

RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA RADIAIS UTILIZANDO ALGORITMO BASEADO EM COLÔNIA DE FORMIGAS.

Waldemar Pereira Mathias Neto, José Roberto Sanches Mantovani, Luis Gustavo Wesz da Silva.– Engenharia Elétrica – Departamento de Engenharia Elétrica – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Campus de Ilha Solteira.

A reconfiguração de redes aéreas de distribuição de energia elétrica é um problema de programação não linear inteiro misto (PNLIM) de natureza combinatória, que gera espaços de busca muito grandes para sistemas de distribuição reais. A alteração da topologia, mantendo-se a radialidade da rede, é realizada de modo a reduzir as perdas ativas do sistema, melhorar o perfil de tensão e aumentar os níveis de confiabilidade, eliminando e/ou isolando faltas para restaurar o fornecimento de energia. A restrição de radialidade é um dos fatores complicantes para o problema, pois não é possível representar esta restrição através de relações algébricas simples e, portanto, tornando-se muito difícil o uso de algoritmos baseados em técnicas determinísticas de otimização. Algoritmos eficientes dedicados a reconfiguração de redes aéreas utilizam metas heurísticas. O algoritmo de colônia de formigas é uma meta heurística inspirada na observação de colônias de formigas reais que são insetos sociais e vivem em colônias, sendo o comportamento dos indivíduos direcionado muito mais pela sobrevivência da colônia do que de cada indivíduo em si. Um dos problemas estudados pelos entomologistas está relacionado com o fato de como insetos quase cegos como as formigas, podem se guiar estabelecendo caminhos de rota mínima entre seus ninhos e as fontes de alimento. Foi descoberto que o meio usado entre os indivíduos para trocar informações relacionadas ao caminho está ligado à intensidade de cheiro do feromônio, uma substância deixada pelas formigas ao se movimentar. Enquanto uma formiga isolada move essencialmente de forma aleatória, uma formiga encontrando uma trilha previamente marcada com o cheiro de feromônio pode detectar e decidir com alta probabilidade seguir esta trilha, reforçando o cheiro com o seu próprio feromônio. Desta forma há um comportamento coletivo do tipo autocatalítico, em que a maioria das formigas segue o cheiro, e o cheiro mais intenso torna por ser seguido. O processo é então caracterizado por um laço de realimentação positivo, onde a probabilidade com que uma formiga escolha um determinado caminho aumenta com o número de formigas que escolhe previamente o mesmo caminho. Assim uma rota é determinada, e esta possui uma alta probabilidade de ser a menor possível.

Neste trabalho, para a solução do problema de reconfiguração propõe-se um método baseado na meta-heurística de colônia de formigas (Ant Colony System – ACS), e que utiliza como ferramenta auxiliar um algoritmo de fluxo de potência monofásico para redes radiais de distribuição de energia elétrica. Da mesma maneira que formigas reais encontram o menor caminho entre seu ninho e a fonte de alimento, é possível por analogia abstrair e criar formigas artificiais que encontrem configuração ótima para o problema de reconfiguração de redes radiais de distribuição de energia elétrica.

De um modo geral, as soluções candidatas para o problema de reconfiguração são formadas pelas formigas que, partindo dos alimentadores, caminham pelos ramos que representam o grafo do sistema de distribuição até completar uma topologia radial. Durante uma iteração do algoritmo cada formiga $k[1, \dots, m]$ constrói uma configuração radial executando $(nb-s)$ passos, onde nb representa o número total de barras da rede de distribuição e s o número de alimentadores. As iterações são representadas por t , onde t pertence ao intervalo entre 1 e o número máximo de iterações t_{\max} , definido pelo usuário, que pode ser utilizado como critério de parada.

Para cada formiga k , a transição da barra i para a barra j da rede de distribuição na iteração t do algoritmo depende de três fatores:

i) Se a barra j já foi visitada pela formiga k . Existe uma memória para cada formiga, que é representada pelo conjunto J^k . Esse conjunto contém todas as barras que a k -ésima formiga já visitou.

Quando uma barra j é visitada pela formiga k , ela é adicionada ao conjunto J^k para evitar uma nova visita. Inicialmente J^k contém apenas os nós raízes dos alimentadores (S/E's).

ii) Do parâmetro visibilidade, definido como o inverso da resistência $\eta_{ij} = 1/R_{ij}$ do ramo entre a barra i e j .

iii) Intensidade de feromônio $\tau_{ij}(t)$ presente nos ramos que conectam duas barras. Atualizada a cada iteração, a trilha de feromônio é uma informação global, modificada dinamicamente, refletindo as experiências adquiridas pela colônia durante a construção da configuração radial.

De modo a garantir que as configurações que estão sendo formadas pelas formigas sejam radiais, apenas algumas barras devem concorrer entre si durante a construção da solução pela formiga k . Estas barras são armazenadas no conjunto L^k . Em cada ciclo de construção, este conjunto é alterado e algumas barras podem ser adicionadas ou excluídas. Se as barras i e j estão interconectadas, pode-se dizer que as barras presentes em L^k são:

$$j \in L^k, \text{ se } i \in J^k \text{ e } j \notin J^k$$

A regra de transição, isto é, a probabilidade da formiga k ir da barra i para a barra j , enquanto constrói a sua t -ésima solução, é dada pela seguinte fórmula:

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{j \in L^k \text{ e } i \in J^k} [\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta} & \text{se } j \in L^k \text{ e } i \in J^k \\ 0 & \text{se } j \notin L^k \text{ ou } i \notin J^k \end{cases}$$

em que α e β são dois parâmetros ajustáveis que controlam o peso relativo da intensidade de feromônio da trilha, $\tau_{ij}(t)$, e da visibilidade, η_{ij} . Se o parâmetro α for nulo, as barras com a menor resistência entre si são mais prováveis de serem selecionadas. Porém, se β for nulo é considerado somente a quantidade de feromônio. É importante notar que embora a fórmula da equação acima permaneça constante durante uma iteração, o valor da probabilidade $P_{ij}^k(t)$ pode ser diferente para duas formigas em uma mesma barra i . Isso porque a probabilidade $P_{ij}^k(t)$ é uma função de J^k . Ou seja, ela depende da solução parcial construída pela k -ésima formiga. Na figura 01 mostram-se os dois passos iniciais dos ($nb-s$) passos necessários para a construção de uma topologia radial. Os ramos destacados concorrerão entre si com objetivo de se tornar um circuito energizado. Inicialmente em (a), o conjunto J^k contém apenas as barras 1, 2 e 3, enquanto o conjunto L^k as barras 4, 8 e 13; em (b), depois de aplicada a regra de transição é escolhida a barra 4 para movimentar-se e os conjuntos J^k e L^k são atualizados, modificando-se para 1, 2, 3, 4 e 5, 6, 8 e 13, respectivamente; em (c) novamente a regra de transição é aplicada e a formiga k move-se em direção a barra 6.

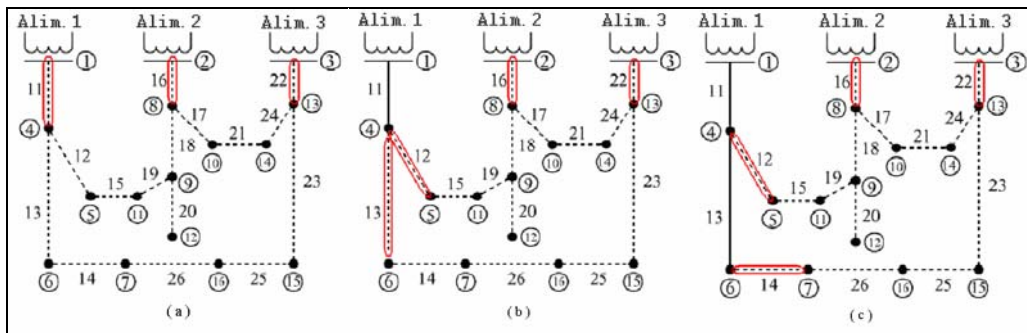


Fig. 01 - Início da construção de uma configuração radial realizada por uma formiga.

Após encontrar o conjunto das k soluções factíveis construídas pelas formigas, a sub-rotina de fluxo de potência é executada para cada configuração, avaliando função de adaptação. Até o presente estágio de desenvolvimento da pesquisa a função de adaptação é a perda de potência ativa no sistema. Em seguida as k formigas adicionam certa quantidade de feromônio $\Delta\tau_{ij}(t)$ às linhas (i, j) utilizadas. Isto torna os ramos mais atraentes às futuras formigas na construção de novas soluções. Na iteração t , a formiga k adiciona uma quantidade feromônio à linha (i, j) , pertencente à topologia do problema, de acordo com a equação abaixo:

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} Q/R_{ij} & \text{se } (i, j) \in S^k(t) \\ 0 & \text{se } (i, j) \notin S^k(t) \end{cases}$$

onde $S^k(t)$ é o conjunto de circuitos energizados pertencentes à configuração radial encontrada pela formiga k na iteração t , e $R_{ij}(t)$ é a resistência do ramo entre as barras i e j . Q é um parâmetro ajustável usado para determinar a taxa de feromônio que é adicionado às linhas.

Ao longo do tempo certa quantidade do feromônio evapora e esta redução da quantidade de feromônio na trilha é implementada pela introdução do coeficiente de redução. Ele é denominado ρ , e seus valores estão no intervalo $[0,1]$. A regra da atualização da quantidade de feromônio resultante aplicada em todos os ramos é dada pela seguinte fórmula:

$$\tau_{ij}(t+1) = \rho \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij}(t)$$

em que $\Delta \tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k(t)$, e m representa o número de formigas. A quantidade inicial do feromônio em todas as arestas é dada por uma pequena constante positiva τ_0 . Na figura 02 ilustra-se o pseudocódigo do algoritmo ACS dedicado a reconfiguração de redes de distribuição.

```

/* Inicialização */
Defina os parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\rho$ ,  $Q$ ,  $t_{\max}$  e o número  $m$  de formigas
Para todos os ramos do sistema faça  $\tau_{ij}(0) = \tau_0$ 
Seja  $S^+$  a configuração radial básica e  $P_{LOSS}^+$  sua função de adaptação
/* Loop principal */
Distribua todas as  $k$  formigas nos nós raízes ( $J_k = \{\text{nós raízes}\}$ )
Para todas as  $t$  iterações e todas as  $k$  formigas
  Construa a solução  $S^k(t)$  aplicando b - s vezes o passo:
    Construa o conjunto  $L^k$ 
    Escolha a próxima barra  $j$  de acordo com a probabilidade
    
$$P_y^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{j \in L^k, i \in J^k} [\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta} & \text{se } j \in L^k \text{ e } i \in J^k \\ 0 & \text{se } j \notin L^k \text{ ou } i \notin J^k \end{cases}$$

    Para todas as  $k$  formigas calcule a função adaptação  $P_{LOSS}$  de sua
    configuração através da sub-rotina de fluxo de potência
    Se uma solução melhor for encontrada então atualize  $S^+$  e  $P_{LOSS}^+$ 
    Para cada formiga atualize o cheiro do feromônio do ramo  $(i, j)$ 
    segundo a regra
    
$$\Delta \tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} Q/R_{ij} & \text{se } (i, j) \in S^k(t) \\ 0 & \text{se } (i, j) \notin S^k(t) \end{cases}$$

    
$$\tau_{ij}(t+1) = \rho \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij}(t)$$

/* Loop principal */
Imprima a melhor solução  $S^+$  e sua potência perdida  $P_{LOSS}^+$ 

```

Fig. 02 - Pseudocódigo do algoritmo ACS aplicado ao problema de reconfiguração.

A implementação computacional do algoritmo é testada e analisada através de um sistema com 16 barras e três chaves de interconexão, ilustrado na figura 03.

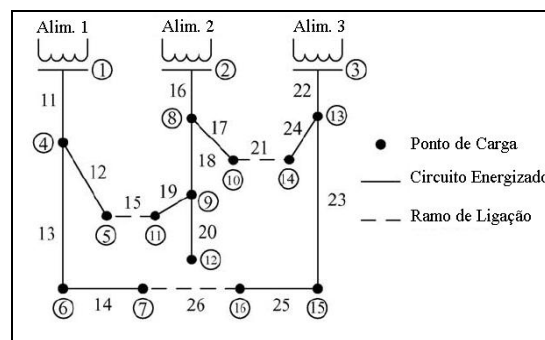


Fig. 03 - Sistema de 16 barras testado.

A carga foi assumida constante e $S_{base} = 100 MVA$. Os parâmetros de utilização do algoritmo foram $\alpha = 1$, $\beta = 5$, $\rho = 0.5$, $Q = 1$ e número de formigas igual ao número de alimentadores. O número de iterações foi 10. Na tabela 01 a seguir ilustram-se os resultados obtidos.

Tabela 01 - Resultados obtidos para o problema da reconfiguração de redes.

	Configuração inicial	Após a reconfiguração
Ramos de Ligação	15, 21, 26	17, 19, 26
Perda de Potência (kW)	511,44	466,13
Redução de Potência (%)	--	8,86
Ramos de ligação alterados	--	2
Tempo CPU (s)	--	0,03

Como se pode observar na tabela acima, houve uma grande redução de potência no sistema, cerca de 9%, substituindo apenas dois dos seus 16 ramos. O esforço computacional foi relativamente pequeno, 0,03 segundos de CPU. Este tempo reduzido de CPU está relacionado com dimensão do espaço de busca para este sistema que é pequeno e também à necessidade de poucas iterações para que o método convergisse. A solução ótima para este problema foi obtida de forma rápida e eficiente, reduzindo as perdas técnicas de potência ativa, mostrando assim a eficiência e rapidez do método de otimização empregado.

O ACS tem se apresentado como uma ferramenta simples e eficiente para solução do problema de reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica. Testes com sistemas de maior porte devem ser realizados nas próximas etapas do desenvolvimento desta pesquisa para testar a viabilidade de empregar o algoritmo ACS para resolver o problema de reconfiguração *on line* de redes de distribuição reais, utilizando modelos realísticos para o problema.

Referências Bibliográficas

1. C. Su, C. Chang, J. Chiou, "Distribution Network Reconfiguration for Loss Reduction by Ant Colony Search Algorithm", Electric Power Systems Research, Vo. 75, 2005, pp. 190-199.
2. M. Dorigo; V. Maniezzo, "The Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents", IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics- Part B, Vol. 26, No. 1, 1996, pp.1-13.
3. E. Carpaneto, G. Chicco, "Ant-Colony Search-Based Minimum Losses Reconfiguration of Distribution Systems", IEEE MELECON, Vol. 3, 2004, pp. 971-974.
4. J.R.S. Mantovani, F. Casari, R. Romero, "Reconfiguração de Sistemas de Distribuição Radiais Utilizando o Critério de Queda de Tensão", Controle e Automação, Revista da Sociedade Brasileira de Automática, Vol. 11, No. 3, Setembro - Dezembro, 2000.

Bolsa: FAPESP