

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**NAIANI PESSOA MACHADO**

**AVALIAÇÃO DE DIFERENTES HEURÍSTICAS APLICADAS A OTIMIZAÇÃO  
DE AJUSTE DE TEMPO EM RELÉS DE SOBRECORRENTE**

**Alegrete**

**2018**

**NAIANI PESSOA MACHADO**

**AVALIAÇÃO DE DIFERENTES HEURÍSTICAS APLICADAS A OTIMIZAÇÃO  
DE AJUSTE DE TEMPO EM RELÉS DE SOBRECORRENTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos

**Alegrete**

**2018**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do  
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

M149a Machado, Naiani Pessoa

Avaliação de Diferentes Heurísticas Aplicadas a Otimização  
de Ajuste de Tempo em Relés de Sobrecorrente / Naiani Pessoa  
Machado.

43 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade  
Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2018.

"Orientação: Eduardo Machado dos Santos".

1. Relé de Sobrecorrente. 2. Otimização. 3. Proteção. 4.  
Heurísticas. I. Título.

NAIANI PESSOA MACHADO

AVALIAÇÃO DE DIFERENTES HEURÍSTICAS APLICADAS A OTIMIZAÇÃO DE AJUSTE DE TEMPO  
EM RELÉS DE SOBRECORRENTE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 3 de dezembro de 2018.

Banca examinadora:



Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos  
Orientador



Prof. Dr. Felipe Bovolini Grigoletto  
UNIPAMPA



Prof. Dr. Chrystian Dalla Lana da Silva  
UNIPAMPA

*Dedico esse trabalho a minha mãe Angela pelo seu apoio imprescindível, pelas palavras de incentivo e pelo seu amor incondicional e em memória ao meu pai Sidnei Machado que sempre esteve comigo em pensamentos.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, a Deus por ter me concedido fé e esperança para chegar até aqui sem desistir.

À minha família, principalmente, a minha mãe e aos meus irmãos por todo o carinho e apoio.

Ao meu amor, Mauro, pelo seu companheirismo e dedicação empenhado a mim para que eu pudesse seguir o meu sonho. Essa vitória também é sua.

Agradeço ao professor Eduardo Machado dos Santos pela orientação, amizade e ensinamentos que foram essenciais para o desenvolvimento desse trabalho.

Agradeço às minhas amigas, Fernanda, Bianca e Bruna pelo constante apoio e boas risadas ao longo desse tempo.

Agradeço aos colegas do Grupo de Pesquisa GESEP, que me acolheram e prestaram ajuda de alguma forma.

A todos meus amigos de faculdade, pela amizade desenvolvida ao longo de toda a caminhada acadêmica, principalmente, ao Pietro, Jovane, Vinícius e Andryan.

E, por fim, agradeço a todos que de alguma forma ajudaram nessa caminhada.

## RESUMO

Relés de sobrecorrente podem ser utilizados nos esquemas de proteção do Sistema de Elétrico de Potência (SEP) desde a geração até a distribuição. Também, podem ser utilizados para a proteção de equipamentos. Estes dispositivos devem ser ajustados e coordenados com valores ótimos, de forma a atuar eliminando as faltas rapidamente, minimizando danos ao sistema, e, dessa forma, garantindo a continuidade do serviço.

Este trabalho descreve a utilização do Algoritmo dos Vagalumes (FA) e do Algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas (PSO) para a otimização da coordenação de relés de sobrecorrente de tempo inverso. Os algoritmos foram implementados no software MATLAB® e testados para dois sistemas testes. Os resultados são analisados e comparados com aqueles obtidos pelo Algoritmo Genético e o Método Dual Simplex. As heurísticas tem seu desempenho avaliado para diferentes Funções Objetivo, as quais dependem do sistema a ser testado. Por fim, destaca-se que o uso de métodos heurísticos, que realizem a otimização dos tempos de coordenação dos relés, propícia maior rapidez e eficiência aos esquemas de proteção de SEPs.

Palavras-Chave: Relé de Sobrecorrente, Otimização, Proteção, Heurísticas.

## **ABSTRACT**

Overcurrent relays can be used in the protection schemes of the Power Electrical System (EPS) from generation to distribution. Also, they can be used for the protection of equipment. These devices must be adjusted and coordinated with optimum values, in order to act eliminating faults quickly, minimizing damages to the system, and thus ensuring continuity of service.

This paper describes the use of the Firefly Algorithm (FA) and Particle Swarm Optimization Algorithm (PSO) to optimize the coordination of inverse time overcurrent relays. The algorithms were implemented in MATLAB® software and tested for two test systems. The results are analyzed and compared with those obtained by the Genetic Algorithm and the Dual Simplex Method. Heuristics have their performance evaluated for different Objective Functions, which depend on the system being tested. Finally, it is worth noting that the use of heuristic methods, which optimize the coordination times of the relays, leads to greater speed and efficiency in the protection schemes of EPSs.

**Keywords:** Overcurrent Relay, Optimization, Protection, Heuristics.



**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1- Curva de Tempo Inverso do Relé de Sobrecorrente .....	18
Figura 2- Diferentes inclinações das curvas de tempo x múltiplo .....	19
Figura 3- Representação esquemática do movimento de uma partícula em PSO. .....	24
Figura 4- Fluxograma Algoritmo de Enxame de Partículas (PSO).....	27
Figura 5- Fluxograma Algoritmo dos Vagalumes (FA).....	29
Figura 6- Sistema Teste Radial 2 barras.....	31
Figura 7- Sistema Teste Radial 4 barras.....	34

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Tipos de curvas em relação aos coeficientes $K$ , $\alpha$ , $L$ e $\beta$ .....	20
Tabela 2- Cálculo da constante $ap$ referente a cada relé. ....	32
Tabela 3- Parâmetros do PSO.....	33
Tabela 4- Parâmetros utilizados no algoritmo FA. ....	34
Tabela 5- Valores obtidos de TMS dos relés para cada Algoritmo. ....	34
Tabela 6- Cálculo da constante $ap$ referente a cada relé. ....	35
Tabela 7- Parâmetros utilizados no algoritmo FA. ....	36
Tabela 8- Parâmetros do PSO.....	36
Tabela 9- Valores obtidos de $TMS$ dos relés para cada Algoritmo. ....	37

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FA - *Firefly Algorithm*

AG - Algoritmo Genético

DS - Dual Simplex

IEC - *International Electrotechnical Commission*

PS - *Plug Setting*

PSO - *Particle Swarm Optimization*

PSM - Múltiplo da configuração da corrente de curto-circuito

RTC - Relação de Transformação

SEP - Sistemas Elétrico de Potência

STI - Intervalo de tempo seletivo

TC - Transformadores de Corrente

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	13
<b>1.1. Considerações Gerais</b> .....	13
<b>1.2. Objetivos</b> .....	13
<b>1.3. Revisão Bibliográfica</b> .....	14
<b>1.4. Estrutura do trabalho</b> .....	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
<b>2.1. Considerações Gerais</b> .....	17
<b>2.2. Relé de Sobrecorrente</b> .....	17
<b>2.2.1 Relé de Sobrecorrente de Tempo Inverso</b> .....	18
<b>2.2.2 Otimização Coordenação de Relés de Sobrecorrente de Tempo Inverso</b> .....	19
<b>2.3. Métodos de Otimização Estudados</b> .....	22
2.3.2 Heurísticas.....	22
<b>2.4. Considerações Finais</b> .....	30
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	31
<b>3.1. Considerações Gerais</b> .....	31
<b>3.2. Caso 1: Sistema Radial com 2 Barras</b> .....	31
<b>3.3. Caso 2: Sistema Radial com 4 Barras</b> .....	34
3.4. Considerações Finais .....	37
4. CONCLUSÕES .....	39
4.1. Conclusões .....	39
4.2. Sugestões para Trabalhos Futuros .....	40

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1. Considerações Gerais**

Um Sistema de proteção deve ser projetado para reconhecer certas anomalias. A função de detectar esses defeitos é dos relés. Se esses defeitos não forem detectados, as elevadas correntes de falta podem causar danos aos equipamentos, podendo ocasionar perdas nos serviços (ANDERSON, 1998).

Nesse contexto, os relés devem ser ajustados para identificar os defeitos e enviarem um sinal para a abertura do disjuntor, de modo que as faltas sejam eliminadas rapidamente, assim, desconectando o trecho com defeito do sistema (KINDERMAN, 2005).

Neste trabalho, serão apresentados e implementados algoritmos para a otimização da coordenação dos relés de sobrecorrente de tempo inverso, visando determinar os ajustes destes dispositivos de modo que as faltas sejam eliminadas rapidamente, maximizando a continuidade do serviço.

### **1.2. Objetivos**

Este trabalho tem como objetivo geral a otimização da coordenação entre relés de sobrecorrente de tempo inverso em sistemas elétricos de potência.

Por objetivos específicos, citam-se:

- Encontrar os valores mínimos de ajuste de relés que mais se aproxime do ótimo;
- Implementar duas heurísticas destinadas à otimização da coordenação entre relés; e
- Comparar as soluções obtidas pelos métodos implementados para diferentes funções objetivo com aquelas obtidas por algoritmos já implementados encontrados na literatura, de modo a determinar qual heurística melhor otimiza a atuação dos relés de sobrecorrente para os sistemas testados.

### 1.3. Revisão Bibliográfica

Diversas técnicas de otimização têm sido utilizadas para a solução do problema de coordenação ótima de relés de sobrecorrente. Nos últimos anos foram desenvolvidas várias técnicas de otimização, para que esse tipo de procedimento auxilie na busca da melhor coordenação entre os dispositivos de proteção dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP).

Nesse contexto, destaca-se uma metodologia clássica, conhecida como o método simplex, a qual foi proposta por DANTZIG (1947) e inicialmente utilizada para resolver problemas nutricionais. Tal metodologia, passou a ser aplicada mais tarde para problemas matemáticos de otimização, incluindo o problema de coordenação entre relés de sobrecorrente de tempo inverso, conforme os trabalhos de URDANETA *et al.* (2001) e BEDEKAR *et al.* (2010). Embora o método simplex e suas variações obtenham a solução ótima na maioria dos casos, esses métodos são lentos e trabalhosos, mesmo para sistemas de pequeno porte, além de servirem apenas para a aplicação em problemas lineares.

Ainda, é importante destacar que, ao longo dos anos, outras técnicas de otimização já foram aplicadas para a solução do problema em questão. Dessa forma, destaca-se o trabalho de URDANETA e PEREZ (1988), os quais foram os pioneiros em formular o problema da coordenação como um problema de otimização. Os autores solucionaram casos via Programação Linear, permitindo determinar uma solução “ótima” para o problema de coordenação de uma maneira mais eficiente.

Já em SO *et al.* (1997), o problema de coordenação dos relés foi solucionado pela primeira vez utilizando o Algoritmo Genético (AG). Neste trabalho, as variáveis multiplicador de tempo e multiplicador de corrente foram codificadas de forma binária no cromossomo do AG.

Além disso, a programação quadrática sequencial foi utilizada por BIRLA *et al.* (2006), sendo que esse tipo de otimização aproxima a função objetivo de forma quadrática e restrições na forma linear, permitindo assim a solução de um problema de otimização.

Em ZEINELDIN *et al.* (2006), o enxame de partículas (PSO) foi usado para resolver problemas de programação não-linear inteira mista, de modo a encontrar a

solução ótima para o problema de coordenação. Já em MANSOUR et. al (2007), a mesma heurística foi usada para encontrar o multiplicador de tempo, sendo este um problema linear, podendo assim ser comparado com a resposta do método simplex, o que permitiu concluir que sua convergência foi para uma configuração ótima.

Também, RAZAVI et al. (2008), propuseram um algoritmo genético que foi utilizado somente para determinar o multiplicador de tempo, fazendo com o que problema se tornasse mais simples (problema linear).

Ainda, NOGHABY et al. (2009) realizaram o estudo da coordenação de relés de sobrecorrente direcionais utilizando um algoritmo genético híbrido, que foi projetado para melhorar a convergência do algoritmo genético convencional. Nesse trabalho, os autores utilizaram um algoritmo de programação linear para resolver parte do problema de otimização, enquanto o método híbrido determinava apenas as configurações de corrente de pick-up de todos os relés, sendo estas codificadas como variáveis discretas.

Já em SADEH et al. (2011), os autores apresentam o (PSO) híbrido que é proposto para encontrar o ponto ótimo global na coordenação de relés de sobrecorrente e de distância, usando uma nova suposição que satisfaz todas as restrições. O PSO é usado para encontrar a corrente de ajuste dos relés de sobrecorrente, e, sequencialmente, uma programação linear é aplicada para determinar o TMS (*Time Multiplies Setting*) ótimo e o tempo de atuação da segunda zona de proteção do relé de distância.

Em GOKHALE et al. (2014) foi usado o algoritmo de vaga-lumes (FA, do inglês Firefly Algorithm) para resolver o problema de coordenação de relés em um problema de programação linear, considerando a configuração dos relés e o tempo de operação fixos uma função linear do multiplicador de tempo.

Ainda em 2014, HUSSAIN et al. (2014) propôs a implementação do algoritmo dos vaga-lumes (FA) na minimização do tempo de operação do relé, a qual depende do multiplicador de ajuste de tempo, demonstrando melhores resultados, além de evitar a descoordenação entre cada par de relés.

Em CHAITANYA et al. (2017), utilizou-se a evolução diferencial, que usa a mutação como mecanismo de busca e seleção para direcionar a busca para as regiões prospectivas na região viável e considera as atuais restrições existentes para formar os valores otimizados. Os resultados obtidos foram comparados com

aqueles obtidos com o método dual simplex, o qual fornece a solução ideal sem introduzir variáveis artificiais.

Por fim, em THARAKAN et al. (2017) foi usado o algoritmo FA e o Algoritmo de Colônia de Formigas para chegar a melhor configuração do multiplicador de tempo dos relés, a fim de garantir o tempo mínimo de operação dos relés.

Tendo em vista o crescente interesse pela aplicação da otimização em problemas de coordenação de relés, este trabalho avalia o desempenho de três heurísticas aplicadas a este problema, de modo a determinar qual delas melhor desempenha esta função.

#### **1.4. Estrutura do trabalho**

No Capítulo 2, são expostos os fundamentos acerca dos Relés de Sobrecorrente de Tempo Inverso, onde são discutidas suas principais características quanto a sua operação, seus ajustes para coordenação, bem como é apresentada a teoria sobre as heurísticas implementadas para a otimização da coordenação destes dispositivos.

No Capítulo 3, são apresentados os sistemas teste e as suas funções objetivo correspondentes, bem como os resultados alcançados através de cada algoritmo de otimização implementado para o respectivo sistema teste.

Por fim, o Capítulo 4 apresenta as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.



## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1. Considerações Gerais**

O Relé de Sobrecorrente é o dispositivo que desempenha função indispensável nos esquemas de proteção, fazendo-se necessário o conhecimento dos principais conceitos que abrangem a coordenação deste dispositivo. Desta forma, nesse capítulo são abordados os principais conceitos deste dispositivo, bem como os critérios para a sua coordenação.

### **2.2. Relé de Sobrecorrente**

O Relé de Sobrecorrente é amplamente utilizado para a proteção de alimentadores, linhas de transmissão entre outros componentes do sistema elétrico de potência. Tal proteção se dá contra as correntes de curto-circuito ou sobrecargas que ultrapassem o ajuste do relé, para as quais os relés envia sinal de abertura do disjuntor, isolando o trecho faltoso do restante do sistema e eliminando a sobrecorrente oriunda do defeito. Assim, esse relé deve proteger o trecho para o qual foi destinado com garantia de sensibilidade, seletividade, velocidade e confiabilidade (KINDERMAN, 2005).

Sendo assim o relé só será considerado seguro se ele responder somente para faltas ocorridas dentro da sua zona de proteção. Para proteger todos os equipamentos do sistema, eles devem estar ao menos em uma zona de proteção, sendo que as zonas de relés a montante devem se sobrepor às zonas de proteção dos dispositivos à jusante, para evitar que algum elemento do sistema esteja desprotegido (HOROWITZ, 2008). Isso garante a atuação da proteção de retaguarda, caso a proteção (local) falhe.

Dessa forma, cada relé no sistema é coordenado com o relé que protege o equipamento que fica mais próximo à falta, de modo a garantir a atuação antecipada do dispositivo mais próximo do ponto do defeito. Assim, a coordenação se faz de modo que exista uma hierarquia de atuação em relação ao tempo. Logo, a coordenação é feita considerando-se dois tipos de relés:

Relé de Proteção Primária: deve operar o mais rápido possível para uma falta dentro de sua zona de proteção, desconectando o respectivo trecho do sistema, interrompendo o serviço para o menor número de consumidores possível.

Relé de Proteção Secundária: se o relé da proteção primária falhar, a proteção secundária deverá atuar rapidamente, segundo a característica tempo x corrente, isolando o trecho em falta, sendo este ajustado com um retardo no seu tempo de atuação em relação a proteção primária (CORRÊA, 2012).

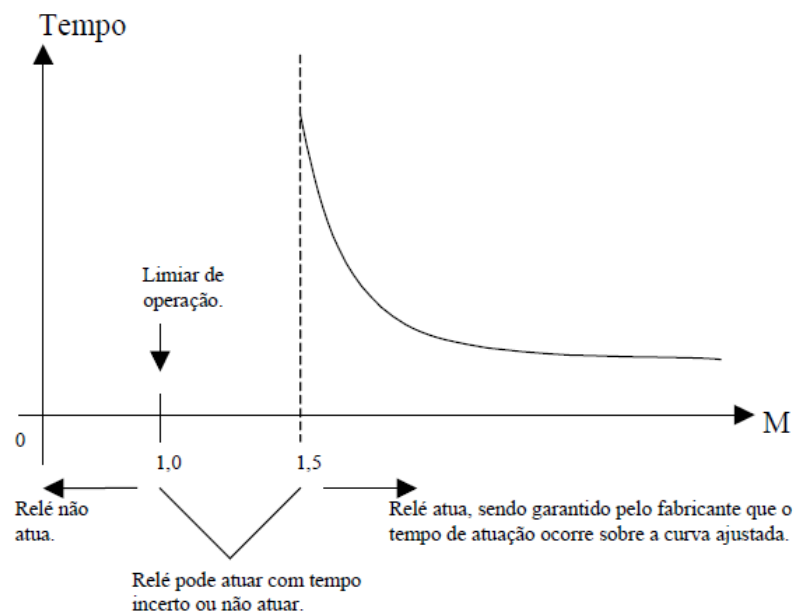
### 2.2.1 Relé de Sobrecorrente de Tempo Inverso

Para relés de sobrecorrente de tempo inverso, não se escolhe o tempo de atuação, mas sim a curva de atuação que é determinada em função das características e condições de coordenação dos demais dispositivos atuantes na proteção.

Os relés eletromecânicos, no intervalo de múltiplos de 1,0 e 1,5, operam com um pequeno conjugado, não produzindo um bom desempenho no fechamento de seus contatos, assim não garantindo uma eficiência na atuação da proteção.

A Figura 1 mostra uma curva típica do relé de sobrecorrente de tempo inverso.

Figura 1- Curva de Tempo Inverso do Relé de Sobrecorrente



Fonte: OLIVEIRA JUNIOR, R. G. (2008).

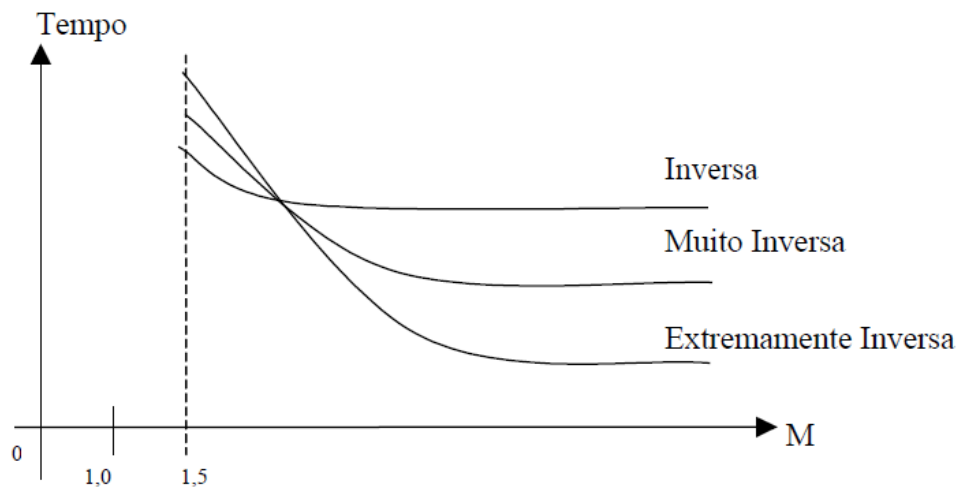
Para evitar que o relé atue entre os múltiplos 1 e 1,5 e obter uma operação adequada e segura do relé, é necessário ajustá-lo de modo a atender as condições expressas em (1).

$$1,5 \times I_{nom. \text{ de carga}} \leq I_{ajuste \text{ do relé}} \leq \frac{I_{CC \text{ mínimo no final do trecho protegido}}}{1,5} \quad (1)$$

Em (1), o fator 1,5 que multiplica a corrente nominal se justifica para que, em possíveis flutuações de carga, o relé não atue indevidamente.

Os relés de sobrecorrente de tempo inverso podem ter diferentes inclinações nas suas curvas. A Figura 2 mostra as denominações das inclinações mais conhecidas. Para uma melhor coordenação da proteção, o ideal seria que todos os relés tivessem a mesma característica de inclinação de curvas (KINDERMAN, 2005).

Figura 2- Diferentes inclinações das curvas de tempo x múltiplo



Fonte: OLIVEIRA JUNIOR, R. G. (2008).

A tabela 1 mostra os valores de  $K$ ,  $\alpha$ ,  $L$  e  $\beta$  que definem os diferentes tipo de curva definida pela norma IEC.

### 2.2.2 Otimização Coordenação de Relés de Sobrecorrente de Tempo Inverso

A principal característica do Relé de Sobrecorrente de tempo inverso é que seu tempo de operação é inversamente proporcional a corrente que passa em seus terminais. Quanto maior a corrente mais rápido o relé irá operar.

Tabela 1-Tipos de curvas em relação aos coeficientes K,  $\alpha$ , L e  $\beta$ .

Norma	Tipo de Curva	K	$\alpha$	L	$\beta$
	Curva Inversa	0,14	0,02	0	1
	Moderadamente Inversa	0,05	0,04	0	1
IEC	Muito Inversa	13,5	1	0	1
	Extremamente Inversa	80	2	0	1

Fonte: KINDERMAN (2008).

Os relés devem obedecer o princípio da seletividade, onde o dispositivo mais próximo a falta antecipa a atuação do dispositivo de proteção de retaguarda. A coordenação de relés é necessária, porque o sistema de proteção também está sujeito a falhas.

Em geral, a coordenação do relé de sobrecorrente em sistemas de potência pode ser definida como um problema de otimização, onde deve ser minimizado o somatório dos tempos de operação dos relés (valor de  $z$ , conforme Equação 2) que compreendem o sistema para uma determinada falta.

$$z = \sum_{p=1}^m W_p \cdot t_{p,k} \quad (2)$$

Em (2)  $m$  indica o total de relés que protegem determinado trecho ou equipamento, sendo  $t_{p,k}$ , 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 (ZEIENLDIN, 2005).

### 2.2.1.1 Restrição e Tempo de Coordenação

Os relés no sistema de proteção devem ser coordenados pelo critério exposto em (3).

$$T_{nk} - T_{ik} \geq \Delta T \quad (3)$$

Onde  $T_{nk}$  é o tempo de operação do relé de retaguarda para o curto-circuito em k,  $T_{ik}$  é o tempo de operação do relé principal para o curto-circuito em k e  $\Delta T$  é o intervalo de coordenação do relé.

Como a operação dos relés exige um tempo mínimo para poder iniciar a sua atuação, o relé deve responder a uma certa restrição, dada por (4).

$$t_{i,k}min \geq t_{i,k} \geq t_{i,k}max \quad (4)$$

Onde  $t_{i,k}min$  e  $t_{i,k}max$  são os tempos mínimo e máximo de operação do relé k para determinada falta (PURANI, 2016).

### 2.2.1.2 Parâmetros considerados para a otimização da coordenação de relés de sobrecorrente

Considera-se que os relés são idênticos, com características normais de tempo mínimo definido inverso (IDMT), que podem ser escritos por (5).

$$t_{op} = TMS \left( \frac{K}{PSM^\alpha - \beta} \right) \quad (5)$$

Substituindo em (5) os valores dos parâmetros do relé adotado,  $t_{op}$  resulta em (6).

$$t_{op} = TMS \left( \frac{0,14}{PSM^{0,02} - 1} \right) \quad (6)$$

Onde  $t_{op}$  é o tempo de operação do relé, TMS é a configuração do multiplicador de tempo referente a cada relé e PSM, o múltiplo da configuração da corrente de curto-circuito dado por (7).

$$PSM = \left( \frac{I_{relé}}{RTC.PS} \right) \quad (7)$$

Em um problema linear o valor de PS pode ser igual a 1, logo, a equação (6) é reduzida em (8).

$$t_{op} = a_p \cdot TMS \quad (8)$$

A constante  $a_p$  do relé em função dos parâmetros da configuração de cada relé pode ser obtida através de (9):

$$a_p = \left( \frac{0,14}{PSM^{0,02} - 1} \right) \quad (9)$$

## 2.3. Métodos de Otimização Estudados

### 2.3.1 Dual Simplex (DS)

A otimização linear consiste na solução de maximização e minimização de uma função linear, definida sobre um domínio descrito por equações e inequações lineares, representadas em (10), (11) e (12), respectivamente.

$$\text{Minimizar } f(x) = c^T x \quad (10)$$

$$\text{Sujeito a: } Ax = b \quad (11)$$

$$x \geq 0 \quad (12)$$

Onde  $A$  é uma matriz  $m \times n$ , e  $x$  um vetor  $n \times 1$  e  $b$  um vetor  $m \times 1$ . A notação  $x \geq 0$  significa que:  $x_j \geq 0$   $j=1, \dots, n$ . A função linear  $f: R^n \rightarrow R$  é chamada função objetivo. Uma solução que satisfaça as restrições  $Ax=b$  e  $x \geq 0$  é dita uma solução possível.

Para resolver um problema de otimização linear, deve-se encontrar uma solução possível ( $x^*$ ) tal que,  $f(x^*) \leq f(x)$  para toda solução possível para  $x$ . Sendo assim, pode-se dizer que  $x^*$  é uma solução ótima (BAZARAA, 1990).

### 2.3.2 Heurísticas

Heurísticas são estruturas algorítmicas, muitas vezes inspiradas na natureza, utilizadas para resolver problemas difíceis e complexos de otimização. Em sua formulação matemática, são consideradas informações incertas, aleatórias e

dinâmicas, fornecendo soluções aceitáveis em um tempo razoável. São projetadas e adaptadas para resolver quase todos os tipos de otimização (BIANCHI, 2009). Em sua grande maioria esses métodos são utilizados para resolver problemas que não podem ser tratados por métodos exatos. Desta forma, o objetivo principal de uma heurística é encontrar soluções ótimas, muitas vezes melhores que as conhecidas, de uma forma muito rápida. Assim, nas Subseções seguintes, são apresentadas as heurísticas utilizadas neste Trabalho.

### **2.3.2.1 Algoritmo Genético (AG)**

O Algoritmo genético foi desenvolvido por John Holland e colaboradores nos anos de 1960 e 1970. Este é um modelo da evolução biológica baseada na teoria da seleção natural de Charles Darwin (YANG, 2010).

O algoritmo genético envolve três passos: O primeiro, consiste na definição de qual será a função para representar o problema. Após essa definição, pode-se acrescentar a parametrização do sistema. Nesse momento, as variáveis devem ser inicializadas, sendo estas o tamanho da população, a quantidade de gerações, a taxa de cruzamento, a taxa de mutação e o tamanho do indivíduo.

O segundo passo diz respeito à geração da população de forma aleatória com a quantidade de indivíduos e seu tamanho determinado em parâmetros. Já o terceiro é analisar o critério de parada, o qual pode ser definido pelo número de gerações estabelecidas.

Os indivíduos selecionados tem a maior probabilidade de participarem do processo de escolha para uma nova geração. O melhor material genético tem maior chance de ser selecionado. Após a escolha, são aplicados os operadores de cruzamento. Quando a condição de término é atendida, o indivíduo mais apto é considerado como o mais forte em que a solução procura (OLIVEIRA JUNIOR, 2008).

### **2.3.2.2 Algoritmo Enxame de Partículas- PSO**

A otimização por enxame de partículas (PSO) é uma técnica de otimização com base populacional aleatória, desenvolvida por Eberhart e Kennedy em 1995 (YANG,

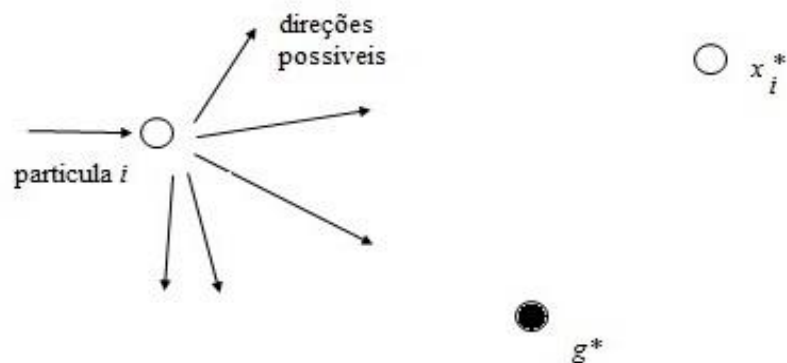
2010). Esse algoritmo é baseado no comportamento da vida de alguns animais, como as aves que andam em bando e nos cardumes de peixes.

O algoritmo desenvolvido através do enxame de partículas ajusta as trajetórias de uma população através de um problema, podendo encontrar uma solução ótima para um dado caso. Dessa forma, o algoritmo consiste em um número de indivíduos (partículas) refinando sua posição em um dado espaço de busca.

As partículas, isto é, as soluções experimentais do problema de otimização, compartilham suas informações umas com as outras e correm em direção a uma melhor trajetória para encontrar a solução ideal em um processo iterativo. Um vetor de velocidade é definido para cada partícula e a posição da partícula depende dessa velocidade (KENNEDY, 1995).

O movimento de uma partícula de enxame se dá em dois componentes principais: um componente aleatório e um componente determinístico. Cada uma dessas partículas é atraída para uma melhor posição atual  $g^*$ . Quando uma partícula encontra um melhor local ela é atualizada como o melhor lugar para a partícula  $i$ . O objetivo é encontrar o melhor resultado possível levando em conta as restrições pré-determinadas ou após um certo número de iterações. O movimento das partículas é mostrado na Figura 3.

Figura 3- Representação esquemática do movimento de uma partícula em PSO.



Fonte: YANG (2010).

Onde  $x_i^*$  é a melhor posição para a partícula  $i$ , e  $g^* \approx \min \{f(x_i^*)\}$  para  $(i = 1, 2, \dots, n)$  é a melhor posição global atual (YANG, 2010).



O PSO começa com uma população aleatória inicial de partículas, onde cada partícula é uma solução possível. A velocidade e a posição das partículas são inicializadas aleatoriamente. Durante o processo de otimização, cada partícula memoriza sua melhor posição, que é chamada de melhor local. Por outro lado, a população memoriza a melhor posição entre todas as melhores posições individuais obtidas, o que é chamado de melhor global. O peso de inércia é linearmente diminuído através do processo de otimização para enfatizar a pesquisa globalmente nas iterações iniciais e localmente nas iterações finais. O algoritmo PSO pode ser descrito nas seguintes etapas:

- Inicializar aleatoriamente  $n$  vetores de posição  $\{X_k(0), k = 1, 2, \dots, n\}$  de cada tamanho  $m$ . Os elementos de  $X_k$  são distribuídos em um intervalo adequado. Posteriormente, iniciar aleatoriamente  $n$  vetores de velocidade  $\{V_k(0), k = 1, 2, \dots, n\}$  com elementos distribuídos entre valores mínimos e máximos. A adequação de cada partícula é avaliada usando uma função objetivo. Além disso, deve-se inicializar o melhor local de cada partícula para sua posição inicial e o melhor global para a melhor adequação entre os melhores locais. Por fim, deve-se inicializar o intervalo dos pesos de inércia  $w(0)$ .
- Cada elemento  $j$  do vetor de velocidade da  $k$ -ésima partícula pode ser atualizado da forma mostrada na equação (13).

$$v_{kj}(t) = w(t)v_{kj}(t-1) + c1r1(x_{kj}^L(t-1) - x_{kj}(t-1)) + c2r2(x_{kj}^G(t-1) - x_{kj}(t-1)) \quad (13)$$

Onde:

$t$  é o número da iteração;

$c1$  é uma constante que controla o tamanho do passo em direção a melhor posição local da partícula;

$c2$  é uma constante que controla o tamanho do passo em direção a melhor posição global encontrada por todo o enxame;

$r_1$  e  $r_2$  são distribuídos uniformemente como números aleatórios no intervalo  $[0, 1]$  para adicionar aleatoriedade às alterações de velocidade,  $x_{kj}(t)$  representa a posição atual da partícula;

$x_{kj}^L$  é a melhor posição da partícula;

$x_{kj}^G$  é a melhor posição global;

$w(t)$  é o peso de inércia para controlar a aceleração da partícula em sua direção original. Menores valores de  $w$  aceleram a convergência para a ótima e maiores valores de  $w$  incentivam a exploração de todo o espaço de busca.

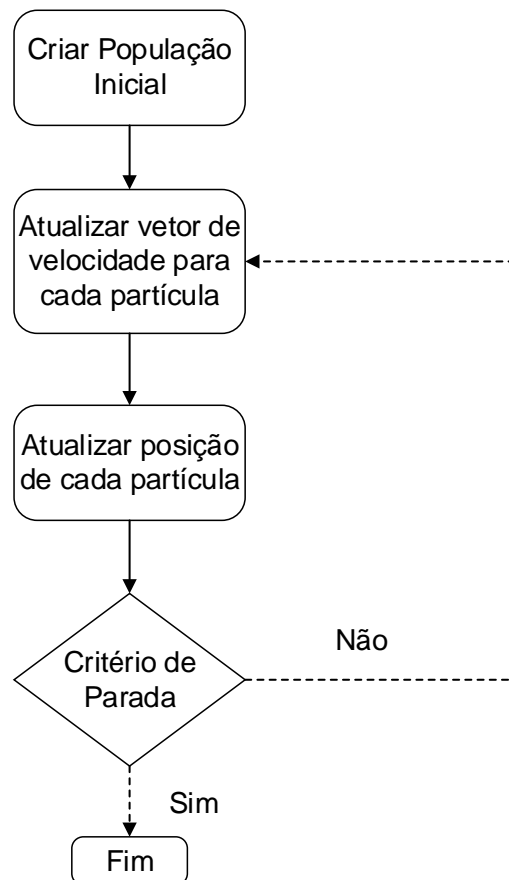
$w(t)v_{kj}(t - 1)$  é o componente de inércia para manter a partícula que se move no mesmo sentido que na iteração anterior.

$c_1r_1(x_{kj}^L(t - 1) - x_{kj}(t - 1))$  é chamado de componente cognitivo e atua como uma memória da partícula fazendo com que ela retorne ao seu melhor local encontrado; e  $c_2r_2(x_{kj}^G(t - 1) - x_{kj}(t - 1))$  é chamado de componente social, pois faz com que a partícula se mova em direção ao melhor global.

- Após atualizar a velocidade de cada partícula, esta é utilizada para a atualização da posição da partícula correspondente como  $x_{kj}(t) = v_{kj}(t) + x_{kj}(t - 1)$ .
- A adequação de cada partícula é avaliada de acordo com a nova posição atualizada. Se a posição atualizada levar a um valor de função objetivo melhor, o melhor local e o melhor global serão atualizados.
- O processo é repetido até que o número de iterações determinado seja alcançado (MOHANDÉS, 2012).

A Figura 4 ilustra o fluxograma do Algoritmo de Enxame de Partículas (PSO).

Figura 4- Fluxograma Algoritmo de Enxame de Partículas (PSO).



Fonte: Elaborado pela autora.

### 2.3.2.3 Algoritmo dos Vagalumes

O *Firefly Algorithm* (FA) foi proposto por Xin-She Yang na Universidade de Cambridge em 2007 (YANG, 2010). Esse algoritmo é baseado na observação da luz do vaga-lume piscando, sendo que, quanto maior o brilho da sua luz, mais vaga-lumes são atraídos.

Dessa forma, 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).

A luz inconstante pode ser formulada de forma a estar associada a função objetivo. A cada iteração, o objetivo é fazer com que os valores convirjam para o ponto que gere o maior brilho, obtido na posição onde a função objetivo apresenta o valor ótimo.

Para a simplificação desse algoritmo usam-se três regras idealizadas:

- Todos os vaga-lumes são unissex assim, um vagalume será atraído para outros vaga-lumes, independentemente de seu gênero;
- A atratividade é proporcional ao seu brilho, portanto, os vagalumes mais brilhantes irão atrair os de menor brilho. A atratividade é proporcional ao brilho e ambos diminuem à medida que a distância aumenta. Se não houver um mais brilhante que o outro, ele se moverá de forma aleatória;
- O brilho de um vaga-lume é afetado por sua aptidão (valor da função objetivo).

A intensidade da luz  $I(r)$  varia de acordo com a lei do quadrado inverso, dada por (14).

$$I(r) = \frac{I_s}{r^2} \quad (14)$$

Em (14)  $I_s$  é a intensidade na fonte. Para um dado meio com um coeficiente  $\gamma$  de absorção de luz, a intensidade da luz  $I$  varia com a distância  $r$ , conforme (15).

$$I = I_0 e^{-\gamma r} \quad (15)$$

Em (15),  $r$  é a distância entre os vaga-lumes,  $\gamma$  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 vagalume é proporcional à intensidade enxergada pelos vagalumes adjacentes, podemos definir a atratividade ( $\beta$ ) como (16).

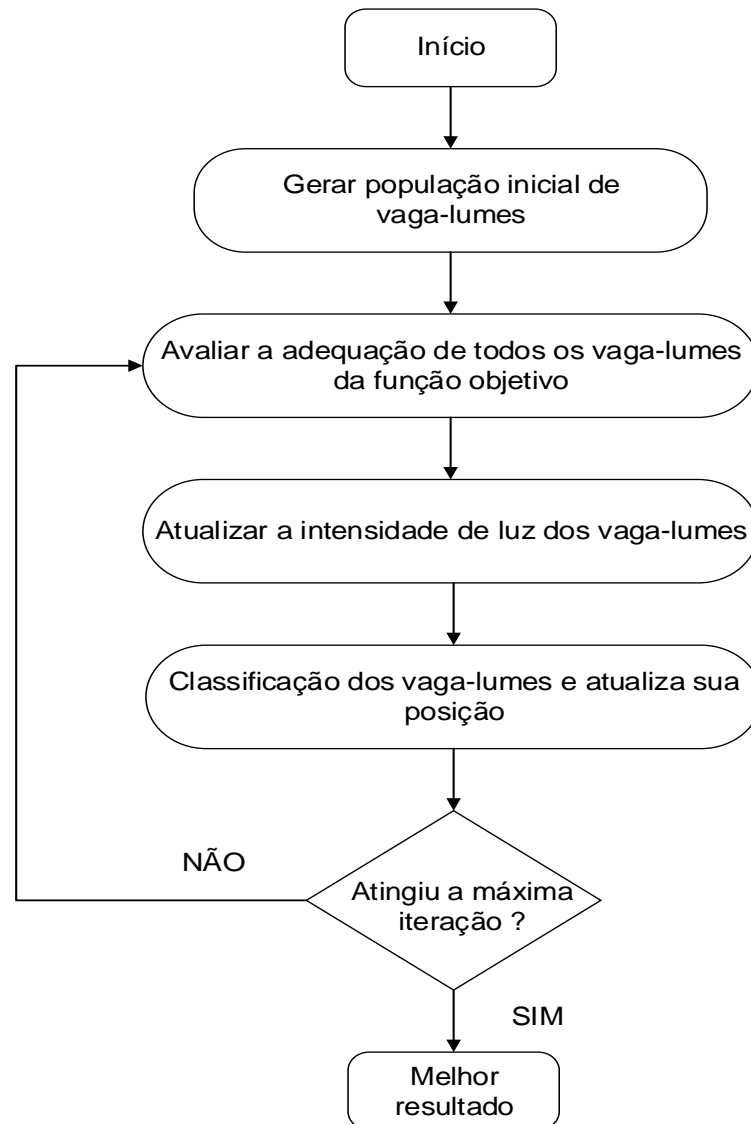
$$\beta(r) = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (16)$$

Onde  $\beta_0$  é a atratividade em  $r=0$ . Assim, a posição de um vagalume  $i$ , atraído por outro vagalume  $j$  no instante  $t+1$ , é dada por (17).

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \beta_0 e^{\gamma r_{ij}^2} (x_j(t) - x_i(t)) + \alpha \left( rand - \frac{1}{2} \right) \quad (17)$$

Onde  $x_i(t)$  é a posição atual do vaga-lume  $i$  e  $\alpha \left( rand - \frac{1}{2} \right)$  é a parcela aleatória do movimento, na qual  $rand$  é um número aleatório entre 0 e 1 e  $\alpha$  é o peso deste movimento. O parâmetro  $\gamma$  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 (YANG, 2010). Na Figura 5 pode ser visto o fluxograma do FA.

Figura 5- Fluxograma Algoritmo dos Vagalumes (FA).



Fonte: Elaborado pela autora.

## **2.4. Considerações Finais**

Neste capítulo, introduziram-se os fundamentos acerca dos relés de sobrecorrente de tempo inverso, bem os conceitos sobre o seu funcionamento, sendo este dispositivo aplicado na proteção do sistema elétrico de potência. O entendimento sobre coordenação torna-se indispensável para a aplicação dos métodos heurísticos apresentados nesse Trabalho.

Dessa forma, o Capítulo seguinte ilustra os sistema teste analisados, bem como suas respectivas funções objetivo e as restrições de cada caso para o problema de otimização da coordenação dos relés envolvidos.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1. Considerações Gerais

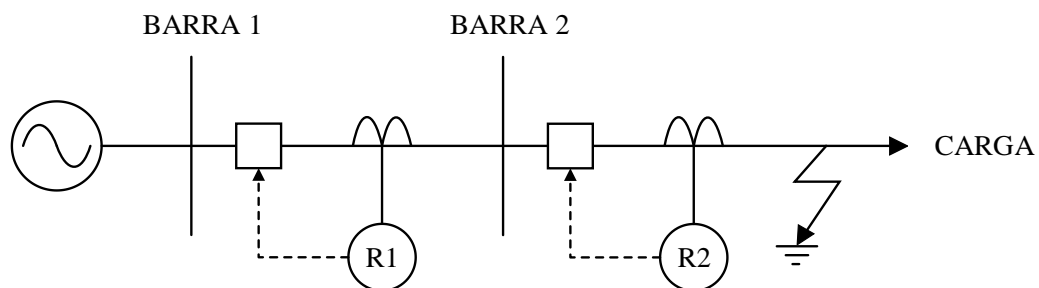
Neste Capítulo, são mostrados os resultados obtidos a partir da simulação dos métodos anteriormente descritos, sendo que suas respostas comparadas entre si.

Para realizar as análises, dois sistemas teste foram utilizados, sendo estes descritos no decorrer do trabalho. Cada heurística aplicada tem seus resultados analisados e comparados com aqueles encontrados na literatura, em relação a sua eficiência em otimizar a coordenação dos relés.

#### 3.2. Caso 1: Sistema Radial com 2 Barras

O diagrama unifilar de um sistema radial simples é ilustrado na Figura 6. Este sistema teste foi exposto em MADHUMITHA et al. (2015), possuindo dois relés de sobrecorrente instalados próximos aos barramentos.

Figura 6- Sistema Teste Radial 2 barras.



Fonte: Adaptado de MADHUMITHA et al. (2015).

Ressalta-se ainda que o sistema radial da Figura 6 é composto por uma fonte de 220kV, 100 MVA. A corrente de falta máxima, logo após o relé R1, é de 2108 A. Após o relé R2, essa corrente é de 1703 A. O intervalo de coordenação dos relés é tomado como 0,57s. A relação dos transformadores de corrente(TCs) em todos os barramentos é igual a 500:2.

A falha do sistema é considerada logo após o relé R2. Nesse caso, este dispositivo deverá atuar como proteção primária. Caso não ocorra a eliminação da falha, a proteção de retaguarda, R1 neste caso, deve atuar. O relé R1 deve operar

após o intervalo de tempo de coordenação, que é a soma do tempo de operação do disjuntor na Barra 2. Esse tempo não deve ultrapassar o valor de 0,2s. Nesse trabalho, o problema de coordenação do relé foi formulado como um problema de programação linear. Portanto, considera-se  $PS$  igual a 1.

O cálculo da constante  $ap$  é feito usando a Equação 9, utilizando os parâmetros da Tabela 1, a qual corresponde ao tipo da curva do relé. Os resultados para este caso são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2- Cálculo da constante  $ap$  referente a cada relé.

	Local da Falta	Relé R1	Relé R2
1	Após a Barra 1	3,213	*
2	Após a Barra 2	7,389	3,579

\* A falta não é detectada pelo relé nesta situação.

Fonte: Elaborado pela autora.

A função objetivo do problema é definida na Equação 18.

$$\min z = 3,213 x_1 + 3,579 x_2 \quad (18)$$

Em (18),  $x_1$  e  $x_2$  são os valores de  $TMS$  do relé R1 e R2, respectivamente, a serem encontrados pelos métodos de otimização.

O problema a ser resolvido é sujeito às restrições de coordenação expostas em (19), (20) e (21).

$$7,381 x_1 - 3,579 x_2 \geq 0,57 \quad (19)$$

$$3,213 x_1 \geq 0,2 \quad (20)$$

$$3,579 x_2 \geq 0,2 \quad (21)$$

O problema de otimização foi resolvido utilizando os algoritmos PSO e o FA, sendo ambos implementados conforme descrito no capítulo anterior. Os resultados foram obtidos a partir de simulações computacionais utilizando a ferramenta Matlab® e foram comparados com os dados encontrados na literatura.



O conceito de otimização por enxame de partículas consiste em, a cada intervalo de tempo, mudar a velocidade de cada partícula em direção às suas localizações mais próximas e ótimas.

Nesse contexto, para o uso do Algoritmo PSO, a geração de partículas foi realizada de maneira aleatória, sendo esse parâmetro é ajustável. O número de partículas foi variado entre 100 e 1000 com passos de 100. A Tabela 3 relaciona os parâmetros utilizados na implementação do PSO.

Tabela 3- Parâmetros do PSO

Parâmetros	Valores
Partículas (P)	1000
Dimensão (D)	2
Cognitivo ( $\varphi_1$ )	2
Social ( $\varphi_2$ )	2
Velocidade Máxima (V <sub>máx</sub> )	5
Critério de Parada (c1)	$10^{-3}$

Fonte: Elaborado pela autora.

Para a utilização do Algoritmo dos Vagalumes, foram fixadas 100 iterações, variando o valor de  $\alpha$  (aleatoriedade),  $\beta$  (atratividade) e  $\gamma$  (velocidade). A população de vagalumes foi variada entre 10 e 150. Os valores ajustados para a melhor solução são mostrados na Tabela 4.

Os valores encontrados para *TMS* dos relés, utilizando os dois algoritmos implementados, bem como aqueles registrados para o Dual Simplex e o Algoritmo Genético (GA), conforme MADHUMITHA et al. (2015), são exibidos na Tabela 5.

Nesse caso, o tempo ideal total de execução dos dois relés foi de 0,5359s para o AG, 0,5378s para o PSO e 0,5348s para o DS e o FA.

Os resultados obtidos mostram que o FA é mais eficiente que as outras abordagens, visto que, à medida que o tempo de operação do relé diminui os danos causados pelas falhas diminuem. Isso é possível concluir, porque o DS retorna a solução ótima do problema.

Tabela 4- Parâmetros utilizados no algoritmo FA.

Parâmetros	Vagalumes	Iterações	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
Valores	100	50	0,5	0,2	0,1

Fonte: Elaborada pelo autora.

Tabela 5- Valores obtidos de *TMS* dos relés para cada Algoritmo.

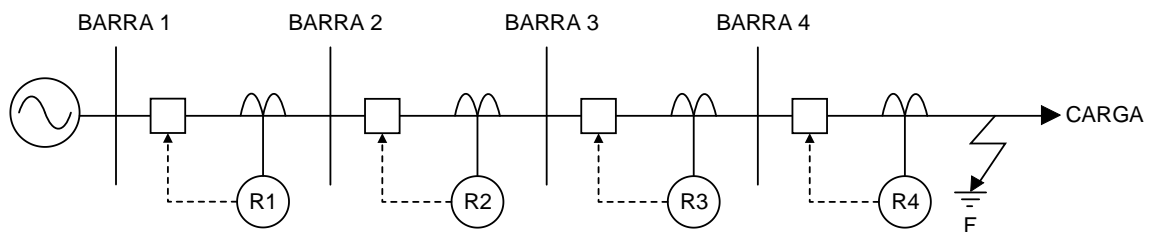
Relé	<i>TMS</i>	AG	DS	PSO	FA
R1	$x_1$	0,1043	0,1043	0,1047	0,1043
R2	$x_2$	0,0561	0,0558	0,0563	0,0558

Fonte: Elaborada pelo autora.

### 3.3. Caso 2: Sistema Radial com 4 Barras

Com a finalidade de testar os algoritmos em um caso mais complexo, foi considerado um circuito radial de quatro barras, conforme mostrado na Figura 7. Este sistema teste também foi exposto em MADHUMITHA et al. (2015).

Figura 7- Sistema Teste Radial 4 barras.



Fonte: Adaptado de MADHUMITHA et al. (2015).

Nesse sistema, faltas podem ocorrer em todos os barramentos. Para faltas após a barra 4, deve-se garantir a seletividade do sistema, ou seja, deve-se garantir que o relé a operar primeiro seja o R4. Caso isso não ocorra, R3 deve servir como proteção de retaguarda após um certo tempo. O mesmo ocorre para uma falha após o barramento 3, onde o relé R3 deve atuar primeiro, sendo o relé R2 a proteção de retaguarda. Por último, se a falha ocorrer no barramento 2, o relé R2 tem que atuar primeiro, sendo que R1 servirá de relé de retaguarda.

Neste estudo de caso, procurar-se minimizar o tempo de coordenação entre os relés R1 e R4. Assim, as relações de transformação (RTC) dos transformadores de

corrente (TCs) de todos os barramentos são de 200:5, sendo que a fonte do sistema é de 66 kV e 100 MVA.

O PSM é calculado com base na máxima corrente de falta e o tempo mínimo de operação. Para ambos os relés, esse parâmetro foi ajustado em 0,2s. Além disso, o valor do intervalo de tempo seletivo (*STI*), mínimo, é 0,57s.

O cálculo de *ap* é feito usando a Equação (9) e os resultados são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6- Cálculo da constante *ap* referente a cada relé.

	Local da Falta	Relé R1	Relé R2	Relé R3	Relé R4
1	Após a Barra 1	2,52	*	*	*
2	Após a Barra 2	2,80	2,74	*	*
3	Após a Barra 3	*	3,49	3,46	*
4	Após a Barra 4	*	*	3,60	3,59

\* A falta não é detectada pelo relé nesta situação.

Fonte: Elaborado pela autora.

Neste caso, o problema de otimização é formulado como (22), sendo  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  e  $x_4$  os valores de ajuste do *TMS* que minimizam o tempo de operação dado por  $z$ .

$$\min z = 2,52 x_1 + 2,74 x_2 + 3,46 x_3 + 3,59 x_4 \quad (22)$$

Esse problema está sujeito às restrições de coordenação descritas nas Equações 23 a 25.

$$2,80 x_1 - 2,74 x_2 \geq 0,57 \quad (23)$$

$$3,49 x_2 - 3,46 x_3 \geq 0,57 \quad (24)$$

$$3,60 x_3 - 3,59 x_4 \geq 0,57 \quad (25)$$

Ainda, as restrições referentes ao tempo mínimo de operação são relacionadas em (26) a (29).

$$2,52 x_1 \geq 0,2 \quad (26)$$

$$2,74 x_2 \geq 0,2 \quad (27)$$

$$3,46 x_3 \geq 0,2 \quad (28)$$

$$3,59 x_4 \geq 0,2 \quad (29)$$

Para a utilização do Algoritmo dos Vagalumes, foram fixados 350 iterações, variando o valor de  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ . A população de vagalumes foi variada entre 10 e 500 com passos de 10. Com base nos testes, a melhor configuração dos valores ajustados é mostrada na Tabela 7.

Tabela 7- Parâmetros utilizados no algoritmo FA.

Parâmetros	Vagalumes	Iterações	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
Valores	400	350	0,2	0,2	0,1

Fonte: Elaborado pela autora.

Os parâmetros do FA podem não mudar no tempo durante as iterações. Dois parâmetros do algoritmo são o coeficiente de atratividade e o coeficiente de aleatoriedade. Esses valores são extremamente importantes para determinar a velocidade da convergência e o comportamento do algoritmo FA.

Para o Algoritmo PSO, a geração de partículas foi realizada de maneira aleatória, sendo esse parâmetro é ajustável. O número de partículas foi variado entre 100 e 1500 com passos de 100. A Tabela 8 relaciona os parâmetros utilizados na implementação do PSO.

Sendo  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  e  $x_4$  os valores de *TMS* os quais encontrados para cada relé são mostrados na Tabela 9. As equações de otimização foram resolvidas usando os algoritmos FA e PSO, sendo seus resultados comparados com aqueles obtidos segundo o Método Simplex e o AG implementado por MADHUMITHA et al. (2015).

O tempo ideal total de execução da proteção de todos os relés atingido pelos métodos de otimização analisados foram de 3,4305s para o AG mostrado na literatura, 3,4488s para o PSO e 3,3905s para o FA e o DS.

Tabela 8- Parâmetros do PSO

Parâmetros	Valores
------------	---------

Partículas (P)	1000
Dimensão (D)	4
Cognitivo ( $\varphi_1$ )	2
Social ( $\varphi_2$ )	2
Velocidade Máxima ( $V_{m\acute{a}x}$ )	5
Critério de Parada ( $c_1$ )	$10^{-3}$

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 9- Valores obtidos de *TMS* dos relés para cada Algoritmo.

Relé	<i>TMS</i>	AG	DS	PSO	FA
R1	$x_1$	0,577	0,568	0,577	0,568
R2	$x_2$	0,379	0,374	0,378	0,374
R3	$x_3$	0,213	0,213	0,217	0,213
R4	$x_4$	0,056	0,055	0,058	0,055

Fonte: Elaborado pela autora.

Com base nesses resultados, pode-se afirmar que todos os algoritmos encontram a solução ótima do problema. Porém, o algoritmo dos vagalumes (FA) alcança a solução ótima com menos tempo de execução, assim como o DS.

Ressalta-se que a função objetivo vista em (22) foi analisada pelo Dual Simplex para que haja uma comparação dos resultados, visto que este se trata de um problema linear, podendo ser resolvido segundo o referido método, retornando o valor ótimo. Assim, os valores obtidos com o DS servem como referência para aqueles obtidos com o FA.

### 3.4. Considerações Finais

Após verificar os resultados apresentados na seção anterior, constatou-se que todas as técnicas de otimização utilizadas encontram as soluções ótimas para os problemas lineares expostos. Porém, os resultados obtidos pelo FA e o DS são muito próximos, apresentando o menor valor para a função custo. Dessa forma, são métodos superiores na minimização do problema proposto, quando comparados ao GA e PSO.

É fundamental enfatizar que o método DS, ao contrário das heurísticas, sempre garante o valor ótimo em um problema de otimização linear. Portanto, sistemas nos

quais é preciso se determinar mais de uma variável não podem ser resolvidos com o DS. O mesmo ocorre com sistemas lineares com muitas variáveis, pois o DS exige um número elevado de cálculos, o que pode tornar a otimização muito difícil.

Já as heurísticas implementadas podem ser utilizadas para sistemas não lineares, precisando informar apenas as restrições e a função objetivo a ser minimizada.

## 4. CONCLUSÕES

### 4.1. Conclusões

Neste trabalho, foram estudadas e implementadas computacionalmente metodologias distintas para a solução do problema da coordenação de relés de sobrecorrente de tempo inverso de Norma. O problema fundamenta-se em ajustar os parâmetros pertencentes aos relés, visando minimizar seus tempos de atuação sem afetar a seletividade, confiabilidade e sensibilidade do sistema de proteção.

Como foi pesquisado na bibliografia, o estudo de coordenação dos relés é frequentemente modelado como um problema de otimização, em que são utilizadas diversas heurísticas para a resolução dos problemas propostos. Assim, foi abordada a utilização de dois algoritmos implementados utilizando a ferramenta Matlab®, sendo esses o PSO e o algoritmo de vagalumes (FA), destinados a resolução do problema de otimização do tempo de operação dos relés de sobrecorrente. Seus desempenhos foram comparados com resultados encontrados na bibliografia. Dois casos foram abordados, a fim de avaliar o desempenho destes algoritmos, em comparação com a resposta obtida através do método Simplex, o qual gera uma solução ótima.

Neste contexto, as metodologias de otimização da coordenação implementadas nesta pesquisa foram capazes de fornecer resultados satisfatórios, quando aplicadas aos sistemas teste considerados, sem infringir as restrições do respectivo problema. Também, pôde-se observar que os valores encontrados são muito próximos ao valor mínimo que soluciona o problema segundo a resposta do DS. Os resultados obtidos mostram a possibilidade de alcançar soluções de qualidade igual ou superior quando comparados aos estudos já realizados e disponíveis na literatura.

Por fim, tendo em vista os resultados obtidos, pode-se concluir que, para os sistemas testes analisados, todos os algoritmos mostrados anteriormente alcançam as soluções ótimas para a coordenação de relés de sobrecorrente de tempo inverso, em problemas onde a otimização é tratada como um problema linear.

## **4.2. Sugestões para Trabalhos Futuros**

Como sugestões para a continuação deste trabalho, citam-se:

- Testar as metodologias implementadas para outros sistemas teste;
- Implementar outras heurísticas e comparar seus resultados; e
- Aplicar os métodos de otimização em problemas não lineares de coordenação de relés de sobrecorrente e avaliar as respectivas respostas.



## REFERÊNCIAS

AMJADY N, REZAI H.S. **Daily Hydrothermal Generation Scheduling by a new Modified Adaptive Particle Swarm Optimization technique**. Electric Power Systems Research, Vol. 80 n°6, pp.723-732, Junho 2010.

ANDERSON, P. M. **Power System Protection**. Nova Iorque, EUA: IEEE Press, 1998.

BAZARAA, M.S.; JARVIS, J.J. & SHERALI, H.D. **Linear Programming and Network Flows**. 2 nd Ed., Wiley, New York, 1990.

BIANCHI, L., DORIGO, M., GAMBARDELLA, L.M. *et al.* **A survey on metaheuristics for stochastic combinatorial optimization**. Natural Computing (2009).

BIRLA, D.; MAHESHWARI, R. P.; GUPTA, H. O. **A New Nonlinear Directional Overcurrent Relay Coordination Technique, and Banes and Boons of Near-End Faults Based Approach**. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 21, no.3, pp. 1176-1182, 2006.

CHAITANYA, A. V. K., JINKA ROHIT, and OV GNANA SWATHIKA. **Optimum coordination of overcurrent relays in distribution systems using differential evolution and dual simplex methods**. Computing Methodologies and Communication (ICCMC), 2017 International Conference on. IEEE, 2017.

CORRÊA, Rafael. **Otimização de Coordenação de Relés de Sobrecorrente Direcionais em Sistemas Elétricos de Potência Utilizando a Programação Inteira Binária**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

GOKHALE, S. S., and V. S. KALE. **Application of the Firefly algorithm to optimal over-current relay coordination**. Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), International Conference on. IEEE, 2014.

HOROWITZ S.H; PHADKE, A. G. **Power System Relaying**. 3ª edição, Research Studies Press Limited e John Wiley & Sons Ltd., Inglaterra, 2008.

HUSSAIN M. H., MUSIRIN I., ABIDIN A. F. **Directional overcurrent relay coordination problem using Modified Swarm Firefly Algorithm considering the effect of population size.** IEEE 8th International Power Engineering and Optimization Conference, 2014.

KENNEDY, J., EBERHART R. **Particle Swarm Optimization.** Proc. IEEE Int.Conf. Neural Networks IV, pp. 1942-1948, 1995.

KINDERMANN, G. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência.** Vol 1, 2ª Edição, UFSC, Santa Catarina, 2005.

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.

MANSOUR, M. M.; MEKHAMER, S. F.; EL-KHARBAWE, N. E. **A modified particle swarm optimizer for the coordination considering the Priority of Constration.** IEEE Transactions on Power Delivery, vol 26, nº 3, pp. 1857-1863, 2009.

MOHANDES, M.A. **Modeling global solar radiation using particle swarm optimization (PSO).** Sol Energy, Vol. 86 nº11, pp.3137-3145, Novembro 2012.

OLIVEIRA JUNIOR , R, G. **Coordenação de relés de sobrecorrente em sistemas radiais utilizando Algoritmo Genético.** Trabalho Conclusão de Curso, Escola Politécnica/ UFRJ, 2008.

PURANI, V. S, GANDHI, S.N. **Optimal over current relay co-ordination using Firefly Algorithm in Electrial Network: A nature inspired approach.** International Conference on. IEEE, 2016.

RAZAVI, F.; ABYANEH, H. A.; AL-DABBAGH, M.; MOHAMMADI, R.; TORKAMAN, H. **A new comprehensive genetic algorithm method for optimal overcurrent relays coordination.** Electric Power Systems Research. Vol. 78, pp. 713-720,2008.

SADEH,J.; AMINTOJJAR, V.; BASHIR, M. **Coordination of overcurrent and distance relays using hybrid particle swarm optimization.** International Conference on advanced power system automation and protection, pp. 1130-1134, Beijin 2011.

YANG, XIN-SHE. **Nature-inspired metaheuristic algorithms.** Luniver press, 2010.

ZEIENLDIN, H., E. F. EL-SAADANY, and M. A. SALAMA. **A novel problem formulation for directional overcurrent relay coordination.** Power Engineering, 2004. LESCOPE-04. 2004 Large Engineering systems Conference on. IEEE, 2004.

ZEINELDIN, H. H.; EL-SAADANY, E. F.; SALAMA, M. M. A. **Optimal coordination of overcurrent relays using a modified particle swarm optimization.** Electric Power Systems Research. Vol. 76. 988-995, 2006.