

RECONFIGURAÇÃO DE REDES ELÉTRICAS DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO ALGORITMO DE FORMIGAS COM ELITISMO

Niraldo Roberto Ferreira¹, Benemar Alencar de Souza², José do Patrocínio dos Santos Silva²

1. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Bahia, Rua Aristides Novis, 02 Federação, 40210-630, Salvador BA
2. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Rua Aprígio Veloso, 822, Bodocongó, 58429-900, Campina Grande PB.

Abstract – The primary distribution systems of electric power almost always operate in a radial manner which seeks to find the configuration that operates with minimal loss of energy for economic reasons. This is a combinatorial optimization problem and to solve it we use the heuristic method known as Ant Colony Algorithm (ACO). 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 an elitism technique in the process of convergence. The method was applied to a distribution system with 16 bars and 3 sources with good results.

Keywords – Reconfiguration, distribution system, ant colony optimization, elitism.

Resumo – A configuração predominante de redes distribuição primária de energia elétrica é radial. Encontrar uma configuração radial com a qual as perdas de potência sejam mínimas tem motivações técnicas e razões econômicas. Este é um problema de otimização combinatória e para resolvê-lo se propõe o método heurístico conhecido como algoritmo de formigas ou ACO (*Ant Colony Optimization*). 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, o algoritmo desenvolvido incorporou uma técnica de elitismo no processo de convergência. O método foi aplicado a um sistema de distribuição com 16 barras e 3 fontes mostrando bons resultados.

Palavras chaves – Reconfiguração, sistema de distribuição, otimização colônia de formigas, elitismo.

1 Introdução

A reconfiguração de rede distribuição de energia elétrica consiste na abertura e fechamento de chaves, produzindo modificações de topologia e permitindo a transferência de cargas de um alimentador para outro mais aliviado. Procura-se encontrar uma configuração ótima respeitando restrições variadas: correntes máximas nas linhas, amplitudes das tensões de barra e configuração radial [1]. Os dispositivos de chaveamento incluem chaves seccionadoras, normalmente fechadas (NF), e chaves de interconexão, normalmente abertas (NA). O problema é não linear e de natureza combinatória devido aos estados das chaves manobráveis. Portanto, considerando-se as dimensões dos sistemas elétricos de médio e grande porte, a busca por solução ótima é uma tarefa árdua, pois requer a avaliação de um número de opções muito grande. Outro aspecto que eleva a complexidade do problema é o requisito de que a rede seja radial e conexa.

Desde quando despertou o interesse de engenheiros e pesquisadores, a minimização das perdas ativas totais na rede tem sido o objetivo de reconfiguração mais usual [2].

Ultimamente, estão sendo empregadas várias metas-heurísticas para resolver problemas de redes, tais como técnicas de inteligência artificial [3], [4], algoritmos genéticos [5], [6], algoritmos de otimização [7], [8], regras heurísticas [9], programação evolutiva [10] e algoritmo de formigas [11].

O algoritmo de formigas ou ACO (do inglês *Ant Colony Optimization*) foi concebido para resolver problemas de otimização combinatória. Da primeira vez foi aplicado ao problema clássico do caixeiro viajante [12] e depois para resolver o problema da configuração de redes [11]. Algumas aplicações de ACO para resolução do problema da configuração de redes foram propostas sem se desvincularem por completo do problema do caixeiro viajante, que serviu para a proposição original, tornando a eficiência do algoritmo aquém do que poderia ser. Maneiras usuais de melhorar a eficiência do ACO aproveitam o conhecimento de especialistas no problema. Ao incorporar as peculiaridades do problema para propor uma versão do ACO [13] procurou evitar que as configurações intermediárias fossem ineficazes, porém até completá-las as formigas podiam fazer movimentos e cancelá-los, desperdiçando tempo de processamento. Esses movimentos inconseqüentes podiam se repetir até um limite previamente estabelecido, quando a expedição da formiga era então sustada. No ACO proposto neste artigo, todas as soluções intermediárias são factíveis, sem movimentos de formigas além do que é essencial e evitando que o algoritmo tenha de observar um amplo conjunto de regras e condições. Além de mais eficiente, o algoritmo se aplica aos casos em que a rede a ser configurada pode ser suprida por mais de uma subestação, além de respeitar as capacidades limitadas das ligações.

2 Algoritmo colônia de formigas

2.1 O comportamento das formigas

O ACO é uma heurística inspirada nas formigas, que conseguem descobrir os menores caminhos entre o formigueiro e uma fonte de alimento através da cooperação e de um mecanismo de comunicação indireta [14], [12]. Ao retornar ao ninho depois de ter encontrado uma fonte de alimento, a formiga deposita feromônio no caminho. Esta substância química atrai outras formigas do ninho para a coleta do alimento encontrado. Se existirem várias trilhas conduzindo a uma dada fonte, a seleção é probabilística com base na concentração de feromônio em cada uma delas.

As formigas que percorrem a trilha menor até a fonte de alimento, retornam ao ninho antes fazendo com que a concentração de feromônio nessa trilha menor seja cada vez maior, o que atrai um número crescente de formigas. Deste modo, a colônia é capaz de selecionar o menor caminho para uma determinada fonte de alimento de forma cooperativa. Tal processo é exemplificado na Fig. 1.

Inicialmente, as formigas partem do formigueiro de forma aleatória em busca do alimento (Fig. 1a). Com o tempo, elas passam a percorrer o menor caminho, apontado pela maior concentração de feromônio (Fig. 1b).

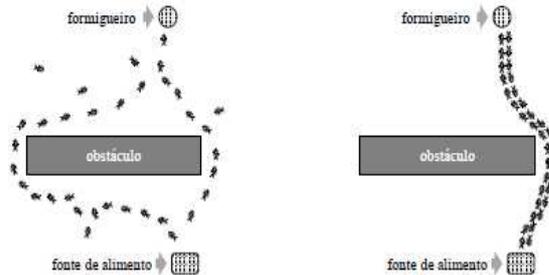


Figura 1. (a) Escolha aleatória do caminho; (b) Escolha do menor caminho.

2.2 Formulação do problema

O problema de configuração ótima de redes radiais consiste em suprir n nós de carga a partir de p nós-fontes mediante a ativação de n ligações das m existentes ($m > n$). Para a formulação do algoritmo é considerado que os nós têm estados binários e as ligações têm estados ternários: um nó pode estar *ligado* ou *desligado*, enquanto uma ligação pode ser *ativada*, *desativada* ou *ativável*. Durante a escolha das ligações que formam uma configuração radial, a ligação pode estar em um dos três estados, dependendo do estado de seus nós. Se uma ligação está ativada então seus dois nós devem estar necessariamente ligados. Se inicialmente uma ligação está desativada então seus dois nós devem estar necessariamente desligados. Se uma ligação está *ativável* então um de seus nós deve estar *ligado* e o outro não. Explicando de outra forma, uma ligação está ativada quando tiver sido percorrida pela formiga. Do contrário, a ligação será considerada desativada se não há possibilidade de ser percorrida naquele instante, ou *ativável* se for uma das opções que a formiga tem naquele momento para seguir em sua expedição.

A reconfiguração de redes de distribuição pode ser formulada como um problema de otimização não linear. Encontrar a solução consiste em selecionar entre todas as possíveis configurações aquela que produz a menor perda total de potência ativa, e que satisfaça a um conjunto de restrições. A capacidade de condução de corrente nas ligações é limitada, de modo que o problema pode ser formulado do seguinte modo:

$$\text{Minimizar } \Delta P_{\text{total}} \quad (1)$$

tendo-se como restrições:

- i) as equações de fluxo de carga,
- ii) capacidade das ligações $I_i \leq I_{\max,i}$,
- iii) A configuração radial da rede.

e sendo ΔP_{total} as perdas de potência ativa totais na rede.

O problema de otimização com restrição expresso por (1) pode ser convertido num problema de otimização irrestrita cuja função objetivo incorpore as restrições de corrente máxima nas ligações e tensões máximas e mínimas nas barras [5]:

$$F = \Delta P_{\text{total}} + \sum_i \lambda_i (I_i - I_{\max,i}) + \sum_j \mu_j (V_j - V_{\min,j}) + \sum_k \nu_k (V_k - V_{\max,k}) \quad (2)$$

sendo λ_i , μ_j , ν_k fatores de penalidade, I_i e $I_{\max,i}$ a magnitude da corrente e a corrente máxima admissível, respectivamente na ligação i , V_j , V_k , as tensões de barra, $V_{\min,j}$, $V_{\max,k}$ as tensões de barra mínimas e máximas admissíveis. Considera-se no primeiro somatório, $I_i > I_{\max,i}$, no segundo somatório $V_j < V_{\min,j}$ e no terceiro somatório $V_k > V_{\max,k}$.

A primeira restrição é intrínseca, haja vista que o valor das perdas totais de potência ativa é calculado mediante um método computacional que tem por base as equações de fluxo. Aproveitando-se da terceira restrição emprega-se no cálculo de fluxo de carga o método da soma de potência [15], por ser de eficiência computacional reconhecida.

2.3 Cálculo das perdas

O cálculo das perdas de potência é parte do cálculo do fluxo de carga, que é feito empregando-se o método da soma de potência – MSP: um método iterativo nas variáveis perdas de potência ativa e reativa do tipo *forward-backward* [15]. As amplitudes das tensões de barra são calculadas sequencialmente no sentido das subestações para as barras terminais. Para calcular a tensão na barra final da ligação i faz-se:

$$V_i = \sqrt{A + \sqrt{A^2 - B}}, \quad (3)$$

Sendo

$$A = \frac{V_{oi}^2}{2} - (R_i P_i + X_i Q_i),$$

$$B = (R_i^2 + X_i^2)(P_i^2 + Q_i^2),$$

em que R_i e X_i são respectivamente a resistência e a reatância da ligação, P_i e Q_i são os fluxos de potência ativa e reativa no fim da ligação i e V_{oi} é a tensão da barra em que essa ligação se origina. Depois de calculado o novo valor da tensão, atualizam-se as estimativas das perdas ativas e reativas:

$$\Delta P_i = \frac{R_i(P_i^2 + Q_i^2)}{V_i^2}, \quad (4)$$

$$E \quad \Delta Q_i = \frac{X_i}{R_i} \Delta P_i, \quad (5)$$

Então, os fluxos no final da ligação i são dados por:

$$P_i = P_{Li} + \sum_{j \in \Omega_i} (P_j + \Delta P_j), \quad (6)$$

$$E \quad Q_i = Q_{Li} + \sum_{j \in \Omega_i} (Q_j + \Delta Q_j), \quad (7)$$

sendo P_i e Q_i é os fluxos de potência ativa e reativa no fim da ligação i , P_{Li} e Q_{Li} são as potências ativa e reativa da carga instalada na barra final da ligação i e Ω_i é o conjunto de todas as ligações que se originam na barra em que termina a ligação i .

Uma iteração se completa quando o procedimento acima é repetido para todas as barras. O processo iterativo do MSP converge quando o erro absoluto percentual, entre as perdas totais de uma iteração e a iteração precedente é menor que uma tolerância pré-estabelecida.

2.4 A escolha pseudo-aleatória das ligações no percurso das formigas

A formiga escolhe a próxima barra a ser visitada com base em seu próprio conhecimento (resistência das ligações entre a barra que está e as vizinhas) e no conhecimento coletivo (quantidade de feromônio depositado em cada uma dessas mesmas ligações). O conhecimento coletivo é cumulativo, sendo alterado sempre que uma nova configuração radial se completa.

A probabilidade de uma das ligações ativáveis ser escolhida por uma formiga para sair da barra em que se encontra para outra é dada pela seguinte expressão:

$$P_i = \begin{cases} \frac{\tau_i^\alpha \eta_i^\beta}{\sum_{j \in \Omega} \tau_j^\alpha \eta_j^\beta}, & \text{se } i \in \Psi \\ 0, & \text{se } i \notin \Psi \end{cases} \quad (8)$$

em que τ_i é a quantidade de feromônio na ligação escolhida i , cuja resistência é $1/\eta_i$. α e β são os pesos da carga de feromônio e da resistência respectivamente. Ψ é o conjunto das ligações ativáveis.

2.5 Distribuição do feromônio

Imediatamente após percorrer cada trecho i , entre as barras “ i ” e “ j ”, durante a construção do percurso das formigas aplica-se a regra de atualização local do feromônio dada pela seguinte expressão:

$$\tau_i = (1 - \tau_0)\tau_i + \xi\tau_0, \quad (9)$$

Onde τ_i é a carga de feromônio na ligação i , τ_0 é o nível inicial de feromônio e ξ é um parâmetro heurísticamente definido tal que $0 < \xi < 1$. O efeito da regra de atualização local é reduzir τ_i , diminuindo a possibilidade de estagnação do processo e aumentando a exploração do espaço de busca [12].

Tão logo as formigas completarem uma configuração factível são calculadas as perdas na rede e a carga de feromônio nas ligações ativas da melhor configuração é incrementada do seguinte modo, constituindo a regra de atualização global do feromônio:

$$\tau_i = (1 - \rho)\tau_i + \rho/F_{\text{best}}, \quad (10)$$

Onde F_{best} é o melhor valor da função objetivo obtido até o momento, ou seja, representa a configuração de menores perdas, e $\rho \in [0,1]$ é chamado de taxa de evaporação. Na realidade o feromônio é uma substância volátil [12]. Essa propriedade evita que soluções antigas fiquem registradas de modo demasiadamente persistente, continuando a influenciar o processo de busca pela solução ótima e acabando por estagná-lo. O parâmetro ρ modela a taxa de evaporação do feromônio.

Usar F_{best} na atualização global do feromônio é chamado de estratégia elitista [12]. A idéia é fornecer um forte reforço adicional aos trechos pertencentes a melhor configuração encontrada desde o início do algoritmo.

Caso não se utilize o elitismo no processo, tão logo uma formiga complete uma configuração factível, são calculadas as perdas na rede e a carga de feromônio das ligações ativas da nova configuração é incrementada do seguinte modo:

$$\tau_i = \tau_i + \gamma/F \quad (11)$$

Onde γ é um fator de ajuste. Neste caso, a evaporação do feromônio é incorporada no algoritmo da seguinte forma: o número de expedições é dividido em partes iguais denominadas de ciclos, findo o qual a carga de feromônio é atualizada com a expressão:

$$\tau_i = \begin{cases} (1 - \rho)\tau_i + \rho(\gamma/F), & \text{se } i \in \Omega \\ (1 - \rho)\tau_i, & \text{se } i \notin \Omega \end{cases} \quad (12)$$

Em que Ω é o conjunto das ligações ativas da nova configuração.

2.6 Resolução do problema com o algoritmo de formigas

Inicialmente todos os nós-fontes estão *ligados*, enquanto os nós de carga estão todos *desligados*, de modo que nenhuma ligação está *ativada*. As formigas partem simultaneamente 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:
 - i. este nó torna-se ligado e a ligação ativada;
 - ii. surge outra formiga para ocupar o nó originalmente ligado deixado por ela;
 - iii. fazer atualização local do feromônio;
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.

Ao término de uma expedição sempre se terá determinado uma configuração radial. O número de formigas por expedição é variável. Começa igual ao número de nós-fontes e termina igual ao número de nós ligados. As formigas vão surgindo aleatoriamente de nós ligados e se movimentam por ligações *ativáveis* enquanto puderem. De acordo com as regras estabelecidas acima o ACO proposto para configuração ótima de redes de distribuição radial é aquele que se apresenta na figura 2. A carga de feromônio é atualizada aplicando-se as equações (9) e (10).

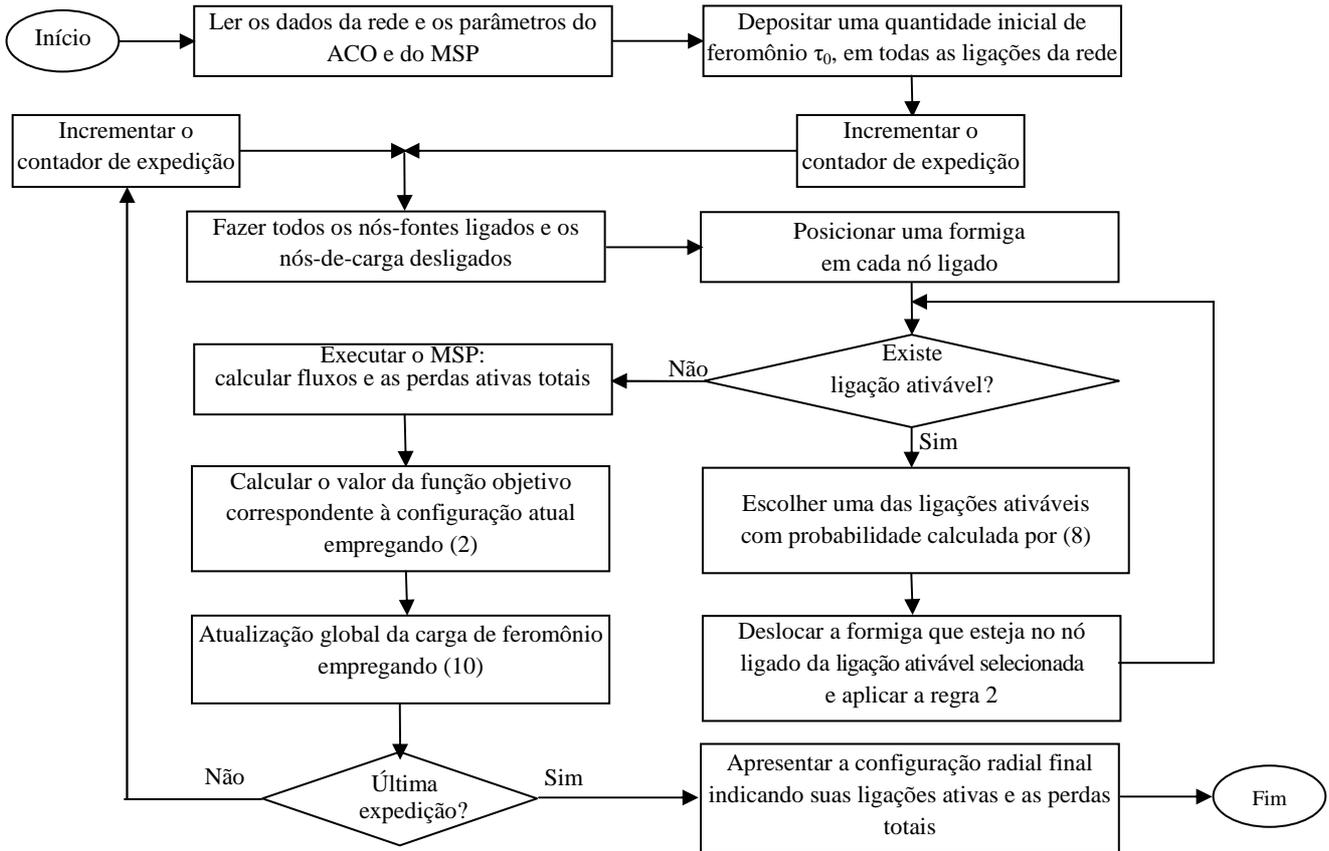


Figura 2: Fluxograma do ACO utilizado

3 Resultados

O algoritmo considerado foi implementado em linguagem de programação Matlab[®] e testado utilizando um sistema elétrico de distribuição com dezesseis barras, três das quais são fontes e dezesseis ligações ou trechos[16], conforme está apresentado na Figura 3. A tensão de linha nas saídas das subestações, (barras 1, 2 e 3), é 13,8 kV. Os dados da rede são apresentados na Tabela 1. A condição necessária, porém não suficiente para a rede ser radial é que três das dezesseis ligações sejam desativadas, pois as barras de carga são apenas treze. Os valores apropriados dos parâmetros do programa sem sobrecarregamento são mostrados na Tabela 2 e com esse programa obteve-se a solução de perda mínima indicada na mesma tabela, bem como nas figuras 4 (sem elitismo) e 5 (com elitismo).

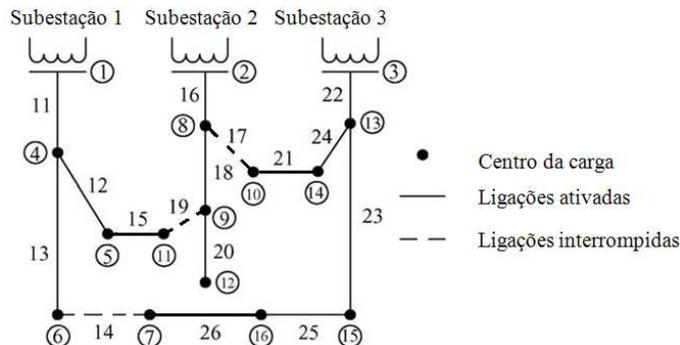


Figura 3: Sistema de distribuição de 16 barras e 16 ligações

Tabela 1: Dados de entrada para o sistema da figura 3 sem sobrecarregamento dos dados

de-para	R (p.u.)	X (p.u.)	Potências (p.u.)	
			Ativa	Reativa
1 - 4	0,075	0,1	0,020	0,016
4 - 5	0,08	0,11	0,030	0,004
4 - 6	0,09	0,18	0,020	-0,004
6 - 7	0,04	0,04	0,015	0,012
2 - 8	0,11	0,11	0,040	0,027
8 - 10	0,11	0,11	0,010	0,009
8 - 9	0,08	0,11	0,050	0,018
9 - 11	0,11	0,11	0,006	-0,005
9 - 12	0,08	0,11	0,045	-0,017
3 - 13	0,11	0,11	0,010	0,009
13 - 14	0,09	0,12	0,010	-0,011
13 - 15	0,08	0,11	0,010	0,009
15 - 16	0,04	0,04	0,021	-0,008
5 - 11	0,04	0,04	0,006	-0,005
10 - 14	0,04	0,04	0,010	-0,011
7 - 16	0,12	0,12	0,021	-0,008

Tabela 2: Parâmetros usados e resultados obtidos para o caso sem sobrecarregamento com elitismo e sem elitismo

Parâmetros	Símbolo	Com elitismo	Sem elitismo	
		Valor	Valor	
Dados	Alfa	α	1,0	1,5
	Beta	β	1,0	1,0
	Rô	ρ	0,1	0,01
	Tolerância MSP	ϵ	10^{-3}	10^{-3}
	Expedições		200	200
	Ciclos de evaporação			30
	Csi	ξ	0.01	
	Feromônio inicial		1	
	Fator de ajuste	γ		0.01
Resultados	Menores perdas		466,13 kW	466,13 kW
	Chaves abertas		17; 19;26	17; 19; 26

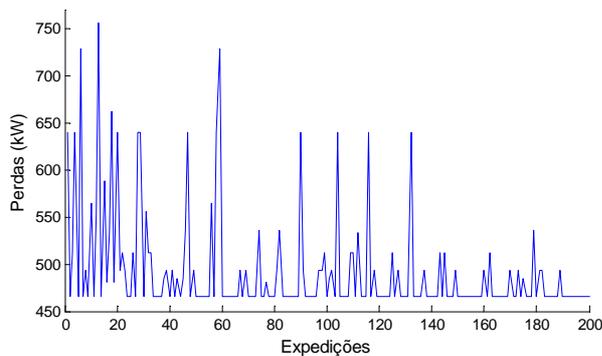


Figura 4: Evolução das perdas ativas totais versus expedições para a reconfiguração da rede da figura 3 sem elitismo.

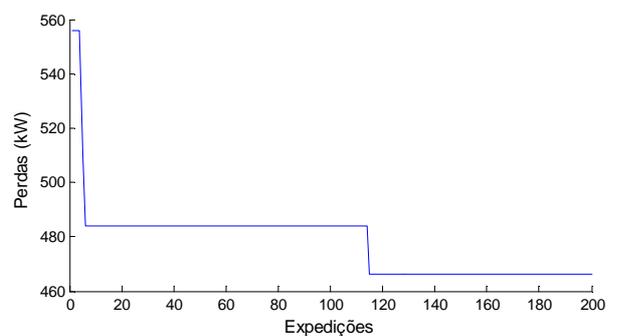


Figura 5: Evolução das perdas ativas totais versus expedições para a reconfiguração da rede da figura 3 com elitismo.

Ao analisar as figuras 4 e 5 observou-se um comportamento mais regular da convergência no caso com elitismo, além disso, os experimentos mostraram que em diversos casos a convergência é feita em poucas interações. O caso apresentado na figura 5 foi escolhido por indicar, mas claramente a evolução em degraus da convergência mostrando uma evolução, mas rápida do que com o método sem elitismo o que indica a vantagem do seu emprego. O uso do elitismo deve ser feito com cuidado para evitar o risco de ocorrer convergência prematura.

Outro caso investigado foi o sobrecarregamento da potência ativa na barra 7 para o valor 0,150 p.u.. A tabela 3 apresenta três situações para este caso. A primeira situação é a configuração inicial que serve como modelo de comparação em termos de potência ativa total indicando um valor relativamente elevado e caracterizado pelas chaves abertas: 14, 17 e 19. Na segunda situação, encontramos a aplicação do algoritmo de formigas sem condição de restrição de tensão. Observa-se que a configuração obtida tem as chaves 17, 19 e 26 abertas que são as mesmas chaves do caso estudado anteriormente (sem sobrecarregamento), tendo mudado apenas o valor da perda ótima, o que já era esperado por ter aumentado a carga na barra 7.

Na terceira e última situação, encontramos a mesma aplicação do algoritmo de formigas só que utilizando uma restrição de tensão nas barras. Nesta situação, observou-se a obtenção do mesmo valor de potência ótima e das chaves abertas. A figura 6 apresenta o perfil de tensão nas barras do sistema nas situações de sobrecarrregamento da potência ativa na barra 7 nas condições iniciais e ótima com restrição de tensão. Observa-se uma melhoria da distribuição de tensão das barras dentro da faixa de tensão analisada, devido à reconfiguração do sistema.

Tabela 3: Dados e resultados do sobrecarrregamento da potência ativa na barra 7

	Parâmetro	Símbolo	Configuração inicial	AOC sem restrição de tensão	AOC com restrição de tensão
Dados	Alfa	α		1,5	1,5
	Beta	β		1,0	1,0
	Rô	ρ		0,01	0,01
	Tolerância MSP		10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}
	Expedições			200	200
	Ciclos de evaporação			30	30
	Feromônio inicial			1	1
	Fator de ajuste	γ		0,01	0,01
	Tensão mínima				0,95 p.u.
	Tensão máxima				1,05 p.u.
Resultados	Perdas da configuração ótima		1706,4 kW	1191,1 kW	1191,1 kW
	Chaves abertas		14; 17; 19	17; 19; 26	17; 19; 26

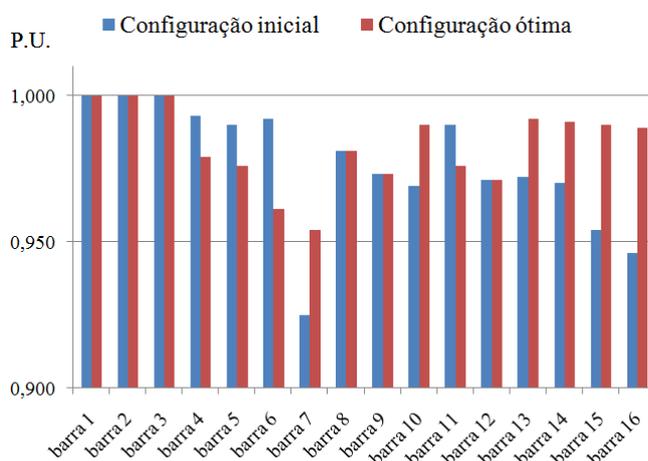


Figura 6: Comparação do perfil de tensão para uma configuração inicial dada e a configuração ótima após aplicação do ACO com restrição de tensão (0,95 p.u. e 1,05 p.u.)

5 Conclusão

Neste artigo se propôs um algoritmo colônia de formigas com elitismo para obter a configuração ótima de redes elétricas de distribuição, em que as perdas ativas totais sejam mínimas. Para isso, a atualização do feromônio é feita em duas fases: uma local, após a formiga trilhar cada trecho do seu percurso e uma atualização global, após a formiga completar seu caminho. Essa última atualização sendo esta feita sobre a melhor solução obtida até o momento.

A atualização local reduz a carga de feromônio afastando-se da estagnação do processo e permitindo uma melhor exploração do espaço de busca, já a atualização global promove o elitismo por priorizar a solução ótima na correção da carga de feromônio e com isso, observou-se que a utilização de uma estratégia elitista melhorou o comportamento da convergência do algoritmo de formigas.

Ressalta-se também que a reconfiguração ótima da rede melhora o perfil de tensão do sistema no caso de circuitos sobrecarregados. As pesquisas prosseguem na busca por melhores resultados, notadamente quando o problema se refere a redes de grande porte. Uma dificuldade que já foi atenuada significativa, mas que ainda não foi eliminada por completo e de modo definitivo é a estagnação do algoritmo.

7 Referências

- [1] F. S. Pereira, K. Vittori, and G. R. M. Costa, "Distribution system reconfiguration for loss reduction based on ant colony behavior," in Proc. 2006 **IEEE/PES Latin America Transmission & Distribution Conference and Exposition**, p. 1-5.
- [2] M. E. Baran, and F. F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing," **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 4, n. 2, p. 1401-1407, jan.1989.
- [3] K. Nara, A. Shiose, M. Kitagawa, and T. Ishihara, "Implementation of genetic algorithm for distribution systems loss minimum reconfiguration," **IEEE Transaction on Power Systems**, vol. 7, n.3, p. 1044-1051, aug.1992.
- [4] H. C. Cheng, and C. C. Kou, "Network reconfiguration in distribution systems using simulated annealing," **Electric Power Systems Research**, vol. 29, p. 227-238, may 1994.
- [5] W. M. Lin, F. S. Cheng, and M. T. Tsay, "Distribution feeder reconfiguration with refined genetic algorithm," **IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution**, vol. 147, n. 6, p. 349-354, nov. 2000.
- [6] B. A. Souza, D. M. S. Fontan, and H. D. M. Braz, "Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando Algoritmos Genéticos," in Proc. 2008 **II Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**, p. 1-6, Belo Horizonte.
- [7] T. P. Wagner, A. Y., Chikhani, and R., Hackam, "Feeder reconfiguration for loss reduction: an application of distribution automation," **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 6, n. 4, 1991.
- [8] L. L. Lai, and J. T. Ma, "Application of evolutionary programming to reactive power planning comparison with nonlinear programming approach," **IEEE Transactions on Power Systems**, vol. 12, n.1, 1997.
- [9] Y. Y. Hsu, H. M. Huang, H. C. Kuo, S. K. Peng, C.W. Chang, K. J. Chang, H. S. Yu, C. E. Chow, and R. T. Kuo, "Distribution system service restoration using a heuristic search approach". **IEEE Transaction on Power Delivery**, vol.7 n..2, p. 734-740, 1992.
- [10] Y. T. Hsiao, and C. Y. Chien, "Multiobjective optimal feeder reconfiguration," **Proceedings of the IEE Gen. Transm. Dist.**, vol. 148, p. 333-336, jul. 2001.
- [11] F. S., Pereira, K., Vittori, and G. R. M. Costa, "Ant colony based method for reconfiguration of power distribution system to reduce losses", in **Proceedings 2008 of the IEEE PES Latin America Transmission and Distribution Conference and Exposition**, p. 1-5. Bogotá.
- [12] Dorigo, M., Stützle, T., "Ant colony optimization," **MIT Press**. 2004.
- [13] B. A. Souza, M. F. Leite, J. P. Cabral Neto, and K. Vittori, "Configuração de redes de distribuição via algoritmo de formigas," in **Proceedings 2009 Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente – SBAI**, Brasília.
- [14] M. Dorigo, "Optimization, learning and natural algorithms," (in Italian), PhD thesis, Dipartimento di elettronica e informazione, Politecnico di Milano, IT, 1992.
- [15] R.G. Cespedes, "New method for the analysis of distribution networks," **IEEE Trans. PWRD**, vol. 5, n. 1, p. 391-396, 1990.
- [16] C.T. Su, C.F. Chang, and J.P. Chiou", "Distribution network reconfiguration for loss reduction by ant colony search algorithm", **Electric Power Systems Research**, vol.75, p.190-199, aug. 2005.