

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA UTILIZAÇÃO DOS ALGORITMOS CS E FA APLICADOS À COORDENAÇÃO ÓTIMA DE RELÉS DE SOBRECORRENTE

ARIAN R. FAGUNDES¹, ANDERSON FORTES¹, EDUARDO M. DOS SANTOS¹, HENRIQUE EICKHOFF¹, JOHN J. A. SALDANHA², MARCEL STALTER¹, NAIANI PESSOA¹.

Universidade Federal do Pampa, Av. Tiaraju, 810, Alegrete-RS, Brasil¹.

Instituto Federal de Santa Catarina, Av. Getúlio Vargas, 830, Jaraguá do Sul-SC, Brasil².

E-mails: a.rodriguesfagundes@gmail.com, fortes.cc@gmail.com, eduardosantos@unipampa.edu.br, henriquekoff@gmail.com, john.jefferson.as@gmail.com, marcelstalter@gmail.com, naianipessoa@gmail.com.

Abstract— Overcurrent relays can be used in electric power system schemes, being used in primary protection and backup. The overcurrent relays should be adjusted and coordinated with great values, minimizing their operating times, and in this way, ensure the continuing of the transmission and distribution of energy, as well as the robustness of the protection systems so that, the interruption of the service continuity becomes minimal in the occurrence of a failure on the system. This article describes the utility of the Cuckoo Search algorithm and the Firefly algorithm for optimal coordination of the operating time on these relays. The algorithm were implemented in the MATLAB® software and tested in several conditions where in this work, is found in two different systems configurations. The results are analyzed compared to the dual simplex method, differential evolution and the genetic algorithm.

Keywords— Optimization, Power System Protection, Overcurrent Relays.

Resumo— Relés de sobrecorrente são utilizados nos esquemas de proteção do sistema de elétrico de potência, sendo utilizados como proteção primária e de retaguarda. Os relés de sobrecorrente devem ser ajustados e coordenados com valores ótimos, minimizando seus tempos de operação, e dessa forma, garantir a continuidade na transmissão e distribuição de energia, bem como a robustez dos sistemas de proteção de forma que a interrupção do serviço seja mínima na ocorrência de uma falha no sistema. Este artigo descreve a utilização do algoritmo Cuckoo Search e do algoritmo Firefly para a coordenação ótima do tempo de operação desses relés. Os algoritmos foram implementados no software MATLAB® e testados em diversas condições onde neste trabalho encontram-se reproduzidos dois sistemas de diferentes configurações. Os resultados são analisados e comparados com os métodos dual simplex, evolução diferencial e o algoritmo genético.

Palavras-chave— Otimização, Proteção de Sistemas Elétricos, Relé de Sobrecorrente.

1 Introdução

A segurança e a robustez do Sistema Elétrico de Potência (SEP) são garantidas por esquemas de proteção comandados por relés. Esses relés têm por função identificar os defeitos, localizá-los da maneira mais exata possível e alertar a quem opera o sistema, realizando o disparo de alarmes e sinalizações.

Também é função dos relés realizar a abertura de disjuntores de modo a isolar o defeito, mantendo o restante do sistema em condições normais de operação. Sendo assim, os relés assumem a posição mais importante no sistema de proteção, monitorando as condições de operação do SEP.

A proteção primária ou principal é composta em grande maioria por relés de sobrecorrente. Estes relés também são usados como proteção de retaguarda (*back-up*) em sistemas de transmissão.

O relé de proteção primária atua como o primeiro mecanismo de socorro contra faltas no sistema. Já a proteção de retaguarda deverá entrar em operação somente em caso de irregularidade no funcionamento do sistema de proteção primário.

Um dos problemas decorrentes do uso de relés de sobrecorrente diz respeito a sua coordenação, que visa

obter a configuração ótima de modo que, as faltas sejam extintas rapidamente em qualquer que seja o local de sua ocorrência no sistema, mesmo quando o relé mais próximo ao ponto defeituoso venha a falhar.

Quanto a coordenação dos relés de sobrecorrente, dois são os ajustes que precisam ser otimizados: a configuração do multiplicador de tempo (TMS) e a configuração de plugue (PS). Logo, a otimização da coordenação dos relés de sobrecorrente é definida como um problema de minimização do tempo de operação dos relés sob condições de seletividade (Urdaneta et al., 1988).

O problema de coordenação é elaborado estabelecendo uma função objetivo e um conjunto de restrições correspondentes. Após, ele é resolvido como um problema de programação linear, considerando apenas um valor variável (TMS ou PS), e, também pode ser tratado como um problema não-linear, onde ambas as configurações são variáveis a serem determinadas.

Diversas técnicas de otimização têm sido utilizadas para a solução do problema de coordenação ótima de relés de sobrecorrente. Algumas metodologias clássicas como o método simplex (Perez; Urdaneta, 2001) (Bedekar et al., 2010), o método simplex dual em Chaitanya et al. (2017), métodos de busca aleató-

ria (Birla et al., 2005) foram implementadas para coordenação de relés, porém, de acordo com a complexidade do problema esses métodos podem não apresentar uma forma de resolução trivial.

Em Khan et al. (2003), o problema de coordenação do relé foi formulado como programação não-linear inteira mista.

Estudos mais recentes empregaram métodos híbridos e de evolução populacional como em Yang (2009), Yang (2010) e Uthitsunthorn et al. (2011).

Um algoritmo de otimização de enxame de partículas (PSO) também foi desenvolvido por Zeineldin et al. (2006) e Liu e Yang (2012).

Em Koochaki et al. (2008), Bedekar e Bhide (2011) e So et al. (1997) os algoritmos genéticos (GAs) foram propostos para encontrar a solução ideal para as configurações do relé.

Neste trabalho são abordados dois casos, onde o problema de coordenação dos relés de sobrecorrente é formulado como um problema de programação linear, sendo o tempo total de operação dos relés uma função linearmente dependente dos ajustes de TMS. São empregados os algoritmos heurísticos Cuckoo Search (CS) e Firefly (FA) e comparados com outros métodos de otimização.

2 Coordenação do Relé de Sobrecorrente

Os relés devem operar o mais rápido possível, sendo que o relé mais próximo do defeito deve atuar primeiro. Assim, a coordenação é uma estratégia onde, para qualquer corrente de curto-circuito, há uma linha de tempo no sentido do relé principal (mais próximo do defeito) para os relés de retaguarda, garantindo assim seletividade no desligamento do sistema (Blackburn; Domin, 2006).

Ressalta-se que o objetivo da proteção é eliminar o defeito o mais rápido possível, reduzindo o número de consumidores sem fornecimento de energia. Assim, a coordenação de relés se faz necessária, pois o sistema de proteção também é suscetível a falhas. Quando a proteção principal falha, a atuação da proteção de retaguarda é imprescindível (Elmore, 2003).

De acordo com Rawat et al. (2016), no sistema radial de duas barras mostrado na Figura 1, para uma falha após o do barramento B, o relé RB da barra B, deve operar primeiro. O relé RA (proteção principal da barra A) tem a função servir como proteção de retaguarda nesta situação. Se o tempo de operação de RB, é ajustado para 0,1 s, RA deve ser coordenado de modo que não opere antes deste mesmo espaço de tempo, adicionando os tempos de operação do disjuntor da barra B e o tempo de *overshoot* de RA.

Em geral, a coordenação do relé direcional de sobrecorrente pode ser definida como um problema de otimização. Neste, deve-se minimizar o somatório dos tempos de operação de todos os relés que compreendem o esquema de proteção para determinada falha.

O tempo total de operação é denotado por z na Equação (1) mostrada a seguir:

$$z = \sum_{p=1}^m W_p \cdot t_{p,k} \quad (1)$$

Onde m indica o número total de relés que protegem determinado trecho ou equipamento, $t_{p,k}$ é o tempo de operação do relé primário para falta na zona de proteção k e W_p é o peso atribuído ao tempo de operação do relé. Em sistemas de distribuição e linhas de transmissão não muito extensas são atribuídos a todos os relés a mesma ponderação, e W assume valor unitário (Zeineldin et al., 2006).



Figura 1. Esquema de proteção do sistema radial.

2.1 Restrição e Tempo de Coordenação

A operação dos relés exige um tempo mínimo (*delay*) para posteriormente iniciar a sua atuação, além disso, este *delay* não deve compreender um intervalo de tempo muito grande. Sendo assim, surge a restrição apresentada na Equação (2).

$$t_{p,k}min \geq t_{p,k} \geq t_{p,k}max \quad (2)$$

Os tempos $t_{p,k}min$ e $t_{p,k}max$ são os valores mínimo e máximo de operação do relé k para determinada falta (Rawat et al., 2016).

Para existir a coordenação seletiva, os tempos de operação de dois relés sucessivos devem satisfazer a condição apresentada em (3):

$$t_{montante} - t_{jusante} \geq STI \quad (3)$$

Sendo $t_{montante}$ e $t_{jusante}$ o tempo de atuação do relé principal e o tempo de atuação do relé de retaguarda, respectivamente, e STI o intervalo de tempo de coordenação, tempo esse que expressa a diferença mínima para atuação entre dois relés subsequentes que compõe o mesmo sistema de proteção. De forma a garantir a coordenação, ou seja, a atuação do relé de proteção mais próximo ao defeito e não a atuação da proteção de retaguarda (Elmore, 2003).

Deve-se optar por um STI mais próximo possível do valor dado por (3). Isto só é possível, quando respeitado um intervalo de tempo composto por:

- Tempo de operação do mecanismo de abertura do disjuntor B;
- Tempo de extinção do arco elétrico do disjuntor B;
- Tempo de *reset* do relé A;
- Tempo de segurança do ajustador.

2.2 Características de operação do relé de sobrecorrente

Os relés digitais operam de acordo com função dada pela Equação (4).

$$t_{op} = TMS \left(\frac{K}{PSM^\alpha - \beta} \right) \quad (4)$$

Considerando que os relés sejam idênticos, e com características normais de tempo mínimo definido inverso (IDMT), substituindo os parâmetros da norma IEC em (4), temos (5):

$$t_{op} = TMS \left(\frac{0,14}{PSM^{0,02} - 1} \right) \quad (5)$$

Onde t_{op} é o tempo de operação do relé, TMS é a configuração do multiplicador de tempo referente a cada relé e PSM é o múltiplo da configuração da corrente de curto-circuito dado por (6).

$$PSM = \left(\frac{I_{relé}}{RTC \cdot PS} \right) \quad (6)$$

Em um problema linear, o valor de PS pode ser igual a 1, logo, a Eq. (5) é reduzida para a Eq. (7).

$$t_{op} = a_p \cdot TMS \quad (7)$$

A constante a_p do relé em função dos parâmetros da configuração de cada relé pode ser obtida através de (8).

$$a_p = \left(\frac{0,14}{PSM^{0,02} - 1} \right) \quad (8)$$

Portanto, a função objetivo do problema pode ser escrita conforme a Equação (9):

$$\text{Minimize:} \quad z = \sum_{p=1}^m a_p \cdot TMS_p \quad (9)$$

3 Algoritmo Cuckoo Search

O Cuckoo Search (CS) é um algoritmo de pesquisa que se baseia no comportamento parasita de algumas espécies de pássaros cucos em combinação com o comportamento dos voos de Lévy de algumas aves e insetos.

Os cucos possuem uma característica de reprodução que chama a atenção pela estratégia agressiva. Algumas espécies colocam seus ovos em ninhos comunitários e muitas vezes podem remover os ovos dos outros pássaros para aumentar a probabilidade de incubação de seus próprios ovos (Davies, 2010).

Se um pássaro hospedeiro descobre que os ovos não são seus, ele joga esse ovo intruso fora ou aban-

dona seu ninho e constrói um novo ninho em outro lugar. Por isso, em algumas espécies de cuco, as fêmeas são capazes de reproduzir inclusive as cores padrões dos ovos da espécie hospedeira. Isso reduz a probabilidade de os ovos serem abandonados e, assim, aumenta sua taxa de reprodução (Payne, 2005).

Dessa forma, três regras são utilizadas para a implementação do algoritmo CS:

- 1) Cada cuco coloca um ovo por vez e o deposita em um ninho de uma ave hospedeira escolhido aleatoriamente;
- 2) Os melhores ninhos, com alta qualidade de ovos (soluções), são transferidos para as próximas gerações;
- 3) O número de ninhos hospedeiros disponíveis é fixo e o ovo colocado por um cuco pode ser descoberto pelo pássaro hospedeiro com uma probabilidade $pa \in [0, 1]$.

Com base nestas três regras, os passos básicos do algoritmo CS podem ser resumidos como o pseudocódigo mostrado na Figura 2.

Ao gerar novas soluções x_i para um determinado cuco i em uma iteração $t+1$, um voo de Lévy é realizado, conforme (10).

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \alpha \otimes \text{Lévy}(\lambda) \quad (10)$$

Neste caso, $\alpha > 0$ é o tamanho do passo que deve estar relacionado às escalas do problema e $x_i(t)$ representa a solução na iteração anterior. Segundo Yang (2010), na maioria dos casos pode-se usar $\alpha=1$. A equação (10) é essencialmente a fórmula estocástica para a caminhada aleatória. O produto \otimes significa multiplicações executadas de forma independente entre os vetores.

Um passeio aleatório é um processo estocástico em que partículas ou ondas viajam ao longo de trajetórias aleatórias (Barthelemy et al., 2008). O movimento browniano é o mais conhecido de todos os passeios aleatórios, onde os comprimentos dos passos são definidos de acordo com uma distribuição de probabilidade gaussiana.

Nos voos de Lévy, os comprimentos dos passos são definidos de acordo com uma lei de potência e descritos por uma distribuição de probabilidade de “cauda pesada”, pois os passos de grande comprimento são mais prevalentes do que em outras distribuições, como a gaussiana. Esta diferença estatística fornece aos voos de Lévy uma aparência muito distinta, em que o padrão apresenta aglomerados de pequenos passos separados por grandes saltos. Esse movimento contrasta visualmente com os padrões mais homogêneos do movimento browniano (Bartumeus, 2003).

Estudos mostram que o comportamento do deslocamento de muitos animais e insetos seguem as características típicas dos voos de Lévy (Brown et al., 2007).

Os voos de Lévy são compostos por sequências aleatórias de segmentos de movimento (como voar,

nadar ou andar), com comprimentos l , extraídos de uma função de distribuição de probabilidade, onde $1 < \lambda < 3$.

A geração de movimentos aleatórios com voos de Lévy consiste em duas etapas: a escolha de uma direção aleatória e a geração de etapas. A geração de uma direção deve ser obtida a partir de uma distribuição uniforme, enquanto que a geração de etapas consiste em definir o tamanho dos saltos, o que pode ser calculado através do algoritmo de Mantegna (Mantegna, 1994) para uma distribuição de Lévy estável (Yang, 2009).

Algumas das novas soluções devem ser geradas em torno da melhor solução obtida, acelerando a busca local. No entanto, uma fração substancial das novas soluções deve ser gerada aleatoriamente de modo a levar a locais distantes da melhor solução atual. Isso assegura que o sistema não fique preso em um ótimo local.

```

1: Função Custo  $f(x)$ ,  $x = (x_1, \dots, x_d)^T$ ;
2: gerar população inicial dos  $n$  ninhos hospedeiros  $X_i (i = 1, 2, \dots, n)$ ;
3: while ( $t < \text{MaxIterações}$ ) ou (critério de parada) do
4:   obter novas soluções aleatoriamente por vãos de Levy;
5:   avaliar a qualidade  $f(x_i)$ ;
6:   escolha um ninho entre  $n$  (digamos,  $j$ ) aleatoriamente;
7:   if  $f(x_i) > f(x_j)$  then
8:     substituir  $j$  pela nova solução;
9:   end if
10:  uma fração ( $pa$ ) de piores ninhos é substituída;
11:  mantenha as melhores soluções
12:  classifique as soluções e encontre a melhor atual
13: end while
14: mostrar resultados e visualização

```

Figura 2. Pseudocódigo para o algoritmo CS (Yang, 2009).

4 Algoritmo Firefly (FA)

Na natureza, os vaga-lumes usam seu brilho para atrair possíveis parceiros. Essa atração é mais forte quanto maior for a intensidade da luz emitida. O princípio do algoritmo FA é calcular o valor da função objetivo em diversos pontos do domínio, escolhidos inicialmente de forma aleatória, considerando que cada um desses pontos é um vaga-lume.

A intensidade de luz dos vaga-lumes é relacionada com o valor da função custo para aquele ponto no domínio. A cada iteração, o objetivo é fazer com que os valores converjam para o ponto que gere o maior brilho, obtido na posição onde a função custo apresenta o valor ótimo (ou o menor valor conhecido).

A atratividade de cada vaga-lume está ligada à intensidade da luz (I) que ele emite e diminui com o aumento da distância (Yang, 2010). Algumas regras do algoritmo são as seguintes:

- Um vaga-lume pode ser atraído por outro;
- A atratividade é proporcional ao brilho. O vaga-lume de menor brilho sempre irá se mover em direção ao de maior brilho;
- A atratividade é proporcional à força da luz, que é inversamente proporcional à distância;

- Quando não houver nenhum outro com brilho maior que o seu, o vaga-lume se moverá de forma aleatória;
- A intensidade de brilho de um vaga-lume é determinada pelo valor da função custo para a posição em que está localizado.

O meio absorve a luz, que se torna mais fraca à medida que a distância aumenta. Considerando as reduções causadas pela distância e pela absorção do meio tem-se a equação (11) para a intensidade do brilho enxergada por um vaga-lume.

$$I(r) = I_0 e^{-\gamma r^2} \quad (11)$$

Onde r é a distância entre os vaga-lumes, γ é o coeficiente de absorção de luz pelo meio e I_0 é a intensidade da luz em $r=0$. Como a atratividade de um vaga-lume é proporcional à intensidade enxergada pelos vaga-lumes adjacentes, pode-se definir a atratividade (β) como (12):

$$\beta(r) = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (12)$$

Sendo β_0 a atratividade em $r = 0$. Assim, a posição de um vaga-lume i atraído por outro vaga-lume j no instante $t+1$ é dada por (13):

$$\mathbf{x}_i(t+1) = \mathbf{x}_i(t) + \beta_0 e^{\gamma r_{ij}^2} (\mathbf{x}_j(t) - \mathbf{x}_i(t)) + \alpha \left(\text{rand} - \frac{1}{2} \right) \quad (13)$$

Onde $\mathbf{x}_i(t)$ é a posição atual do vaga-lume i e $\alpha \left(\text{rand} - \frac{1}{2} \right)$ é a parcela aleatória do movimento, na qual rand é um número aleatório entre 0 e 1, e variável α , representa o peso deste movimento.

O parâmetro γ é de extrema importância na determinação da velocidade de convergência do algoritmo. Ele deve ser determinado com base nas dimensões do problema a ser otimizado e geralmente varia entre 0,01 e 100. O pseudocódigo do FA visto é apresentado na Figura 3 (Yang, 2010).

```

1: Função Custo  $f(x)$ ,  $x = (x_1, \dots, x_d)^T$ ;
2: gerar população inicial dos vaga-lumes  $X_i (i = 1, 2, \dots, n)$ ;
3: A intensidade de luz  $I_i$  em  $x_i$  é determinada com base em  $f(x_i)$ 
4: Definir o coeficiente de absorção de luz  $\gamma$ 
5: while ( $t < \text{MaxIterações}$ ) ou (critério de parada) do
6:   for  $i=1: n$  all  $n$  fireflies do
7:     for  $j=1: n$  all  $n$  fireflies do
8:       if  $I_j > I_i$  then
9:         Mova o vaga-lume  $i$  para  $j$  na dimensão  $d$ 
10:      end if
11:      A atratividade varia com a distância  $r$ ;
12:      Avaliar a nova solução e atualizar a intensidade de luz;
13:    end for
14:  end for
15:  Classifique os vaga-lumes com base em  $f(x)$  e escolha o melhor;
16: end while
17: mostrar resultados e visualização

```

Figura 3. Pseudocódigo para o algoritmo FA (Yang, 2010)

5 Resultados e Discussões

5.1. Caso 1: Sistema Radial de 4 Barras

Com a finalidade de testar os algoritmos, foi considerado inicialmente um circuito radial de quatro barramentos (BUS), as configurações de conexão dos relés para este caso são mostradas na Figura 4. São utilizados relés digitais com curva de tempo inverso.

Os pontos de falta ocorrem entre todos os barramentos e após a barra 4. As relações de transformação (RTC) dos transformadores de corrente (CTs) de todos os barramentos são de 200:5, a fonte do sistema é de 66 kV e 100 MVA.

O tempo mínimo de operação para cada relé é de 0,2 s. Este intervalo é utilizado a fim de evitar que os relés operem indevidamente para surtos transitórios. O menor valor que o STI assume neste caso é de 0,57 s, conforme as características de operação dos relés.

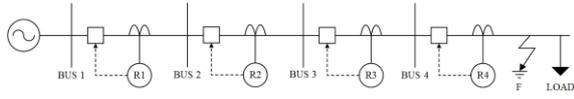


Figura 4. Esquema de proteção do sistema radial com 4 barras.

A constante a_p foi obtida através de (8), e os valores são exibidos na Tabela 1.

Tabela 1. Valor da Constante a_p Referente a Cada Relé do Caso 1.

Ponto de Falta	Valor de a_p			
	Relé1	Relé2	Relé3	Relé4
Entre Barra A e B	2,52	*	*	*
Entre Barra B e C	2,80	2,74	*	*
Entre Barra C e D	*	3,46	3,46	*
Após Barra D	*	*	3,60	3,59

(*A falta não é detectada pelo relé nesta situação)

O problema de otimização do caso descrito acima é formulado como (14), sendo x_1 , x_2 , x_3 e x_4 os valores de ajuste do TMS que minimizam o tempo de operação dado por z .

Min.:

$$z = 2,52x_1 + 2,74x_2 + 3,46x_3 + 3,59x_4 \quad (14)$$

Sujeito as restrições de coordenação (15)-(17) e as restrições referentes ao de tempo mínimo de operação (18)-(21):

$$2,81x_1 - 2,74x_2 \geq 0,57 \quad (15)$$

$$3,49x_2 - 3,46x_3 \geq 0,57 \quad (16)$$

$$3,61x_3 - 3,59x_4 \geq 0,57 \quad (17)$$

$$x_1 \geq 0,0793 \quad (18)$$

$$x_2 \geq 0,0348 \quad (19)$$

$$x_3 \geq 0,0578 \quad (20)$$

$$x_4 \geq 0,0557 \quad (21)$$

O problema de otimização foi resolvido utilizando os algoritmos CS e FA no ambiente MATLAB®.

Com o intuito de adaptar as heurísticas de otimização ao problema proposto, foi necessário calibrar alguns parâmetros dos algoritmos. Sendo assim, alguns testes foram realizados. A cada mudança de parâmetro o algoritmo foi executado 30 vezes.

Para o CS, primeiramente o número máximo de iterações foi fixado em 400, então variou-se o número de ninhos (n) entre 50 a 500 com passos de 50, e o parâmetro pa foi variado de 0,1 até 0,9 com passos de 0,1. A partir dos testes, foi definido o melhor número de ninhos como 200 e $pa = 0,2$ para o problema alvo.

O FA quando comparado ao CS, possui um maior número de parâmetros a serem definidos. Novamente foi fixado o mesmo número de iterações em 400, variando o valor de α , β e γ . A população de vagalumes foi variada entre 50 e 550 vagalumes com passos de 25. Com base nos testes, a melhor configuração do FA é mostrada na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros Utilizados no Algoritmo FA.

Parâmetro	População	Iterações	α	β	γ
Valor	200	400	0,2	0,2	1

O problema de otimização foi formulado de forma que as heurísticas possam variar os valores de x_1 , x_2 , x_3 e x_4 dentro de um mínimo e máximo permitido para cada variável. Os valores mínimos são mostrados nas restrições (18)-(21) e o valor máximo é de 1,2 para todas as variáveis. Esse intervalo de valores aceitáveis é chamado de região factível. Para as restrições (15)-(16) é utilizado um sistema de penalidades, onde, cada vez que uma das restrições não é obedecida um valor grande é adicionado à função custo, levando o algoritmo ao descarte da solução que contenha uma ou mais variáveis que tenham infringido alguma das restrições.

Os valores encontrados para TMS dos relés são exibidos na Tabela 3. Estes resultados são comparados com os valores de Madhumitha et al. (2015) e Chaitanya et al. (2017) que aplicaram algoritmos genéticos (GA) e o método da evolução diferencial (DE) para o mesmo sistema teste. Além disso, os resultados

são comparados com os valores mínimos obtidos pelo método dual simplex (DS).

Tabela 3. Resultados do TMS dos Relés Para Cada Algoritmo.

Resultado	CS	FA	DS	GA	DE
x_1	0,5683	0,5684	0,5682	0,577	0,6
x_2	0,3748	0,3748	0,3747	0,379	0,4
x_3	0,2133	0,2132	0,213	0,213	0,29
x_4	0,0557	0,0557	0,055	0,056	0,2

O tempo total de operação para todos os relés é mostrado na Tabela 4.

Tabela 4. Valor Mínimo da Função Objetivo.

	CS	FA	DS	GA	DE
$z(s)$	3,39706	3,39716	3,39703	3,43	4,32

Os resultados acima indicam que os algoritmos Cuckoo Search, Firefly e Dual Simplex são muito próximos e tem o menor valor para a função custo. Dessa forma, são métodos superiores na minimização do problema proposto quando comparados ao GA e DE.

É importante salientar que o método DS, ao contrário das heurísticas, sempre garante o valor ótimo em um problema de otimização linear. Isto ocorre, pois, o DS percorre os vértices da região factível até alcançar uma resposta que não possua soluções vizinhas melhores, sendo essa a solução a resposta ótima. No entanto, a medida que o problema a ser otimizado se torna não linear, o dual simplex não pode ser utilizado. Além disso, mesmo em um problema linear com muitas variáveis, o método DS leva a um número elevado cálculos, o que pode tornar a otimização bastante complexa (Mahdavi, 2007). Já as heurísticas podem ser utilizadas para sistemas não lineares, precisando informar apenas as restrições e a função objetivo (custo) a ser minimizada. Embora algumas vezes possam não garantir a solução ótima, os resultados são consideravelmente satisfatórios na maioria das aplicações (Chan, 2007).

A evolução da função objetivo dos métodos propostos neste trabalho são mostradas na Figura 5 para o algoritmo CS e Figura 6 para FA.

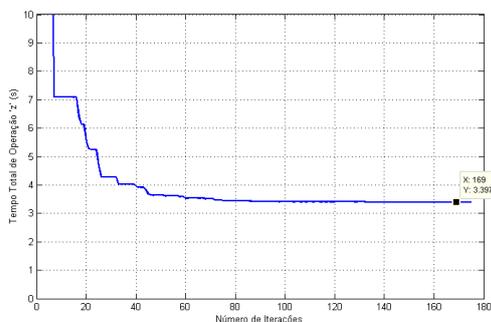


Figura 5. Evolução da Função Custo Para CS no Caso 1.

O tempo de execução do algoritmo CS até a convergência é de 24,1 segundos, enquanto para o FA é de 57,24 segundos, para o sistema utilizado. Porém,

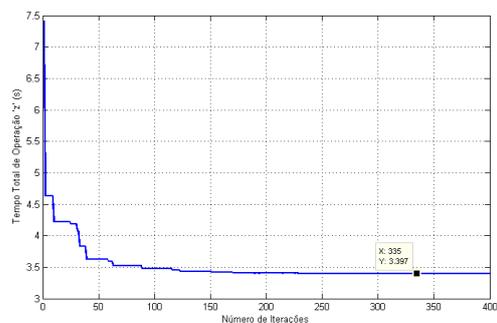


Figura 6 - Evolução da Função Custo Para FA no Caso 1.

não foi possível a comparação com o tempo de execução dos métodos GA e DE, pois estas informações não se encontram disponíveis na literatura.

A solução converge em diferentes iterações para os dois métodos, porém, a convergência para o CS requer um número menor de iterações.

5.2. Caso 2: Sistema em Paralelo

A fim de validar a utilização das heurísticas CS e FA para um problema mais complexo, é realizada a otimização de um sistema com alimentação em paralelo (Figura 7), composto por 5 relés e abastecido por uma única fonte. São considerados novamente relés digitais com curva de tempo inverso. Sendo os relés 2 e 3 do tipo direcionais. A corrente de falta é de 4000 A, e a RTC é de 300:1.

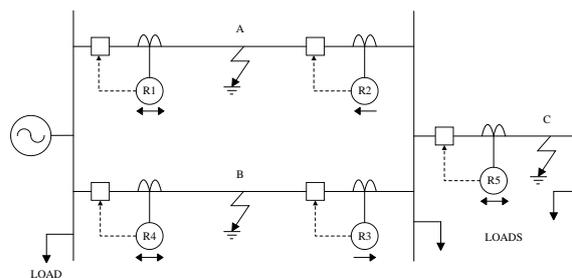


Figura 6. Sistema em Paralelo

O tempo mínimo de operação para cada relé é de 0,1 s e o STI mínimo para este caso é de 0,2 s. Os valores da constante a_p são exibidos na Tabela 5.

Tabela 5. Valor da Constante a_p Referente a Cada Relé do Caso 2.

Ponto de Falta	Constante a_p				
	Relé 1	Relé 2	Relé 3	Relé 4	Relé 5
Ponto A	*	3,1	*	6,26	*
Ponto B	6,26	*	3,1	*	*
Ponto C	4,34	*	*	4,34	2

(*A falta não é detectada pelo relé nesta situação)

O problema de otimização é estabelecido conforme a equação (22):

Min.:

$$z = 3,106x_1 + 6,265x_2 + 3,106x_3 + 6,265x_4 + 2x_5 \quad (22)$$

Sujeito as restrições de coordenação (23)-(26) e de tempo mínimo de cada relé dadas por (27)-(31).

$$6,265x_4 - 3,106x_2 \geq 0,2 \quad (23)$$

$$6,265x_1 - 3,106x_3 \geq 0,2 \quad (24)$$

$$4,341x_1 - 2x_5 \geq 0,2 \quad (25)$$

$$4,341x_4 - 2x_5 \geq 0,2 \quad (26)$$

$$x_1 \geq 0,032 \quad (27)$$

$$x_2 \geq 0,015 \quad (28)$$

$$x_3 \geq 0,032 \quad (29)$$

$$x_4 \geq 0,015 \quad (30)$$

$$x_5 \geq 0,049 \quad (31)$$

Como pode ser observado nas restrições (23)-(26), a utilização de duas linhas em paralelo, torna o problema de otimização mais complexo.

Os parâmetros utilizados pelos algoritmos CS e FA são os mesmos do caso anterior na resolução deste problema.

Os valores ótimos de TMS, o tempo total de operação dos relés, bem como o tempo de execução dos algoritmos são mostrados na Tabela 6. Novamente o CS e o FA são comparados com a solução ótima, obtida através do dual simplex.

Tabela 6. Resultados da Aplicação dos Algoritmos.

Resultado	CS	FA	DS
x_1	0,0691	0,0691	0,0691
x_2	0,0160	0,0160	0,0159
x_3	0,0322	0,0322	0,0321
x_4	0,0691	0,0691	0,0691
x_5	0,0499	0,0499	0,0499
z (s)	0,94764	0,94764	0,94761
Processamento (s)	14,21	58,2	-

O CS e o FA encontram os mesmos valores em cada uma das variáveis x_1 , x_2 , x_3 , x_4 e x_5 , e consequentemente o valor para a função objetivo é o mesmo. Porém, o CS tem como vantagem a velocidade quanto ao tempo de execução do código até a convergência, sendo 44 segundos mais rápido neste caso.

A diferença entre as heurísticas e o método dual simplex para a função objetivo é de 0,0005. É importante salientar que para esse sistema o cálculo do DS já não é trivial devido ao grande número de restrições.

As características de convergência do valor mínimo de z para a utilização do algoritmo CS e FA são mostradas nas Figuras 8 e 9, respectivamente.

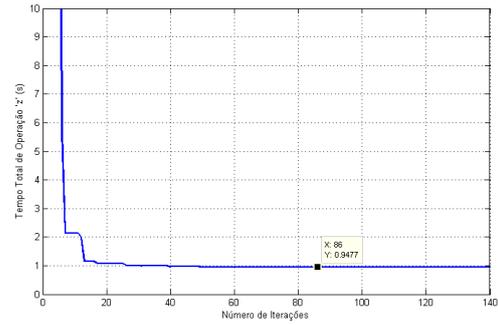


Figura 7. Evolução da Função Custo Para CS no Caso 2.

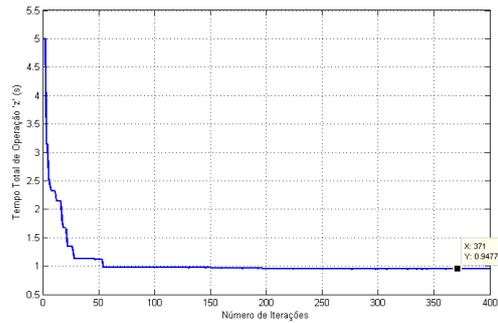


Figura 8. Evolução da Função Custo Para FA no Caso 2.

Novamente a minimização do valor de z ocorre com um número menor iterações quando aplicado o algoritmo CS.

6 Conclusão

Neste artigo foi abordada a utilização dos algoritmos Cuckoo Search e Firefly para resolução do problema de otimização do tempo de operação dos relés de sobrecorrente. Dois casos são abordados a fim de avaliar o desempenho destes algoritmos.

Os resultados mostram a possibilidade de alcançar soluções de qualidade igual ou superior quando comparados aos estudos já realizados e disponíveis na literatura, visto que, em ambos os casos os valores encontrados que minimizam as funções objetivo através dos algoritmos CS e FA são muito próximos ao valor mínimo que soluciona o problema, obtido pelo método dual simplex.

À medida que o problema se torna mais complexo, com o acréscimo de restrições e o aumento do número de variáveis de decisão, as heurísticas surgem como alternativa mais viável na busca da solução.

Fica evidente também a superioridade na velocidade com que o algoritmo CS encontra o valor de convergência quando comparado ao FA, sendo o CS 2,3 vezes mais rápido na busca do valor mínimo da função objetivo do problema para o sistema radial e 4 vezes para o problema de otimização do sistema em paralelo.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Ensino Superior (CAPES), o Grupo de Energia e Sistemas Elétricos de Potência da Unipampa, bem como o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da mesma instituição.

Referências Bibliográficas

- Barthelemy, Pierre; Bertolotti, Jacopo; Wiersma, Diederik S. A Lévy flight for light. *Nature*, v. 453, n. 7194, p. 495-498, 2008.
- Bartumeus, Frederic et al. Helical Lévy walks: adjusting searching statistics to resource availability in microzooplankton. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 100, n. 22, p. 12771-12775, 2003.
- Bedekar, P.P & S.R.Bhide, "Optimum coordination of over-current relay using the Continuous Genetic Algorithm", *Expert System with applications (Elsevier)* 38(2011), 11286-11292.
- Birla, D; R.P. Maheshwari, H.O. Gupta, "Time overcurrent relay coordination: a review", *Int. Journal of Emerging Electrical Power Systems*, vol. 2, no. 2, pp. 1-13, 2005.
- Blackburn, J. L.; Domin, T. J. *Protective Relaying: Principles And Applications*. 3ª ed., CRC Press, Boca Raton, Florida, EUA, 2006.
- Brown, Clifford T.; Liebovitch, Larry S.; Glendon, Rachel. Lévy flights in Dobe Ju/'hoansi foraging patterns. *Human Ecology*, v. 35, n. 1, p. 129-138, 2007.
- Chaitanya, A. V. K., Jinka Rohit, and OV Gna Swathika. "Optimum coordination of overcurrent relays in distribution systems using differential evolution and dual simplex methods.". *ICCMC, 2017 International Conference on. IEEE, 2017*.
- Chan, F. T., & Tiwari, M. K. (2007). Preface: *Swarm Intelligence, Focus on Ant and Particle Swarm Optimization*. In *Swarm Intelligence, Focus on Ant and Particle Swarm Optimization*. InTech.
- Davies, Nicholas B. *Cuckoos, cowbirds and other cheats*. A&C Black, 2010.
- Elmore, W. A.; *Protective Relaying: Theory And Applications*. 2ª ed., CRC Press, EUA, 2003.
- Khan, R.A.J; Abyaneh, H.A; M. Al-Dabbagh, H.K. Karegar, S.H.H. Sadeghi, "A new optimal approach for coordination of overcurrent relays in interconnected power systems", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 18, no. 2, pp. 430-435, April 2003.
- Koochaki, M.R. Asadi, R.R. Naghizadeh, "Optimal over-current relay coordination using Genetic Algorithm", *11th International Conference OPTIM 2008*, pp 197-202.
- Liu, An, & Ming-Ta Yang. "Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays Using NM-PSO Technique." *Computer, Consumer and Control (IS3C), 2012 International Symposium on. IEEE, 2012*.
- Madhumitha, R., et al. "Optimum Coordination of Overcurrent Relays Using Dual Simplex and Genetic Algorithms." *Computational Intelligence and Communication Networks (CICN), 2015 International Conference on. IEEE, 2015*.
- Mahdavi-Amiri, N., & Nasser, S. H. (2007). Duality results and a dual simplex method for linear programming problems with trapezoidal fuzzy variables. *Fuzzy sets and systems*, 158(17), 1961-1978.
- Mantegna, Rosario Nunzio. Fast, accurate algorithm for numerical simulation of Levy stable stochastic processes. *Physical Review E*, v. 49, n. 5, p. 4677, 1994.
- Payne, Robert B.; Sorensen, Michael D. *The Cuckoos*. Oxford University Press, 2005.
- Perez, Luis G., and Alberto J. Urdaneta. "Optimal timing in a mixed protection scheme with directional overcurrent relays." *IEEE Transactions on Power Delivery* 16.3 (2001): 385-388.
- Rawat, Ritesh, Vijay S. Kale, and Sanjeev S. Gokhale. "Application of nature inspired metaheuristic techniques to overcurrent relay coordination." *Future Technologies Conference (FTC). IEEE, 2016*.
- So, C.W; K.K. Li, K.T. Lai, K.Y. Fung, "Application of Genetic Algorithm to over-current relay grading coordination, *Proceedings of the 4th International Conference on Advances in Power Systems, Control, Operation and Management, Hong Kong 1997*.
- Urdaneta, A. J; Restrepo, Marquez, S; and Sanchez, J. Optimal Coordination of Directional relays in Interconnected Power Systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, July 1988, Vol.3 No.3, pp 903-911.
- Uthitsunthorn, D; P. Pao-L-Or, T. Kulworawanichpong, "Optimal overcurrent relay coordination using artificial bees colony algorithm", *Eighth electrical engineering electronics computer telecommunications and information technology conference*, pp. 901-904, 2011.
- Yang, Xin-She. *Nature-inspired metaheuristic algorithms*. Luniver press, 2010.
- Yang, Xin-She; DEB, Suash. Cuckoo Search via Lévy flights. In: *Nature & Biologically Inspired Computing, World Congress on. NaBIC 2009. IEEE*, p. 210-214, 2009.
- Zeineldin, H.H; E.F. El-Saadany, M.M.A. Salama, "Optimal coordination of overcurrent relays using a modified particle swarm optimization", *Electrical Power Systems Research*, vol. 76, pp. 988-995, 2006.