

Um algoritmo baseado em evolução diferencial para coordenação ótima de relés de sobrecorrente

Ramayana Leonarda de Araujo Pereira *
 Jamile Pinheiro Nascimento * Núbia Silva Dantas Brito *
 Helon David de Macêdo Braz **

* Universidade Federal de Campina Grande, PB (e-mail: {ramayana.pereira,jamile.nascimento,nubia}@ee.ufcg.edu.br).
 ** Universidade Federal da Paraíba (e-mail: helon@cear.ufpb.br)

Abstract: The use of an Evolutionary Differential Algorithm to obtain the best adjustments of direct overcurrent reports is adopted. The problem was formulated considering Textit Time Dial Setting as a decision variable, while the type of curve and the sensitization current were considered pre-defined, characterizing a linear problem. To evaluate the performance of the algorithm, two radial systems and one grid were considered. The results analyzed by the algorithm were compared with other methods consolidated in the literature, and showed that the analyzed method showed results identical to the best adjustments reported in the literature.

Resumo: O uso de um Algoritmo Diferencial Evolutivo para obter os melhores ajustes dos relés de sobrecorrente direcional é proposto. O problema foi formulado considerando o *Time Dial Setting* como variável de decisão, enquanto que o tipo de curva e a corrente de sensibilização foram considerados pré-definidos, caracterizando assim um problema linear. Para avaliar a eficácia do algoritmo dois sistemas radiais e um malhado foram considerados. Os resultados obtidos pelo algoritmo foram comparados com outros métodos consolidados na literatura, e cujas análises mostraram que o método proposto obteve resultados idênticos aos melhores ajustes reportados na literatura.

Keywords: protection system; overcurrent relays; optimization; evolutionary differential.

Palavras-chaves: sistema de proteção; relés de sobrecorrente; otimização; diferencial evolutivo.

1. INTRODUÇÃO

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) agrega toda a estrutura pela qual a energia elétrica percorre, desde a geração até o consumo final, sendo dividido em três subsistemas: geração, transmissão e distribuição. Para assegurar a qualidade do serviço prestado ao consumidor, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabeleceu parâmetros a serem adotados pelas empresas dentre os quais destacam-se aqui, os indicadores de continuidade do serviço, considerados como sendo de maior relevância, haja visto os transtornos que causam ao consumidor (ANEEL, 2019).

Em termos do SEP, a continuidade de serviço está diretamente relacionada a qualidade do seu sistema de proteção, definido como sendo o conjunto de equipamentos composto por relés de proteção, relés auxiliares, equipamentos de teleproteção e acessórios destinados a proteção em caso de falhas elétricas e de outras condições anormais de operação dos componentes de um SEP (ONS, 2019). Em outras palavras, o sistema de proteção tem como função salvaguardar os equipamentos e manter a integridade do fornecimento contínuo e econômico da energia elétrica.

No âmbito dos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE) predominam os relés de sobrecorrente, de-

vido à sua simplicidade e custo baixo (Nascimento, 2014). Apesar das suas reconhecidas vantagens, a etapa de parametrização pode torna-se uma tarefa complexa, principalmente quando o número desses equipamentos ou o número de malhas na rede cresce. Na prática, o problema consiste em obter o ajuste dos parâmetros que assegure o atendimento aos requisitos básicos da filosofia de proteção, ou seja, confiabilidade, sensibilidade, velocidade e seletividade.

Esse é um problema típico de otimização e constitui uma linha de pesquisa tradicional da área de sistemas de potência, a qual vem despertando interesse renovado dos pesquisadores, haja visto o aumento da complexidade dos SEP. Dentre as várias linhas de pesquisa que vêm sendo conduzidas atualmente, destacam-se o uso de métodos de otimização baseados em meta-heurística para realizar a coordenação dos tempos de operação dos relés de sobrecorrente. Nesse contexto, destacam-se os trabalhos de: Kida (2016), que avaliou o desempenho de diferentes métodos, como: Algoritmo de Busca por Enumeração, Algoritmo Genético de Chu-Beasley e Programação Linear; Bernardes (2018) que analisou o desempenho do Algoritmo de Enxame de Partícula e Algoritmo Genético; e Moirangthem et al. (2011), que propuseram um algoritmo adaptativo baseado no Algoritmo Diferencial Evolutivo.

Este trabalho enquadra-se nesse âmbito, em particular, no uso de meta-heurísticas para a coordenação dos tempos de operação dos relés de sobrecorrente. Mais especificamente, propõe utilizar um Algoritmo Diferencial Evolutivo (ADE) para determinar os valores ótimos *Time Dial Setting* (TDS) dos relés. Neste trabalho, os tipos de curvas adotadas e as correntes de sensibilização dos relés são consideradas como pré-definidas. A razão da escolha do ADE foi a sua reputação de convergir rapidamente, o que constitui um requisito importante, visto que o tempo de execução é um parâmetro crucial na solução dos problemas de proteção dos SEP (Moirangthem et al., 2011).

Para demonstrar a viabilidade e eficácia do método proposto, três sistemas-teste foram selecionados, os quais vem sendo utilizados na literatura recente. Dos sistemas foram utilizados em Kida (2016), sendo estes radiais típicos com cinco e dez relés, respectivamente. O terceiro sistema-teste foi utilizado em Urdaneta et al. (1988), sendo um sistema de transmissão em malha com seis relés de sobrecorrente direcionais.

O texto foi organizado em seis seções, incluindo esta seção introdutória. Nas seções 2 e 3, os fundamentos da coordenação da proteção dos SDEE tradicionais e do método de otimização utilizado são apresentados; o algoritmo proposto é descrito na seção 4; os resultados obtidos são discutidos na seção 5; e por fim, as conclusões do trabalho são apresentadas na seção 6.

2. COORDENAÇÃO DA PROTEÇÃO

No âmbito dos SDEE, as amplitudes das correntes de curto-circuito assumem valores bem maiores que os da corrente de carga, a não ser em casos de faltas de alta impedância. Por conseguinte, os esquemas de proteção utilizados são realizados majoritariamente, com relés de sobrecorrente, cujo princípio de funcionamento baseia-se na definição de um limiar de sensibilização, denominado de corrente de *pick-up* (I_p). O relé deve atuar quando a corrente medida no local em que ele está instalado ultrapassar esse valor, enviando um sinal de comando (*trip*) para abrir os contatos do disjuntor (Nascimento et al., 2018).

Este trabalho se restringe aos relés de sobrecorrente temporizados de tempo inverso, nos quais o tempo de atuação é inversamente proporcional ao múltiplo da corrente, definido como a razão entre a corrente que sensibiliza o relé e a I_p . Os relés de sobrecorrente são amplamente utilizados nos esquemas de proteção dos SDEE, principalmente para garantir a coordenação da proteção quando os relés estão dispostos em cadeias (Nascimento et al., 2018). Neste caso, a disposição dos relés é realizada de modo que a corrente proveniente de uma falta pode sensibilizar todos os relés da cadeia. Ordenando os relés pela sua proximidade do defeito, o relé 1 é o responsável principal pela proteção do sistema, sendo nomeado de relé principal; o relé 2 é o responsável pela proteção do sistema caso a proteção principal falhe, sendo nomeado de relé de retaguarda. Coordenação da proteção significa atender a essa hierarquia, a qual é executada pelo ajuste minucioso dos tempos de atuação dos relés.

Os relés de sobrecorrente de tempo inverso possuem uma família de curvas com declividades diferentes, relacionando os múltiplos da corrente ao tempo de atuação (Benmouyal et al., 1999).

$$t = \text{TDS} * \frac{k_1}{\left(\frac{I_f}{RTC \times I_p}\right)^{k_2} - 1} \quad (1)$$

Sendo: t o tempo de atuação do relé, em segundos; I_f a corrente de falta; RTC a relação de transformação do transformador de corrente; I_p a corrente de *pick-up*; k_1 e k_2 os valores que definem os tipos de curva (Tabela 1). O termo que aparece no denominador elevado a k_2 em (1) é o múltiplo da corrente M .

Tabela 1. Valores dos Coeficientes. Fonte: Standard (1976).

Tipo de Curva	k_1	k_2
Inversa (NI)	0,14	0,02
Muito Inversa (MI)	13,5	1
Extremamente Inversa (EI)	80	2

A tarefa de coordenação da proteção dos relés de sobrecorrente não é trivial e para garantir que a cadeia de relés esteja coordenada, é necessário que todos os pares de relés principal (P) e retaguarda (R) atuem conforme (2):

$$t(R) - t(P) \geq \text{CTI}. \quad (2)$$

Em que: $t(P)$ e $t(R)$ são os tempos de atuação dos relés principal e retaguarda, respectivamente; CTI é uma constante definida como intervalo de coordenação (do inglês *Coordination Time Interval*). Portanto, é planejado um atraso intencional em $t(R)$, de modo que o relé de retaguarda opere na falha do relé principal, mas suporte pequenos atrasos em $t(P)$.

Matematicamente, a coordenação dos relés de sobrecorrente resulta em um problema de otimização não linear, cujas variáveis são: TDS, I_p e o tipo de curva. Uma forma de reduzir a complexidade do problema é construir uma relação linear entre TDS e t , o que pode ser feito supondo que I_p e o tipo de curva sejam conhecidos. Neste caso, (1) pode ser reescrita do seguinte modo:

$$t = K \cdot \text{TDS}, \quad (3)$$

sendo, K uma constante definida como:

$$K = \frac{k_1}{\left(\frac{I_f}{RTC \times I_p}\right)^{k_2} - 1} \quad (4)$$

Considere um SDEE no qual deseja-se testar o sistema de proteção para um conjunto de faltas selecionadas: $\alpha = P \cup PR$, em que: P engloba faltas nas situações com a presença apenas de relé principal, sem a presença do relé de retaguarda; PR engloba faltas nas situações com a presença de relé principal e de retaguarda. No caso de P e PR constituírem conjuntos disjuntos, $n(\alpha) = n(P) + n(PR)$. Para uma falta genérica i , define-se:

- RP_i relé principal;
- RR_i relé de retaguarda;
- KP_i constante de (4) relativa ao relé principal; e
- KR_i constante de (4) relativa ao relé de retaguarda.

A coordenação de relés de sobrecorrente de tempo inverso neste trabalho foi formulada como um problema de minimização, cuja função objetivo (FO) foi definida como a

soma dos tempos de operação dos relés do sistema que operam na função principal:

$$\min(FO) = \min \left(\sum_{i=\alpha} TDS(RP_i) * KP_i \right). \quad (5)$$

Sujeito às seguintes restrições:

1. Seletividade

$$g_i = t(RR_i) - t(RP_i) - CTI \geq 0, \text{ com } i \in PR. \quad (6)$$

2. Limites de TDS dos relés

$$\begin{cases} h_{\min j} = TDS(j) - TDS_{\min}(j) \geq 0 \\ h_{\max j} = TDS_{\max}(j) - TDS(j) \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

com $j=\{1, 2, \dots, nr\}$.

Sendo: o nr número de relés, $TDS_{\min}$ e $TDS_{\max}$ os valores mínimos e o máximo do TDS, para cada relé, respectivamente.

3. Tempo mínimo e máximo de atuação dos relés

$$\begin{cases} f_{\min i} = t(RP_i) - t_{\min} \geq 0 \\ f_{\max i} = t_{\max} - t(RP_i) \geq 0 \end{cases} \text{ com } i \in \alpha. \quad (8)$$

Sendo: $t_{\min}$ e $t_{\max}$ os tempos de operação mínimo e máximo permitidos para os relés atuando na função primária, nessa ordem.

Essa formulação assegura que a cadeia de relés atue com o menor tempo possível, sem comprometer a coordenação da proteção para todas as faltas incluídas em α .

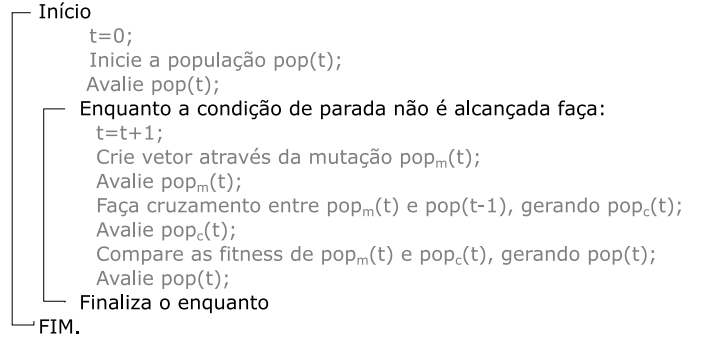
3. ALGORITMO DIFERENCIAL EVOLUTIVO

O ADE foi proposto por Rainer Storn & Kenneth Priece em 1995 (Storn and Price, 1997) e integra classe dos algoritmos evolutivos, os quais são inspirados na evolução natural das espécies. Trata-se de um sistema de base populacional simples, que utiliza a técnica de busca estocástica, sendo considerado um otimizador global eficaz no domínio contínuo (Moirangthem et al., 2011).

O algoritmo inicia com uma população pop gerada aleatoriamente com $n(pop)$ indivíduos, em que cada indivíduo representa uma solução possível para o problema. Essa população evolui ao longo de gerações sucessivas, em que uma nova população é formada através das operações de mutação e cruzamento.

A mutação gera uma população pop_m do mesmo tamanho de pop , em que cada indivíduo é obtido por meio de uma diferença ponderada entre dois indivíduos escolhidos aleatoriamente em pop . Essa diferença é multiplicada por um fator de mutação (F) e por fim, somado com um terceiro indivíduo, também selecionado de forma aleatória. O cruzamento visa gerar uma população (pop_c) que é do mesmo tamanho de pop , porém pelo cruzamento de indivíduos de pop e pop_m . Ambas as operações têm a função de evitar a homogeneidade da população, proporcionando uma busca guiada no espaço das soluções.

Em cada geração, todos os indivíduos são avaliados pela análise do valor da sua função *fitness*, influenciando quais indivíduos devem sobreviver e participar das próximas gerações. Para melhor compreensão, apresenta-se o pseudocódigo a seguir:



4. O ALGORITMO PROPOSTO

São buscados valores de TDS dos relés que tornam o sistema de proteção o mais rápido possível sem violar sua coordenação, considerando valores de I_p e os tipos de curva conhecidos. Com o advento dos relés digitais, os TDS podem assumir quaisquer valores dentro da faixa de 0,05 - 1,0. Desse modo, os valores TDS foram modelados com codificação em ponto flutuante, sendo adotados $TDS_{\min}=0,1$ e $TDS_{\max}=1,1$ para todos os relés.

O algoritmo proposto é apresentado a seguir, sendo resumido no fluxograma da Fig. 1.

- Os dados de entrada são informações referentes as faltas aplicadas no sistema (I_f), assim como os dados dos relés, tais como: I_p , RTC, tipos de curvas e todos os pares de relés (P/R).
- O indivíduo é composto por um cromossomo, formado por nr genes reais, em que o valor do gene i codifica o TDS do relé i . A população inicial de cada estudo é gerada de forma aleatória com $n(pop)$ indivíduos. Tais valores são distribuídos de forma aleatória, resultando no aumento do espaço de busca do algoritmo.
- Para avaliar a aptidão dos indivíduos utilizou-se a função *fitness* (FA), que é expressa por (5) acrescida da análise relativa às penalidades (Pen), conforme (9):

$$FA = FO + Pen_1 + Pen_2. \quad (9)$$

Em que:

$$Pen_1 = \begin{cases} K & \text{se } t_r \leq t_p \\ \frac{K}{CTI} \sum_{i \in PR} (t_p + CTI - t_r) & \text{se } t_p < t_r \leq t_p + CTI \\ 0 & \text{Caso Contrário.} \end{cases} \quad (10)$$

$$Pen_2 = \begin{cases} \frac{K}{t_{\max}} \sum_{i \in \Omega} (t_{\max} - t_r) & \text{se } t_r < t_{\max} \\ 0 & \text{se } t_{\min} \leq t_r \leq t_{\max} \\ K & \text{Caso Contrário.} \end{cases} \quad (11)$$

sendo, K uma constante que permite ajustar a penalidade; e t_p e t_r os tempos de atuação dos relés principal e de retaguarda, respectivamente. Para este trabalho, adotou-se $K=100$.

- Para operação de mutação são escolhidos, de maneira aleatória, três indivíduos distintos ($I_\alpha, I_\beta, I_\gamma$) dentre todos os indivíduos que compõem a população atual. A princípio fez-se uma diferença vetorial entre dois indivíduos selecionados, e seu resultado é multiplicado por F . Por fim, o vetor resultante é somado ao terceiro indivíduo, tornando-se um indivíduo da população mutada conforme (12), pop_m é gerada repetindo esse procedimento $n(pop)$ vezes:

$$pop_m = I_\alpha + F * (I_\beta - I_\gamma). \quad (12)$$

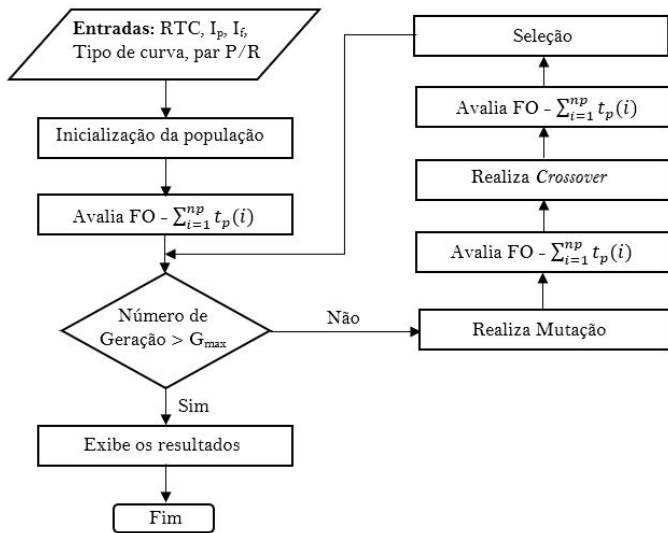


Figura 1. Fluxograma do algoritmo proposto.

- A criação de pop_c é advinda de um cruzamento entre indivíduos de pop e pop_m . São escolhidos aleatoriamente um indivíduo de cada população e para decidir qual gene será transmitido, fez-se um sorteio, que consiste em gerar de forma aleatória um número entre 0 – 1 e testá-lo contra um parâmetro CR, nomeado taxa de cruzamento: se o valor é maior que CR, o gene mutante é transmitido; caso contrário, o gene de pop é passado adiante. Geralmente, CR é definida no intervalo de 0,8 – 1,0 (Storn and Price, 1997).
- Para que os melhores indivíduos sejam passados adiante, é criada uma nova população pop advinda da escolha entre os melhores indivíduos de pop_m e pop_c . Essa seleção é determinada através de uma verificação simples termo a termo. Para o índice $i=\{1, 2, ..., n(pop)\}$, é selecionado $pop_m(i)$ se sua $fitness$ é maior que a $fitness$ de $pop_c(i)$; caso contrário, é selecionado $pop_c(i)$.
- Como critério de parada, adotou-se o número máximo de iterações.

5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos quando o algoritmo da seção 4 foi aplicado na ordenação da proteção de sobrecorrente dos três sistemas-testes. Para todos os testes, foram adotados: $n(pop)=40$, $G_{max}=200$, $F=0,5$ e $CR=0,9$.

5.1 Caso 1: Sistema Radial 1

Trata-se de um SDEE radial simples, composto por 5 relés, 6 barras e 1 gerador (subestação) (Fig. 2). Os dados de entrada referentes a esse sistema são apresentados na Tabela 2. Para avaliar o comportamento do sistema de proteção, foram considerados dois tipos de faltas: i) faltas trifásicas, próximas ao local em que os relés encontram-se instalados; e ii) falhas bifásicas no final de cada ramo.

Análise pormenorizada dos resultados mostrou a eficácia do algoritmo proposto, visto que o método foi capaz de obter resultados semelhantes aos encontrados na literatura

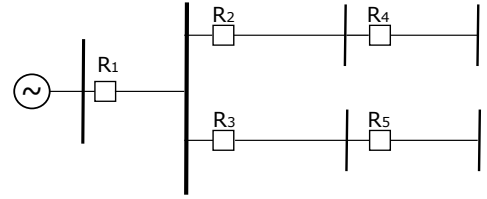


Figura 2. Sistema Radial 1. Fonte: Kida (2016)

Tabela 2. Dados dos relés (Sistema Radial 1).
Fonte: Kida (2016).

	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5
RTC	300/5	300/5	100/5	200/5	100/5
I_{carga}	199,5	130,8	68,7	100,7	50,0
I_p	5,00	3,50	5,25	4,00	4,00
Tipo de Curva	M.I	I	I	M.I	E.I
I_{ccmax}	3115,0	2010,7	2010,7	1512,5	878,4
I_{ccmin}	1741,3	1309,9	760,7	500,3	325,1

(Tabela 4). Para fins comparativos, utilizou-se o trabalho de Kida (2016), que aplicou o método clássico matemático de Programação Linear.

Os tempos de atuação de cada relé são apresentados na Tabela 3. Por se tratar de um sistema radial sem geração distribuída, os dispositivos de proteção principal e retaguarda possuem a característica de serem sensibilizados pelos mesmos níveis de corrente de curto-circuito (I_{cc}). É necessário considerar todos os valores de I_{cc} , pois caso fossem considerados apenas os níveis máximos da falta, a seletividade não estaria garantida para todos os níveis de falhas previstos.

Observou-se que as diferenças entre os tempos de atuação dos relés principais e de retaguarda são os menores possíveis, sendo limitados pelo CTI, que neste caso foi de 0,4 s. Deste modo, para quaisquer valores de TDS inferiores aos encontrados pelo algoritmo, resultará na perda da seletividade.

Tabela 3. Tempos de atuação dos relés (Sistema Radial 1).

P	R	I_{ccmax}			I_{ccmin}		
		$t_p(s)$	$t_r(s)$	$\Delta t=t_r-t_p$	$t_p(s)$	$t_r(s)$	$\Delta t=t_r-t_p$
R_1	-	0,5395	-	-	1,0537	-	-
R_2	R_1	0,4878	0,8878	0,4000	0,6045	1,5038	0,8993
R_3	R_1	0,3442	0,8878	0,5181	0,5181	3,2650	2,7784
R_4	R_2	0,1597	0,5597	0,4000	0,6347	1,2872	0,6525
R_5	R_3	0,0669	0,4830	0,4150	0,5157	0,9157	0,4000

Tabela 4. Valores de TDS e FO ótimos (Sistema Radial 1).

	FO	TDS_1	TDS_2	TDS_3	TDS_4	TDS_5
Kida (2016)	4,9248	0,3750	0,1610	0,1490	0,1000	0,1000
Alg. Proposto	4,9248	0,3750	0,1610	0,1490	0,1000	0,1000

5.2 Caso 2: Sistema Radial 2

Utilizou-se o sistema SDEE constituído por 10 relés, 11 barras e 1 gerador (subestação) (Fig. 3). Neste cenário, todos os relés foram configurados com a curva IEC-NI e possuem TDS_{min} e TDS_{max} de 0,1 e 10, respectivamente. Os dados do sistema são apresentados na Tabela 5 e

os valores ótimos de TDS obtidos pelo algoritmo na Tabela 6. Os valores de TDS apresentados garantem os menores tempos de atuação dos relés principais e de retaguarda (Tabela 7), sem violar as restrições impostas pelo problema. O sistema é dito coordenado, visto que todos os tempos de coordenação dos relés são superiores ao valor de CTI adotado de 0,4 s. A eficácia do algoritmo proposto foi novamente comprovada.

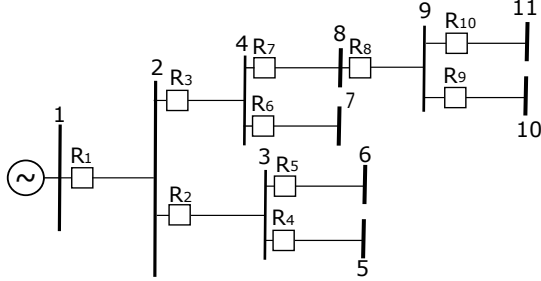


Figura 3. Sistema Radial 2. Fonte: Kida (2016)

Tabela 5. Dados dos relés (Sistema Radial 2).
Fonte: Kida (2016)

	I_p	I_{cc-min}	I_{cc-max}	RTC
R_1	4,25	3115,0	1741,3	400/5
R_2	4,0	2010,7	1309,9	1200/5
R_3	4,5	2010,7	1309,9	200/5
R_4	4,0	1512,5	630,3	100/5
R_5	4,0	1512,5	599,1	100/5
R_6	3,0	1190,0	510,5	100/5
R_7	3,0	1190,0	823,1	200/5
R_8	3,0	950,4	675,5	200/5
R_9	3,25	780,1	398,3	100/5
R_{10}	3,0	780,1	372,1	100/5

Tabela 6. Valores de TDS e FO ótimos (Sistema Radial 2).

	TDS	Kida (2016)	Alg. Proposto
TDS_1	0,3666	0,3666	0,3666
TDS_2	0,2072	0,2072	0,2072
TDS_3	0,3597	0,3597	0,3597
TDS_4	0,1000	0,1000	0,1000
TDS_5	0,1000	0,1000	0,1000
TDS_6	0,1000	0,1000	0,1000
TDS_7	0,3046	0,3046	0,3046
TDS_8	0,1839	0,1839	0,1839
TDS_9	0,1000	0,1000	0,1000
TDS_{10}	0,1000	0,1000	0,1000
FO	12,6639	12,6639	12,6639

Tabela 7. Tempos de atuação dos relés (Sistema Radial 2).

P	R	I_{ccmax}			I_{ccmin}		
		$t_p(s)$	$t_r(s)$	$\Delta t=t_r-t_p$	$t_p(s)$	$t_r(s)$	$\Delta t=t_r-t_p$
R_1	-	1,5456	-	-	1,1331	-	-
R_2	R_1	0,6754	1,8772	1,2019	0,5586	1,4185	0,8599
R_3	R_1	0,3442	0,8878	0,5436	1,0185	1,4158	0,4000
R_4	R_2	0,3322	1,0433	0,7112	0,2312	0,63212	0,4000
R_5	R_2	0,3407	1,0840	0,7433	0,2312	0,6312	0,4000
R_6	R_3	0,2300	2,3905	2,0705	0,2274	1,3082	1,0808
R_7	R_3	1,0861	1,6315	0,5454	0,9082	1,3082	0,4000
R_8	R_7	0,7320	1,2127	0,4807	0,6091	1,0091	0,4000
R_9	R_8	0,3792	1,0600	0,6808	0,2747	0,6747	0,4000
R_{10}	R_8	0,3766	1,1244	0,7478	0,2660	0,6747	0,4088

5.3 Caso 3: Sistema Malhado

Neste caso, utilizou-se um sistema de transmissão malhado composto de 3 barras, 3 linhas, 3 geradores e 6 relés, Fig. 4. Este sistema é considerado pioneiro na área de coordenação ótima de relés de sobrecorrente direcionais (Urdaneta et al., 1988). Todos os relés utilizaram a curva IEC-NI na sua parametrização, cujos dados são apresentados nas Tabelas 8 e 9. Foram aplicadas faltas trifásicas no meio de cada linha e consideradas duas configurações: normal e transitória, sendo que esta última ocorre quando um dos relés atua dentro da sua zona de proteção principal, após o relé da extremidade oposta da linha ter operado (Urdaneta et al., 1988).

Por se tratar de um sistema em anel, a coordenação da proteção é mais complexa, em razão da direcionalidade da corrente. Neste sistema, não são considerados limites para os tempos de atuação dos relés principais. Mesmo assim, o algoritmo proposto foi eficaz, tendo em vista que obteve valores semelhantes aos encontrados por Urdaneta et al. (1988), Mansour et al. (2007) e Amraee (2012), os quais utilizaram diferentes técnicas de otimização como Algoritmo Simplex, enxame de partícula e *Seeker Optimization Algorith*.

Os tempos de atuação dos relés para as faltas consideradas são apresentados na Tabela 10. Com os valores de TDS (Tabela 11) encontrados pelo algoritmo é possível obter os menores tempos de atuação dos relés, garantindo a integridade do sistema. Devido a todos os intervalos de atuação estarem superiores ao CTI (0,20 s), é possível afirmar que o sistema está seletivo e coordenado.

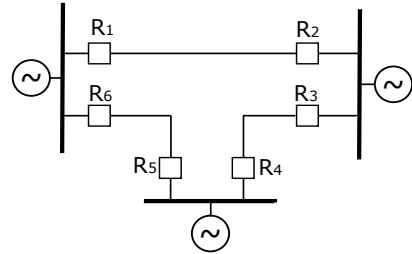


Figura 4. Sistema Malhado. Fonte: Urdaneta et al. (1988)

Tabela 8. Valores de RTC e I_p (Sistema Malhado). Fonte: Urdaneta et al. (1988)

	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6
I_p	5,0	1,5	5,0	4,0	2,0	2,5
RTC	300/5	200/5	200/5	300/5	200/5	400/5

Tabela 9. Dados dos relés (Sistema Malhado).
Fonte: Urdaneta et al. (1988)

P	R	Normal		Transitório	
		$I_{cc-P}(A)$	$I_{cc-R}(A)$	$I_{cc-P}(A)$	$I_{cc-R}(A)$
R_1	R_5	1978,9	175,00	2075,00	400,7
R_2	R_4	1525,70	545,0	1621,70	700,64
R_3	R_1	1683,90	617,22	1779,60	760,17
R_4	R_6	1815,40	466,17	1911,50	622,65
R_5	R_3	1499,66	384,00	1588,50	558,13
R_6	R_2	1766,30	145,34	1855,40	380,70

Tabela 10. Tempos de atuação dos relés (Sistema Malhado).

Configuração normal				
P	R	t_p (s)	t_r (s)	$\Delta_t=t_r-t_p$
R_1	R_5	0,3641	1,1535	0,7894
R_2	R_4	0,2856	0,8465	0,5609
R_3	R_1	0,3390	0,9664	0,6274
R_4	R_6	0,3216	0,8202	0,4986
R_5	R_3	0,3011	1,0661	0,765
R_6	R_2	0,3144	1,0697	0,7553
Configuração transitório				
R_1	R_5	0,3550	0,5549	0,1999
R_2	R_4	0,2802	0,6464	0,3662
R_3	R_1	0,3133	0,7459	0,4326
R_4	R_6	0,3304	0,6094	0,2790
R_5	R_3	0,2950	0,6751	0,3801
R_6	R_2	0,3073	0,5073	0,2000

Tabela 11. Valores de TDS ótimos (Sistema Malhado)

Autor	FO	TDS_1	TDS_2	TDS_3	TDS_4	TDS_5	TDS_6
Urdaneta (1988)	1,9258	0,1000	0,1364	0,1000	0,1000	0,1298	0,1000
Alg. Proposto	1,9258	0,1000	0,1364	0,1000	0,1000	0,1298	0,1000

6. CONCLUSÃO

Um algoritmo para solucionar o problema de coordenação de relés de sobrecorrente baseado no Algoritmo Diferencial Evolutivo foi proposto. O problema foi formulado como um problema linear, no qual considerou-se, apenas o *Time Dial Setting*, como variável de decisão. Para avaliar a eficácia e a eficiência do algoritmo proposto, três estudos de casos e uma análise comparativa com diferentes algoritmos consolidados na literatura foram realizados.

Os resultados obtidos pelo algoritmo proposto foram idênticos aos melhores ajustes reportados na literatura para diferentes configurações de SDEE com relés de sobrecorrente direcional e não direcional, mesmo quando se incluíram correntes transitórias.

Há um indicativo consolidado na literatura do tema que inclui correntes de sensibilização dos relés na formulação do problema, permitindo obter resultados melhores que os obtidos até o presente momento. Sendo assim, o problema deixará de ser linear e passará a ter duas dimensões, aumentando assim o espaço de busca do algoritmo. Consequentemente, justificará o uso do DE como técnica de otimização.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica (COPELE) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) pelo suporte técnico e à CAPES/PROEX pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- Amraee, T. (2012). Coordination of directional overcurrent relays using seeker algorithm. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27(3), 1415–1422.
- ANEEL (2019). ANEEL. <http://www.aneel.gov.br/prodis>. [Online; accessed 09-dezembro-2019].

- Benmouyal, G., Meisinger, M., Burnworth, J., Elmore, W., Freirich, K., Kotos, P., Leblanc, P., Lerley, P., McConnell, J., Mizener, J., et al. (1999). Ieee standard inverse-time characteristic equations for overcurrent relays. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 14(3), 868–872.
- Bernardes, W.M.S. (2018). *Análise da proteção de sistemas de energia elétrica utilizando técnicas modernas de otimização heurística*. Ph.D. thesis, Universidade de São Paulo.
- 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.
- Mansour, M.M., Mekhamer, S.F., and El-Kharbawe, N. (2007). A modified particle swarm optimizer for the coordination of directional overcurrent relays. *IEEE transactions on power delivery*, 22(3), 1400–1410.
- Moirangthem, J., Krishnanand, K., and Saranjit, N. (2011). Optimal coordination of overcurrent relay using an enhanced discrete differential evolution algorithm in a distribution system with dg. In *2011 International Conference on Energy, Automation and Signal*, 1–6. IEEE.
- Nascimento, J.P., Meira, R.N., Silva, H., Pereira, R.L., Brito, N.S., and Souza, B.A. (2018). Coordination of overcurrent relays in radial distribution systems: An analytical approach. In *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*, 1–6. IEEE.
- Nascimento, J.P. (2014). *Um algoritmo de proteção adaptativa para sistemas de distribuição com inserção de geração distribuída*. Master's thesis, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.
- ONS (2019). Operador Nacional de Sistema Elétrico. <http://www.ons.org.br/>. [Online; accessed 17-dezembro-2019].
- Standard, I. (1976). Single input energizing quantity measuring relays with dependent specified time.
- Storn, R. and Price, K. (1997). Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of global optimization*, 11(4), 341–359.
- Urdaneta, A.J., Nadira, R., and Jimenez, L.P. (1988). Optimal coordination of directional overcurrent relays in interconnected power systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 3(3), 903–911.