



# Estudo do Firefly Algorithm e aplicações em sistemas elétricos de potência

Aluno: Lucas Amaral Gigo

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto de Castro Jr

## 1. Justificativa

O sistema elétrico de potência consiste na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. As perdas de potência ativa referem-se à parcela da potência ativa gerada e que é dissipada pelas linhas de transmissão e redes de distribuição, não chegando a ser comercializada.

O transporte da energia, seja na transmissão ou na distribuição, resulta inevitavelmente em perdas técnicas relacionadas à transformação de energia elétrica em energia térmica nos condutores (efeito joule), perdas nos núcleos dos transformadores, perdas dielétricas etc [1].

Uma das ações de controle para redução das perdas de potência ativa na distribuição consiste na redução de fluxos de energia reativa nas redes, através da instalação e controle adequado de fontes de potência reativa, como por exemplo os capacitores. Quando bem sucedidas, essas iniciativas proporcionam, além da redução de perdas, melhoras nos níveis de tensão dos alimentadores e aumento da capacidade útil das redes. A escolha dos melhores locais para instalação de capacitores, fixos ou chaveados (isto é, com possibilidade de fornecer níveis diferentes de potência reativa), e suas respectivas capacidades, é realizada nos procedimentos de planejamento. Metodologias para definir os melhores locais para instalação e dimensionamento de capacitores vêm sendo estudadas desde a década de 50 [2], visto que uma má seleção destes parâmetros pode acarretar em um impacto negativo no comportamento do sistema.

## 2. Objetivo

Este trabalho de iniciação científica objetivou iniciar os estudos visando a utilização do Firefly Algorithm (FA) em aplicações relacionadas a sistemas elétricos de potência. Para isso, foram imprescindíveis estudos e conhecimentos detalhados do FA propriamente dito. Desta forma, os objetivos dessa iniciação científica foram:

- Realizar um estudo detalhado do FA a partir de referências básicas
- Aplicar o FA para problemas de otimização simples
- Estudo detalhado sobre o cálculo de fluxo de carga, ferramenta fundamental na resolução do problema proposto, e familiarização com o software Matpower.
- Aplicação do FA para a resolução do problema de alocação ótima de bancos de capacitores em sistemas elétricos, bem como análise crítica dos resultados obtidos.

## 3. Metodologia

Nesta seção serão apresentados dados relevantes sobre o funcionamento o funcionamento geral do FA e como ele foi adaptado ao problema de alocação de capacitores em sistemas de potência.

### 3.1 Firefly Algorithm – Conceitos

#### A. Comportamento dos vaga-lumes

A luz emitida pela maioria dos vaga-lumes pode ser observada apenas em um certo raio de distância, de forma que os vaga-lumes conseguem se comunicar entre si. Conforme a distância aumenta, a intensidade da luz tende a diminuir, de acordo com o inverso do quadrado da distância. Dada uma intensidade de luz ( $I$ ), seu módulo diminui ou aumenta conforme varia a relação  $1/r^2$ , onde  $r$  é a distância entre dois vaga-lumes.

Segundo o que registrou Yang em seu estudo sobre o comportamento dos vaga-lumes [3], algumas regras básicas precisam ser seguidas, sendo: (a) todos os vaga-lumes se atraem, independente do sexo; (b) a atratividade de um vaga-lume é proporcional ao seu brilho, ou seja, quanto mais brilho ele emite, mais vaga-lumes irá atrair. Além disso, como a intensidade de brilho depende da distância, a atratividade diminui proporcionalmente à distância. O brilho de cada um dos vaga-lumes é influenciado e determinado pelo valor da função objetivo.

No FA, a função objetivo no problema de otimização se baseia na diferença de intensidade da luz dos vaga-lumes, que se movem na direção do vaga-lume com maior brilho, a fim de se obter a solução ótima.

Cada vaga-lume muda de posição a cada iteração e sua intensidade de luz está associada com a função objetivo.

A intensidade do brilho de cada vaga-lume ( $I$ ) é proporcional ao valor da função objetivo ( $f$ ). Desta forma, temos que  $I(x) \propto f(x)$ . A atratividade ( $B$ ) é relativa e proporcional à intensidade de luz observada pelos vaga-lumes adjacentes e varia conforme a distância ( $r_{ij}$ ) entre os vaga-lume  $i$  e o vaga-lume  $j$ .

A intensidade da luz diminui quando aumenta a distância de sua fonte e também ocorre a absorção pelo ar, fazendo com que a atração varie conforme o grau de absorção. Na forma mais simples, a intensidade da luz  $I(r)$  varia inversamente ao quadrado da distância, com um coeficiente de absorção de luz ( $\gamma$ ) fixo, que controla a redução da intensidade da luz. Pode-se ver essa relação na equação (1), onde  $I_0$  é a intensidade inicial da luz.

$$I(r) = I_0 \cdot e^{-\gamma r} \quad (1)$$

Analogamente, cada vaga-lume tem um parâmetro de atração que é descrito pela função decrescente da distância  $r$  entre dois vaga-lumes quaisquer, no qual  $B_0$  denota a máxima atratividade em  $r = 0$ .

$$B(r) = B_0 \cdot e^{-\gamma r^m}, \quad m \geq 1 \quad (2)$$

## B. Trajetória de movimento e distância

A distância entre dois vaga-lumes  $i$  e  $j$  nas posições  $x_i$  e  $x_j$ , respectivamente, são calculadas utilizando o método cartesiano:

$$r_{ij} = \|x_i - x_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_{i,k} - x_{j,k})^2} \quad (3)$$

onde  $x_{i,k}$  é o  $k$ -ésimo componente da coordenada espacial  $x_i$  do  $i$ -ésimo vaga-lume e  $d$  denota o número de dimensões. Para duas dimensões, temos:

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 - (y_i - y_j)^2} \quad (4)$$

A trajetória de movimento de um determinado vaga-lume  $i$ , levando-se em conta que ele é atraído por outro vaga-lume mais brilhante, é dado por:

$$x_i = x_i + \beta_0 \cdot e^{-\gamma r_{ij}^2} \cdot (x_j - x_i) + \alpha \cdot \left(\epsilon_i - \frac{1}{2}\right) \quad (5)$$

onde o segundo termo do lado direito da equação se deve à atração entre os vaga-lumes  $i$  e  $j$ , e o terceiro termo se refere à randomização com o vetor de variáveis aleatórias  $\epsilon_i$ , sendo extraídas de uma distribuição gaussiana [3].

## 3.2 – FA aplicado a problemas de otimização simples

A figura 1 mostra o algoritmo base utilizado em todos os problemas que envolvem o FA [3].

---

**Algorithm 1** Firefly Algorithm

---

```

1: Função objetivo  $f(x)$ ,  $x=(x_1, \dots, x_d)^T$ 
2: Gerar população inicial de vaga-lumes  $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 
3: Intensidade da luz  $I_i$  em  $x_i$  é determinada por  $f(x_i)$ 
4: Definir o coeficiente de absorção do ar,  $\gamma$ 
5: while  $t <$  número de gerações do
6:   for  $i=1:n$  todos os  $n$  vaga-lumes do
7:     for  $j=1:i$  todos os  $n$  vaga-lumes do
8:       if  $(I_j > I_i)$  then
9:         Mover vaga-lume  $i$  em direção ao  $j$  na dimensão  $d$ 
10:      end if
11:      Atratividade varia com a distância  $r$  via  $\exp(-\gamma r)$ 
12:      Avaliar novas soluções e atualizar a intensidade da luz
13:    end for
14:  end for
15:  Rankear os vaga-lumes e encontrar o melhor atual
16: end while
17: Processar os resultados e exibi-los

```

---

Figura 1 – Algoritmo básico do Firefly Algorithm.

Fonte: [3].

### 3.3 – Firefly Algorithm adaptado ao problema do fluxo de carga

O estudo do fluxo de carga (FC) consiste em obter as condições de operação de sistemas elétricos de potência em regime permanente. A partir de seus resultados, conseguimos determinar as potências injetadas nos barramentos do sistema e calcular grandezas como tensão e corrente.

Conforme as conclusões do estudo do FC, podemos modificar, seguindo certas restrições, os valores de tensão das barras e as demais grandezas de operação da rede, com o objetivo de obter melhores condições de operação para o sistema.

A alocação ideal de capacitores é descrita como o processo de encontrar o número, localização e tamanho ideais e relevantes de modo que todas as vantagens sejam obtidas e ao mesmo tempo as restrições das redes sejam satisfeitas. Desta forma, temos um problema não convexo, discreto e de otimização não linear.

Neste trabalho, a perda total de potência ativa de uma rede radial é considerada a função objetivo que se deseja minimizar. Desta forma,

$$\min f(x) = P_{t,loss} \quad (6)$$

Para a resolução do problema de minimização de perdas na rede através da alocação do capacitor ótimo à rede de distribuição, adaptou-se o FA, de modo que esse pudesse encontrar a posição ótima do capacitor na rede para minimizar as perdas. Foram seguidas as regras apresentadas em 3.1 de forma adaptada e o algoritmo apresentado em 3.2.

#### A. Intensidade da luz e atratividade

Para o nosso caso, como temos  $F_{obj} = P_{t,loss}$ , proporcionalmente, temos que o brilho de um vaga-lume é inversamente proporcional a isso, se tornando mais chamativo conforme menor a perda que total da rede que ele proporciona. Além disso, como se trata de uma primeira análise, consideramos a absorção do ar  $\gamma = 1$  e a atratividade dos vaga-lumes  $\beta_0 = 1$ .

#### B. Distância e trajetória de movimento

No firefly algorithm adaptado para a resolução do problema de minimização de perdas de potência ativa na rede através da alocação de um capacitor, a posição de cada vaga-lume foi estabelecida como sendo um número inteiro, representando o número da barra no sistema de distribuição em que o vaga-lume está posicionado. Esta posição é feita de forma aleatória na inicialização do programa e o número de vaga-lumes é proporcional ao número de nós terminais da mesma, além de nunca começarem numa mesma barra. A distância entre um vaga-lume de menor brilho  $x_i$  e o vaga-lume mais brilhante  $x_j$  é dado pelo número de linhas de distribuição do caminho mais curto ( $d_{min(i,j)}$ ) entre as barras em que estes vaga-lumes em questão estão localizados. O passo dos vaga-lumes é sempre dado por um número aleatório inteiro entre 0 e  $|d_{min(i,j)}|$  de modo que, para cada movimentação dele e posicionamento em uma nova barra, executa-se o fluxo de carga para uma nova avaliação das perdas de potência desta nova configuração.

Na figura 2 pode-se ver o diagrama unifilar de uma rede radial fictícia. O caminho em amarelo é a menor distância entre o vaga-lume  $j$  (mais brilhante) que está na barra 7 e o vaga-lume  $i$  que está na barra 4. Desta forma,  $d_{min(i,j)} = 4, 3, 2, 7$  e  $|d_{min(i,j)}| = 4$ .

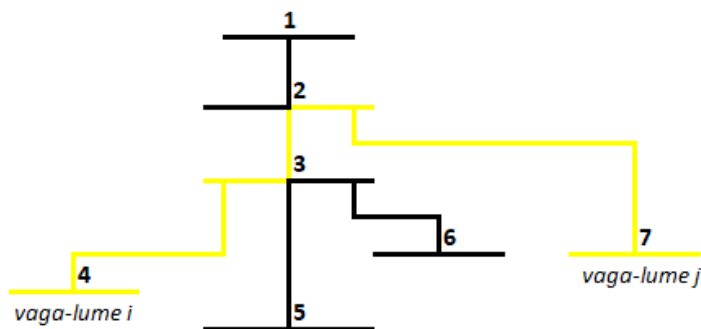


Figura 2: Rede radial fictícia. Destacado em amarelo o menor caminho entre o vaga-lume  $i$  e o vaga-lume  $j$

### 3.6 – Aplicação do Firefly Algorithm adaptado

A implementação do algoritmo foi feita de acordo com o algoritmo inicial (figura 1) utilizando o Matlab e o MATPOWER – pacote de dados sobre redes de distribuição de energia elétrica - encontrando o estado da rede após resolver o fluxo de carga com os vaga-lumes nas barras.

O algoritmo adaptado foi utilizado em duas redes, uma de pequeno porte e uma de porte médio, tendo, respectivamente, 6 e 33 barras. Na tabela 1 e figura 3 podemos ver características da rede de 6 barras extraídas do MATPOWER.

Ramo		Parâmetros		Carga	
de	para	r [Ω]	x [Ω]	P [kW]	Q [kVAR]
1	2	0,002	0,0005	0,50	0,10
2	3	0,002	0,002	1,50	0,20
3	4	0,002	0,002	5,00	2,00
2	5	0,3	0,05	0,50	0,30
2	6	0,02	0,02	1,20	0,50

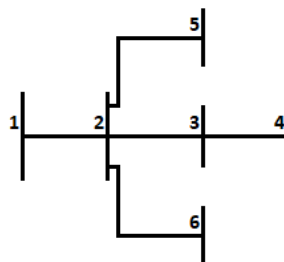


Tabela 1 – Dados para a rede de 6 barras

Figura 3 – Diagrama Unifilar da rede de 6 barras

### 4. Resultados obtidos

Nesta seção serão mostrados os resultados obtidos nas redes sem o capacitor, os resultados dos testes exaustivos com a conexão dos capacitores e as soluções apresentadas pós aplicação do FA.

#### Rede de 6 barras

Rodando o fluxo de carga, sem capacitor, a rede de 6 barras tem 57.9426 MW de perdas. Fazendo o teste exaustivo, conseguimos plotar o gráfico 1, que nos mostra as perdas da rede ao colocar o capacitor de 30 MVAR na barra  $i$ , onde  $i = 1,2,3,4,5,6$ .

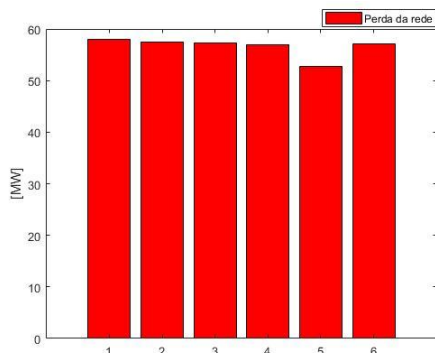


Gráfico 1: Perdas da rede para capacitor alocado em cada barra

A barra 5 é dada como a posição ótima para se conectar o capacitor, apresentando uma perda de 52.77 MW. Já com o firefly algorithm adaptado, colocando um vaga-lume nas barras 1, 5 e 6, após 6 iterações, todos os vaga-lumes foram atraídos para a barra 5. Podemos ver no gráfico 2 a evolução da função objetivo com o passar das iterações.

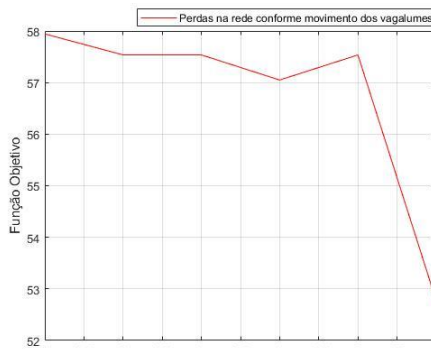


Gráfico 2: Função Objetivo x Iterações

### 4.3 – Ajustes a partir dos resultados

Conforme o algoritmo foi sendo rodado, fomos encontrando algumas características que eram indesejadas. Apesar de o FA sempre achar o ótimo local, esse nem sempre representava o ótimo global do sistema. Para resolver isso, foram implementadas duas adaptações para resolver o problema: (1) um mecanismo onde o vaga-lume de maior brilho verifica sua vizinhança e, caso esta tenha um maior brilho, ele se desloca em direção a ela, e (2) os vaga-lumes comecem a dar um passo menor, entre 0 e  $\frac{|dist_{\min(i,j)}|}{2}$ , a fim de passar por um maior número de barras possível.

Acredita-se que a adaptação das distâncias dos vaga-lumes de uma distância cartesiana para uma distância baseada na disposição das barras tenha causado esse efeito indesejado. Uma possível solução que poderia ser investigada para resolver esse problema seria utilizar as distâncias elétricas entre as barras, dado esse que pode ser extraído do MATPOWER, através da matriz impedância da rede.

### 5. Conclusões

O firefly algorithm se mostrou uma técnica eficiente para se resolver problemas de otimização, além de ser um método bem simples e de fácil implementação.

Durante o trabalho de pesquisa, esse método foi explorado e utilizado com sucesso num primeiro momento para a resolução de problemas simples de otimização não-linear.

Além disso, como proposta passos futuros, fazer com que, além de detectar a melhor barra para alocação do capacitor, o algoritmo possa reconhecer também o melhor valor de potência que esse capacitor. Com isso, o algoritmo será mais robusto e ainda mais útil.

Foi uma experiência incrível, apesar de bastante desafiadora, criar do zero um programa em MATLAB. Antes da iniciação científica eu nunca tinha usado esse programa e, graças a ela, aprendi muito mais do que pensei ser capaz. De longe, hoje, é a linguagem de programação que eu mais me sinto à vontade em programar e sinto que é só o começo.

### 6. Referências

[1] Disponível em <<https://www.aneel.gov.br/informacoes-tecnicas>> Acesso em: 20 de Setembro de 2018

[2] J.F.V.González, Redução de perdas em redes primárias de distribuição de energia elétrica por instalação e controle de capacitores, Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica), Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação – Unicamp, 2003

[3] X.S. Yang, Firefly algorithm, stochastic test functions and design optimisation, Int. J. Bio-Inspired Computation, 2010.