

# REDUÇÃO DE PERDAS NA RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA APLICANDO *MAX-MIN ANT SYSTEM*

HUILMAN S. SANCA\*, NIRALDO R. FERREIRA\*, BENEMAR A. SOUZA†

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

†*Departamento de Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Campina Grande - (UFCG)*  
Av. Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, 58429-900  
Campina Grande, Paraíba, Brasil

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

**Abstract**— This paper presents an algorithm, *MAX-MIN Ant System*, a variation of the ant colony algorithm, used to solve the optimal reconfiguration problem of electric power distribution network. This optimization problem is nonlinear of combinatorial nature. In cooperation, ants find the shortest paths between the nest and a food source by using an indirect mechanism of communication. The method was applied to a 69 buses distribution feeder found in the literature.

**Keywords**— Reconfiguration, ant colony, *MAX-MIN Ant System*, distribution network, active losses, radial load flow, power summation method.

**Resumo**— Neste artigo apresenta-se um algoritmo *MAX-MIN Ant System*, uma variação do algoritmo colônia de formigas, utilizada para resolver o problema de reconfiguração ótima de redes de distribuição de energia elétrica. Este problema de otimização é não linear e de natureza combinatória. Em cooperação as formigas descobrem os menores caminhos entre o formigueiro e uma fonte de alimento usando um mecanismo de comunicação indireta. O método foi aplicado a um alimentador de 69 barras encontrada na literatura.

**Keywords**— Reconfiguração, colônia de formigas, *MAX-MIN Ant System*, rede de distribuição, perdas ativas, fluxo de carga radial, método de soma de potências.

## 1 Introdução

Os sistemas elétricos de potência estão sendo objetivo de muitas pesquisas e investimentos visando a modernização. Uma vez que o sistema está operando em regime permanente, é desejável aumentar sua eficiência e diminuir seu custo operacional mediante a minimização das perdas do sistema. Exemplos de algumas técnicas utilizadas para redução das perdas do sistema são, o aumento do nível de tensão da rede, o recondutoramento, a instalação de bancos de capacitores e a reconfiguração da rede de distribuição primária.

A reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica é levada a efeito operando-se chaves de interconexão existentes de modo que a topologia do sistema seja modificada (Nara et al., 1992), permitindo a transferência de cargas de um alimentador fortemente carregado para outro mais aliviado, respeitando sempre as restrições de fluxo de carga da rede e a topologia radial do sistema (Civanlar et al., 1988). A reconfiguração de redes é um problema de otimização combinatoria não diferenciável (Ching-Tzong et al., 2005). A dimensão do espaço de busca do problema está relacionada com o número de chaves seccionadoras envolvidas na busca de uma configuração radial.

Metaheurísticas têm sido empregadas para resolver o problema de reconfiguração de redes. Em (Civanlar et al., 1988), os autores apresen-

tam a formulação como um problema de programação inteira, fundamentado basicamente em fluxo de carga. Os autores (Lin et al., 2000) empregam algoritmos genéticos. Os autores (Ashish et al., 2007) aplicam um algoritmo de busca harmônica. Em (Jeon et al., 2002) os autores propuseram a aplicação do algoritmo de temperatura simulada (*Simulated annealing algorithm*). Em (Abdelaziz et al., 2010) os autores utilizaram um algoritmo de busca tabu *Tabu Search*. Os autores (Olamaei et al., 2007) alcançam a solução do problema mediante o algoritmo de nuvem de partículas (*Particle swarm optimization*). Em (Zhijiam et al., 2008; Abdelaziz et al., 2012) os autores aplicam o algoritmo colônia de formigas (*Ant colony optimization*).

Nas últimas décadas, tem sido crescente a atenção a algoritmos inspirados na observação de fenômenos naturais para ajudar a resolver os complexos problemas combinatorios da engenharia moderna. O algoritmo colônia de formigas, *ACO*, é uma metaheurística utilizada para encontrar soluções a este tipo de problemas de otimização combinatoria. O algoritmo colônia de formigas *Ant colony system*, foi aplicado pela primeira vez para resolver o problema clássico do caixeiro viajante, *Traveling Salesman Problem (TSP)* (Dorigo and Stutzle, 2004). Este algoritmo é inspirado no comportamento das formigas reais, elas são capazes de encontrar o caminho mais curto entre o

formigueiro e a fonte de alimento sem a utilização de sinais visuais. A comunicação entre as formigas ocorre mediante uma substância química depositada por elas no caminho e chamada de feromônio. Realizando uma analogia com o caso do TSP em (Zhiijam et al., 2008), a metaheurística é aplicada para resolver o problema de reconfiguração ótima de redes elétricas.

Neste trabalho apresenta-se o uso de uma variante do algoritmo colônia de formigas, o *Max-Min Ant system - MMAS* (Stutzle and Hoos, 1996; Stutzle and Hoos, 2000). Esse algoritmo tem como principal característica a intensa exploração em torno das melhores soluções. Outra característica do MMAS é a existência de limites superior e inferior para a taxa de feromônio. Esses limites foram introduzidos para evitar a convergência precoce do algoritmo. 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), Observa-se nos resultados computacionais o bom desempenho do método proposto que fornece bons resultados em comparação com outros métodos.

## 2 Descrição do Problema

### 2.1 Formulação do problema de reconfiguração

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

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

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 ativa 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 numero de barras e  $N_T$  é o conjunto de trechos de linha do sistema.

Este problema de otimização expresso em (1), pode ser convertido num problema de otimização irrestrito cuja função objetivo incorpore a restrição de corrente máxima nos trechos (Pereira et al., 2006).

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

sendo  $\lambda_I$  um fator de penalidade com respeito à corrente admissível no trecho.

A primeira restrição é intrínseca, em vista de que o valor das perdas totais de potência ativa é calculado mediante um método de fluxo de potência, método da soma de potência-MSP (Haque, 1996), aproveitando-se da terceira restrição que indica uma configuração radial da rede no final do processo.

### 2.2 Cálculo das perdas

O cálculo das perdas de potência é parte do cálculo do fluxo de carga, que é resolvido pelo método MSP. O MSP, é um método iterativo do tipo *forward - backward* (Haque, 1996). Os valores absolutos das tensões das barras são calculadas sequencialmente no sentido das subestações para as barras terminais (*forward*). As magnitudes das potências são calculados sequencialmente no sentido das barras terminais para as subestações (*backward*). Para o cálculo de um trecho  $(i, i+1)$ , referido à Fig. 1, podem-se escrever estas equações como em (Haque, 1996):

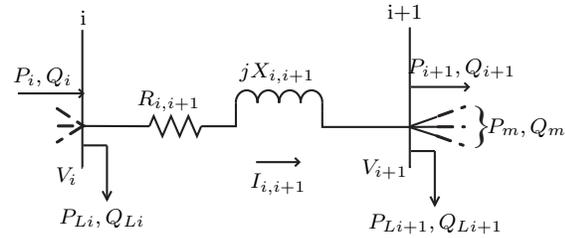


Figura 1. Trecho de uma rede de distribuição simples.

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

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

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

Onde  $P_i$  e  $Q_i$  são os fluxos de potência ativa e reativa que fluem para fora da barra  $i$ , respectivamente,  $P_{Li}$  e  $Q_{Li}$  são as potências ativa e reativa das cargas instaladas na barra  $i$ , respectivamente,  $P_{Li+1}$  e  $Q_{Li+1}$ , são os fluxos de potência ativa e reativa que fluem para fora da barra  $i + 1$ . A resistência e a reatância da seção da linha entre as barras  $i$  e  $i + 1$ , são indicadas por  $R_{i,i+1}$  e  $X_{i,i+1}$ , respectivamente. De (6) é possível obter.

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

Sendo:

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

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

A perda de potência ativa no trecho é:

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

A perda de potência ativa total do sistema  $P_{T,Perdas}$  é:

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

### 3 Paradigma MAX-MIN Ant System

#### 3.1 Algoritmo colônia de formigas

O algoritmo colônia de formigas, ACO, é uma metaheurística inspirada nas formigas reais (Stutzle and Hoos, 2000; Dorigo and Stutzle, 2004).

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, a maioria das formigas irão escolher o mesmo caminho devido à atualização constante do feromônio. Este comportamento ilustra 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:

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

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

#### 3.3 MAX-MIN Ant System - MMAS

Observando a convergência precoce do ACO, em (Stutzle and Hoos, 2000), os autores propuseram o *MAX-MIN Ant System-MMAS*. A etapa de construção é idêntica a do ACO, usando a mesma fórmula para calcular a probabilidade. As modificações mais substanciais dizem respeito à taxa de atualização do feromônio e a sua limitação a certos valores máximo e mínimo.

##### 3.3.1 Regra de atualização do feromônio

Como no ACO, a atualização do feromônio é feita apenas quando termina a fase de construção, porém, diferentemente da ACO, a atualização no MMAS é feita apenas pela melhor formiga (Na nossa proposta isto corresponde ao conjunto de formigas que gerou a melhor configuração da iteração). Logo após de achar uma configuração radial é calculada a perda de potência ativa do sistema e o nível de feromônio é atualizado, apenas nos trechos que fazem parte da melhor solução, da seguinte forma:

$$\tau_{(i,j)} = (1 - \rho)\tau_{(i,j)} + \Delta\tau^{melhor} \quad (11)$$

sendo:

$$\Delta\tau^{melhor} = \frac{1}{F_{melhor}} \quad (12)$$

Sendo  $F_{melhor}$  o valor da melhor solução encontrada da função objetivo até o momento. Neste trabalho é utilizado a melhor solução de um conjunto de soluções por iteração, assim temos menos risco de convergência prematura. No problema de reconfiguração de redes  $F_{melhor}$  representa as perdas de potência ativa da melhor configuração encontrada. Como o feromônio é uma substância volátil essa propriedade evita que soluções antigas sejam persistentes,  $(1 - \rho)$  é a taxa de evaporação do feromônio, sendo  $\rho$  um valor entre  $[0, 1]$ .

De acordo com (Stutzle and Hoos, 1996; Stutzle and Hoos, 2000), a utilização da melhor solução de uma iteração aumenta o efeito de exploração das melhores soluções durante o processo de busca. Ao mesmo tempo, contribui para o efeito de intensificação do processo utilizando sempre as melhores soluções em cada iteração para a atualização do feromônio.

##### 3.3.2 Limites do feromônio

Outra diferença, comparando o MMAS e ACO, é que no MMAS, existem limites superior e inferior para o nível de feromônio. Ao realizar uma atualização do feromônio (aumento e evaporação) num ramo, o seu valor não pode ultrapassar  $\tau_{max}$ , nem ser inferior a  $\tau_{min}$ .

No MMAS, a proposta de impor limites superior e inferior é para evitar que o feromônio depositado fique muito grande. Após cada iteração, se  $\tau_{i,j} > \tau_{max}$ , então  $\tau_{i,j} = \tau_{max}$ , se  $\tau_{i,j} <$

$\tau_{min}$ , então  $\tau_{i,j} = \tau_{min}$ , além disso  $\tau_{min} > 0$ , se  $\eta_{i,j} < \infty$ , para todas as componentes da solução. Adicionalmente propõe-se a reinicialização do feromônio, este passo sera feito quando um número pre-definido de iterações é atingido sem ser encontrada uma solução melhor (estagnação do algoritmo) (Stutzle and Hoos, 2000).

Pode-se dizer que esta proposta de impor limites ao feromônio, tem um efeito de intensificação no processo de busca da melhor solução (para encontrar um maior número de possibilidades). A dificuldade é determinar quais são os valores apropriados para  $\tau_{min}$  e  $\tau_{max}$ . Em (Stutzle and Hoos, 2000),  $\tau_{max}$  é definido pela equação:

$$\tau_{max} = \frac{1}{\rho \cdot F_{melhor}^*} \quad (13)$$

Em (Stutzle and Hoos, 2000), também é proposto inicializar o algoritmo fazendo  $\tau_0 = \tau_{max}$ , para obter uma intensa exploração das soluções no espaço de busca.

Enquanto ao valor de  $\tau_{min}$ , não há um completo acordo sobre como pode ser determinado. Em (Dorigo et al., 1996), é dito que este valor de  $\tau_{min}$  é determina empiricamente, porém, em (Stutzle and Hoos, 1996), existe uma proposta analítica para determinar este valor, equação (14).

$$\tau_{min} = \frac{\tau_{max} \cdot (1 - P_{dec})}{k \cdot P_{dec}} \quad (14)$$

Onde  $k$  é o número de escolhas que a formiga ainda pode fazer em qualquer ponto de decisão, e  $P_{dec}$  determinado pela equação (15):

$$P_{dec} = \frac{n-1}{\sqrt{P_{melhor}}} \quad (15)$$

sendo  $P_{melhor}$  a probabilidade de uma formiga construir o melhor caminho até agora e  $n$  o número de passos no caminho (número de cidades).

#### 4 Aplicação do Algoritmo *MMAS* para Reconfiguração de Redes

Inicialmente todos os trechos têm a mesma quantidade de feromônio, fazendo  $\tau_0 = \tau_{max}$ , todos os nós-fontes estão ligados, enquanto os nós de carga estão todos desligados, de modo que nenhuma ligação está ativada. Nó ligado é aquele onde está a formiga no momento, em outro caso o nó fica desligado (nó que a formiga ainda pode visitar). Ligação ativada é aquela ligação que já foi percorrida e ligação ativável é aquela ligação vizinha por onde a formiga pode continuar o percurso.

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

1. As formigas se deslocam exclusivamente por ligações ativáveis ou adjacentes a ela;

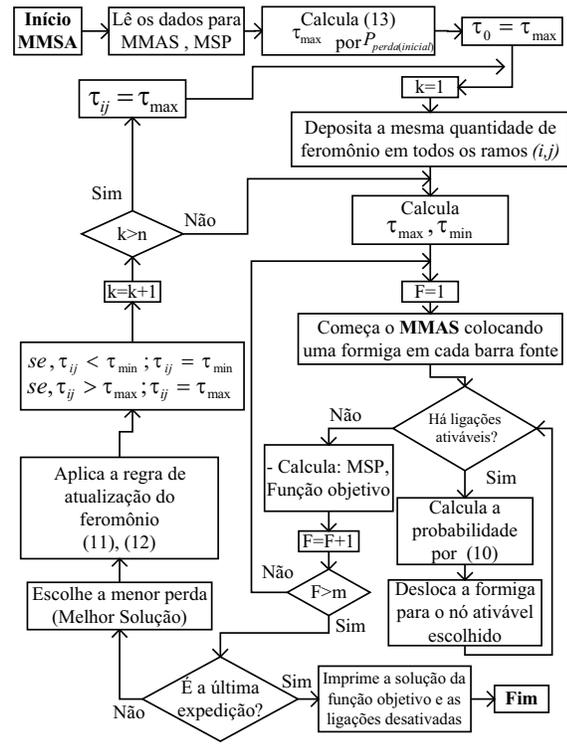


Figura 2. Fluxograma do *Max-Min Ant System* - *MMAS* para reconfiguração de redes.

2. Quando uma formiga chega a ua barra desligada da ligação ativável que tenha percorrido:
  - esta barra torna-se ligada e a ligação ativada;
  - surge outra formiga para ocupar a barra originalmente ligado deixado por ela;
3. O percurso de uma formiga se completa quando ela não puder mais seguir pelas ligações ativáveis;
4. A expedição termina quando nenhuma formiga tiver mais mobilidade, ou seja, quando não houver nenhuma ligação ativável.

No termino do processo de uma expedição sempre se terá determinado uma configuração radial do sistema. O número de formigas por expedição é variável. Ela começa igual ao número de barras-fontes. As formigas vão surgindo aleatoriamente de barras ligadas e elas se movimentam por ligações ativáveis ou adjacentes enquanto puderem. De acordo com as regras estabelecidas acima. Uma vez que é achado uma melhor solução da configuração radial do sistema são calculadas as perdas dela e atualiza-se o nível de feromônio para depois ser comparada com os níveis de feromônio  $\tau_{min}, \tau_{max}$ , se  $\tau_{i,j} < \tau_{min}$  ou  $\tau_{i,j} > \tau_{max}$  os valores de  $\tau_{i,j}$  será  $\tau_{i,j} = \tau_{min}$  ou  $\tau_{i,j} = \tau_{max}$  respectivamente. Este processo do *MMAS* é apresentado no fluxograma da Fig. 2.

## 5 Teste e Resultados

O algoritmo MMAS usado foi implementado em *Matlab*<sup>®</sup> e testado em um alimentador de 69 barras da Fig. 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, a tensão de linha na saída da subestação (barra 1) é de 12,66 kV. Os dados do sistema testado foram tomados de (Chiang and Jeam-Jumeau, 1990). Uma condição necessária mas não suficiente para que a rede seja radial é de 5 dos 73 trechos estejam desativadas, porque todas as barras são barras de carga, exceto a barra da subestação.

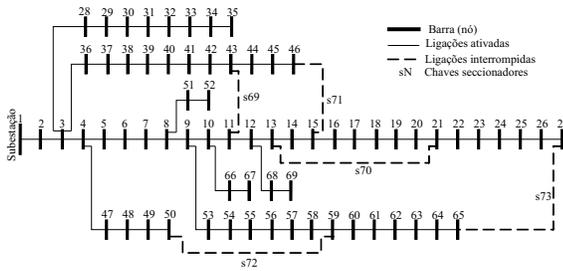


Figura 3. Sistema de distribuição de 69 barras e 73 ligações.

O algoritmo MMAS foi programado em um computador *Intel core i5-2410M de 2,3 GHz e 6 GB*. Valores apropriados para o algoritmo são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros usados para o algoritmo MAX-MIN Ant System

Parâmetros	Símbolo	Valor
Peso da carga de feromônio	$\alpha$	0,1
Peso da visibilidade do feromônio	$\beta$	1
Taxa de evaporação do feromônio	$\rho$	0,1
Tolerância do fluxo de carga MSP	$\epsilon$	$10^{-3}$
Expedições (número de iterações)		200
Perda ativa inicial	$F_{melhor}^*$	20,9
Número de passos do caminho	$n$	69
Probabilidade de achar a melhor solução	$P_{melhor}$	0,05
Feromônio inicial	$\tau_0$	$\tau_{max}$

A Tabela 2, apresenta os resultados obtidos da configuração ótima após a corrida do algoritmo desenvolvido.

Pode-se ver claramente que o algoritmo proposto, *Max-Min Ant System* (MMAS), obteve bons resultados, sendo que as perdas ativas totais para a configuração inicial do sistema é de 20,9 kW, enquanto, para a configuração obtida pelo algoritmo, MMAS, proposto as perdas de potência ativa totais foram de 9,39 kW, isto equivale a uma redução de 55,10% da perda de potência ativa total inicial.

Fazendo uma comparação com os resultados obtidos em (Chiang and Jeam-Jumeau, 1990; Abdelaziz. et al., 2010; Abdelaziz et al., 2012), que alcançaram uma redução de 54,97%; 55% e 54,88% da perda de potência ativa inicial, equivalente a 9,41 kW; 9,4 kW e 9,43 kW respectivamente, tal

como são apresentados na tabela 2, nota-se a vantagem do algoritmo utilizado, MMAS, para encontrar uma melhor solução do problema.

Tabela 2: Resultados do teste

Configuração	Perdas (kW)	Redução (%)	Chaves desligadas
Inicial	20,9	- - -	s69, s70, s71, s72, s73
MMAS	<b>9,39</b>	<b>55,10</b>	s12, s57, s63, s69, s70
Abdelaziz (2012)	9,43	54,88	s14, s58, s61, s69, s70
Abdelaziz (2010)	9,40	55,00	s12, s55, s61, s69, s70
Chiang (1990)	9,41	54,97	s14, s55, s61, s69, s70

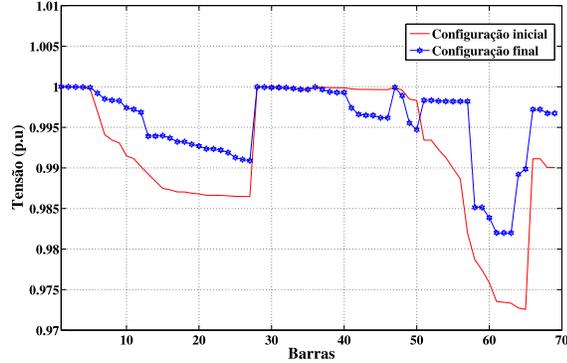


Figura 4. Comparação de tensões das barras para a configuração inicial e a configuração ótima encontrada.

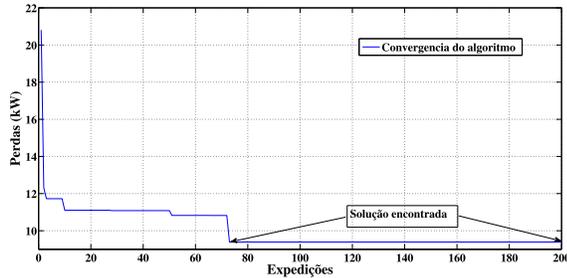


Figura 5. Evolução do processo de convergência do algoritmo: Perdas ativas totais versus expedições.

Na Fig. 4, apresenta-se o perfil das tensões em cada barra da configuração inicial e da configuração ótima encontrada pelo algoritmo. Neste perfil de tensões é mostrado com maior clareza a melhora obtida no perfil da tensão nas barras do sistema.

Na Fig. 5, observa-se o processo de convergência do algoritmo MMAS, este processo começa com 20,9 kW de perda de potência ativa no ponto inicial. Na expedição 73 o MMAS alcança a convergência do problema, (acha a solução), e vai até o final das expedições, expedição 200.

O resultado obtido após a reconfiguração da rede é alcançado desativando-se as chaves seccionadoras s12, s57, s63, s69, s70 que equivalem aos trechos dos nós: 12-13, 57-58, 63-64, 11-43, 13-21.

## 6 Conclusão

Um algoritmo *MAX-MIN Ant System* - MMAS, foi utilizado neste artigo com o objetivo de encontrar uma melhor configuração radial para minimizar a perda de potência ativa total. Nesta proposta, formigas artificiais exploram o meio ambiente (sistema de distribuição) e trocam informações buscando encontrar uma topologia radial que apresente o menor valor de perdas ativas. Para melhorar o desempenho e evitar a convergência precoce do algoritmo, o MMAS incorpora limites de feromônio nos trechos para garantir uma intensa exploração em torno das melhores soluções. Dos resultados obtidos, conclui-se que o MMAS implementado é promissor para encontrar soluções ao problema de reconfiguração de redes apresentando um bom desempenho.

## 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., Mohamed, F., Mekhamer, S. and Badr, M. (2010). Distribution system reconfiguration using a modified tabu search algorithm, *Electric Power System Research* **80**(1): 943–953.
- 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, *IEEE Generation, Transmission and Distribution - IET* **6**(2): 176–187.
- Ashish, A., Sanjoy, D. and Pahua, A. (2007). An ais-aco hybrid approach for multi-objective distribution system reconfiguration, *IEEE Transaction on Power Systems* **22**(3): 1101–1111.
- 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, New York* **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* (75): 190–199.
- Civanlar, S., Grainger, J. J. and Lee, S. S. H. (1988). Distribution feeder reconfiguration for loss reduction, *IEEE Transaction on Power Delivery* **3**(3): 1217–1223.
- Dorigo, M., Maniezzo, V. and A., C. (1996). Ant system: Optimization by a colony of cooperating agents, *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions* **26**(1): 29–41.
- Dorigo, M. and Stutzle, T. (2004). *Ant colony optimization*, Massachusetts Institute of Technology - MIT Press.
- Haque, M. H. (1996). 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.
- Nara, K., Shiose, A., Kitagawa, M. and Ishihara, T. (1992). Implementation of genetic algorithm for distribution systems loss minimum reconfiguration, *IEEE Transaction on Power System* **7**(3): 1044–1051.
- 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 - PSC* pp. 326–330.
- Pereira, F. S., Vittori, K. and da Costa, G. R. M. (2006). Distribution system reconfiguration for loss reduction based on ant colony behavior, *IEEE PES Transaction and Distribution Conference and Exposition Latin America, Venezuela*.
- Stutzle, T. and Hoos, H. H. (1996). Improving the ant system: A detailed report on the max-min ant system, *FG Intellektik, FB Informatik, TU Darmstadt, Germany, Tech. Rep. AIDA* pp. 1–22.
- Stutzle, T. and Hoos, H. H. (2000). Max-min ant system, *Future Generation Computer Systems - Elsevier Science* **16**: 889–914.
- Zhijiam, H., and G. Yang, H. X. and Dong, L. (2008). Distribution network reconfiguration based on ant colony system algorithm, *IEEE Industrial Electronics and Application, ICIEAalgorithm, Conference* pp. 2470–2474.