

Reconfiguração de Redes de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando Metaheurística Colônia de Formigas Modificada

Huilman S. Sanca¹, Niraldo R. Ferreira¹, Benemar A. Souza²

¹Departamento de Engenharia Elétrica – Universidade Federal da Bahia (UFBA)
Rua Aristides Novis, 02, Federação, 40210-630 – Salvador – BA – Brasil

²Departamento de Engenharia Elétrica Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)
Av. Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, 58429-900 – Campina Grande – PB – Brasil

huilman.sanca@gmail.com, niraldo@ufba.br, benemar@dee.ufcg.edu.br

Abstract. *This paper introduces a modified ant colony optimization algorithm (ACO) to solve the optimal reconfiguration problem of electric power distribution network. This optimization problem is nonlinear, combinatorial. In cooperation, ants find the shortest paths between the nest and a food source by using an indirect mechanism of communication. Seeking to improve the performance of the algorithm we will use a elitism technique in the process of convergence. The method was applied to a 69 buses distribution feeder.*

Keywords. *Reconfiguration, ant colony, elitism, distribution network, active losses, radial load flow.*

Resumo. *Neste artigo apresenta-se um algoritmo colônia de formigas (ACO) modificada para resolver o problema de reconfiguração ótima de redes de distribuição de energia elétrica. Este problema de otimização é não linear e de natureza combinatoria. Em cooperação as formigas descobrem os menores caminhos entre o formigueiro e uma fonte de alimento usando um mecanismo de comunicação indireta. Visando melhorar o desempenho do algoritmo proposto foi dotado de uma técnica de elitismo no processo da convergência. O método foi aplicado a um alimentador de 69 barras.*

Palavras Chaves. *Reconfiguração, colônia de formigas, elitismo, rede de distribuição, perdas ativas, fluxo de carga radial.*

1. Introdução

Os sistemas de distribuição de energia elétrica devem operar de forma confiável e econômica, respeitando os parâmetros de qualidade da energia. O problema da reconfiguração consiste em encontrar outra configuração radial que apresente o menor valor de perdas de potência ativa do sistema melhorando o perfil de tensão nas barras. A reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica é levada a efeito operando-se chaves existentes de modo que a topologia da rede seja alterada para que haja transferência de cargas de um alimentador fortemente carregado para outro, relativamente, menos carregado.

Reconfiguração de redes é um problema de otimização combinatoria não diferenciável [Ching-Tzong et al. 2005]. Devido ao elevado número de combinações necessárias, metaheurísticas têm sido empregadas para resolvê-lo. Diferentes métodos

e técnicas de inteligência artificial têm sido aplicados a reconfiguração de redes. Em [Lin et al. 2000], utiliza algoritmos genéticos. Em [Jeon et al. 2002], [Parada et al. 2004], os autores propuseram a aplicação do algoritmo de têmpera simulada (*simulated annealing algorithm*). Em [Olamaei et al. 2007], [Lu et al. 2009], obtém-se a solução do problema mediante o algoritmo de nuvem de partículas (*Particle Swarm Optimization*).

O algoritmo colônia de formigas foi aplicada pela primeira vez ao problema clássico do caixeiro viajante, *Traveling Salesman Problem (TSP)* [Dorigo and Stutzle 2004]. O algoritmo colônia de formigas é inspirado no comportamento das formigas reais, em particular, como é conhecido, as formigas reais são capazes de encontrar o caminho mais curto a partir do formigueiro para a fonte de alimento sem a utilização de sinais visuais, o meio de comunicação das formigas ocorre mediante uma substância química depositada por elas chamada de feromônio.

Neste artigo, se propõe um método ACO modificado que emprega regras de atualização global e local de feromônio, para efeito de melhoramento de seu desempenho. Com a finalidade de demonstrar a eficácia do algoritmo é aplicada para reconfigurar um alimentador de 69 barras apresentado em [Chiang and Jean-Jumeau 1990], e que consta de 69 barras e 73 ligações, fornecendo bons resultados.

2. Formulação do Problema

2.1. Formulação do problema de reconfiguração de redes para o ACO Elitista

A reconfiguração de redes pode ser formulado como um problema de otimização não linear mista, de variáveis inteiras e reais, cuja expressão é a seguinte:

$$\text{Minimize } f(x) = P_{T,Perdas} = \sum_{i=1}^{N_B-1} P_{perdas}(i, i+1) \quad (1)$$

Sujeito as restrições:

1. de fluxo de carga;
2. limites de corrente nos trechos:

$$|I_j| \leq I_{j,max}; \forall j, j \in N_T \quad (2)$$

3. configuração radial da rede.

$P_{T,perdas}$ é a perda de potência total do sistema, $|I_i|$ e $I_{i,max}$ são a amplitude da corrente e o limite máximo de corrente em cada trecho i , respectivamente, N_B é o número de barras e N_T é o número de trechos do sistema.

O problema de otimização com restrições expresso em (1), pode ser convertido num problema de otimização irrestrito cuja função objetivo incorpore a restrição de corrente máxima nos trechos [Lin et al. 2000].

$$\text{Minimize } f(x) = \sum_{i=1}^{N_B-1} P_{perdas}(i, i+1) + \sum_{j=1}^{N_T} \lambda_I (I_j - I_{j,max})^2 \quad (3)$$

sendo λ_I um fator de penalidade com respeito à corrente admissível no trecho.

2.2. Cálculo das perdas

O cálculo das perdas de potência é parte do problema do fluxo de carga, que aqui é resolvido empregando-se o método da soma de potência (MSP). O MSP, é um método iterativo nas variáveis de perdas de potência ativa e reativa do tipo *forward - backward* [Haque 2000]. Os valores absolutos das tensões das barras são calculadas sequencialmente no sentido das subestações para as barras terminais (*forward*). As potências dos trechos são calculados sequencialmente no sentido das barras terminais para as subestações (*backward*). Para o cálculo de um trecho ($i, i+1$). Referido à Figura 1, podem-se escrever estas equações como em [Haque 2000]:

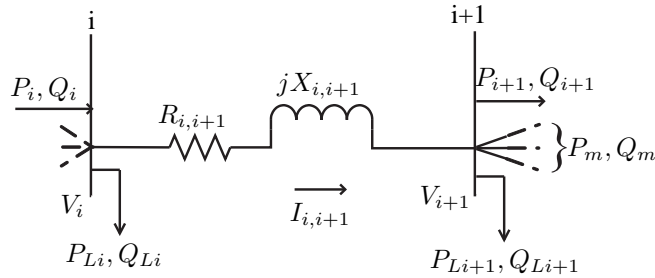


Figura 1. Trecho de uma rede de distribuição simples.

$$P_i = P_{i+1} + P_{Li+1} + R_{i,i+1} \left[\frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2} \right] \quad (4)$$

$$Q_i = Q_{i+1} + Q_{Li+1} + X_{i,i+1} \left[\frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2} \right] \quad (5)$$

$$|V_{i+1}|^2 = |V_i|^2 - 2(R_{i,i+1}P_i + X_{i,i+1}Q_i) + (R_{i,i+1}^2 + X_{i,i+1}^2) \frac{(P_i^2 + Q_i^2)}{|V_i|^2} \quad (6)$$

sendo P_i e Q_i são os fluxos de potência ativa e reativa no trecho entre as barras i e $i + 1$, respectivamente. P_{Li} e Q_{Li} são as potências ativa e reativa das cargas instaladas na barra i , respectivamente. A resistência e a reatância do trecho entre as barras i e $i + 1$, são indicadas por $R_{i,i+1}$ e $X_{i,i+1}$, respectivamente.

Uma expressão alternativa à (6) é:

$$|V_{i+1}| = \sqrt{A + \sqrt{A^2 - B}}, \quad (7)$$

sendo:

$$A = \frac{|V_i|^2}{2} - (R_{i,i+1}P_i + X_{i,i+1}Q_i)$$

e

$$B = (R_{i,i+1}^2 + X_{i,i+1}^2)(P_i^2 + Q_i^2).$$

A perda de potência ativa no trecho é dada por:

$$P_{perdas}(i, i + 1) = R_{i,i+1} \frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2}. \quad (8)$$

A perda de potência ativa total do sistema $P_{T,Perdas}$, é a soma das perdas de potência ativa de todos os trechos do sistema:

$$P_{T,Perdas} = \sum_{i=1}^{N_B-1} P_{perdas}(i, i+1). \quad (9)$$

3. Algoritmo Colônia de Formigas

3.1. O comportamento da colônia de formigas

O algoritmo colônia de formigas, ACO, é uma metaheurística inspirada nas formigas reais [Dorigo and Stutzle 2004], [Ding and Loparo 2012].

Na busca por alimento as formigas inicialmente se movimentam sem orientação tomando decisões com base em critérios individuais. Mais tarde, as formigas que escolheram o caminho mais curto entre o formigueiro e a fonte de alimento completarão suas expedições mais rapidamente. Isto fará que mais formigas escolham o menor caminho devido à maior concentração de feromônio. No fim, todas as formigas irão escolher o mesmo caminho devido à atualização constante do feromônio. Este comportamento mostra o paradigma fundamental do algoritmo de busca por colônia de formigas.

3.2. Escolha pseudo-aleatória das ligações

Trazendo o modo natural das formigas descobrir e coletar alimentos para resolver o problema da reconfiguração de redes se pode imaginar o seguinte: a formiga escolhe a barra seguinte a ser visitada com base em seu próprio conhecimento que tem da rede (resistência das ligações entre a barra onde ficou a formiga e as barras vizinhas a ela) e no conhecimento coletivo (quantidade de feromônio depositado nas ligações durante o percurso). O conhecimento coletivo é cumulativo, sendo alterado sempre que uma nova configuração radial se completa. A probabilidade de uma das ligações vizinhas vir a ser escolhida por uma formiga é dada pela expressão:

$$Prob_{(i,j)} = \begin{cases} \frac{[\tau_{(i,j)}]^\alpha [\eta_{(i,j)}]^\beta}{\sum_{m \in J_{K(i)}} [\tau_{(i,m)}]^\alpha [\eta_{(i,m)}]^\beta} & \text{se } \forall j \in J_{K(i)}; \\ 0 & \text{se } \forall j \notin J_{K(i)}, \end{cases} \quad (10)$$

sendo τ a quantidade de feromônio na ligação escolhida (i, j) , cuja resistência é $1/\eta_{(i,m)}$. α e β são os pesos do grau de atratividade e a visibilidade do feromônio respectivamente. $J_{K(i)}$ é o conjunto das ligações vizinhas que poderão ser visitadas pela formiga K que se encontra no nó i .

3.3. Regra de atualização local do feromônio

Logo após as formigas percorrerem cada trecho, entre as barras i e j , aplica-se a regra de atualização local do feromônio, conforme a seguinte expressão:

$$\tau_{(i,j)} = (1 - \rho)\tau_{(i,j)} + \rho\tau_0 \quad (11)$$

Onde $\tau_{(i,j)}$ é a carga de feromônio na ligação (i, j) , τ_0 é o valor inicial do feromônio e ρ é a taxa de evaporação do feromônio, $\rho \in [0, 1]$. Esta regra de atualização local serve para diminuir a possibilidade de estagnação do processo e aumentar a probabilidade de encontrar uma melhor solução até o momento [Dorigo and Stutzle 2004].

3.4. Regra de atualização global do feromônio

Logo após uma configuração radial factível ser achada são calculadas as perdas de potência ativa da rede e a carga de feromônio nas ligações da melhor configuração é incrementada do seguinte modo:

$$\tau_{(i,j)} = (1 - \sigma)\tau_{(i,j)} + \sigma\Delta\tau \quad (12)$$

sendo:

$$\Delta\tau = \frac{1}{F_{melhor}} \quad (13)$$

e F_{melhor} é o valor da função objetivo da melhor solução achada até o momento, σ é a taxa de evaporação da regra de atualização global, $\sigma \in [0, 1]$. O feromônio é uma substância volátil o suficiente para evitar que soluções antigas sejam demasiadamente persistentes. $(1 - \sigma)$ modela a evaporação do feromônio.

4. Aplicação do Algoritmo para o Problema de Reconfiguração de Redes

Inicialmente todos os trechos têm a mesma quantidade de feromônio, todos os nós-fontes estão ligados, portanto os nós de carga estão todos desligados, mas nenhuma ligação está ativada. Nó ligado é aquele onde está a formiga no momento, ligação ativada é aquela que já foi percorrida e ligação ativável é aquela ligação vizinha para a qual a formiga pode se deslocar. O algoritmo *ACO Elitista* proposto é aquele que se apresenta na Figura 2.

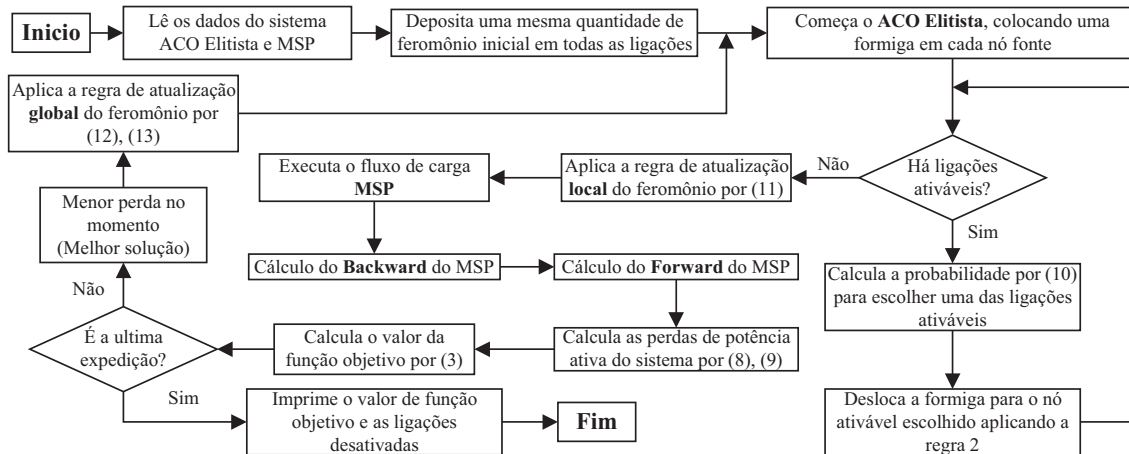


Figura 2. Fluxograma do ACO com Elitismo.

As formigas partem simultaneamente de forma aleatória de nós ligados respeitando as seguintes regras:

1. As formigas se deslocam exclusivamente por ligações ativáveis;
2. Quando uma formiga chega ao nó desligado da ligação ativável que tenha percorrido:
 - este nó torna-se ligado e a ligação ativada;
 - surge outra formiga para ocupar o nó originalmente ligado deixado por ela;

3. O percurso de uma formiga se completa quando ela não puder mais seguir por ligações ativáveis;
4. A expedição termina quando nenhuma formiga tiver mais mobilidade, ou seja, quando não houver nenhuma ligação ativável.

Durante uma iteração, apenas uma lista de barras a serem visitadas (barra ativáveis vizinhas ao nó ligado) é utilizada e escolhida de forma probabilística, atualiza-se a lista conforme os agentes caminham sobre a rede. Quando um agente se encontra sobre a barra i , seleciona a barra vizinha j (diretamente conectada a i) a ser visitada com base na concentração de feromônio sobre a linha (i,j) e no inverso da resistência desta, só são consideradas barras ativáveis aquelas barras que são diretamente conectadas a barra ligada (barra onde a formiga esta no momento).

5. Teste e Resultados

O algoritmo proposto foi implementado em *Matlab*[®] e testado com o alimentador de 69 barras da Figura 3, no qual há 5 chaves de interconexão e 73 chaves seccionadoras, originalmente 68 chaves estão fechadas (chaves de 1 a 68) e 5 abertas (chaves de 69 a 73). Para esta configuração inicial as perdas ativas iniciais são de 20,9 kW e a tensão de linha na saída da subestação (barra 1) é de 12,66 kV. Os parâmetros utilizados no algoritmo são mostrados na Tabela 1. A solução, que se vê na tabela 2, foi alcançada em 3,79 segundos utilizando-se um computador com processador *Intel core i5-2410M de 2,3 GHz e 6 GB de RAM*.

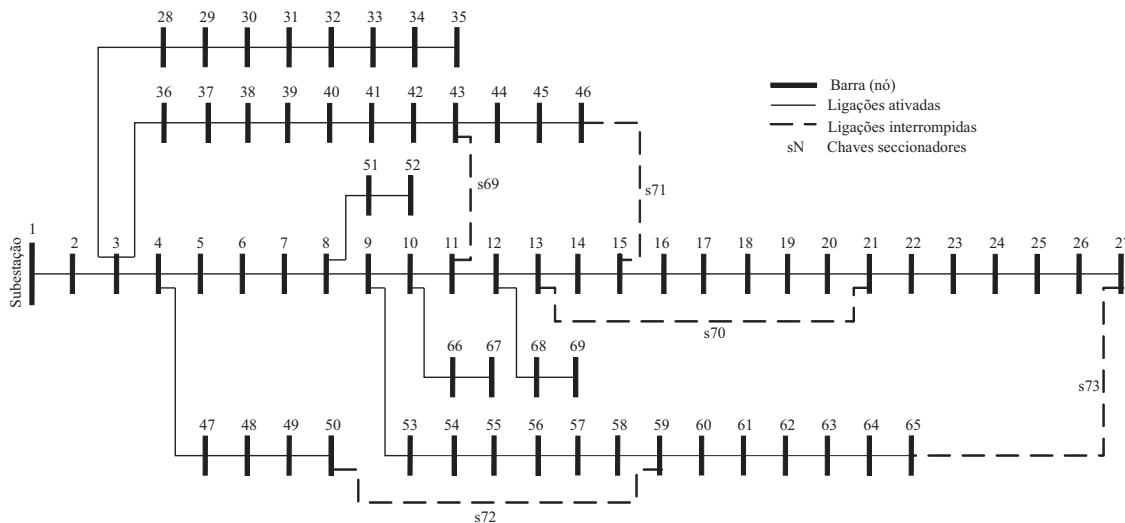


Figura 3. Sistema de distribuição de 69 barras e 73 ligações, [Chiang and Jean-Jumeau 1990].

A perda ativa total para a configuração inicial do sistema é de 20,9 kW, enquanto para a configuração obtida pelo algoritmo proposto elas foram de 9,35 kW, isto equivale a uma redução de 55,26%.

Fazendo-se uma comparação com os resultados publicados por [Chiang and Jean-Jumeau 1990] e [Abdelaziz et al. 2012], tal como mostrado na

Tabela 1. Parâmetros usados para o teste do algoritmo

Parâmetros	Símbolo	Valor	Parâmetros	Símbolo	Valor
Alfa	α	0,1	Expedições		170
Beta	β	1,9	Sigma	σ	0,01
Rô	ρ	0,1	Feromônio inicial	τ_0	1
Tolerância do MSP	ε	10^{-3}			

Tabela 2. Resultados do teste

Configuração	Perdas finais (kW)	Redução (%)	Chaves desligadas
Inicial	20,9	- - -	s69, s70, s71, s72, s73
ACO Elitismo	9,35	55,26	s10, s57, s62, s70, s71
[Chiang and Jean-Jumeau 1990]	9,34	55,31	s15, s57, s62, s70, s71
[Abdelaziz et al. 2012]	9,355	54,30	s14, s58, s61, s69, s70

tabela 2, nota-se o bom desempenho do algoritmo proposto. A Figura 4 apresenta uma comparação das tensões em cada barra nas configurações inicial e final (ótima).

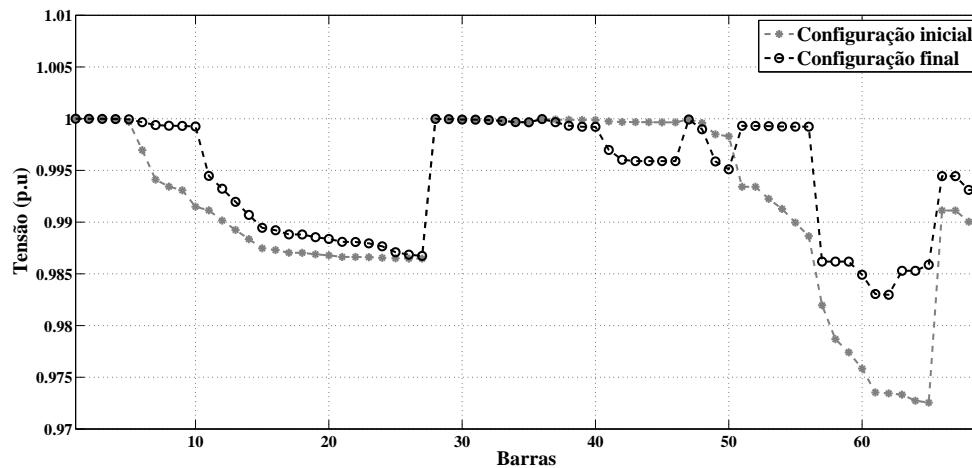


Figura 4. Comparação de tensões das barras para a configuração inicial e a configuração ótima encontrada.

Observa-se a melhoria obtida no perfil de tensão decorrente da reconfiguração alcançada desativando-se as chaves seccionadoras s10, s57, s62, s70, s71 que equivalem aos trechos dos nós: 10-11, 57-58, 62-63, 13-21, 15-46.

6. Conclusão

Um algoritmo de formigas modificado (ACO Elitista) foi proposto neste artigo com o objetivo de encontrar uma configuração radial ótima, minimizando as perdas de potência ativa totais. O escopo do trabalho foi resolver o problema de reconfiguração ótima de redes de distribuição de energia elétrica aplicando uma metodologia inspirada no comportamento de colônia de formigas.

Para melhorar o desempenho, o algoritmo desenvolvido incorpora uma técnica de elitismo no processo de convergência mediante regras de atualização local e global do feromônio. Dos resultados obtidos, conclui-se que o ACO proposto é promissor para a solução do problema de reconfiguração de redes apresentando um bom desempenho. Pretende-se agora investigar melhorias nas propriedades de convergência do algoritmo.

7. Agradecimentos

Os autores deste artigo agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia - FAPESB.

Referências

- Abdelaziz, A. Y., Osama, R. A., and El-khodary, S. M. (2012). Reconfiguration of distribution system for loss reduction using the hyper-cube ant colony optimization algorithm. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 6(2):176–187.
- Chiang, H.-D. and Jean-Jumeau, R. (1990). Optimal network reconfigurations in distribution systems: part 2 : Solution algorithms and numerical results. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 5(3):1568–1574.
- Ching-Tzong, S., Chung-Fu, C., and Ji-Pyng, C. (2005). Distribution network reconfiguration for loss reduction by ant colony search algorithm. *Electric Power Systems Research*, 7:190–199.
- Ding, F. and Loparo, K. A. (2012). A simple heuristic method for smart distribution system reconfiguration. *Energytech, IEEE Conference*, pages 1–6.
- Dorigo, M. and Stutzle, T. (2004). Ant colony optimization. *MIT Press*, 3(2):12.
- Haque, M. H. (2000). A general load flow method for distribution systems. *Electric Power System Research*, 54(1):47–54.
- Jeon, Y., Kim, J. C., Kim, J., Shin, J. R., and Lee, K. (2002). An efficient simulated annealing algorithm for network reconfiguration in large-scale distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 17:1070–1078.
- Lin, W. M., Cheng, F. S., and Tsay, M. T. (2000). Distribution feeder reconfiguration with refined genetic algorithm. *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, 147(6):349–354.
- Lu, L., Liu, J., and Wang, J. (2009). A distributed hierarchical structure optimization algorithm based poly-partical swarm for reconfiguration of distribution network. *SUPERGEN 09 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*, pages 1–5.
- Olamaei, J., G., G., and T., N. (2007). An approach based on particle swarm optimization for distribution feeder reconfiguration considering distributed generators. *Power Systems Conference: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources*, pages 326–330.
- Parada, V., Ferland, J. A., Arias, M., and Daniels, K. (2004). Optimization of electrical distribution feeders using simulated annealing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19:1135–1141.