Aplicação de Métodos de Otimização na Coordenação de Relés de Sobrecorrente

Angelo M. Maia * **Rainer Zanghi** **

* *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações, Universidade Federal Fluminense, RJ, (e-mail: angelomaia@id.uff.br).*
** *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Teecomunicações, Universidade Federal Fluminense, RJ, (e-mail: rzanghi@id.uff.br).*

Abstract: In power systems, the overcurrent protection stands out for its simple operation and low cost. However, the coordination of the devices that performs this function have to be re-evaluated whenever a change in the circuit topology occurs, once the proper operation of these devices depends directly on the rated and on the short-circuit currents in the system. By these factors, the optimal coordination of overcurrent relays has been object of study for a long time, accumulating a vast bibliography. This article synthesizes important theorical aspects related to the coordination problem using optimization algorithms. To illustrate the methodology, some cases from the literature are presented, and the coordination problem is solved using optimization algorithms.

Resumo: Em sistemas de potência, a proteção de sobrecorrente se destaca por ser de funcionamento simples e de baixo custo. Contudo, a coordenação dos dispositivos que desempenham essa função deve ser reavaliada sempre que uma modificação na topologia do circuito for realizada, já que a atuação devida desses aparelhos depende diretamente das correntes nominais e de curto-circuito no sistema. Por esses fatores, a coordenação ótima de relés de sobrecorrente vem sendo objeto de estudos por um longo tempo, tendo acumulado uma bibliografia relativamente vasta. Esse artigo sintetiza importantes aspectos teóricos envolvidos no problema de coordenação ótima, propondo uma metodologia de análise do problema. Para ilustrar a metodologia, são apresentados alguns casos da literatura e a solução do problema de coordenação através de algoritmos de otimização. A otimização linear apresenta um melhor desempenho para problemas onde uma das variáveis de decisão pode ser fixada, enquanto as meta-heurísticas se destacam em casos mais abrangentes e complexos.

Keywords: Protection; Power Systems; Overcurrent Relay Coordination; Optimization; Simplex; Metaheuristics; PSO.

Palavras-chaves: Proteção; Sistemas Elétricos de Potência; Coordenação de Relés de Sobrecorrente; Otimização; Simplex; Meta-heurísticas; PSO.

1. INTRODUÇÃO

Um sistema elétrico de potência é composto por diversos equipamentos e pode ser responsável pela alimentação de inúmeras cargas, variando de pontos de iluminação pública até processos críticos em instalações industriais e hospitalares. Por isso, garantir a continuidade do fornecimento de energia é de extrema importância. Com esse propósito, atuam os sistemas de proteção que, como diz Mason (1956), devem atender requisitos básicos de confiabilidade, seletividade, velocidade e sensibilidade.

Os relés de proteção atuam através de algoritmos computacionais ou de fenômenos eletromecânicos interpretando as condições do sistema e sinalizando a necessidade da abertura de um disjuntor, de um religador ou de alguma outra ação no sistema de potência (Mamede, 2011). Contudo, a parametrização desses dispositivos deve ser feita de acordo com as características do sistema no qual eles estão inseridos, uma tarefa que demanda considerável quantidade de tempo e se apoia em cálculos, em simulações e em ensaios para garantir os requisitos básicos mencionados anteriormente. A garantia destes requisitos é fundamental para a prevenção da atuação indevida da proteção ou também da sua não operação em situações de falha de equipamentos.

No caso de sistemas de grande extensão, com um elevado número de equipamentos, como sistemas de distribuição, a parametrização dos dispositivos de proteção torna-se uma tarefa impreterível e de elevada complexidade, uma vez que esses sistemas podem sofrer alterações dependendo dos geradores, subestações, linhas e de outros equipamentos ativos no momento, como é evidenciado em Mason (1956).

De acordo com Hussain et al. (2013) e Foqha et al. (2024), desde a década de 60, uma quantidade considerável de métodos para a coordenação de relés de sobrecorrente

foi desenvolvida. Os primeiros métodos se apoiavam na tentativa e erro, que, por sua essência, possuem lenta convergência e necessitam de uma grande quantidade de iterações. As abordagens utilizando algoritmos de otimização possuem Urdaneta et al. (1988) como a primeira publicação rastreável sobre o tema.

Os estudos iniciais na área consideraram abordagens utilizando a programação linear, como Urdaneta et al. (1988), Chattopadhyay et al. (1996) e Urdaneta et al. (1997), onde um dos parâmetros é fixado e a otimização é realizada considerando apenas uma variável de decisão por relé. Posteriormente, buscando simular a natureza discreta dos diais de relés eletromecânicos e de outros dispositivos de proteção, foi empregada a programação não linear inteira mista, como pode ser visto em Zeienldin et al. (2004) e Zeineldin (2008), onde são considerados parâmetros discretos para os valores de corrente de *pick-up*. A partir de 2010, a otimização por meta-heurísticas passa ter grande relevância nas pesquisas. Moirangthem et al. (2011) e Kida (2016) utilizam algoritmos genéticos, o primeiro também considerando variáveis discretas e a aplicação em sistemas com geração distribuída, Albasri et al. (2015) faz uso de algoritmo baseado em biogeografia, já Purani and Gandhi (2016) aplica o um método que se baseia no comportamento de vaga-lumes. Biswal et al. (2020) utiliza o algoritmo busca cuco caótica (CCS) para a coordenação ótima de relés de sobrecorrente direcionais em redes de distribuição com a presença de geração distribuída, já Atsever et al. (2021) apoia-se no algoritmo de ciclo d'água (WCA) e, além disso, avalia restrições adicionais relativas a interferências causadas pelo agrupamento de cabos em redes de distribuição.

Neste artigo, é proposta uma metodologia de abordagem computacional para a resolução do problema da otimização da coordenação de relés de sobrecorrente considerando tanto a abordagem linear quanto a não linear. Essa metodologia é validada em um estudo de casos da literatura com o uso de algoritmos de otimização determinísticos (*simplex*) e probabilísticos (enxame de partículas). Este trabalho dá continuidade à pesquisa iniciada em Maia (2022), ampliando a revisão bibliográfica com algumas das contribuições presentes em Foqha et al. (2024).

2. ASPECTOS TEÓRICOS

2.1 Proteção de Sobrecorrente

Segundo Kindermann (2005), os dispositivos de proteção contra sobrecorrente atuam nos sistemas de potência comparando correntes adquiridas por Transformador de Correntes (TCs) com parâmetros pré-ajustados e atuando instantaneamente ou após um determinado intervalo de tempo. O padrão IEEE 242 (IEEE, 2001) também diz que quando a corrente do trecho do sistema supervisionado é maior do que a pré-ajustada, o relé responsável por ele deve atuar, garantindo assim que a falha existente seja isolada do resto do sistema no menor tempo possível. Esses relés podem ser instantâneos, nos quais apenas uma Corrente de Pickup ($\mathrm{I_p}$) ou corrente de ajuste é definida, ou temporizados, onde tanto a $\mathrm{I_p}$ quanto o tempo para a atuação são especificados. Os relés temporizados são classificados em tempo definido, onde o tempo não varia de acordo com a magnitude da corrente, e tempo inverso, onde quanto maior a corrente, menor o tempo de atuação.

O comportamento dos relés de tempo inverso é definido de acordo com curvas que obedecem equações dispostas em normas como a IEEE (2019) e IEC (2014), que podem ser representadas pela Equação (1).

$$t(I) = TDS\left(\frac{K}{\left(\frac{I}{I_p}\right)^{\alpha} - \beta} + L\right) \tag{1}$$

Onde:
TDS: multiplicador de tempo
I: corrente atual do sistema
I_p: corrente de pick-up
K, L, α e β: parâmetros variáveis que definem o tipo de curva.

A razão entre a corrente atual I e a $\mathrm{I_p}$ também é chamada de múltiplo do relé (M).

A coordenação de relés de sobrecorrente consiste na parametrização dos dispositivos garantindo o desligamento do menor trecho de circuito e no menor tempo possível durante uma falta. Esse procedimento é realizado pois existem possibilidades de falhas da proteção, tornando necessária a atuação da proteção do setor adjacente ao setor defeituoso. Para a coordenação, a Equação (2) deve ser atendida.

O Tempo Mínimo de Coordenação (Δt) é definido por Kindermann (2005) como o intervalo mínimo de atuação entre dois relés adjacentes e é composto pela soma do tempo de atuação do mecanismo de abertura do disjuntor a jusante, do tempo de extinção do arco do disjuntor a jusante, o tempo de sobre-percurso do relé a montante (no caso de dispositivos eletromecânicos) e do tempo de segurança (especificado pelo projetista). O valor de Δt também varia de acordo com características construtivas e tecnológicas do relé de proteção e do disjuntor operado.

$$t_{montante} - t_{jusante} \geq \Delta t \tag{2}$$

Kindermann (2005) também diz que, em proteções de tempo definido, a coordenação consiste em adotar um tempo de atuação para o dispositivo mais afastado da fonte (mais a jusante) e tempos maiores para as proteções a montante. Sendo assim, a desvantagem é o maior tempo necessário para a atuação da proteção mais a montante do circuito.

Para mitigar esse problema são utilizados relés com elementos instantâneos com I_p sendo a corrente obtida em um trecho do circuito, podendo se considerar os curtos trifásicos e bifásicos para ajuste da proteção de fase e o curto monofásico para a proteção de neutro. Kindermann (2005) exemplifica o cálculo de I_p considerando um curto trifásico a 85% da linha.

Dessa forma, é possível extinguir curtos próximos às barras em um intervalo de tempo bem reduzido sem perder a coordenação com demais dispositivos.

2.2 Método Típico de Coordenação

O processo de coordenação de relés de sobrecorrente de tempo inverso com elemento instantâneo pode ser resumido nos seguintes passos, realizados de acordo com Kindermann (2005).

Passos Iniciais Antes de realizar a coordenação dos relés temporizados, é necessário dimensionar os transformadores de corrente (TC), definir seus tapes e também realizar os ajustes dos relés instantâneos. Esses passos estão descritos em Maia (2022).

Definição da curva N. Nesta etapa, para o relé mais distante, é selecionada a curva com menor valor de tempo possível. Essa seleção é usualmente feita a partir da escolha do TDS para uma família de curva previamente selecionada para o equipamento protegido.

Cálculo do múltiplo (M_N). É calculado o múltiplo do N-ésimo relé (M_N) através da Equação (3), considerando o RTC e o tape do relé, calculados nos *Passos Iniciais.*

$$M_N = \frac{I_{CC3\phi_{k\%}}}{RTC_N \cdot tape_N} \tag{3}$$

Onde:
$I_{CC3\phi_{k\%}}$: Corrente de curto trifásico até k% da linha
RTC_N: relação de transformação do N-ésimo relé
$tape_N$: tape do N-ésimo relé

Obtenção do tempo de atuação (t_N). Após calcular o múltiplo do relé mais distante e conhecendo a sua curva, que foi escolhida previamente, é possível obter o tempo de atuação do relé através de análise gráfica ou com o uso da Equação (1).

Cálculo de M_{N-1} e t_{N-1}. Em seguida, calcula-se o múltiplo do relé a montante (M_{N-1}) com a Equação (3) e o tempo t_{N-1} com a Equação (4). Assim, é possível encontrar a curva para esse relé por análise gráfica ou aplicação da Equação (1), porém, essa curva ainda não é definitiva.

$$t_{N-1} = t_N + \Delta t \tag{4}$$

Cálculo de M'_{N-1} considerando $I_{CC3\phi}$ na barra. Deve ser verificado nessa etapa se a curva selecionada coordena com a curva do relé N em todo o intervalo de atuação, principalmente em relação a zona de proteção do relé de sobrecorrente instantâneo. Para tal, calcula-se o múltiplo M'_{N-1} considerando a corrente $I_{CC3\phi}$ total da linha na barra do relé N, a jusante.

Obtenção do t'_{N-1}. Com o valor obtido para M'_{N-1}, obtêm-se o tempo t'_{N-1} através de análise gráfica ou da Equação (1) da curva selecionada.

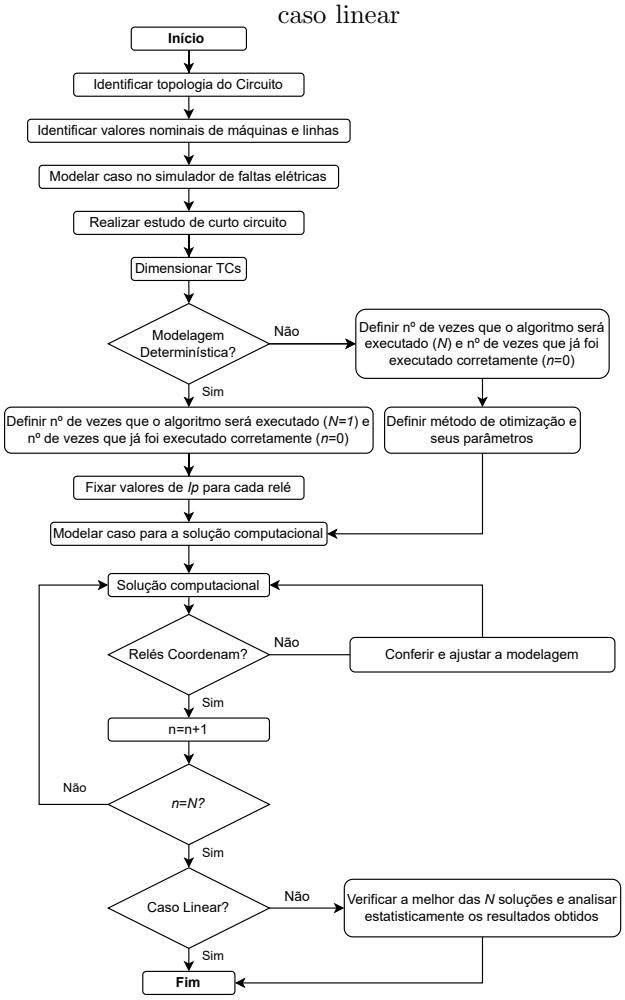
Verificação da coordenação com t'_{N-1}. Dessa forma, se $t'_{N-1} \leq \Delta t$, a curva do relé $N-1$ coordena com a curva do relé N, seguindo para o próximo passo, onde será analisado o próximo relé a montante. Caso contrário, a curva não coordena, sendo necessário refazer o passo anterior utilizando a próxima curva superior à atual.

Verificação da lista de relés. Nessa etapa é verificado se todos os relés já foram coordenados, sendo esse o critério para o fim do algoritmo. Caso contrário, é necessário retornar ao passo 5) onde o próximo relé a montante será analisado.

3. METODOLOGIA

No presente trabalho, é proposta a metodologia representada no algoritmo descrito no fluxograma da Figura (1). Este algoritmo sintetiza e sistematiza as orientações presentes em distintas fontes da literatura sob a forma de uma solução computacional generalista para o problema de otimização estudado. Aplicando o algoritmo proposto é possível obter uma lista de parâmetros ótimos de configuração dos relés envolvidos, considerando as restrições de coordenação. A descrição de cada passo é realizada nas seções seguintes e busca orientar o usuário na aplicação das técnicas e procedimentos necessários para obter a configuração ótima dos relés de sobrecorrente. A abordagem generalista adotada pode ser utilizada em diferentes topologias e técnicas de otimização.

Figura 1. Fluxograma da metodologia proposta para o caso linear



3.1 Estudos de Curto-Circuito

Após a modelagem do caso no *software* utilizado para os estudos de curto-circuito, levando em conta as informações topológicas do sistema, tensões nas barras e impedâncias nos ramos, as correntes de curto-circuito de interesse podem ser obtidas através de simulações. Na bibliografia consultada (Kindermann (2005), Urdaneta et al. (1988), de Cillo Moro (2014), Kida (2016)), por exemplo, são adotados os pontos de curto *close-in* (1%), 50% e 85% da linha de transmissão.

3.2 Identificação dos Limites de I_p TDS Intervalo de Coordenação

Em relés comerciais, os valores de I_p e TDS são limitados de acordo com as características construtivas do dispositivo. Portanto, é fundamental conhecer o equipamento que será utilizado na aplicação. A natureza do relé também impacta no intervalo de coordenação. Em dispositivos eletromecânicos, esse tempo é naturalmente maior, já que há a necessidade de um percurso físico das peças que compõem o dispositivo. Após a verificação dessas características, é possível definir os limites para as variáveis de decisão do problema e também o intervalo de coordenação que será usado.

O valor do Δt, por sua vez, depende da tecnologia tanto do relé quanto do disjuntor associado. Sendo assim, é necessário conhecer ou definir todos os dispositivos utilizados no circuito estudado para que essas informações sejam mapeadas e consideradas. Para os sistemas analisados neste trabalho, foram adotados os limites indicados nas referências bibliográficas consultadas os quais que levam os critérios citados em consideração.

3.3 Otimização

Na otimização, são utilizados os limites das variáveis de I_p, TDS e de tempo de coordenação, além dos valores de curto-circuito identificados através dos procedimentos indicados nos passos (3.2) e (3.1) tanto para a programação linear quanto para a PSO. Como resultado da otimização, é obtida uma lista de valores ótimos para as variáveis de decisão, que correspondem ao valor de TDS de cada relé no caso linear e aos valores de TDS e de I_p no caso não linear. Esses dados são a solução final do procedimento proposto e devem ser utilizados para a parametrização dos dispositivos de proteção.

Para o cálculo da constante de cada parâmetro da função objetivo, tanto para a solução por PL quanto para a solução por PSO, a Equação (1) foi utilizada. Como a Ip é pré-determinada, após atribuir valor a todas as grandezas conhecidas, apenas o TDS resta como incógnita.

Para a solução por programação linear, foi utilizada a linguagem Python e solver HiGHS (Huangfu, Q., Hall, J.A.J, 2018) implementado na biblioteca SciPy.

No algoritmo de PSO utilizado, as restrições de valores máximos e mínimos dos TDS e das I_p (sendo essas últimas avaliadas apenas no problema não linear) são facilmente ajustadas modificando o espaço de busca das variáveis. Para a limitação dos valores de tempo de atuação, não é possível realizar a restrição do espaço de busca, já que essas grandezas não são variáveis de decisão. Portanto, para esses casos, foram utilizadas penalidades, como visto na Equação (5), fazendo com que o algoritmo evite as combinações que não atendem a coordenação dos relés uma vez que o caso estudado é uma minimização.

$$P^i = \begin{cases} 1, \text{caso o par de relés não coordene} \\ 0, \text{caso o par de relés coordene} \end{cases} \tag{5}$$

Essas penalidades são acrescidas à função objetivo como visto na Equação (6).

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^{N} t^i p^i + c \sum_{i=1}^{\psi} P^i \\ \textbf{sujeito a} \quad & I^i_{p_{min}} \leq I^i_p \leq I^i_{p_{max}} \\ & t^\gamma - t^\phi \geq \Delta t \\ & TDS^i_{min} \leq TDS^i \leq TDS^i_{max} \end{aligned} \tag{6}$$

4. RESULTADOS

Este tópico apresenta os resultados obtidos para dois casos onde apenas o TDS é considerado como variável de decisão. Nesses casos, a corrente de *pick-up* dos relés foi considerada constante. Em todos os testes foram usados Python 3.10.4, SciPy 1.8.0, NumPy 1.22.3, Matplotlib 3.5.2 e PySwarms 1.3.0 e o editor de textos Atom 1.60.0.

É válido ressaltar que embora uma proposta metodológica para estudos de curto-circuito tenha sido feita neste trabalho, devido a ausência das informações de impedâncias das linhas nas referências consultadas, foram utilizados os valores previamente calculados pelos autores dos artigos que apresentaram os casos abordados.

4.1 Sistemas Teste

A avaliação dos sistemas teste teve por objetivo validar a modelagem computacional implementada. Para a validação dos resultados, nos desenvolvimentos dos sistemas apresentados foram adotadas as mesmas famílias de curvas, as mesmas correntes de *pick-up*, os mesmos limites de TDS e os mesmos Δt utilizados nas referências.

Sistema 1. A Figura (2) apresenta a topologia do circuito do Sistema 1 obtido de Purani and Gandhi (2016). Trata-se de um sistema radial com um alimentador, um transformador, quatro barramentos e três linhas. Cada linha possui um disjuntor, um TC e um relé de sobrecorrente, responsáveis pela supervisão e pela proteção do circuito. Nesta topologia, os relés a montante servem de backup para os relés a jusante. Sendo assim, a coordenação deve ser realizada para que dada uma falta no barramento C, o Relé C seja o primeiro a atuar. Caso essa proteção falhe, para que não haja a perda de seletividade, o Relé B deve atuar como backup e o Relé A deve ser o último a ser sensibilizado pela falta, atuando apenas caso os dois relés a jusante falhem.

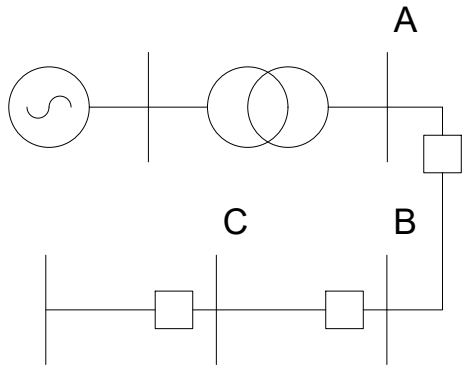


Figura 2. Rede radial com 3 relés (adaptado de Purani and Gandhi (2016))

No estudo, foi considerado um tempo de coordenação mínimo de 0,3 segundos. O tempo de operação mínimo de cada relé para a falta em sua barra foi definido como 0,2 segundos. Além disso, todos os dispositivos foram coordenados levando em consideração os parâmetros da curva inversa da IEC.

Resolução Por Programação Linear. A matriz **A** e vetores **b** e **c** apresentados a seguir foram modelados para a solução deste problema linear em Purani and Gandhi (2016). A matriz **A** apresenta em suas três primeiras linhas as constantes das relações de coordenação presentes no sistema. As demais linhas são relativas aos tempos mínimos de atuação para uma falha na zona de proteção principal de cada dispositivo. As constantes de intervalo mínimo de coordenação e tempo mínimo de atuação são armazenadas no vetor **b**. Por sua vez, o vetor **c** apresenta os coeficientes da função objetivo.

A lista **limites** informa a restrição do espaço de busca utilizada, onde cada elemento de um dos pares ordenados que a compõe representa o limite inferior e superior de uma das variáveis. Já a Tabela (1) apresenta o resultado do processo de otimização por programação linear.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & -6,3019 & 6,3019 \\ -6,3019 & 6,3019 & 0 \\ -4,9790 & 4,9790 & 0 \\ -4,2790 & 0 & 0 \\ 0 & -4,9790 & 0 \\ 0 & 0 & -6,3019 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{b} = [-0,3 \ -0,3 \ -0,3 \ -0,2 \ -0,2 \ -0,2]$$

$$\mathbf{c} = [4,2797 \ 4,9797 \ 6,3019]$$

$$\textbf{limites} = [(0,1) \ \ (0,1) \ \ (0,1)]$$

Tabela 1. Resultados do Simplex - Sistema 1

Parâmetro	Solução Ótima
TDS_1	0,140
TDS_2	0,0793
TDS_3	0,0317

Tabela 2. Parâmetros do PSO - Sistema 1

Parâmetro	Valor
Número de Partículas	200
Número de Iterações	2500
Parâmetro Cognitivo	2
Parâmetro Social	2
Coeficiente de Inércia	0,3
Peso das penalidades	10

Tabela 3. Resultados do PSO - Sistema 1

Parâmetro	Melhor Solução	Média das Soluções	Desvio Padrão das Soluções
TDS_1	0,140	0,1415	0,0049
TDS_2	0,0793	0,0795	0,0005
TDS_3	0,0317	0,0317	0,0001

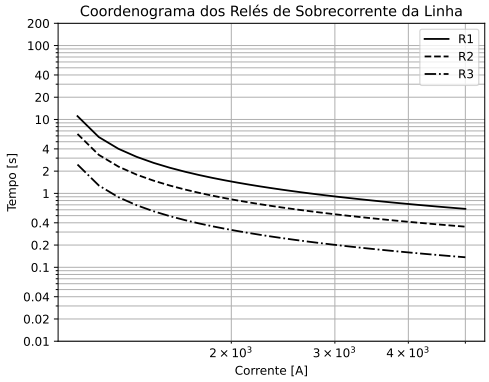


Figura 3. Coordenograma para o Sistema 1

O coordenograma da Figura (3) expõe a configuração final do sistema levando em conta os parâmetros de TDS obtidos na otimização. Na figura, é possível visualizar que o comportamento do sistema está respeitando os critérios de seletividade mencionados ($t_{R1} > t_{R2} > t_{R3}$ para qualquer corrente) e também o tempo de coordenação especificado de acordo com Purani and Gandhi (2016).

Resolução Por PSO. A Tabela (2) apresenta os parâmetros utilizados na implementação da otimização por enxame de partículas para a solução computacional do Sistema 1. Por se tratar de um método meta-heurístico, o processo iterativo foi realizado 100 vezes para a verificação das médias e dos desvios padrão dos resultados, além da verificação da melhor resposta obtida. Esses resultados estão dispostos na Tabela (3). A melhor solução ocorreu em 40% das vezes em que o algoritmo foi executado. Contudo, pelos desvios e pelas médias, é possível verificar que as demais soluções que não alcançaram o mínimo global chegaram bem perto do resultado ótimo e seriam soluções satisfatórias para a configuração dos dispositivos de proteção.

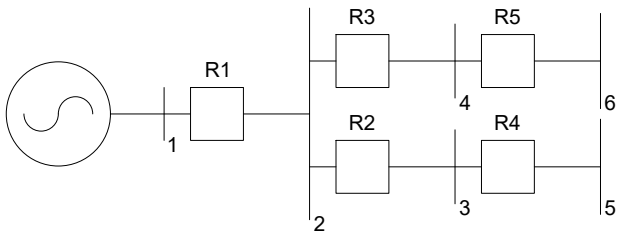


Figura 5. Rede radial com 6 barras e 5 relés (adaptado de Kida (2016))

Figura 4. Histórico do custo da melhor solução de PSO para o Sistema 1

4.2 Sistema 2

A Figura (5) apresenta a topologia do circuito do Sistema 3 obtida de Kida (2016). Trata-se de um sistema radial com dois ramos independentes e que contém seis barras, uma unidade geradora e cinco relés. Nesse caso, os relés a jusante possuem como backup os relés a montante, portanto, é necessária a coordenação entre R1, R3 e R5 e entre R1, R2 e R4 para que a seletividade do sistema não seja comprometida.

Resolução Por Programação Linear. Neste tópico estão apresentados os vetores necessários para a resolução do problema linear do Sistema 3 e também a solução obtida, disposta na Tabela (4). Para estas matrizes, foi utilizado o sistema modelado em Kida (2016).

Neste caso foi considerado um tempo de coordenação de 0,4 segundos. O tempo mínimo de atuação dos relés para uma falta em sua zona de proteção primária é de 0,05 segundos. O tempo máximo de atuação para os dispositivos foi definido como 2 segundos, já os valores de TDS devem estar entre 0,1 e 10.

$$\mathbf{A}|\mathbf{b} = \begin{bmatrix} -4,010 & 3,754 & 0 & 0 & 0 & -0,400 \\ -2,368 & 3,029 & 0 & 0 & 0 & -0,400 \\ -8,791 & 0 & 3,465 & 0 & 0 & -0,400 \\ -2,367 & 0 & 2,302 & 0 & 0 & -0,400 \\ 0 & -7,994 & 0 & 6,347 & 0 & -0,400 \\ 0 & -3,476 & 0 & 1,597 & 0 & -0,400 \\ 0 & 0 & -6,124 & 0 & 5,157 & -0,400 \\ 0 & 0 & -3,226 & 0 & 0,669 & -0,400 \\ -2,810 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,050 \\ -1,438 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,050 \\ 0 & -3,754 & 0 & 0 & 0 & -0,050 \\ 0 & -3,029 & 0 & 0 & 0 & -0,050 \\ 0 & 0 & -3,465 & 0 & 0 & -0,050 \\ 0 & 0 & -2,301 & 0 & 0 & -0,050 \\ 0 & 0 & 0 & -6,347 & 0 & -0,050 \\ 0 & 0 & 0 & -1,597 & 0 & -0,050 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -5,157 & -0,050 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0,669 & -0,050 \\ 2,810 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 1,438 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 3,754 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 3,029 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 3,465 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 2,301 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 6,347 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1,597 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5,156 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,669 & 2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{c} = [4,289\ \ 6,783\ \ 5,767\ \ 7,944\ \ 5,826]$$

$$\textbf{limites} = [(0,1\ \ 10)\ \ (0,1\ \ 10)\ \ (0,1\ \ 10)\ \ (0,1\ \ 10)\ \ (0,1\ \ 10)]$$

Tabela 4. Resultados do Simplex - Sistema 2

Parâmetro	Solução Ótima
TDS_1	0,3749
TDS_2	0,1610
TDS_3	0,1495
TDS_4	0,1
TDS_5	0,1

A Figura (6) apresenta um dos coordenogramas da solução ótima obtida, que está de acordo com a coordenação necessária para a manutenção da seletividade do sistema, ou seja, $t_{R1} > t_{R2} > t_{R4}$. Para os relés R1, R3 e R5, devido às características do sistema, o coordenograma apresenta a mesma topologia de curvas, ou seja, $t_{R1} > t_{R4} > t_{R5}$, conforme evidenciado pela Figura (7)

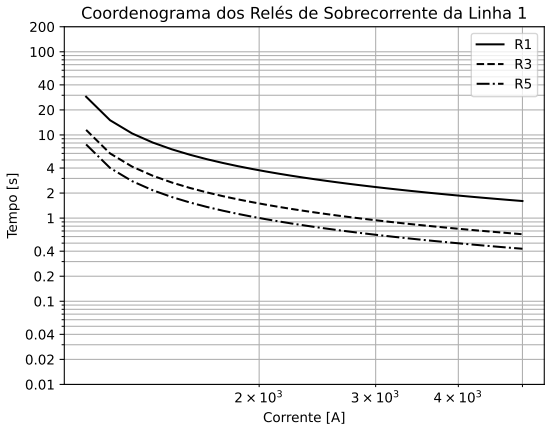


Figura 6. Coordenograma 1 para o Sistema 2

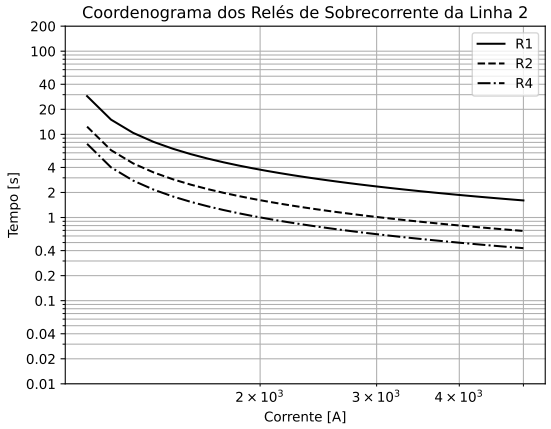


Figura 7. Coordenograma 2 para o Sistema 2

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi realizado um estudo bibliográfico com o intuito de verificar as etapas necessárias ao processo de coordenação ótima de relés de sobrecorrente levando em conta os aspectos técnicos inerentes ao problema e as particularidades de sua modelagem computacional. Esse levantamento serviu como base para a elaboração de uma metodologia que foi validada em dois casos da literatura. Essa metodologia formaliza as contribuições clássicas da literatura em um algoritmo generalista e sistematiza de forma clara e objetiva a aplicação de procedimentos de modelagem e técnicas de otimização. A abordagem pode ser utilizada como uma plataforma para novos estudos na área.

REFERÊNCIAS

Albasri, F.A., Alroomi, A.R., and Talaq, J.H. (2015). Optimal coordination of directional overcurrent relays using biogeography-based optimization algorithms. *IEEE Transactions on Power Delivery*, volume 30, 1810–1820.

Atsever, M.B., Karacasu, O., and Hocaoglu, M.H. (2021). Optimal overcurrent relay coordination in distribution networks. In *International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, volume 56, 1–6. IEEE.

Biswal, S., Sharma, N.K., and Samantaray, S.R. (2020). Optimal overcurrent relay coordination scheme for microgrid. In *National Power Systems Conference (NPSC)*, volume 21, 1–6. IEEE.

Chattopadhyay, B., Sachdev, M., and Sidhu, T. (1996). An on-line relay coordination algorithm for adaptive protection using linear programming technique. *IEEE Transactions on Power Delivery*, volume 11(1), 165–173.

de Cillo Moro, V. (2014). *Metodologia para Coordenação Otimizada entre Relés de Distância e Direcionais de Sobrecorrente em Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica*. Master's thesis, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

Foqha, T., Alsadi, S., Omari, O., and Refaat, S.S. (2024). Optimization techniques for directional overcurrent relay coordination: A comprehensive review. *IEEE Access*, 12, 1952–2006.

Huangfu, Q., Hall, J.A.J (2018). Parallelizing the dual revised simplex method 10. *Math. Prog. Comp.*, 119–142.

Hussain, M., Rahim, S., and Musirin, I. (2013). Optimal overcurrent relay coordination: A review. *Procedia Engineering*, 53, 332–336.

IEC (2014). IEC 60255-121:2014, "Measuring relays and protection equipment".

IEEE (2001). *IEEE Recommended practice for protection and coordination of industrial and commercial power systems*. Institute of Electrical and Electronics Engineers.

IEEE (2019). *IEEE Standard for Inverse-Time Characteristics Equations for Overcurrent Relays*. IEEE.

Kida, A.A. (2016). *Metodologias para a Coordenação de Relés de Sobrecorrente Utilizando Técnicas de Otimização Matemática*. Master's thesis, Universidade Estadual de Londrina, Londrina,PR.

Kindermann, G. (2005). *Proteção de sistema elétricos de potência*, volume 1. UFSC, Florianópolis.

Maia, A.M. (2022). Aplicação de métodos de otimização linear e PSO na coordenação de relés de sobrecorrente. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ.

Mamede, J.F. (2011). *Proteção de sistema elétricos de potência*. Grupo Gen - LTC, Rio de Janeiro.

Mason, C. (1956). *The Art and science of protective relaying*. Wiley, New York.

Moirangthem, J., Krishnanand, K.R., and Saranjit, N. (2011). Optimal coordination of overcurrent relay using an enhanced discrete differential evolution algorithm in a distribution system with dg. In *International Conference on Energy, Automation and Signal*, 1–6. IEEE, Bhubaneswar, India.

Purani, S.V. and Gandhi, N.S. (2016). Optimal over current relay co-ordination using firefly algorithm in electrical network: A nature inspired approach. In *2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*, 1638–1643. IEEE, Chennai, India.

Urdaneta, A., Nadira, R., and Perez Jimenez, L. (1988). Optimal coordination of directional overcurrent relays in interconnected power systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 3, 903–911.

Urdaneta, A., Perez, L., and Restrepo, H. (1997). Optimal coordination of directional overcurrent relays considering dynamic changes in the network topology. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 12, 1458–1464.

Zeienldin, H., El-Saadany, E., and Salama, M. (2004). A novel problem formulation for directional overcurrent relay coordination. In *2004 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering*, 48–52. Nova Scotia, Canada.

Zeineldin, H.H. (2008). Optimal coordination of microprocessor based directional overcurrent relays. In *2008 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, 289–294. IEEE, Ontario, Canada.