## COORDENAÇÃO DE RELÉS DE SOBRECORRENTE - UMA ABORDAGEM VIA OTIMIZAÇÃO

Denise Costa de Araújo\*, Eubis Pereira Machado\*, Rodrigo Pereira Ramos\*

\* Colegiado de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Vale do São Francisco Av. Antônio Carlos Magalhães, 510, Santo Antônio, Juazeiro-BA, Brasil

Emails: dnise.araujo@gmail.com, eubis.machado@univasf.edu.br, rodrigo.ramos@univasf.edu.br

**Abstract**— The purpose of the coordination of numerical overcurrent relays in a power system is to guarantee the selectivity of protection devices and perform the appropriate maneuver to clear the fault. In this study, the problem of coordinating the relays is formulated as an optimization problem. The culmination of the project is to solve the optimization problem by the proposed method, Shuffled Complex Evolution. It was made a study of the method and it was carried out functionality tests for the case of relays coordination through the application of a power system reported in the literature.

Keywords— Power system protection, overcurrent relays, optimal coordination, hybrid algorithm.

**Resumo**— O objetivo da coordenação de relés numéricos de sobrecorrente, em um sistema elétrico de potência, é garantir a seletividade dos dispositivos de proteção e realizar a manobra conveniente para eliminar a falta. Neste trabalho, o problema de coordenação dos relés é formulado como um problema de otimização. A culminância do projeto consiste em resolver o problema de otimização através do método proposto, Shuffled Complex Evolution. Foi feito um estudo do método e foi realizado um teste de sua funcionalidade para o caso de coordenação de relés através da aplicação em um sistema elétrico reportado da literatura.

Palavras-chave — Proteção de sistema elétrico, relés de sobrecorrente, coordenação ótima, algoritmo híbrido.

#### 1 Introdução

A proteção dos sistemas elétricos de potência consiste em uma importante medida de segurança, com o intuito de garantir uma boa distribuição de energia elétrica, sem a qual pode ocasionar danos a equipamentos e acarretar prejuízos. Segundo Almeida (2008), para que um sistema de proteção desempenhe sua função em um sistema de potência, é necessário que haja confiabilidade, seletividade e sensibilidade.

Dentre os dispositivos de proteção disponíveis no mercado, os relés se destacam por possuir uma unidade central lógica de proteção. Além disso, elementos de proteção, como é o caso dos seccionadores e religadores, utilizam os relés como parte integrante em sua composição (Conceição, 2012).

Na proteção de sobrecorrente, os relés atuam para uma corrente maior que a corrente de ajuste, sendo essa atuação de forma instantânea ou temporizada, conforme a necessidade (Oliveira, 2010). Dependendo da importância do elemento de sistema a ser protegido, a proteção pode ser hierarquizada em níveis conhecidos como proteção primária e de retaguarda. Isso significa que caso ocorra uma falta, a proteção primária (mais próxima da falta) atua e somente no caso dessa falhar é que a proteção de retaguarda na subestação a montante mais próxima opera com um certo retardo de tempo. À estratégia de proteção, em que para qualquer corrente de curto-circuito o relé mais próximo do defeito atua prioritariamente, dá-se o nome de Coordenação da Prote $c\tilde{ao}$ . Assim, a proteção de retarguarda deve estar coordenada com a proteção primária, criando uma sequência de atuações.

De acordo com Oliveira (2010), procedimentos de tentativa e erro são utilizados para a coordenação da proteção os quais o especialista deve analisar os resultados do cálculo de curto-circuito, do fluxo de carga e de simulações de contingências, considerando diversas condições de operação do sistema elétrico. A obtenção dos ajustes de coordenação que atendam a cada condição de operação resulta em diversas iterações até que alcance uma solução satisfatória, tornando assim o ajuste da proteção de sobrecorrente um processo difícil e ineficaz, por ser difícil contemplar todas as situações possíveis.

A utilização de técnicas de otimização é uma estratégia diferenciada para coordenação de proteção. Diversas técnicas têm sido apresentadas na literatura para a obtenção da coordenação otimizada. Métodos baseados em programação linear como simplex e suas variações foram utilizados por Chattopadhyay et al. (1996), Karegar et al. (2005), e outros autores para obter o múltiplo de tempo (K) ótimo de relés onde a corrente de ajuste era pré definida. Métodos naturais, que simulam processos usados na natureza, são amplamente utilizados para solucinar o problema de coordenação. Dentre esses destacamse os algoritmos genéticos que foram utilizados por So et al. (1997), Razavi et al. (2008) e Chen et al. (2013). Outros métodos naturais baseados no comportamento colaborativo e individual das

populações, como o Particle Swarm Optimization (PSO) foi empregado por Zeineldin et al. (2006). Além disso, os métodos híbridos estão ganhando espaço para solucionar problemas de coordenação. Bottura (2014), utiliza um algoritmo híbrido para a coordenação de relés de sobrecorrente através da combinação da programação linear e do algoritmo genético. Hassan and Zellagui (2015), utilizam o algoritmo híbrido BFOA-PSO para coordenar réles direcionais de sobrecorrente, com o objetivo de utilizar as vantagens dos dois métodos: a troca de informações sociais do Particle Swarm Optimization; e a capacidade de encontrar uma nova solução por dispersão e eliminação do Bacterial Foraging Optimization Algorithm.

O método híbrido de otimização *Shuffled Complex Evolution* (SCE-UA) foi desenvolvido em 1994 para determinar parâmetros de modelos hidrológicos e é baseado na combinação de técnicas de busca aleatória, algoritmos genéticos e otimização local. Não há registros na literatura, quanto a aplicabilidade do SCE-UA na coordenação de relés de sobrecorrente, caracterizando-se, portanto, como uma das motivações para a realização deste trabalho.

## 2 Proteção de Sobrecorrente

De modo geral, o princípio de funcionamento do relé de sobrecorrente é baseado na equação:

$$I_F \ge I_P. \tag{1}$$

Caso a corrente de falta  $I_F$  seja maior ou igual à corrente de ajuste do relé  $I_P$ , também conhecida como corrente de *pick-up*, TAP ou ainda corrente de partida, o relé deve atuar para isolar o trecho defeituoso do restante do sistema.

Diferente dos relés de tempo definido, nos quais o ajuste é dado pela determinação dos tempos de atuação, o ajuste dos relés de tempo inverso se dá através da escolha das curvas de atuação que os representam. Para esses relés o tempo de atuação é inversamente proporcional ao valor da corrente.

Segundo Kindermann (2005), o relé digital opera associando a curva de atuação a uma função que reproduz a curva normalizada:

$$t = K \times \left(\frac{\beta}{M^{\alpha} - 1} + L\right), \qquad (2)$$

sendo:

K - multiplicador de ajuste de tempo;

t - tempo de atuação do relé em segundos;

 $M = \frac{I}{I_P}$  - múltiplo do relé;

 ${\cal I}$  - corrente real que entra no relé;

 $I_P$  - corrente de ajuste;

 $\alpha,\,\beta$ eL - constantes que definem a forma da curva de operação.

Observa-se que o tempo de atuação é função do múltiplo de acionamento do relé (M). No ajuste de relés de sobrecorrente de tempo inverso, esse múltiplo é especialmente importante, pois é utilizado para determinar qual será a curva de atuação do relé sendo dado por (Conceição, 2012):

$$M = \frac{I_{cc}}{RTC \times I_P}.$$
(3)

Em que:

 $I_{cc}$  - corrente de curto-circuito;

 $I_P$  - corrente de ajuste;

RTC - relação de transformação do TC.

O ajuste do tipo de curva do relé consiste na escolha da curva tempo-corrente mais adequada para o uso. Por sua vez, essas curvas podem ser também deslocadas através do ajuste do *Time Dial*, *K*, o múltiplo de tempo das curvas. Além disso, esse ajuste implica na definição do tempo de disparo da função temporizada, seja ela de fase ou neutro (unidades temporizadas, de tempo definido ou de tempo inverso, denominadas pela norma ANSI como: 51F e 51N, respectivamente).

Para o ajuste de corrente da unidade temporizada de sobrecorrente de fase (51F), o relé deve ter sensibilidade para detectar todas as possíveis correntes de curto-circuito no seu trecho, assim:

$$\frac{FS \times I_{nom}}{RTC} \le I_{tap51F} \le \frac{I_{ccmin}}{RTC}.$$
 (4)

Note que, deve ser escolhido o fator que representa a sobrecarga admissível na instalação, conhecido como fator de segurança (FS) que varia entre 1,2 e 1,5. Como o relé irá enxergar a corrente que passa pelo secundário do TC, faz-se uso da relação de transformação do TC (RTC). Além disso, os relés devem operar para a menor corrente de curto-circuito no trecho protegido que não envolver a terra, a qual será presumida como sendo a falta bifásica ( $I_{ccmin} = I_{cc2}$ ).

## 3 Formulação do Problema

Segundo Hassan and Zellagui (2015), a coordenação de relés pode ser resolvida através de um algoritmo de otimização, no qual a função objetivo é descrita pelo tempo total de operação de todos os relés de proteção primária. Essa função objetivo tem a seguinte forma:

$$Minimizar \ F = \sum_{i=1}^{n} t_{ii},\tag{5}$$

em que,

$$t_{ii} = K_i \left( \frac{\beta}{\left(\frac{I}{I_{Ri}}\right)^{\alpha} - 1} + L \right) \tag{6}$$

é o tempo de operação do relé primário Ri para faltas que ocorrem próximo a este mesmo relé e

n o número de relés a serem coordenados. Ainda da Equação (6), I é a corrente vista pelo relé, ou seja, a corrente de falta referida ao secundário do TC, e  $I_{Ri}$  a corrente de ajuste do relé Ri. Note que  $\alpha$ ,  $\beta \in L$  são constantes que definem a forma da curva de operação.

A função objetivo deve ser minimizada, ou seja, é desejável que os tempos de operação dos relés sejam os menores possíveis, desde que mantenham a característica de seletividade. Para isso, a função deve respeitar restrições que garantam a coordenação entre a proteção primária e de retaguarda e que satisfaça às características operacionais exigidas pelos fabricantes de relés.

A otimização é feita através da identificação dos pontos ótimos de  $K_i$  e de  $I_{Ri}$  que minimizem a função objetivo. A primeira restrição  $(K_i)$  representa um valor associado à curva, ou seja, o múltiplo de tempo desta:

$$K_{min} \le K_i \le K_{max}.\tag{7}$$

Essa limitação é estipulada pelo fabricante. Por exemplo, para o relé GRD110 fabricado pela Toshiba,  $K_{max} = 1,5$  s,  $K_{min} = 1,0$  ms e  $K_i$  varia em intervalos de 1,0 ms.

A segunda restrição,  $I_{Ri}$ , refere-se ao ajuste da corrente dos relés, sendo 1,0 mA o passo de variação típico:

$$I_{min} \le I_{Ri} \le I_{max}.\tag{8}$$

Sendo as correntes mínima e máxima calculada conforme o descrito na Equação (4).

Além disso, para haver coordenação, os tempos de operação de dois relés adjacentes devem satisfazer a desigualdade:

$$t_{ij} \ge t_{ii} + \Delta t. \tag{9}$$

Sendo,

- t<sub>ij</sub> tempo de operação do relé de retaguarda R<sub>j</sub> para uma falta próxima de R<sub>i</sub>;
- t<sub>ii</sub> tempo de operação do relé de proteção primária R<sub>i</sub>;
- Δt tempo de coordenação, que depende do tipo do relé utilizado e do tipo de disjuntor envolvido e é um valor inerente ao fabricante. Os técnicos e projetistas de proteção adotam os seguintes valores:

$$\Delta t = \begin{cases} 0, 4 \neq 0, 5 \leq \infty \\ 0, 3 \leq \infty \end{cases}$$
 relés digitais e numéricos.

Apesar de os relés digitais e numéricos terem o tempo de coordenação menor, na prática, para garantir a coordenação, as empresas costumam adotar o tempo de coordenação dos relés eletromecânicos, assumindo valores entre 0,4 e 0,5s (Kindermann, 2005).

## 4 Método Shuffled Complex Evolution (SCE-UA)

O método SCE-UA, sugerido por Duan et al. (1994), é baseado na síntese de quatro conceitos: (1) combinação de aproximações determinísticas e probabilísticas; (2) evolução sistemática de um complexo de pontos distribuídos no espaço de parâmetros; (3) evolução competitiva; (4) combinação de complexo. A síntese destes conceitos torna o método SCE-UA eficaz, robusto, eficiente e flexível.

O SCE-UA tem característica evolucionária e iterativa, similar aos indíviduos de uma população que evoluem em direção ao ótimo global por meio de sucessivas iterações que avaliam a função objetivo. Os dados de entrada são as restrições laterais que definem o espaço de busca dos parâmetros. Baseado na fronteira do espaço de busca, é gerada uma população uniformemente distribuída.

A ideia de divisão do espaço de busca em vários complexos é um ponto crucial do SCE-UA. Um método de busca local é aplicado em cada complexo, especificamente uma variação do método Simplex de Nelder and Mead (1965) em conjunto com a operação de mutação dos algoritmos genéticos. A primeira parte é utilizada para descartar os piores pontos, ou seja, os pontos com maior valor da função objetivo (para o caso de minimização da função) e a segunda parte identifica novas vizinhanças de interesse e desvia dos mínimos locais.

Em consequência da competição natural, os melhores indivíduos tendem a ser utilizados para a criação de novas soluções. Por último, novos complexos são formados através da recombinação e mistura de todas as soluções. A descrição do algoritmo é apresentada em forma de fluxograma na Figura 1.



Figura 1 – Fluxograma SCE-UA.

A etapa de evolução dos complexos é executada pelo algoritmo CCE (*Competitive Complex Evolution*) (Duan et al., 1994) que, de modo geral, faz uso de uma distribuição de probabilidade para selecionar pontos de cada complexo que serão submetidos às etapas de reflexão, expansão e contração definidas pelo método Simplex de Nelder-Mead (Nelder and Mead, 1965).

O método possui uma característica muito relevante, sua persistência, já que o mesmo ponto é atingido mesmo quando são alterados alguns parâmetros e a semente do processo de geração de números aleatórios. Isto é uma forte indicação, embora não seja uma prova, de que o ponto encontrado é o ótimo global.

## 5 Estudo de Caso e Análises dos Resultados

O método SCE-UA foi aplicado em dois sistemas testes, um sistema radial com 2 relés e um outro sistema em anel com 5 barras e 8 relés do tipo direcional. Para o primeiro, realizou-se uma comparação entre o método usualmente utilizado para a coordenação, executado manualmente através de cálculos com a filosofia da tentativa e erro, e o método híbrido SCE-UA. Para o segundo sistema teste, foram explanadas duas abordagens de aplicação do método de otimização. Os algoritmos foram implementados e simulados por meio do software Matlab  $(\mathbb{R})$ .

#### 5.1 Sistema teste composto por dois relés

O sistema teste composto por dois relés reportado em Kindermann (2005) é apresentado na Figura 2. As relações de transformação dos TC, bem como as correntes de curto-circuito trifásicas nas barras são exibidas na Tabela 1.



Figura 2 – Sistema teste com dois relés.

Tabela 1 – Dados do sistema teste com 2 relés.

RTC	$I_{cc,3\phi}$
800/5	13 kA
600/5	8.6 kA
-	6,2 kA
	RTC 800/5 600/5

Apesar da possibilidade de utilizar o tipo de curva também como parâmetro de otimização, neste trabalho, para efeitos de simplicidade, o tipo de curva é fixado e as variáveis de projeto, ou seja, os parâmetros a serem otimizados são: o multiplicador de ajuste de tempo das curvas, K, e a corrente de ajuste,  $I_{ajuste}$ . Para este primeiro sistema teste, o tipo de curva utilizada foi a extremamente inversa da norma *IEEE* e foi considerado um fator de segurança (FS) de 1,5, que representa a sobrecarga admissível. Foi considerado um tempo de coordenação de  $\Delta t = 0,5 \ s$ , embora os relés geralmente sejam coordenados com valores inferiores àquele.

A partir da condição de operação do sistema, foram obtidas as seguintes faixas de valores para o ajuste de corrente da unidade de tempo inverso localizada nas barras B e A:

$$\begin{cases} 4, 18 \ A \le I_{51B} \le 44, 91 \ A \\ 4, 31 \ A \le I_{51A} \le 33, 68 \ A. \end{cases}$$
(10)

Para o problema de coordenação, faz-se necessário adicionar as restrições que garantem a coordenação, a saber:

$$\begin{cases} t_{AC} - t_{BC} \ge \Delta t \\ t_{AB} - t_{BB} \ge \Delta t. \end{cases}$$
(11)

De modo a atender o tempo de coordenação para faltas no trecho BC, os valores de Ke de  $I_{ajuste}$  foram obtidos de forma convencional (forma heurística), conforme indicados na Tabela 2. Para estes parâmetros, os tempos de atuação dos relés para faltas trifásicas que ocorrem na barra B e na barra C são apresentados na Tabela 3, onde é possível verificar que as unidades estão coordenadas. Na Figura 3, seguem as curvas dos relés ajustados pelo método convencional.

**Tabela 2** – Ajuste obtidos pelo método convencional.

	K(s)	$I_{ajuste}(A)$
$R_A$	1,482	6,5
$R_B$	1,0	$^{5,0}$

**Tabela 3** – Tempos de atuação para o método convencional.





**Figura 3** – Curvas de tempo de operação dos relés ajustados pelo método convencional.

Os mesmos relés foram sujeitos ao ajuste por meio do método SCE-UA, cujos parâmetros adotados durante a otimização são aqueles apresentados na Tabela 4. A metodologia de seleção dos parâmetros, bem como os valores adotados como padrão podem ser consultados em Duan et al. (1994).

**Tabela 4** – Parâmetros da simulação para o sistema 1.

Parâmetro	Ajuste
$p: n^{\circ}$ de complexos	150
$m : n^{\circ}$ de pontos em cada complexo	11
$s=p\times m$ : tamanho da amostra	1650
$\lambda$ : coeficiente de reflexão	$^{0,1}$
$\mu:$ coeficiente de contração	$^{0,1}$

O espaço de busca das variáveis de projeto foram os mesmos utilizados no método convencional, isto é, aquele descrito pelas Equações (10) e (11). Considerando o uso de relés do tipo GRD110 fabricado pela Toshiba, tem-se ainda o seguinte espaço de busca para o multiplicador de ajuste de tempo:

$$0,01 \le K_{51} \le 1,5 \ s. \tag{12}$$

As Equações (10)-(12) definem as restrições a serem utilizadas durante a otimização.

Para fazer a comparação entre o método convencional e o método de otimização SCE-UA, a curva do relé 51B foi mantida fixa e o algoritmo fez o ajuste do relé 51A. Esta manobra foi realizada para que o ajuste fosse o mais legítimo possível, mostrando a melhoria ao utilizar o método SCE-UA.

Formalizando o problema de coordenação em um problema de otimização, tem-se a função objetivo:

$$Minimizar \ F = t_{AC} + t_{AB}.\tag{13}$$

E as seguintes restrições laterais e de comportamento:

$$\begin{cases}
4,31 \ A \le I_{51A} \le 33,68 \ A \\
0,01 \le K_{51A} \le 1,5 \ s \\
t_{AC} - t_{BC} \ge 0,5 \ s \\
t_{AB} - t_{BB} \ge 0,5 \ s.
\end{cases}$$
(14)

Os relés do sistema da Figura 2 foram ajustados aplicando o método SCE-UA, cuja evolução da função objetivo pode ser observada na Figura 4. A partir da população gerada, o método consegue selecionar em poucas iterações os valores ótimos das variáveis de projeto. A Figura 5 e as Tabelas 5 e 6 apresentam a comparação entre os resultados obtidos pelo algoritmo de otimização na simulação e método convencional. Para faltas que ocorrem na barra C, a redução no tempo de atuação foi de 80 ms, o que equivale a aproximadamente 5 ciclos de operação na frequência fundamental.



**Figura 4** – Função Objetivo para o sistema teste 1.

Tabela 5 – Ajustes obtidos para o Sistema 1.

Ajuste 51B fixado	$K_{51B}$	1,0 s
	$I_{51B}$	5,0 A
Método Convencional	$K_{51A}$	1,482 s
	$I_{51A}$	6,5 A
Método SCE-UA	$K_{51A}$	1,5 s
	$I_{51A}$	$6,\!236~{ m A}$

**Tabela 6** – Tempos de operação do relé 51A para falta na barra C e na barra B.

	$T_{AC}$	$T_{AB}$
Método Convencional	1,39 s	0,80 s
Método SCE-UA	1,31 s	0,76
Redução do tempo de operação	4,8 ciclos	2,4 ciclos



Figura 5 – Curvas com os ajustes para o sistema teste 1.

#### 5.2 Sistema teste em anel

O sistema elétrico em anel de 34,5 kV é apresentado na Figura 6. Uma particularidade deste tipo de sistema é que, na ocorrência de um curtocircuito, a corrente pode fluir em qualquer sentido. Neste caso, é necessário que a proteção possua características direcionais para que haja seletividade. Note que neste diagrama unifilar são descritas as direcionalidades de cada relé.



Figura 6 – Sistema elétrico com relés direcionais.

Executados os cálculos, obtiveram-se os limites laterais para o ajuste de corrente de cada relé descrito na Figura 6, considerando um fator de segurança (FS) de 1,5. Para o multiplicador de ajuste de tempo, o espaço de busca é estipulado pelo fabricante do relé, neste caso:

$$0,01 \ s \le K \le 1,5 \ s. \tag{15}$$

O tempo de coordenação,  $\Delta t$ , utilizado para este problema foi de 0,3 s.

# 5.2.1 Coordenação simultânea dos relés com mesma direcionalidade

Inicialmente, foi realizada a execução do algoritmo SCE-UA para a coordenação simultânea dos relés R1, R3, R4, R5 e R8 para faltas que ocorram no trecho 2-1. Estes relés possuem a mesma direcionalidade e, por este motivo, devem ser coordenados. Os relés de direcionalidade oposta (R2, R6 e R7) não foram investigados no estudo de coordenação.

Formalizando o problema de coordenação em um problema de otimização, tem-se a função objetivo:

$$\begin{array}{l}
Minimizar \ F = t_{11} + t_{31} + t_{81} + t_{51} + t_{12} \\
+ t_{32} + t_{42} + t_{82} + t_{52} + t_{43} + t_{33} + t_{53},
\end{array} (16)$$

cujas restrições laterais e de comportamento foram, respectivamente:

$$\begin{cases} 5, 192 \ A \le I_{R1} \le 20, 77 \ A \\ 7, 396 \ A \le I_{R3} \le 13, 835 \ A \\ 1, 71 \ A \le I_{R4} \le 2, 835 \ A \\ 7, 255 \ A \le I_{R5} \le 10, 376 \ A \\ 5, 946 \ A \le I_{R8} \le 20, 752 \ A. \end{cases}$$
(17)

$$\begin{array}{ll}
t_{31} - t_{11} \ge \Delta t & t_{32} - t_{12} \ge \Delta t \\
t_{42} - t_{32} \ge \Delta t & t_{43} - t_{33} \ge \Delta t \\
t_{81} - t_{11} \ge \Delta t & t_{82} - t_{12} \ge \Delta t \\
t_{52} - t_{82} \ge \Delta t & t_{51} - t_{81} \ge \Delta t \\
t_{42} - t_{52} \ge \Delta t & t_{43} - t_{53} \ge \Delta t.
\end{array}$$
(18)

Além dessas, foram utilizadas as restrições laterais do ajuste de corrente da Equação (15) para os relés R1, R3, R4, R5 e R8.

O proceso de otimização foi realizado com os parâmetros descritos na Tabela 7. Os valores ótimos do múltiplo de tempo e da corrente de ajuste para cada relé, obtidos através do método de otimização, são exibidos na Tabela 8.

Tabela 7 – Parâmetros da simulação para o sistema 2.

Parâmetro	Ajuste
$p: n^{\circ}$ de complexos	150
$m:n^\circ$ de pontos em cada complexo	21
$s=p\times m$ : tamanho da amostra	3150
$\lambda$ : coeficiente de reflexão	1,0
$\mu$ : coeficiente de contração	$^{0,5}$

**Tabela 8** – Valores ótimos obtidos pelo método SCE-UA: coordenação simultânea.

Relés	Múltiplo de tempo K(s)	Corrente de ajuste I(A)
R1	0,011	7,857
R3	0,026	8,493
R8	0,029	8,903
R5	0,033	7,706
R4	0,034	1,876

Para análise de coordenação, foram traçadas as curvas de atuação dos relés. Estes gráficos exibem o tempo que cada dispositivo requer para atuar quando detectado determinado valor de corrente que circula pelo circuito. A Figura 7 exibe estas curvas e mostra que os dipositivos de proteção estão devidamente coordenados, para qualquer corrente menor que 2kA, maior nível da corrente de curto-circuito no trecho protegido pela cadeia de relés indicados, as curvas atendem ao intervalo de coordenação utilizado. Isto indica que nenhum relé coordenado irá atuar fora da sua faixa de atuação. Saliente-se que o tipo de curva foi fixado e, para este caso, foi utilizada a curva moderadamente inversa do IEEE.

## 5.2.2 Coordenação sequencial dos relés com mesma direcionalidade

A coordenação sequencial consiste na execução do algoritmo SCE-UA para cada ajuste. Sendo assim, foi realizado primeiro o ajuste do relé R1 e, a partir deste ajuste, realizou-se o ajuste do relé R3, e assim sucessivamente. Vale ressaltar que, para o ajuste do relé R4, foi considerado o trecho 3-2. Foram considerados os mesmos espaços de busca para o múltiplo de tempo e corrente de ajuste utilizados na coordenação simultânea e as restrições de seletividade foram inseridas de maneira sequencial conforme a necessidade de coordenação.

O método de otimização foi aplicado de forma sequencial utilizando os mesmos parâmetros de simulação da coordenação simultânea descritos na



**Figura 7** – (a) Curvas de atuação dos relés temporizados 1, 3 e 4: coordenação simultânea. (b) Curvas de atuação dos relés temporizados 1, 8, 5 e 4: coordenação simultânea.

Tabela 7. Após a execução do método de otimização para a coordenação dos relés de mesma direcionalidade (R1, R3, R4, R5 e R8), foram obtidos os valores ótimos do múltiplo de tempo e da corrente de ajuste para cada relé, mostrados na Tabela 9.

**Tabela 9** – Valores ótimos obtidos pelo método SCE-UA: coordenação sequencial.

Relés	Múltiplo de tempo K(s)	Corrente de ajuste I(A)
R1	0,01	5,194
R3	0,023	7,46
$\mathbf{R8}$	0,032	5,973
R5	0,034	7,257
R4	0,036	1,749

Para análise de coordenação, foram traçadas as curvas de atuação dos relés, conforme exibidas na Figura 8. Para qualquer corrente menor que 2kA, maior nível da corrente de curto-circuito no trecho protegido pela cadeia de relés indicados, as curvas atendem ao intervalo de coordenação utilizado.

As Tabelas 10 e 11 mostram a comparação entre os tempos de operação dos dispositivos para os dois casos simulados.



**Figura 8** – (a) Curvas dos relés temporizados 1, 3 e 4: coordenação sequencial. (b) Curvas de atuação dos relés temporizados 1, 8, 5 e 4: coordenação sequencial.

**Tabela 10** – Tempos de operação dos relés: falta na barra 1.

	Coord.	Coord.	Diferença
	simultânea	sequencial	em ciclos
Relé 1	0,272 s	0,177 s	5,7 ciclos
Relé 3	$1,084 {\rm ~s}$	$0,803 \mathrm{\ s}$	16,86 ciclos
Relé 8	$0,796 \ s$	$0,628 \ s$	10,08 ciclos
$\operatorname{Relé} 5$	$1,984 {\rm \ s}$	$1,749 \ { m s}$	14,1 ciclos

**Tabela 11** – Tempos de operação dos relés: falta na barra 2.

	Coord.	Coord.	Diferença
	simultânea	sequencial	em ciclos
Relé 3	$0,519 \ s$	$0,424 \ {\rm s}$	5,7 ciclos
Relé 4	$1,621 \ s$	$1,489 \ s$	7,9 ciclos
Relé 8	$0,472 \ s$	$0,424 \ s$	2,88 ciclos
Relé $5$	$0{,}773~{\rm s}$	$0{,}736~{\rm s}$	2,2 ciclos

Através da comparação entre os dois casos, observou-se que os valores foram da mesma ordem de grandeza. Porém, quando analisados sob a ótica de ciclos de operação, notou-se que a coordenação sequencial atingiu valores de tempo de atuação menores que a coordenação simultânea. O método mostrou-se adequado para resolver o problema de coordenação, visto que os resultados são eficientes e formam uma cadeia de proteção. O relé 1 possui o menor tempo de atuação. Caso este falhe, os relés R3 e R8 (localizados em diferentes ramos) atuam e, caso estes também falhem, os relés 4 e 5 atuam. Ou seja, os relés 3, 8, 4 e 5 são proteções de retaguarda do relé 1, proteção primária.

#### 6 Conclusões

O método de otimização mostrou-se com desempenho satisfatório na procura por soluções para problemas de coordenação, visto que os tempos de atuação dos relés foram minimizados. Para o primeiro sistema teste, os resultados obtidos foram melhores quando comparados aos ajustes realizados através do método convencional. E para o segundo sistema teste foi observado que os melhores ajustes foram provenientes da coordenação sequencial. Além disso, o método apresentou rápida convergência nos estudos de caso realizados.

Através dos resultados obtidos neste trabalho pôde-se observar que, o emprego de algoritmos de otimização na coordenação da proteção é uma medida de grande valia. O uso de implementação computacional facilita a tarefa laboriosa dos engenheiros de proteção na obtenção dos parâmetros necessários para coordenar os dispositivos de proteção de um sistema elétrico.

## Referências

- Almeida, A. L. V. (2008). Ajuste e Coordenação de Relés de Sobrecorrente, Monografia, Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Bottura, F. B. (2014). Algoritmo de Otimização Híbrido para a Coordenação de Relés Direcionais de Sobrecorrente em um Sistema Elétrico Malhado, Mestrado, Universidade de São Paulo.
- 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 **11**(1): 165–173.
- Chen, C.-R., Lee, C.-H. and Chang, C.-J. (2013). Optimal overcurrent relay coordination in power distribution system using a new approach, International Journal of Electrical Power & Energy Systems 45(1): 217–222.
- Collischonn, W. and Tucci, C. E. (2001). Calibração automática global do modelo iph2, Anais XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.

- Conceição, E. N. (2012). Modelagem e Simulação da Proteção de Alimentadores de Distribuição Utilizando Software Tipo EMTP, Mestrado, Universidade de Brasília.
- Duan, Q., Sorooshian, S. and Gupta, V. K. (1994). Optimal use of the sce-ua global optimization method for calibrating watershed models, *Journal of hydrology* 158(3-4): 265–284.
- Hassan, H. A. and Zellagui, M. (2015). Optimal coordination of directional overcurrent relays using bfoa-pso algorithm, *Electrotehnica*, *Electronica*, *Automatica* **63**(2): 116.
- Karegar, H. K., Abyaneh, H. A., Ohis, V. and Meshkin, M. (2005). Pre-processing of the optimal coordination of overcurrent relays, *Electric Power Systems Research* 75(2-3): 134–141.
- Kindermann, G. (2005). Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, Vol. 1, 2a edição, Ed. do autor, Florianópolis-SC.
- Nelder, J. A. and Mead, R. (1965). A simplex method for function minimization, *The computer journal* 7(4): 308–313.
- Oliveira, N. L. S. (2010). Algoritmo Genético de Coordenação Ótima da Proteção de Sobrecorrente em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica, Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande.
- Razavi, F., Abyaneh, H. A., Al-Dabbagh, M., Mohammadi, R. and Torkaman, H. (2008). A new comprehensive genetic algorithm method for optimal overcurrent relays coordination, *Electric Power Systems Research* 78(4): 713–720.
- So, C., Li, K., Lai, K. and Fung, K. (1997). Application of genetic algorithm for overcurrent relay coordination.
- Zeineldin, H., El-Saadany, E. and Salama, M. (2006). Optimal coordination of overcurrent relays using a modified particle swarm optimization, *Electric Power Systems Research* **76**(11): 988–995.