancer and B. Mahdad, "Optimal Coordination Of Directional Overcurrent Relays Using Various Metaheuristic Methods," 2022 19th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD), Sétif, Algeria, 2022, pp. 911-916, doi: 10.1109/SSD54932.2022.9955761.
- [20] Bayazidi, A., Abdali, A., & Vasquez, J. C. (2024). Optimal coordination of directional overcurrent relays in power energy systems with emphasis on the discreteness of variables: Comprehensive comparisons. Heliyon, 10(19), e37972. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37972>
- [21] Aminian, M., Shahbazzadeh, M.J. & Eslami, M. Distance optimization and directional overcurrent relay coordination using edge-powered biogeography-genetic algorithms. J Cloud Comp 13, 109 (2024). <https://doi.org/10.1186/s13677-024-00672-2>
- [22] A. Alamshah et al., "Recent Developments of Directional Overcurrent Relay Coordination in Ring Distribution Network Based on Hybrid Optimization Techniques," in IEEE Access, vol. 13, pp. 14961-14982, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3524589.
- [23] Guimarães, M. M., Takahashi, R. H. C., Costa, M. H., Moia, C. H. U., & Carrano, E. G. (2023). Robust coordination of overcurrent relays for several simultaneous faults in wind power generation systems. Applied Soft Computing, 147, 110795. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110795>
- [24] T. Foqha, S. Alsadi, O. Omari and S. S. Refaat, "Optimization Techniques for Directional Overcurrent Relay Coordination: A Comprehensive Review," in IEEE Access, vol. 12, pp. 1952-2006, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3347393.
- [25] Korashy, A., Kamel, S., Nasrat, L. et al. Developed multi-objective grey wolf optimizer with fuzzy logic decision-making tool for direction overcurrent relays coordination. Soft Comput 24, 13305–13317 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00500-020-04745-7>
- [26] V. R. Pandi, H. H. Zeineldin and W. Xiao, "Determining Optimal Location and Size of Distributed Generation Resources Considering Harmonic and Protection Coordination Limits," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 2, pp. 1245-1254, May 2013, doi: 10.1109/TPWRS.2012.2209687.
- [27] M. K. Afifi, H. M. Sharaf, M. M. Sayed and D. K. Ibrahim, "Comparative Study between Single-Objective and Multi-Objective optimization Approaches for Directional Overcurrent Relays Coordination Considering Different Fault Locations," 2019 IEEE Milan PowerTech, Milan, Italy, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/PTC.2019.8810815.
- [28] R. Benabid, "A new formulation and solving of protective relays setting and coordination problem using multi-objective optimization and fuzzy logic," 2016 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC), Algiers, Algeria, 2016, pp. 138-143, doi: 10.1109/ICMIC.2016.7804288.
- [29] J. Zhao et al., "Power system dynamic state and parameter estimation-transition to power electronics-dominated clean energy systems: IEEE task force on power system dynamic state and parameter estimation", 06 2021.
- [30] Shih, Meng Yen, et al. "Directional overcurrent relay coordination optimization." Smart Energy and Electric Power Systems. Elsevier, 2023. 121-146.
- [31] IEC 60255-151, S. (2009). Measuring relays and protection equipment-part 151: Functional requirements of over/under current protection, IEC 60255-151
- [32] R. Tyrrell Rockafellar (2014) Coherent Approaches to Risk in Optimization Under Uncertainty. INFORMS TuORials in Operations Research null(null):38-61.
- [33] A. R. Al-Roomi and M. E. El-Hawary, "Mathematical Schemes to Linearize Operating Times of Overcurrent Relays by Sequentially Fixing Plug Settings and Time Multiplier Settings," 2020 IEEE Canadian

- Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), London, ON, Canada, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/CCECE47787.2020.9255794.
- [34] Zitzler, E., Laumanns, M. & Thiele, L. SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm. *TIK Report*. **103** (2001)
 - [35] T. Amraee, "Coordination of Directional Overcurrent Relays Using Seeker Algorithm," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 27, no. 3, pp. 1415-1422, July 2012, doi: 10.1109/TPWRD.2012.2190107.
 - [36] Ali R. Al-Roomi (2015). Optimal Relay Coordination Test Systems Repository. Halifax, Nova Scotia, Canada: Dalhousie University, Electrical and Computer Engineering.
 - [37] Gaspar-Cunha A, Takahashi R, Antunes C H (2012). "Manual de computação evolutiva e metaheurística". Halifax, Imprensa da Universidade de Coimbra/Coimbra University Press.
 - [38] Kalyanmoy Deb, Ram Bhushan Agrawal et al. (1995). "Simulated binary crossover for continuous search space". *Complex Systems*, 9(2), 115–148. Citeseer.
 - [39] Guo-Qiang Zeng, Jie Chen, Li-Min Li, Min-Rong Chen, Lie Wu, Yu-Xing Dai, Chong-Wei Zheng (2016). "An improved multi-objective population-based extremal optimization algorithm with polynomial mutation". *Information Sciences*, 330, 49–73. Elsevier.
 - [40] Blank J. Deb K. (2020). "pymoo: Multi-Objective Optimization in Python". *IEEE Access*, 8, 89497–89509. IEEE.