

Otimização de Ajustes de Relés de Sobrecorrente em Linhas de Subtransmissão em Anel

Tema: Sistemas de Controle, Automação e Proteção

Autores: Marcos Vinícius Santana Campos

Co-Autores: Dijalma Dantas Pinheiro Neto, George Victor Rocha Xavier

Empresa: Energisa Sergipe - Distribuidora de Energisa SA

Resumo

O uso de um estudo de otimização de ajustes é extremamente importante no processo de parametrização de relés de sobrecorrente, servindo como uma ferramenta de apoio para a tomada de decisão do engenheiro de proteção responsável pela elaboração do estudo de coordenação de proteção, tornando o estudo preciso e rápido. Este artigo apresenta a aplicação de um algoritmo para a otimização da coordenação de relés de sobrecorrente direcional instalados em linhas de subtransmissão em sistemas malhados. Para isso, foi desenvolvida uma ferramenta computacional na plataforma *Scilab* utilizando o algoritmo PSO - *Particle Swarm Optimization*. A ferramenta desenvolvida também busca simplificar a entrada de dados necessários para o algoritmo de otimização, como capacidade de corrente e impedância de sequência positiva dos cabos. As principais funcionalidades da aplicação proposta neste trabalho são: (i) Cálculo automático das condições de curto-circuito (em barramentos e próximos das linhas), (ii) determinação das restrições a serem atendidas, (iii) otimização das curvas IEC C1 NI. A técnica de otimização proposta trouxe resultados promissores, cujos tempos de eliminação de faltas foram satisfatórios e atenderam todas as restrições impostas pelo sistema analisado para todos os casos de faltas avaliados.

1. Introdução

Para garantir o funcionamento ininterrupto do Sistema Elétrico de Potência (SEP), um dos pontos cruciais é garantir a eficácia do sistema de proteção. Esse sistema inclui os equipamentos responsáveis por detectar e eliminar falhas que ocorrem nos componentes protegidos, além de fornecer proteção adicional para componentes adjacentes (ONS, 2023). Portanto, os dispositivos de proteção devem ser sensíveis para detectar os diversos tipos de falhas possíveis no SEP, e devem ser instalados em locais que permitam reduzir a área afetada com uma ação rápida.

Assim, um sistema de proteção confiável deve operar de maneira organizada e aderir à hierarquia estabelecida entre seus elementos, a fim de garantir uma resposta rápida para restaurar o sistema às suas condições normais de operação (Bernardes, Santos, Asada & Ramos, pp. 1-6). Um dos principais componentes desse sistema é o relé de proteção, cuja função é identificar linhas ou equipamentos com falhas, bem como outras condições anormais nos sistemas de energia, sendo capaz de iniciar uma ação de controle apropriada (IEEE C37.100, 1992). No entanto, parametrizar a operação dos relés em um sistema de proteção não é

uma tarefa trivial, especialmente à medida que o número desses dispositivos e a complexidade do sistema aumentam.

Quando um sistema elétrico é grande e não radial, um simples relé de sobrecorrente é insuficiente para fornecer proteção adequada. Isso se deve à maior complexidade na coordenação entre os elementos desse tipo de sistema, uma vez que, durante a ocorrência de uma falha, podem ocorrer reversões na direção da corrente e diferentes níveis de contribuição vindos de cada terminal do sistema. Esse comportamento justifica o uso de proteção direcional de sobrecorrente. No entanto, definir as configurações necessárias para os relés envolvidos nesse tipo de sistema continua sendo uma tarefa desafiadora. Para ajustar a proteção direcional, é necessário ajustar o múltiplo de tempo, a corrente de pick-up e o tipo de curva do relé (Souza, Silva & Calixto, 2018).

Assim, um dos maiores desafios enfrentados pelos especialistas em proteção é encontrar as configurações ideais dos relés para atender aos requisitos fundamentais da filosofia de proteção, a saber, confiabilidade, sensibilidade, velocidade e seletividade (Pereira, 2021). Isso representa um problema típico de otimização, e sua complexidade aumenta à medida que o sistema elétrico analisado se expande em tamanho, número de equipamentos e dispositivos de proteção (Bottura, Oleskovicz, Coury & Souza, 2014).

Atualmente, a pesquisa sobre otimização dos ajustes de proteção para sistemas elétricos de potência (SEP) tem ganhado grande interesse devido à crescente complexidade desses sistemas. Entre as abordagens exploradas, destaca-se o uso de métodos de otimização baseados em metaheurísticas para coordenar os tempos de operação dos relés de sobrecorrente, como visto em (Bangar & Kalage, 2017), (Korashy, Kamel, Youssef & Jurado, 2018) e (Alaee & Amraee, 2021). A maioria desses estudos visa principalmente minimizar os tempos totais de operação dos relés, mantendo um intervalo de tempo especificado entre a proteção primária e a de *backup* (Pereira, 2021).

Em (Bangar & Kalage, 2017), a otimização dos parâmetros de relé de sobrecorrente direcional (*pick-up*, ajuste de tempo e tipo de curva) foi realizada utilizando o algoritmo JAYA, considerando-o como backup tanto para um relé de distância quanto para um relé de sobrecorrente, limitando o foco a esse arranjo. Em (Korashy, Kamel, Youssef & Jurado, 2018), os autores empregaram a técnica de *Grey Wolf Optimization* (GWO) para encontrar as configurações ideais para relés de sobrecorrente direcionais, visando minimizar o tempo total de operação de todos os relés primários, mantendo a margem de coordenação entre os pares de relés. Em (Alaee & Amraee, 2021), os autores estudaram a configuração ideal de relés de sobrecorrente direcionais para detectar e eliminar falhas no menor tempo possível dentro de uma rede com geração distribuída, utilizando o *Imperialist Competition Algorithm* (ICA).

Nesse contexto, este trabalho propõe o desenvolvimento de um algoritmo que oferece uma solução otimizada (utilizando o PSO) para a parametrização de relés de sobrecorrente direcionais temporizados. Para alcançar esse objetivo, foram empregadas técnicas para avaliar os parâmetros de configuração das curvas de relé de sobrecorrente, visando minimizar os tempos de operação enquanto garante a coordenação entre os relés em todos os cenários avaliados. Assim, os resultados do processo de otimização foram avaliados para condições de eliminação completa de curto-circuito, bem como para condições de contingência do sistema em estudo, uma vez que, após a abertura de um terminal, ocorrem alterações na impedância equivalente do sistema, o que pode alterar substancialmente as contribuições das correntes das linhas.

2. Desenvolvimento

2.1. Particle Swarm Optimization

O algoritmo de otimização adotado neste trabalho foi o PSO (Kennedy & Eberhart, 1995), que é baseado na modelagem matemática do comportamento de um bando de aves em voo. Inicialmente, o bando se comporta de forma aleatória, mas em um curto período de tempo, as aves começam a voar de maneira ordenada. Além disso, quando uma ave encontra um local com comida, todas as aves do bando se dirigem para a mesma região. Com base nisso, os autores propuseram um algoritmo de busca simples e robusto, onde cada ave é considerada um ponto, ou partícula, e o local da comida — ou seja, o lugar onde o bando pousa — representa o ponto de busca ótimo.

O principal fator que impulsiona a evolução dos indivíduos é sua velocidade de movimento (voo, no caso das aves), representada por um vetor dentro do espaço de busca. A cada intervalo de tempo, essa velocidade altera a posição da partícula, que é calculada com base na sua posição e velocidade anteriores, atualizando assim sua evolução (Fagundes, 2020).

O PSO pode ser descrito pelas seguintes equações:

$$v_i^{(k+1)} = \omega \cdot v_i^{(k)} + r_1 C_1 (Pbest_i^{(k)} - x_i^{(k)}) + r_2 C_2 (Gbest^{(k)} - x_i^{(k)}) \quad (1)$$

$$x_i^{(k+1)} = x_i^{(k)} + v_i^{(k+1)} \quad (2)$$

onde k é o índice da iteração atual; ω é o coeficiente de inércia; C_1 e C_2 são constantes, parâmetros cognitivo e social, respectivamente; r_1 e r_2 são valores aleatórios (com distribuição uniforme) entre 0 e 1; $Pbest_i$ é o melhor vetor que a partícula i já encontrou; $Gbest$ é o melhor vetor de todas as partículas analisadas, definindo a melhor solução já encontrada até a iteração atual; i é o índice da partícula, que varia de 1 a N , onde N é o número de partículas (tamanho do bando); x_i^k é o vetor atual da partícula i ; e v_i^k é a velocidade da partícula i .

2.2. Procedimentos Computacionais
2.2.1. Processamento de Dados
 Este trabalho foi totalmente desenvolvido com a ajuda do software *Scilab*. Como uma limitação, o algoritmo foi desenvolvido para otimizar falhas trifásicas (3F) que serviram como base para analisar os ajustes otimizados. No entanto, a metodologia pode ser facilmente estendida para estudos de outras falhas simétricas ou assimétricas. Assim, o tratamento matricial para o cálculo de falhas 3F utilizou os dados de impedância de sequência positiva (Z_1) do equivalente de Thévenin conectado ao barramento de balanço do sistema, assim como as Linhas de Transmissão (LTs) conectadas ao sistema analisado.

O sistema modelo utilizado no desenvolvimento do algoritmo de otimização possui três barramentos operacionais, um barramento de balanço e seis LTs (duas em paralelo). A distribuição dos barramentos e linhas foi definida de forma a fornecer ao algoritmo a capacidade de determinar as contribuições das falhas em várias situações.

Inicialmente, para organizar os dados relacionados ao sistema modelo, foi realizada uma ordenação ascendente das barras remotas (barras do tipo *para*) utilizando o algoritmo *bubble sort* (Win, 2020). Os dados ordenados do sistema são apresentados na Tabela I.

Tabela I - Dados do Sistema modelo.

De	Para	$Z_1(\text{pu})$	I_{cabo}
0	1	$0,00 + j0,001i$	0
1	2	$0,10 + j0,10i$	400
2	3	$0,20 + j0,50i$	400
2	3	$0,20 + j0,40i$	400
1	3	$0,08 + j0,20i$	400
3	4	$0,30 + j0,60i$	400
1	4	$0,20 + j0,30i$	400

$$V_{base} = 69 \text{ kV}; S_{base} = 100 \text{ MVA}$$

A partir dos dados apresentados na Tabela I, foi possível obter a matriz de impedância (Z_{bus}) do sistema. Os elementos da diagonal principal da matriz foram usados para calcular o curto-circuito trifásico (3 ϕ) em um barramento específico k de acordo com a seguinte equação (3):

$$I_k^{(f)} = V_k^{(0)} Z_{kk} \quad (3)$$

onde $(I_k)^f$ é a corrente de curto-circuito trifásica (3 ϕ) no barramento k ; $(V_k)^0$ é a tensão pré-falta no barramento k ; e Z_{kk} é o elemento da diagonal principal da matriz Z_{bus} correspondente ao barramento k . Ainda utilizando a matriz Z_{bus} , os cálculos das correntes circulantes nas linhas após a falha foram realizados de acordo com a equação (4) (Stevenson, 1982):

$$\hat{i}_{pq} = (Z_{qk} - Z_{pk} Z_{kk}) (1.0 Z_{pq}) \quad (4)$$

onde i_{pq} é a corrente circulante na linha entre os barramentos p e q , enquanto $Z_{\{pq\}}$ é a impedância característica da linha.

Após calcular as correntes de curto-circuito nos barramentos e suas contribuições através das linhas de transmissão, os números de cada relé nas linhas de transmissão foram determinados. Esse procedimento foi realizado automaticamente, analisando o número de linhas saindo de cada barramento no sistema e adicionando um relé em cada extremidade da linha, atribuindo números aos elementos da rede em estudo. O sistema modelo utilizado e a numeração dos relés estão apresentados na Figura 1.

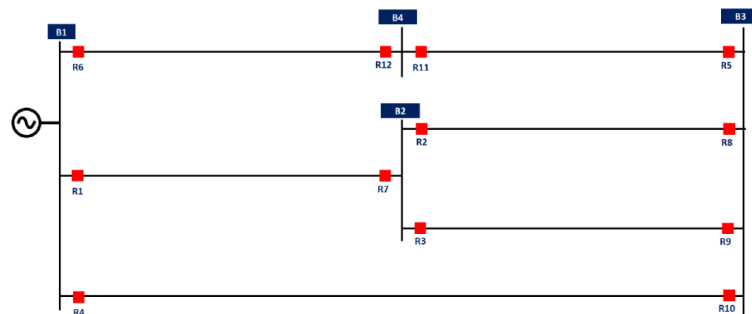


Figura 1 - Sistema malhado com 4 barras/6 linhas/12 relés.

A numeração dos relés foi definida de acordo com a Tabela II.

Tabela II - Numeração dos Relés.

De	Para	Circuito	Relé da Barra (De)	Relé da Barra (Para)
1	2	1	R1	R7
2	3	1	R2	R8
2	3	2	R3	R9
1	3	1	R4	R10
3	4	1	R5	R11
1	4	1	R6	R12

A seguir, a matriz de incidência $M1$ foi construída, na qual cada linha identifica um barramento b do sistema que possui um certo número de barramentos adjacentes b_{adj} diretamente interconectados por uma linha de transmissão. Os relés associados ao barramento b , bem como aos barramentos adjacentes b_{adj} , são identificados e recebem o valor 1 se suas unidades direcionais estiverem ajustadas na direção de b para b_{adj} , e -1 se a direção for de b_{adj} para b . Como as colunas da matriz $M1$ representam cada relé no sistema, aquelas que não são identificadas para o barramento b , nem para seus respectivos barramentos adjacentes b_{adj} , recebem valor nulo. Dessa forma, todos os elementos da matriz foram determinados, estendendo o procedimento mencionado para todos os m barramentos do sistema de energia, resultando na matriz $[M1]$.

$$M_1 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Após a construção da matriz de incidência, foi executada uma rotina que determinou todos os pares de relés (principal e reserva) do sistema analisado, de acordo com a numeração apresentada na Figura 1. Os pares de relés estão apresentados na Tabela III.

Tabela III - Numeração dos Relés.

Back-up	1	9	1	8	2	3	4	8	9	3	4	11	2	4	11	2	3	11	6	5
Principal	2	2	3	3	5	5	5	7	7	8	8	8	9	9	9	10	10	10	11	11

2.2.2. Otimização Como apresentado anteriormente, a coordenação dos relés direcionais de sobrecorrente tem como objetivo calcular os ajustes ótimos para garantir que a proteção primária atue para eliminar falhas na zona protegida no menor tempo possível. Isso deve ser feito levando em conta todas as restrições impostas para garantir uma coordenação adequada entre todos os pares de relés. O tempo de operação é expresso por uma função objetivo, e o objetivo é minimizá-lo.

O modelo de Função Objetivo (FO) amplamente adotado na literatura é a soma total do tempo de operação individual dos relés de proteção principal, de acordo com a seguinte equação (5):

$$z = \min \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m T_{i,z}^j, \quad (5)$$

onde m é o número total de relés que protegem uma determinada seção ou equipamento; n é o número de falhas consideradas dentro da zona de proteção principal; $(T_{i,z})^j$ é o tempo de operação do relé principal R_i para uma falha na zona de proteção z ; e j é o índice atribuído ao nível de falha considerado.

O tempo de operação individual de um relé para uma determinada falha é calculado a partir da função *fitness* (6):

$$T = DTS \cdot \eta \quad (6)$$

onde DTS indica o *Dial Time Setting* do relé R_i , e η é obtido pela equação (7) a seguir:

$$\eta = \left(\frac{A}{\left(\frac{I_{cc}}{I_p} \right)^\alpha - 1} + B \right). \quad (7)$$

Na equação (7), A , B e α são constantes específicas para o tipo de curva escolhida para o relé considerado. O presente trabalho utilizou a curva IEC C1 NI (*Normal Inverse*), onde $A = 0,14$; $B = 0$; $\alpha = 0,02$ e $DTS \in [0,05, 1]$. Além disso, a resposta da equação (7) depende da relação I_{cc}/I_p , que relaciona o valor da corrente de falha vista pelo relé R_i e seu ajuste de corrente de disparo I_p .

Portanto, a FO pode ser reescrita da seguinte forma, conforme equação (8):

$$z = \min \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m DTS_i \cdot \min(\eta_i), \quad (8)$$

onde $\min(\cdot)$ é o menor fator encontrado para o relé R_i , calculado para o maior curto-circuito que passa pelo relé R_i . A função objetivo apresentada está sujeita a dois tipos de restrições: os critérios de coordenação e seletividade, e os limites nos intervalos de ajuste.

Neste trabalho, falhas em barramentos e LT (do tipo "*close-in*") foram simuladas. Assim, os pares de relés que devem ser envolvidos no evento analisado foram considerados no conjunto de restrições. É imperativo que todas as restrições de coordenação sejam atendidas para o correto funcionamento dos relés. Caso contrário, a seletividade do sistema pode ser perdida, resultando na ativação desnecessária dos dispositivos de retaguarda.

Para que os critérios de coordenação sejam atendidos, é necessário um atraso intencional mínimo entre as proteções sucessivas da cadeia de dispositivos. Esse intervalo de tempo é definido como o Intervalo de Tempo de Coordenação (CTI), normalmente entre 0,2 e 0,5 s, e está diretamente relacionado ao tempo de operação do disjuntor, à tolerância do fabricante e ao tempo de segurança do projeto (Pereira, 2021). O CTI pode ser definido pela diferença entre os tempos de operação das proteções de reserva e principal. A função objetivo deve ser minimizada apenas se não houver mais restrições a serem atendidas. Até que todas as restrições da função objetivo sejam atendidas, a função objetivo sofrerá degradação, onde o algoritmo atribuirá uma penalização à função objetivo. Essa penalização deve ser proporcional à violação das restrições verificadas. A soma dessas penalizações é incorporada ao valor da função objetivo. Quando não houver mais restrições violadas, a função objetivo não será penalizada. Com base no exposto, o problema de otimização abordado neste trabalho tem a seguinte forma (9):

$$\min f(x) \quad \text{sujeito a} \quad g_j(x) \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (9)$$

onde, x é o vetor da partícula da variável a ser otimizada, neste caso, o múltiplo do tempo dos relés; $f(x)$ é a função objetivo a ser minimizada (neste caso, a soma do tempo de operação de todos os relés em suas respectivas zonas de proteção); $g(x)$ é a restrição de desigualdade do problema.

Aplicando o método de penalização ao problema de minimização proposto, uma nova função objetivo $h(x)$ é definida, dada por (10):

$$h(x) = f(x) + P(x), \quad (10)$$

onde $P(x)$ é uma função de penalização das restrições. A função de penalização será positiva quando qualquer restrição for violada e zero quando todas as restrições forem atendidas. Uma restrição $g_j(x)$ é satisfeita quando é negativa ou igual a zero. Neste trabalho, a função de penalização para restrições de desigualdade é dada pela Equação (11).

$$P(x) = \sum_{j=1}^n \text{abs}(\min[0, t_r - (t_p + CTI)]), \quad (11)$$

onde n é o número de restrições de desigualdade no modelo matemático e j representa o índice da restrição; t_r é o tempo do relé de reserva e t_p é o tempo do relé principal. Algumas suposições foram adotadas para os testes preliminares do algoritmo, nas quais três variáveis de controle foram combinadas para produzir cenários de simulação. As variáveis foram: velocidade da partícula v , número de iterações n e número de partículas no enxame p . Os valores e/ou intervalos ajustados em cada uma das variáveis de controle são detalhados nas equações (12) a (14).

$$V_{\max} = v \cdot 0.5 \cdot (x_{\max} - x_{\min}), \quad v \in [1, 4], \quad v \in N, \quad (12)$$

em que V_{\min} e V_{\max} ; x_{\max} e x_{\min} são, respectivamente, os maiores e menores DTS para ajuste na curva de proteção do relé.

$$N_{iter} = n \cdot 50, \quad n \in [1, 5], \quad n \in N, \quad (13)$$

$$P = p \cdot 10, \quad p \in [1, 5], \quad p \in N. \quad (14)$$

Assim, o número total de simulações pode ser calculado pela equação (15):

$$Total_{simul} = \max(v) \cdot \max(n) \cdot \max(p). \quad (15)$$

Está apresentado na Figura 2 o fluxograma da metodologia utilizada no trabalho.

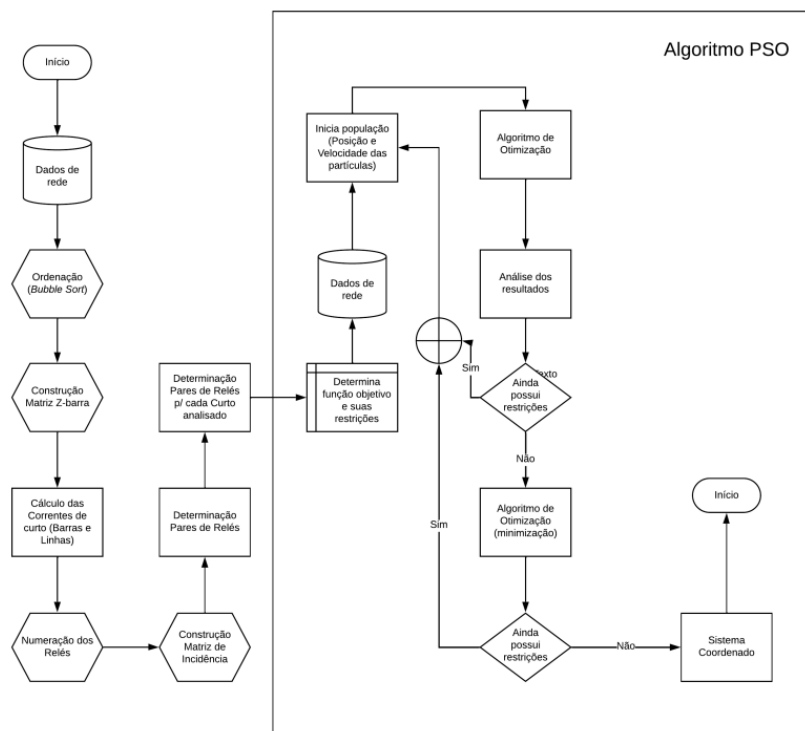


Figura 2 - Fluxograma da metodologia utilizada.

2.3. Resultados e Discussão

O algoritmo desenvolvido encontrou um conjunto de 26 restrições a serem atendidas para os casos de falhas nos barramentos e LTs da rede simulada. Os resultados encontrados para as restrições dadas estão apresentados na Tabela IV:

Tabela IV - Restrições do sistema modelo.

R	Tipo	Local	R_b	R_p	$I_{cc}(R_b)$	$I_{cc}(R_p)$	$\eta(R_b)$	$\eta(R_p)$
01	Barra	2	4	8	1,68	0,88	4,805	8,772
02	Barra	2	4	9	1,68	1,15	4,805	6,542
03	Barra	3	6	11	0,81	0,81	9,805	9,805
04	Barra	3	1	2	2,29	0,99	3,942	7,608
05	Barra	3	1	3	2,29	1,30	3,942	5,869
06	Barra	4	4	5	0,65	1,03	14,189	7,274
07	Linha	2	1	2	5,91	6,95	2,529	2,382
08	Linha	2	9	2	1,15	6,95	6,542	2,382
09	Linha	3	1	3	5,91	6,75	2,529	2,408
10	Linha	3	8	3	0,88	6,75	8,772	2,408
11	Linha	5	2	5	0,99	6,16	7,608	2,490
12	Linha	5	3	5	1,30	6,16	5,869	2,490
13	Linha	5	4	5	3,88	6,16	3,010	2,490
14	Linha	7	8	7	0,88	2,03	8,772	4,238
15	Linha	7	9	7	1,15	2,03	6,542	4,238
16	Linha	8	3	8	1,30	5,99	5,869	2,517
17	Linha	8	4	8	3,88	5,99	3,010	2,517
18	Linha	8	11	8	0,81	5,99	9,805	2,517
19	Linha	9	2	9	0,99	5,67	7,608	2,570
20	Linha	9	4	9	3,88	5,67	3,010	2,570
21	Linha	9	11	9	0,81	5,67	9,805	2,570
22	Linha	10	2	10	0,99	3,10	7,608	3,347
23	Linha	10	3	10	1,30	3,10	5,869	3,347
24	Linha	10	11	10	0,81	3,10	9,805	3,347
25	Linha	11	6	11	2,32	2,32	3,912	3,912
26	Linha	12	5	12	1,03	1,03	7,274	7,274

onde R indica o número da restrição analisada; tipo indica se a falha ocorre em uma barra ou em uma linha; local refere-se ao número do barramento ou do relé onde a falha ocorreu; R_b é o número do relé de reserva; R_p é o número do relé principal; $I_{cc}(R_b)$ é a corrente (kA) no relé de reserva; $I_{cc}(R_p)$ é a corrente (kA) no relé principal; (R_b) indica o valor de para o relé de reserva; (R_p) indica o valor de para o relé principal. Os valores de pick-up de todos os relés foram ajustados para 400 A, de acordo com a capacidade dos cabos do sistema.

Subsequentemente, enquanto o algoritmo era executado na rede modelo, foram realizados testes em 20 casos em busca de uma solução ótima. Entre os casos analisados, a população do enxame de partículas e o grau de liberdade da velocidade das partículas foram variáveis. Os resultados estão apresentados na Tabela V.

Tabela V - Casos analisados.

Caso	Part.	M.I.	Velocidade	Restr.	It. Real	R.N.S	F.O.
01	10	50	1	26	08	03	4,408 s
02	10	50	2	26	04	20	2,355 s
03	10	50	3	26	10	08	4,105 s
04	10	50	4	26	07	15	3,207 s
05	20	50	1	26	06	07	4,084 s
06	20	50	2	26	09	07	4,153 s
07	20	50	3	26	13	02	4,498 s
08	20	50	4	26	06	13	3,527 s
09	30	50	1	26	15	00	4,595 s
10	30	50	2	26	10	03	4,408 s
11	30	50	3	26	08	06	4,089 s
12	30	50	4	26	05	12	3,332 s
13	40	50	1	26	10	03	4,412 s
14	40	50	2	26	06	19	2,349 s
15	40	50	3	26	08	08	3,590 s
16	40	50	4	26	03	19	2,673 s
17	50	50	1	26	06	08	3,994 s
18	50	50	2	26	07	03	4,380 s
19	50	50	3	26	04	21	2,162 s
20	50	50	4	26	05	17	2,311 s

onde Part. é o número de partículas no enxame; M.I. é o número máximo de iterações; Velocidade é o grau de liberdade da partícula, conforme derivado da equação (12); Restr. são o total de restrições da rede analisada; It. Real é o número de iterações realizadas; R.N.S. é o número de restrições não resolvidas; F.O. é a soma do tempo da função objetivo.

De um total de 20 casos simulados, em 1 caso o algoritmo encontrou uma solução ótima. A melhor solução encontrada foi no caso 9, com 30 partículas no enxame, 50 iterações e velocidade 1. Das 26 restrições analisadas, após 15 iterações, 0 restrições não foram resolvidas. A soma do tempo da função objetivo foi de 4,595 s. Os resultados do algoritmo de otimização podem ser vistos na Tabela VI, que contém os valores de DTS dos relés da rede modelo.

Tabela VI - Resultados de DTS para cada relé.

Relé	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12
TDS	0,30	0,10	0,13	0,25	0,10	0,20	0,05	0,09	0,11	0,05	0,07	0,05

Com os resultados obtidos na otimização, foram testados os valores de DTS obtidos para os relés do sistema. Posteriormente, foi avaliado se eles atenderam a todas as restrições impostas, conforme mostrado na Tabela VII.

Tabela VII - Tempos de operação para as restrições.

Restr,	$t(R_b)$	$t(R_p)$	Δ_t	Restr,	$t(R_b)$	$t(R_p)$	Δ_t
01	1,197	0,750	0,447	14	0,750	0,212	0,538
02	1,197	0,750	0,447	15	0,750	0,212	0,538
03	1,880	0,733	1,147	16	0,750	0,215	0,535
04	1,169	0,750	0,419	17	0,750	0,215	0,535
05	1,169	0,750	0,419	18	0,733	0,215	0,518
06	3,535	0,750	2,785	19	0,750	0,295	0,455
07	0,750	0,235	0,515	20	0,750	0,295	0,455
08	0,750	0,235	0,515	21	0,733	0,295	0,439
09	0,750	0,308	0,442	22	0,750	0,167	0,583
10	0,750	0,308	0,442	23	0,750	0,167	0,583
11	0,750	0,257	0,493	24	0,733	0,167	0,566
12	0,750	0,257	0,493	25	0,750	0,293	0,457
13	0,750	0,257	0,493	26	0,750	0,364	0,386

Onde $t(R_b)$ indica o tempo de operação para o relé de reserva, em segundos; $t(R_p)$, indica o tempo de operação para o relé principal, em segundos; t , indica a diferença no tempo de operação entre o relé de reserva e o relé principal, em segundos. Para verificar a eficiência dos resultados obtidos na otimização, o algoritmo testa todas as falhas principais (nos barramentos e de curto-circuito nas linhas de transmissão), observando a sequência de desarme dos relés até que as falhas sejam completamente eliminadas. Portanto, após abrir um terminal, o algoritmo reconstrói a matriz Z_{Bus} com base na nova configuração e recalcula as correntes de falha e suas contribuições nas linhas de transmissão, verificando a coordenação dos relés restantes no sistema. Esse processo é repetido quantas vezes for necessário até que a falha seja totalmente resolvida. Para eliminar completamente as falhas próximas (close-in) nas Lts, espera-se a abertura de dois terminais, precisamente os terminais que conectam as LTs aos barramentos do sistema. Para a eliminação total de falhas no barramento, espera-se a abertura de n terminais, onde n é o número de LTs conectadas ao barramento com curto-circuito. Para o sistema modelo, obtivemos resultados satisfatórios em todas as verificações realizadas para eliminação total da falha. As figuras 2 e 3 ilustram a sequência de abertura dos terminais para uma falha de curto-circuito no disjuntor 08, onde será necessário um total de duas aberturas. Os relés R02 e R08 são os terminais principais para a eliminação da falha, e os relés nos terminais R01 e R11 são os relés de reserva, respectivamente.

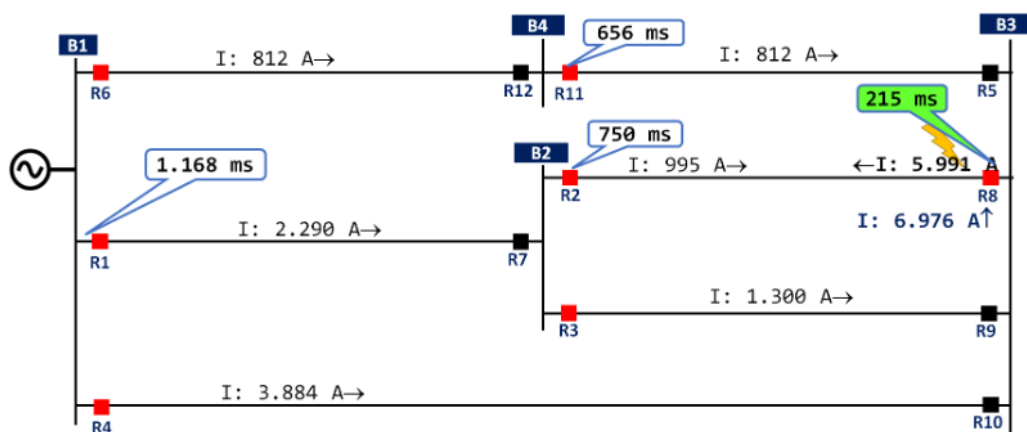


Figura 2 - Tempo de atuação dos relés (1ª abertura).

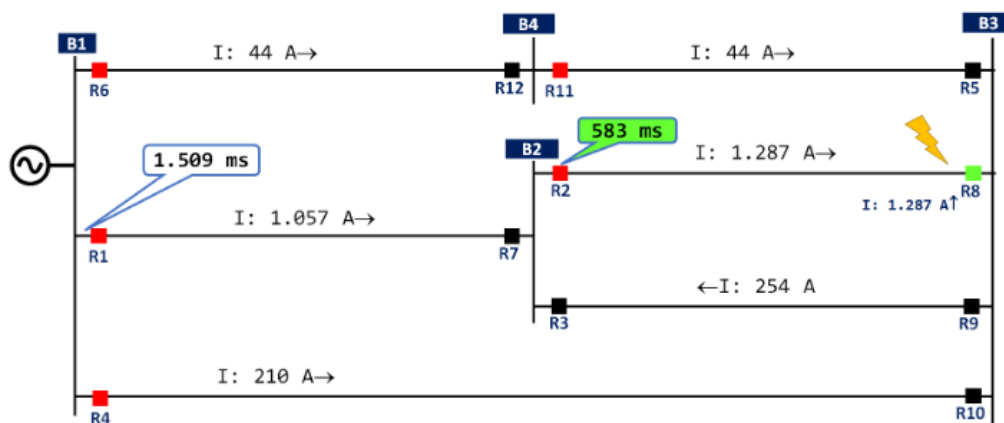


Figura 3 - Tempo de atuação dos relés (2ª abertura).

Na Figura 3, é possível observar que, após a abertura do terminal do relé R08, as contribuições das correntes da linha e os tempos de abertura dos relés são recalculados com a nova configuração da rede, e a coordenação entre os relés permanece atendida, conforme proposto pelo algoritmo.

3. Conclusão

Neste trabalho, foi apresentado um estudo sobre a otimização dos ajustes dos relés de sobrecorrente direcionais instalados em LTs em sistemas malhados. Para esse propósito, o algoritmo PSO foi utilizado para minimizar a soma dos tempos de operação dos relés do sistema, com base na escolha ótima do DTS (considerando a curva IEC C1 NI). Os resultados do processo de otimização demonstraram tempos de coordenação adequados entre as proteções primária e de reserva para todas as falhas simuladas. Os ajustes foram testados considerando a condição inicial do sistema no momento da falha e a condição adquirida através da operação dos dispositivos de proteção, corroborando a robustez do ajuste realizado em resposta à dinâmica do sistema. Para trabalhos futuros, espera-se aplicar o algoritmo a outros tipos de curvas características de relés, tanto das normas IEEE quanto da IEC.

4. Referências bibliográficas

- ONS, “Sistema de proteção,” 2023. [Online]. Available: <https://www.ons.org.br/paginas/conhecimen-to/glossario>
- W. Bernardes, F. Santos, E. Asada, and M. Ramos, “Application of discrete pso and evolutionary pso to the coordination of directional overcurrent relays,” in Proceedings of the IEEE XVII International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, pp. 1–6.
- S. C. of the IEEE Power Engineering Society, “Ieee standard definitions for power switchgear,” Revision C37.100-1981, EUA, March 1992.
- L. A. P. Souza, C. L. B. Silva, and W. P. Calixto, “Optimized coordination of directional overcurrent relays using genetic algorithm,” in 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / ICPS Europe), 2018, pp. 1–6.
- R. L. de Araújo Pereira, “Proposição de algoritmos baseados em evolução diferencial e programação linear para coordenação Ótima de relés de sobrecorrente,” Dissertação de Mestrado, Universidade de Federal de Campina Grande, 2021.
- F. B. Bottura, M. Oleskovicz, D. V. Coury, S. A. de Souza, and M. J. Ramos, “Hybrid optimization algorithm for directional overcurrent relay coordination,” in 2014 IEEE PES General Meeting | Conference Exposition, 2014, pp. 1–5.
- P. A. Bangar and A. A. Kalage, “Optimum coordination of overcurrent and distance relays using jaya optimization algorithm,” in 2017 International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE), 2017, pp. 1–5.
- A. Korashy, S. Kamel, A.-R. Youssef, and F. Jurado, “Solving optimal coordination of direction overcurrent relays problem using grey wolf optimization (gwo) algorithm,” in 2018 Twentieth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), 2018, pp. 621–625.
- P. Alaei and T. Amraee, “Optimal coordination of directional overcurrent relays in meshed active distribution network using imperialistic competition algorithm,” Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, vol. 9, no. 2, pp. 416–422, 2021.
- J. Kennedy and R. Eberhart, “Particle swarm optimization,” in Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks, vol. 4, 1995, pp. 1942–1948 vol.4.
- A. R. Fagundes, “Coordenação de relés de sobrecorrente em sistemas elétricos de potência utilizando metaheurísticas bioinspiradas: uma abordagem considerando o algoritmo de busca dos cucos via voos de lévy,” Dissertação de Mestrado, Universidade de Federal do Pampa, 2020.
- W. Min, “Analysis on bubble sort algorithm optimization,” in 2010 International Forum on Information Technology and Applications, vol. 1, 2010, pp. 208–211.
- W. Stevenson, Elements of Power System Analysis, ser. McGraw-Hill electrical and electronic engineering series. McGraw-Hill, 1982. [Online]. Available: <https://books.google.com.br/books?id=iiA9PgAACAAJ>