

COORDENAÇÃO DE RELÉS DIRECIONAIS DE SOBRECORRENTE USANDO HEURÍSTICAS MATEMÁTICAS

MATEUS H. DA COSTA*, RODNEY R. SALDANHA†, MARTÍN G. RAVETTI‡, EDUARDO G. CARRANO†

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Minas Gerais,
Belo Horizonte, MG, Brasil*

*e
Departamento de Eletricidade
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais- Unidade Nepomuceno
Nepomuceno, MG, Brasil*

*†Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Minas Gerais
Belo Horizonte, MG, Brasil*

*‡Departamento de Engenharia de Produção
Universidade Federal de Minas Gerais
Belo Horizonte, MG, Brasil*

Emails: mateushcosta@yahoo.com.br, rodney@cpdee.ufmg.br, gravetti.martin@gmail.com, egcarrano@ufmg.br

Abstract— Directional overcurrent relays are generally used as protection mechanisms in transmission and distribution systems. These devices are installed along the network and they should be coordinated in order to operate as fast as possible, and in an appropriate sequence, in order to isolate a fault. However, coordination of the relays is a complex problem due to its non-linear nature and its hard and extensive constraint structure. A matheuristic algorithm is proposed in this work to coordinate directional overcurrent relays. A genetic algorithm combined with a linear programming formulation performs the search for effective solutions. Results for two case studies suggest that the proposed approach can generate solutions that are equivalent, or even better, than those obtained in the literature. In addition, the time spent by the algorithm to reach final solutions is small.

Keywords— Power System Protection, Directional Overcurrent Relays, Matheuristics.

Resumo— Relés direcionais de sobrecorrente são geralmente usados como mecanismos de proteção em sistemas de transmissão e distribuição de energia. Estes dispositivos são instalados ao longo da rede e devem ser coordenados de forma a operarem o mais rápido possível e na sequência adequada, com o objetivo de isolar uma falta. No entanto, a coordenação dos relés é um problema complexo, devido à sua natureza não-linear e por sua estrutura de restrições complexa e extensa. Um algoritmo baseado em uma heurística matemática é proposto neste trabalho para coordenação de relés direcionais de sobrecorrente. A busca por soluções eficientes é realizada por um Algoritmo Genético combinado com um modelo de programação linear. Resultados para dois estudos de caso sugerem que a abordagem proposta é capaz de gerar soluções que sejam equivalentes ou até melhores que as já obtidas na literatura. Além disso, o tempo gasto pelo algoritmo até convergência é baixo.

Palavras-chave— Proteção de Sistemas Elétricos, Relés Direcionais de Sobrecorrente, Heurísticas Matemáticas.

1 Introdução

A proteção de um sistema elétrico de potência (SEP) deve manter a continuidade do fornecimento da energia elétrica na maior parte possível de um circuito após uma falta, evitar ou minimizar os danos e os custos de reparos em equipamentos e garantir a integridade física de todos os envolvidos (operadores e usuários do sistema) (Anderson, 1995; Balakrishnan et al., 2004). Devido as configurações das redes (malhadas, radiais com geração distribuídas, etc) em geral não é possível determinar direções únicas para as correntes de falta. Com isso, o uso de relés direcionais de sobrecorrente (RDS) se apresenta como uma alternativa interessante para proteção do sistema.

Os equipamentos de proteção dos SEP devem

respeitar certas sequências de operação para garantir a coordenação e seletividade durante sua atuação. Essa sequência é definida pelas curvas de tempo de atuação, cujo ajuste depende de ao menos dois parâmetros: as correntes de sensibilização dos relés (correntes de *pick-up* - I_p) e os valores dos múltiplos de tempo de atuação (*time multiplier setting* - TMS). Os ajustes de I_p e TMS geram curvas distintas na relação tempo de atuação *vs.* corrente de sensibilização para uma corrente de falta vista por cada equipamento.

Trabalhos recentes mostram que algoritmos baseados em inteligência computacional vêm se destacando na solução de problemas de coordenação da proteção (So et al., 1997; Urdaneta et al., 1988; Leite et al., 2010). Grande parte desses trabalhos tem como objetivo minimizar a

soma dos tempos de atuação dos relés primários do sistema, respeitando um intervalo de tempo na atuação entre os relés que estão mais próximos do defeito (Amraee, 2012; Leite et al., 2010; Botura, 2013; Reza and Farhad, 2014).

Este trabalho propõe um algoritmo de otimização baseado em heurísticas matemáticas para resolver o problema de coordenação dos RDS em SEP's. A ferramenta é baseada em dois métodos conhecidos: (i) um Algoritmo Genético (AG) com operadores discretos, e; (ii) programação matemática por meio de Programação Linear (PL). A junção dessas técnicas tem o objetivo de melhorar o tempo de convergência e a qualidade da resposta oferecida.

As heurísticas matemáticas são algoritmos de otimização compostos pela combinação de métodos heurísticos/meta-heurísticos com ferramentas de programação matemática. Essa combinação pode ser colaborativa ou integrativa (Boschetti et al., 2009; Maniezzo et al., 2010). Neste trabalho adotou-se uma colaboração integrativa, onde o AG explora valores discretos de I_p enquanto o modelo de PL é responsável por, dado os valores de I_p indicados pelo AG, encontrar valores ótimos de TMS .

Dois estudos de caso foram usados para avaliar o desempenho do algoritmo proposto. Os sistemas considerados são malhados e possuem importantes características para testar a performance do algoritmo, tais como ajustes discretos e contínuos de parâmetros, múltiplas unidades geradoras, geração distribuída, etc. Os resultados obtidos foram comparados com os apresentados no trabalho de Amraee (2012). Na referência o autor abordou o problema de coordenação de RDS como um problema de programação não linear inteira mista, que foi resolvido com um algoritmo de otimização denominado *Seeker Algorithm*. Foram considerados TMS contínuo e I_p discreto.

Este trabalho apresenta a seguinte estrutura: o problema da coordenação de RDS é discutido na Seção 2; o método de otimização proposto é apresentado na Seção 3; na Seção 4 são mostrados os resultados obtidos para os dois estudos de caso e; algumas conclusões são feitas na Seção 5.

2 O Problema de Coordenação e Seletividade da Proteção

Garantir a coordenação e a seletividade da proteção em um SEP não é uma tarefa simples. Para que isto ocorra, é necessário que os equipamentos trabalhem rápido e em uma sequência adequada, definida pela posição da falta e a topologia do sistema. Por exemplo, dois elementos de proteção dispostos em série só estarão coordenados se seus ajustes permitirem ao elemento de proteção mais próximo do defeito (primário) atuar prioritariamente para eliminá-lo. Caso este elemento falhe, o

próximo dispositivo de proteção (conhecido como secundário, *backup* ou retaguarda) deve atuar subsequentemente (Grainger and Stevenson, 1994).

Os relés podem apresentar curvas de tempo inversas padronizadas ou próprias de determinados fabricantes. Conforme a norma IEEE Std. C37.112 (1996) (*IEEE Standard Electrical Power System Device Function Numbers and Contact Designations*, 1996), o tempo de atuação de um relé i , quando este atua como proteção primária, é definido por (1). Nessa equação I_p já foi expresso em função de MC ($I_p = MC \cdot RCT$), que é uma das variáveis de interesse do problema considerado.

$$T_i = TMS_i \left[\alpha_i + \frac{\beta_i}{\left(\frac{I_i^{cc}}{MC_i \cdot RCT_i} \right)^{\gamma_i} - 1} \right] \quad (1)$$

onde: α , β e γ são as constantes dos relés; TMS_i é o múltiplo do ajuste de tempo ajustado para o relé i ; I_i^{cc} é a corrente de curto-circuito notada pelo relé i ; MC_i é o valor de múltiplo da corrente ajustado para o relé i , e; RCT_i é a relação do transformador de corrente conectado ao relé.

De forma análoga, o tempo de operação do relé j , quando este atua como backup do relé primário i , é definido por:

$$T_{ij} = TMS_j \left[\alpha_j + \frac{\beta_j}{\left(\frac{I_{ij}^{cc}}{MC_j \cdot RCT_j} \right)^{\gamma_j} - 1} \right] \quad (2)$$

onde I_{ij}^{cc} é corrente vista pelo relé secundário j para uma falta próxima ao relé primário i .

Na prática, a otimização da coordenação dos RDS se resume à busca dos parâmetros MC e TMS de cada relé, com o objetivo de fazer com que os mesmos atuem o mais rápido possível após a ocorrência de uma falta. Porém, também é necessário garantir um intervalo entre os tempos de operação da proteção primária e sua retaguarda, de forma a evitar que o secundário atue inadvertidamente antes do primeiro. Este intervalo é conhecido como o Intervalo de Tempo de Coordenação (ITC) e seu limite mínimo depende das características individuais de cada relé e das necessidades do operador (Mansour et al., 2007).

Com base no discutido, é possível formular um problema de otimização não-linear, com $2N$ variáveis (N é o número de relés), para realizar a coordenação da proteção dos SEP, como apresentado na função objetivo (3) e nas restrições (4), (5), (6) e (7). Nesse modelo: $\mathcal{R}_{ps}$ é o conjunto de pares primário/secundário; T_i é calculado por meio de (1); T_{ij} é calculado por meio de (2); TMS_i^{min} e TMS_i^{max} são os valores mínimos e máximos para

a variável TMS_i , e; $\mathcal{M}_i$   o conjunto de valores discretos admissível para a variável MC_i .

$$\min \sum_{i=1}^N T_i \quad (3)$$

sujeito a:

$$T_{ij} - T_i \geq ITC_{min} \quad \forall (i, j) \in \mathcal{R}_{ps} \quad (4)$$

$$TMS_i \geq TMS_i^{min} \quad \forall i \in \{1, \dots, N\} \quad (5)$$

$$TMS_i \leq TMS_i^{max} \quad \forall i \in \{1, \dots, N\} \quad (6)$$

$$MC_i \in \mathcal{M}_i \quad \forall i \in \{1, \dots, N\} \quad (7)$$

Analisando a estrutura de restrições do modelo   possível notar que: (i) o conjunto de restrições (4) assegura o intervalo mínimo de operação entre todos os pares primário/secundário; (ii) as restrições (5), (6) e (7) definem os limites das variáveis de decisão para todos os relés. Vale destacar que este conjunto de restrições   geralmente grande, tendo em vista o grande número de pares primário/secundário. Essa característica dificulta consideravelmente a solução do problema.

2.1 Modelo linear

Conforme discutido na seção anterior, o problema da coordenação de relés direcionais de sobre-corrente   não linear devido à relação entre a corrente de magnetização e o tempo de atuação do relé. No entanto, caso os valores de MC sejam conhecidos, se torna possível reescrever o modelo anteriormente apresentado como um problema de programação linear. Nesse caso, apenas as equações (3) e (4) são modificadas, como apresentadas em (8) e (9), respectivamente.

$$\min \sum_{i=1}^N TMS_i \cdot \hat{\kappa}_i \quad (8)$$

$$TMS_j \cdot \kappa_{ij} - TMS_i \cdot \hat{\kappa}_i \geq ITC_{min} \quad \forall (i, j) \in \mathcal{R}_{ps} \quad (9)$$

Nessas equações, $\hat{\kappa}_i$ e κ_{ij} são calculados como apresentados nas equações (10) e (11) respectivamente.

$$\hat{\kappa}_i = \alpha_i + \frac{\beta_i}{\left(\frac{I_i^{cc}}{MC_i \cdot RTC_i}\right)^{\gamma_i} - 1} \quad (10)$$

$$\kappa_{ij} = \alpha_j + \frac{\beta_j}{\left(\frac{I_{ij}^{cc}}{MC_j \cdot RTC_j}\right)^{\gamma_j} - 1} \quad (11)$$

O modelo linear resultante pode ser resolvido usando algoritmos de otimização adequados, tais como o método de Pontos Interiores ou o Algoritmo Simplex (Bazaraa and Jarvis, 2009). Essa estratégia é utilizada no presente trabalho para construção da heurística matemática empregada para solução do problema.

3 Heurística Matemática Proposta

Neste trabalho   proposta uma heurística matemática para solução do problema de coordenação dos RDS em SEP. Este algoritmo combina dois métodos de otimização bem conhecidos: (i) um AG discreto para definição de MC , e; (ii) um método exato PL para encontrar os valores de TMS dados os valores de MC indicados pelo indivíduo do AG. O esquema geral do método proposto é apresentado na Figura 1. No algoritmo: **RAND_Population**(N_I) cria aleatoriamente N_I indivíduos seguindo uma distribuição uniforme; $P_i \in \mathcal{P}$ representa o i -ésimo indivíduo da população $\mathcal{P}$ (cada indivíduo P é uma *struct*¹); **LP**($P_i^D, \mathcal{T}, ITC$) constrói o modelo PL com base nos valores de MC dados pelo indivíduo do AG, executa o método PL para encontrar os valores de TMS correspondentes e avalia a solução.

```

 $\mathcal{P} \leftarrow \text{Random\_Population}(N_I)$ 
for  $i$  from 1 to  $|\mathcal{P}|$  do
     $P_i \leftarrow \text{LP}(P_i^D, \mathcal{T}, ITC)$ 
end for
 $it \leftarrow 0$ 
while stop criterion is not met do
     $it \leftarrow it + 1$ 
     $\mathcal{P}^{son} \leftarrow \text{Crossover}(\mathcal{P})$ 
     $\mathcal{P}^{son} \leftarrow \text{Mutation}(\mathcal{P})$ 
    for  $i$  from 1 to  $|\mathcal{P}^{son}|$  do
         $P_i^{son} \leftarrow \text{LP}(P_i^{son}, \mathcal{T}, ITC)$ 
    end for
     $\mathcal{P} \leftarrow \text{Selection}(\mathcal{P} \cup \mathcal{P}^{son})$ 
end while
 $B \leftarrow \text{BEST}(\mathcal{P})$ 
Return  $B$  ▷ best individual

```

Figura 1: Método Proposto

Os indivíduos do AG são cadeias numéricas que representam os valores de MC . Os valores de TMS de cada indivíduo são obtidos por meio da solução de seu modelo de programação linear correspondente, gerado com base no valores de MC que compõem a solução. Isso garante que os valores de TMS encontrados são ótimos para aqueles valores de MC considerados como entrada. A rotina de programação linear também retorna o desempenho do indivíduo na função objetivo.

O algoritmo proposto é uma heurística matemática integrativa, com um algoritmo evolucionário operando a nível principal e executando o método exato internamente, em nível secundário. Esse tipo de abordagem não só reduz o espaço dimensional do problema, mas torna o tratamento de restrições significativamente mais simples, uma vez que estas são tratadas pelo método PL.

¹A *struct* cont m 4 campos: (i) valores de MC (variáveis determinadas pelo AG); (ii) valores de TMS (obtidos pela PL); (iii) valor da função objetivo associado   solução; (iv) valores das restrições avaliadas na solução.

Para cruzamento (função **Crossover**) e mutação (função **Mutation**) foram utilizados os operadores de Cruzamento Uniforme e Mutação de Flip respectivamente. Caso ocorra o cruzamento, de acordo com a taxa de cruzamento, a mutação não é realizada sobre o indivíduo pai e vice versa. A seleção por sua vez (função **Selection**) é executada pelos métodos de torneio binário e elitismo.

4 Resultados

Dois estudos de caso apresentados em Amraee (2012) foram utilizados para avaliar o comportamento do algoritmo proposto. Assim como na referência original, foram considerados relés com curva do tipo normalmente inversa ($\alpha = 0.00$, $\beta = 0.14$ e $\gamma = 0.02$) (*IEEE Standard Electrical Power System Device Function Numbers and Contact Designations*, 1996) e faltas trifásicas *close-in* próximas de cada um dos relés dos circuitos. Os resultados já apresentados na literatura para estes sistemas foram utilizados para fins de comparação.

A heurística matemática foi implementada no *software* MATLAB versão 8.3 (R2014a). Os modelos PL foram gerados utilizando o MATLAB e resolvidos usando a API MATLAB da versão acadêmica do pacote Gurobi Optimization 6.0. O algoritmo foi ajustado com os seguintes parâmetros: (i) população de 50 indivíduos; (ii) taxa de cruzamento: 90%; (iii) critério de parada: 100 iterações para o estudo de caso I e 200 iterações para o estudo de caso II. Estes parâmetros foram ajustados com base em testes empíricos. Em todos os casos, os valores de *TMS* foram apresentados com três casas decimais, apesar de terem sido considerados como contínuos dentro do algoritmo.

As simulações foram realizadas em um computador com sistema Windows 8.1, processador Intel Core i7 4500U de 2.4GHz e memória RAM DDR3 de 8GB.

4.1 Estudo de Caso 1

O primeiro sistema é a rede com 14 relés mostrada na Figura 2. Neste sistema os valores de *TMS* variam de forma contínua no intervalo $[0, 1; 1, 1]$ e os valores de *MC* devem estar no conjunto $\mathcal{M} = \{0, 5; 0, 6; 0, 8; 1, 0; 1, 5; 2, 0; 2, 5\}$. O menor *ITC* deve ser maior ou igual a 0,3s. Informações adicionais do sistema podem ser obtidos em Amraee (2012).

O algoritmo foi executado 33 vezes e na figura 3 são apresentados o melhor, o pior e a mediana do desempenho, em termos de velocidade de convergência, para essas execuções. A Tabela 1 mostra o número de gerações e o tempo de execução até a convergência das três soluções destacadas na figura 3. No pior caso, a convergência ocorreu na geração 47, menor que 169 observada por Amraee (2012). Considerando a mediana das

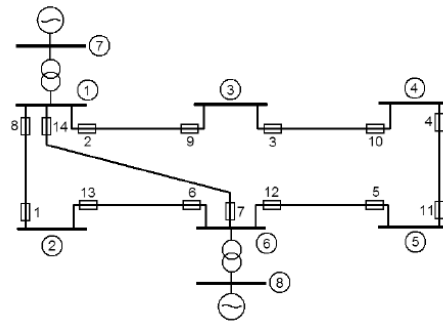


Figura 2: Estudo de Caso 1 – Sistema

soluções, a convergência ocorreu na geração 29, desempenho ainda mais superior comparado a referência original. O algoritmo convergiu para uma solução de custo 8,4271s, mesmo valor obtido na referência original (ver Tabela 2), em todas as 33 repetições. O tempo de execução médio para cada uma das repetições foi de 9,23s, muito inferior ao da referência base, de 50,45s.

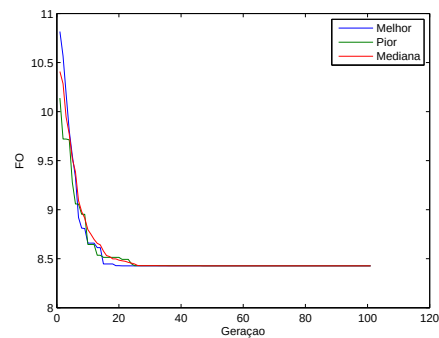


Figura 3: Estudo de Caso 1 – Convergência

Tabela 1: Estudo de Caso 1 – Número de gerações e tempo de execução até a convergência.

	Nº de gerações	Tempo (s)
Melhor	22	3,020
Mediana	29	3,035
Pior	47	4,123

Os ajustes de *TMS* e *MC*, além da síntese do desempenho das soluções encontradas por Amraee (2012) e pelo algoritmo proposto, são apresentadas na Tabela 2.

4.2 Estudo de Caso 2

O segundo sistema tem 15 barras e 42 relés, como mostrado na Figura 4. Neste caso, *TMS* pode assumir qualquer valor contínuo dentro do intervalo $[0, 1; 3, 2]$ e *MC* pode assumir apenas os valores do conjunto $\mathcal{M} = \{0, 5; 1, 0; 1, 5; 2, 0; 2, 5\}$. O menor valor de *ITC* deverá ser maior ou igual a 0,2s. Informações adicionais do sistema também podem ser encontradas em Amraee (2012).

Tabela 2: Estudo de Caso 1 – Ajustes de TMS/MC e síntese de desempenho.

	Amraee (2012)		Proposto	
Relé	TMS	MC	TMS	MC
R1	0,113	2,0	0,113	2,0
R2	0,260	2,5	0,260	2,5
R3	0,225	2,5	0,225	2,5
R4	0,160	2,5	0,160	2,5
R5	0,100	2,5	0,100	2,5
R6	0,173	2,5	0,173	2,5
R7	0,243	2,5	0,243	2,5
R8	0,170	2,5	0,170	2,5
R9	0,147	2,5	0,147	2,5
R10	0,176	2,5	0,176	2,5
R11	0,187	2,5	0,187	2,5
R12	0,266	2,5	0,266	2,5
R13	0,114	2,0	0,114	2,0
R14	0,246	2,5	0,246	2,5
$\sum T_i$ (s)	8,427		8,427	
min ITC (s)	—		0,300	
Gerações	169		43	
Tempo (s)	50,45		9,23	

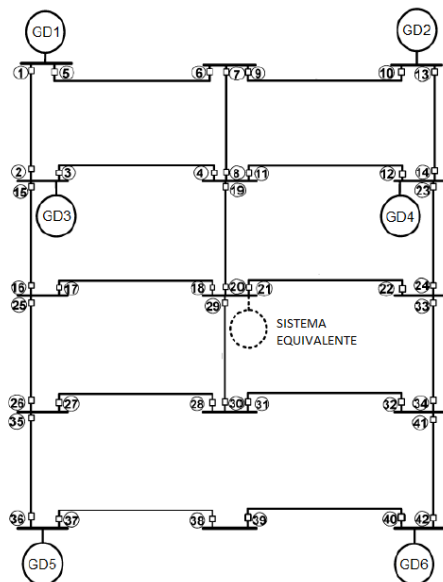


Figura 4: Estudo de Caso 2 – Sistema

Neste estudo de caso em específico, como feito na referência base, o algoritmo foi executado 100 vezes. O pior, o melhor e a mediana do desempenho da convergência dentre as 100 repetições são apresentadas na figura 5. O número de gerações e o tempo de execução até a convergência para as soluções da figura 5 estão na Tabela 3. Pela tabela, é possível perceber que houve uma regularidade no desempenho das repetições com: 138 gerações no pior caso; 90 gerações no melhor e com mediana de 107 gerações até a convergência. Todos esses valores são inferiores à média observada por Amraee (2012), que foi de 385 gerações.

O algoritmo proposto convergiu para uma solução de custo 12,215s em todas as 100 execuções. Esse resultado é ligeiramente melhor ao obtido na

melhor execução da referência original, de custo 12,227s. Além disso, vale ressaltar que a referência original convergiu para diversas soluções piores que a melhor observada. Logo, o algoritmo proposto foi consideravelmente superior em termos de convergência e consistência.

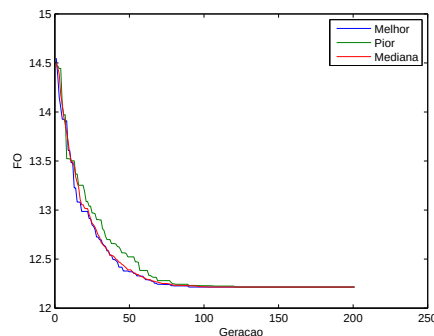


Figura 5: Estudo de Caso 2 – Convergência

Tabela 3: Estudo de Caso 2 – Número de gerações e tempo de execução até a convergência.

	Nº de gerações	Tempo (s)
Melhor	90	10,411
Mediana	107	13,779
Pior	138	17,934

Os ajustes de TMS e MC , além de uma síntese de desempenho para das soluções, estão na Tabela 4.

5 Conclusões

O uso de ferramentas computacionais para ajuste dos parâmetros dos RDS é essencial para se obter uma boa coordenação em sistemas de médio e grande porte, tendo em vista a complexidade do problema. O grau de dificuldade é fortemente ligado ao tamanho do sistema elétrico a ser analisado, à quantidade de dispositivos de proteção presentes no mesmo e na característica das variáveis a serem ajustadas.

O uso de uma heurística matemática, que combinou um AG e um método de PL, se mostrou bastante eficiente na solução de problemas de coordenação dos RDS. Os resultados obtidos para os dois exemplos mostraram que o algoritmo é capaz de encontrar soluções iguais ou melhores àquelas descritas na literatura, com número de gerações e tempo computacional significantemente menores.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CEFET-MG e as agências financiadoras CAPES, CNPq e FAPEMIG pelo suporte financeiro.

Tabela 4: Estudo de Caso 2 – Ajustes de TMS/MC e síntese de desempenho.

	Amraee 2012		Proposto	
	TMS	MC	TMS	MC
Relé				
R1	0,118	1,0	0,100	1,5
R2	0,101	1,0	0,101	1,0
R3	0,105	2,0	0,105	2,0
R4	0,115	1,0	0,115	1,0
R5	0,109	2,0	0,109	2,0
R6	0,108	2,0	0,107	2,0
R7	0,106	2,0	0,106	2,0
R8	0,108	1,5	0,107	1,5
R9	0,106	2,0	0,106	2,0
R10	0,112	1,5	0,112	1,5
R11	0,100	1,5	0,100	1,5
R12	0,100	1,5	0,100	1,5
R13	0,107	2,0	0,107	2,0
R14	0,111	1,0	0,111	1,0
R15	0,103	1,0	0,103	1,0
R16	0,100	1,5	0,100	1,5
R17	0,100	2,0	0,100	2,0
R18	0,105	1,0	0,105	1,0
R19	0,102	2,0	0,102	2,0
R20	0,100	1,5	0,100	1,5
R21	0,166	0,5	0,166	0,5
R22	0,109	1,5	0,109	1,5
R23	0,109	1,0	0,109	1,0
R24	0,100	1,5	0,100	1,5
R25	0,103	2,0	0,103	2,0
R26	0,112	1,5	0,112	1,5
R27	0,104	2,0	0,104	2,0
R28	0,105	2,5	0,105	2,5
R29	0,104	1,5	0,104	1,5
R30	0,101	2,0	0,101	2,0
R31	0,100	2,0	0,100	2,0
R32	0,105	1,5	0,105	1,5
R33	0,100	2,5	0,100	2,5
R34	0,107	2,5	0,107	2,5
R35	0,103	2,0	0,103	2,0
R36	0,100	2,0	0,100	2,0
R37	0,103	2,5	0,103	2,5
R38	0,106	2,5	0,106	2,5
R39	0,103	2,5	0,103	2,5
R40	0,104	2,5	0,104	2,5
R41	0,104	2,5	0,173	2,5
R42	0,104	1,5	0,104	1,5
$\sum T_i$ (s)	12,227		12,215	
min ITC (s)	–		0,200	
Gera��es	385		100	
Tempo (s)	406,3		24,32	

Refer ncias

- Amraee, T. (2012). Coordination of directional overcurrent relays using seeker algorithm, *IEEE Transactions on Power Delivery* **27**(3): 1415–1422.
- Anderson, P. M. (1995). *Analysis of faulted power systems*, Wiley-IEEE Press.
- Balakrishnan, R., Brown, M. and Hewitson, L. (2004). *Practical Power Systems Protection*, Elsevier-Newnes.

- Bazaraa, M. S. and Jarvis, J. J. (2009). *Linear Programming and Network Flows.*, 4 edn, Wiley.
- Boschetti, M. A., Maniezzo, V., Roffilli, M. and Boluf  R hler, A. (2009). Matheuristics: Optimization, simulation and control, in M. J. Blesa, C. Blum, L. Di Gaspero, A. Roli, M. Sampels and A. Schaerf (eds), *Hybrid Metaheuristics*, Vol. 5818 of *Lecture Notes in Computer Science*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 171–177.
- Bottura, F. B. (2013). *Algoritmo de otimização h brido para a coordenação de rel s direcionais de sobrecorrente em um sistema elétrico malhado*, Master’s thesis, School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, SP – Brazil.
- Grainger, J. and Stevenson, W. D. (1994). *Power System Analysis*, McGraw-Hill.
- IEEE Standard Electrical Power System Device Function Numbers and Contact Designations* (1996).
- Leite, H., Barros, J. and Miranda, V. (2010). The evolutionary algorithm epso to coordinate directional overcurrent relays, *10th IET International Conference in Developments in Power System Protection*.
- Maniezzo, V., St tzle, T. and Vo , S. (2010). *Matheuristics: Hybridizing Metaheuristics and Mathematical Programming*, 1 edn, Springer.
- Mansour, M. M., Mekhamer, S. F. and El-Kharbewe, N. E. (2007). A modified particle swarm optimizer for coordination of directional overcurrent relays, *IEEE Transactions on Power Delivery* **22**(3): 1400–1410.
- Reza, K. and Farhad, N. (2014). Optimal coordination of overcurrent relays based on modified bat optimization algorithm, *International Electrical Engineering Journal* **5**(2): 1273–1279.
- So, C., Li, K., Lai, K. T. and Fung, K. Y. (1997). Application of genetic algorithm for overcurrent relay coordination, *Sixth International Conference on Developments in Power System Protection*, Nottingham, UK, pp. 66–69.
- Urdaneta, A. J., Nadira, R. and Perez Jimenez, L. G. (1988). Optimal coordination of directional overcurrent relays in interconnected power systems, *IEEE Transactions on Power Delivery* **3**(3): 903–911.