



ALOCAÇÃO ÓTIMA DE BANCOS DE CAPACITORES UTILIZANDO A META-HEURÍSTICA COLÔNIA DE FORMIGAS

Luís Miguel Magalhães Torres¹, Helton Nascimento Alves²

¹ Aluno do Curso de Engenharia Elétrica Industrial – IFMA. Bolsista FAPEMA. e-mail: luistorres@ieee.org

² Professor Doutor do Departamento de Eletroeletrônica (DEE)- IFMA. e-mail: helton@ifma.edu.br

Resumo: Um algoritmo baseado na Meta-heurística Colônia de Formigas é proposto para solução do problema de alocação de bancos de capacitores em redes de distribuição. O algoritmo proposto tem como objetivo minimizar as perdas de potência ativa e melhorar o perfil de tensão do alimentador. O algoritmo proposto é aplicado em um alimentador radial de 103 barra e os resultados comparados com os resultados obtidos com outras técnicas.

Palavras-chave: Bancos de Capacitores, Rede de Distribuição, Colônia de Formigas, Alocação Ótima.

1. INTRODUÇÃO

No sistema de distribuição de energia elétrica ocorre grande parte de todas as perdas elétricas do sistema de potência e um dos motivos é o seu fator de potência que geralmente é baixo devido à incidência de muitas cargas predominantemente indutivas. As principais consequências disso são: aumento das perdas de energia e de potência ativa de pico, queda no perfil de tensão e má utilização da capacidade instalada, o que pode exigir maiores investimentos na geração.

Um dos meios mais eficientes de reduzir as perdas no sistema de distribuição é a compensação reativa através da aplicação de bancos de capacitores em derivação. O problema de alocação ótima de bancos de capacitores em sistema de distribuição radial consiste em determinar os tamanhos, as localizações e esquema de controle dos bancos alocados nos alimentadores primários dos sistemas de distribuição. Para a solução deste problema são consideradas restrições operacionais, físicas e econômicas. Pretende-se minimizar as perdas de potência ativa com o objetivo de manter o perfil de tensão das barras do sistema dentro de uma faixa adequada, exigida pela legislação do setor elétrico.

Os métodos de solução do problema da compensação reativa são diversificados e evoluem em conformidade com os recursos computacionais disponíveis. Ng et al. (Ng et al., 2000) classificam esses métodos em quatro grupos: analíticos, de programação matemática, heurísticos e baseados em linguagem de inteligência artificial. Dentre esses se destacam os baseados em linguagem de inteligência artificial devido à grande facilidade de se ajustarem ao problema de compensação reativa. Como exemplo se tem os trabalhos de Ananthapadmanadha et al. (1996) que utiliza *simulated annealing*, Alves et al. (2005) utiliza lógica *fuzzy*, Alves et al. (2004) utiliza algoritmos genéticos, Romero e Takehara (2006) utiliza sistemas imunológicos artificiais, Huang et al. (1996) utiliza busca tabu, Santoso e Tan (1990) utiliza redes neurais, entre outros.

Neste trabalho se propõe um método de otimização baseado na Meta-heurística Colônia de Formigas para resolver o problema de alocação ótima de bancos de capacitores em redes de distribuição radial. O objetivo do algoritmo é maximizar a redução das perdas de potência ativa e melhorar o perfil de tensão no alimentador, respeitando as restrições de tensão de barra e fator de



potência impostas pela legislação vigente. Para a validação do algoritmo proposto, os resultados obtidos serão comparados com os resultados obtidos através das técnicas de Algoritmo Genético e Microgenético.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 COMPENSAÇÃO REATIVA

Um dos meios mais eficientes de reduzir as perdas no sistema de distribuição é a compensação reativa através da aplicação de bancos de capacitores em derivação. Sem dúvida, a localização mais adequada dos bancos de capacitores é na carga que se deve compensar. Os grandes e médios consumidores industriais são responsabilizados pela compensação reativa das suas cargas e por isso, precisam instalar bancos junto às cargas, a fim de evitar fatores de potência baixos. Resta às concessionárias de energia elétrica compensar as cargas dos pequenos consumidores e complementar à compensação dos consumidores médios. O planejamento da compensação reativa consiste na determinação da capacidade, localização e tempo de operação ótimo para maximizar a redução de perdas.

2.2 FLUXO DE POTÊNCIA

O cálculo do fluxo de carga é uma parte imprescindível para a obtenção das perdas de potência e energia de um alimentador. Existem muitos métodos para o cálculo de fluxo de carga, dentre estes se destaca o método da soma de potência. Ele é bastante utilizado para cálculo do fluxo e perdas de potência em sistemas de distribuição radiais, pois é veloz e apresenta boa convergência, mesmo em caso de sobrecargas do sistema *Rudnick e Munoz* (1990). Os passos necessários descritos de uma forma simplificada para o cálculo do fluxo de carga são:

1. Iniciar com acúmulo e perdas de potências nos ramos (inicialmente as perdas serão nulas);
2. Partindo do nó fonte em direção as barras terminais, calcular uma estimativa das tensões nodais em cada barra do sistema;
3. Utilizando as tensões obtidas no passo 2 calcular uma estimativa das perdas nos ramos;
4. Voltar ao passo 1 enquanto houver uma diferença apreciável entre as novas perdas calculadas e as perdas do passo anterior.

2.3 META-HEURÍSTICA COLÔNIA DE FORMIGAS

A Meta-heurística Colônia de Formigas imita o comportamento de formigas reais para tentar achar a solução ótima para determinado problema *Dorigo e Di Caro (1999a)*. Na natureza, uma formiga após encontrar alimento volta a sua colônia, deixando um rastro de feromônio entre a colônia a fonte de comida. Se outras formigas descobrem esse rastro, elas serão atraídas pelo feromônio e seguirão o rastro, com certa probabilidade, e conseqüentemente o mesmo caminho. Então essas novas formigas irão aumentar a quantidade de feromônio depositado no caminho percorrido. Futuras formigas escolherão este caminho com maior probabilidade devido ao aumento da quantidade de feromônio no mesmo. O resultado final é um rastro de feromônio forte da colônia até a fonte de alimento, atraindo cada vez mais formigas.

Formigas Artificiais implementam um algoritmo construtivo. Basicamente, esse algoritmo iniciam com uma solução parcial e passo a passo adicionam um componente a solução parcial do problema até chegar a solução final.

A cada passo, as formigas artificiais tomam uma decisão estocástica para escolher a próxima componente a ser adicionada a solução parcial. Esta decisão depende de dois tipos de informações:

- Nível de Feromônio;



- Informação Heurística;

Após as formigas artificiais completarem a construção da solução, elas depositam no caminho que foi percorrido até a solução final. Este processo é repetido até que seja satisfeito um, ou mais, critérios de parada.

3. ALGORITMO PROPOSTO

A solução do problema de alocação de bancos de capacitores é representada por um vetor x de tamanho t , onde t é a quantidade de barras do alimentador e o componente x_i representa o número de bancos de capacitores alocados na barra i do alimentador. Na figura 1 temos o exemplo de um vetor que representa a solução do problema, onde no exemplo são 2 bancos alocados na barra 4 e um banco alocado na barra 6 e 7.

0	0	0	2	0	1	1
---	---	---	---	---	---	---

Figura 1 : Exemplo de solução do problema em uma alimentador de 7 barras

A formiga artificial constrói a solução, passo a passo, como será descrito a seguir. Em cada passo, a formiga seleciona uma barra do sistema e adiciona uma quantidade selecionada de bancos de capacitores a barra. A formiga para o processo de construção da solução, quando o número de bancos de capacitores instalados ou barra com bancos instalados chegar a um limite estabelecido ou quando não houver mais melhoria na solução.

A matriz feromônio, τ , é uma matriz de n linhas e t colunas, onde n é a quantidade máxima de bancos de capacitores que podem ser instaladas em uma barra do alimentador, onde cada elemento da matriz feromônio representa a quantidade de feromônio presente. Na figura 2 temos um exemplo da

		Barra			
		1	2	...	t
Ban cos	1				
	2				
	3				
	...				
	n				

Figura 2: Matriz Feromônio

representação da matriz feromônio.

A informação heurística, η_{ij} , representa o quão bom é alocar uma determinada quantidade de módulos de bancos de computadores e é definido pela redução das perdas ativas pela alocação de i bancos de capacitores na barra j .



$$P_{ij} = \frac{(\tau_{ij})^\alpha (\eta_{ij})^\beta}{\sum \sum (\tau_{ij})^\alpha (\eta_{ij})^\beta}$$

Equação 1

O critério usado por uma formiga para selecionar a próxima barra e a quantidade de bancos de capacitores a serem escolhidos no próximo passo da construção da solução completa é definido pela equação 1, onde: α e β são constantes que controlam o peso relativo do rastro de feromônio e da informação heurística na seleção do próximo passo da solução.

Depois de todas as formigas terem completado a construção da solução, o rastro de feromônio é atualizado. Neste caso duas formas de atualização dos rastros do feromônio podem ocorrer, uma sem a evaporação do feromônio como está mostrado na equação 2, onde feromônio é adicionado em todos os nós que fazem parte da solução que foram visitados. E para evitar uma convergência prematura do algoritmo usa-se o artifício da evaporação do feromônio que faz a quantidade de feromônio decair a cada ciclo de construção de solução, *Pimentel Filho et. al. (2009)*. Na equação 3 temos o decaimento do feromônio, onde ρ é a taxa de evaporação de feromônio que é uma constante menor que 1.

$$\tau_{ij} = \tau_{ij} + \sum \Delta\tau_{ij}$$

Equação 2

$$\tau_{ij} = (1 - \rho)\tau_{ij}$$

Equação 3

O fluxo de potência utilizado foi o método da soma de potência, esse método foi escolhido devido a sua simplicidade e eficiência. Mais detalhes podem ser encontrados em *Monticelli (1993)*.

6.RESULTADOS OBTIDOS

O algoritmo proposto foi aplicado em um alimentador radial de 103 barras com tensão na subestação de 13.8 kV e sem desequilíbrios, na tabela 1 temos as perdas no alimentador sem a alocação de bancos de capacitores. Foram realizados testes com três algoritmos utilizando a meta-heurística colônia de formigas. O primeiro algoritmo considera uma formiga saindo de cada barra com a quantidade de bancos a ser instalada e utiliza a equação 2 para atualização do feromônio. O segundo é similar ao primeiro mudando apenas que utiliza a equação 3 para realizar a evaporação do rastro de feromônio. O terceiro algoritmo difere dos outros dois pois a quantidade de formigas é limitada e também utiliza a evaporação do rastro de feromônio. Os parâmetros foram definidos de forma experimental, mas utilizando como base os valores citados em *Dorigo e Di Caro (1999b)*, os valores foram: $\alpha=0.1, \beta=2$ e $\rho=0.5$ para os três algoritmos. O algoritmo genético utilizado tinha uma população de 100 indivíduos, taxa de cruzamento de 80%, mutação de 1% e um total de 100 gerações e o algoritmo microgenético tinha uma população de 10 indivíduos, taxa de cruzamento de 80%, 10 gerações por migração e um total de 20 migrações. Todos os algoritmos tiveram restrições no limite de bancos alocados no alimentador, bancos por barra e números de barras com bancos de capacitores alocados, esses limites são respectivamente 15, 2 e 10.

Na tabela 2 temos os resultados obtidos com os três algoritmos baseados na meta-heurística colônia de formigas e na tabela 3 temos os resultados obtidos com o algoritmo genético e com o algoritmo microgenético. Os algoritmos tiveram resultados semelhantes sendo a diferença predominante o tempo de processamento do mesmo. Os algoritmos utilizando colônia de formigas 1 e



2 tiveram os piores tempos de processamento, pois a quantidade formigas era elevada e isso torna o processo mais demorado, mas tiveram o melhor resultado no quesito redução das perdas, pois com um número maior de formigas se consegue analisar um número maior de possíveis soluções. Na figura 3 temos o gráfico que compara a evolução do algoritmo 1 e 2, o algoritmo 2 apresentou uma evolução mais rápida no resultado obtido, mas o algoritmo 1 atingiu um resultado melhor, isso se deve ao fato da presença da evaporação do feromônio no algoritmo 2 que faz com que as solução que não visitadas percam feromônio e cada vez mais diminuindo sua probabilidade de aparecerem na solução final. O algoritmo colônia de formigas 3 obteve um bom tempo de processamento, o mais rápido entre todos, mas o resultado não foi tão bom quanto o obtido com os outros algoritmos, devido ao pequeno número de formigas o que provoca uma menor eficiência na varredura do espaço de busca das soluções. Em comparação com os algoritmos genético e microgenético os resultados obtidos foram superiores, exceto do algoritmo colônia de formiga 3, o que mostrar que a técnica é boa para a solução do problema, mas formas de melhorar o tempo de processamento devem ser estudadas para uma melhor relação resultados obtidos versus tempo de processamento.

Comparando as perdas no alimentador antes e após a alocação de bancos de capacitores prevista percebemos uma grande redução. A tensão mínima que sem a alocação dos bancos de capacitores ficava fora dos limites da norma da ANEEL, valores podem ser encontrados em *ANEEL (2010)*, nos 3 algoritmos proposto a tensão mínima encontrada no alimentador ficou dentro dos limites exigidos pela legislação vigente. Também percebe-se um considerável aumento no fator de potência do alimentador, que após a alocação prevista teve o seu fator de potência alterados para valores próximos a 1.

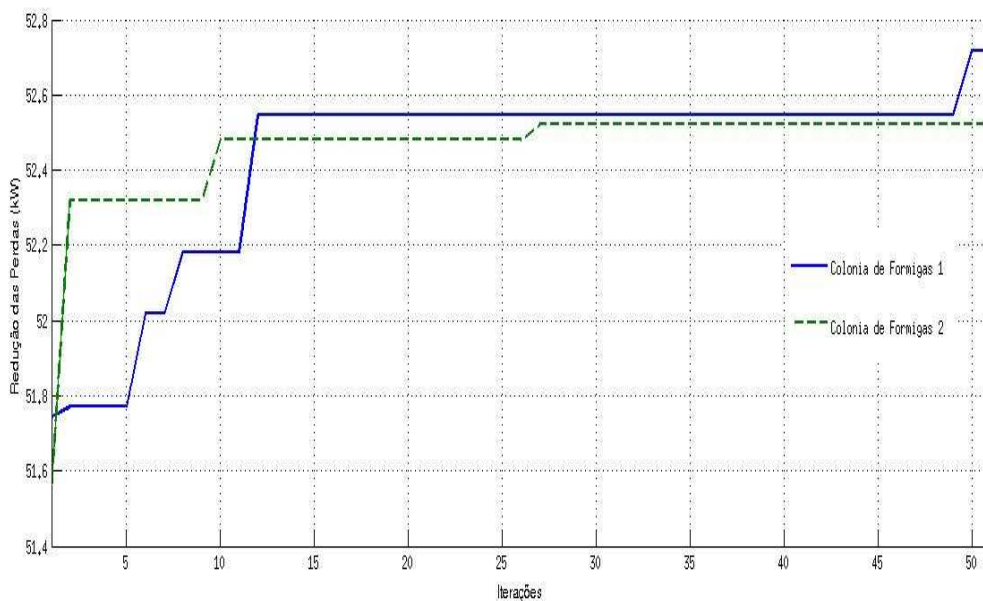


Figura 3: Evolução do resultado dos algoritmos Colônia de Formiga 1 e 2

Tabela 1: Perdas do Alimentador Sem Alocação de Bancos de Capacitores

Alimentador 103 Barras Radial	
Perdas (kW)	225,98
F.P. (cos(φ))	0,9480
Menor Tensão (kV)	12,710
Maior Tensão (kV)	13,720



Tabela 2: Resultados Obtidos com a Meta-Heurística Colônia de Formigas

Colônia de Formigas 1		Colônia de Formigas 2		Colônia de Formigas 3		
Barra	Nº de Bancos	Barra	Nº de Bancos	Barra	Nº de Bancos	
6	2	5	2	20	2	
12	1	23	1	29	2	
30	2	25	1	46	2	
35	2	27	2	49	2	
41	2	35	2	63	2	
54	2	43	2	79	2	
75	2	47	2			
88	1	85	2			
99	1	95	1			
Redução (kW)		52,7183	Redução (kW)	52,5218	Redução(kW)	51,1374
F.P. (cos(□))		0,9946	F.P. (cos(□))	0,9945	F.P. (cos(□))	0,9992
Menor Tensão (kV)	13,1	Menor Tensão (kV)	13,098	Menor Tensão (kV)	13,053	
Maior Tensão (kV)	13,755	Maior Tensão (kV)	13,755	Maior Tensão (kV)	13,748	
Tempo (min)	2,9922	Tempo (min)	5,1542	Tempo (min)	0,5543	

Tabela 3: Resultados Obtidos Utilizando Algoritmo Genético e Microgenético

Algoritmo Genético		Algoritmo Microgenético		
Barra	Nº de Bancos	Barra	Nº de Bancos	
28	2	16	2	
38	1	22	2	
44	1	46	2	
49	1	61	1	
50	1	68	1	
52	1	78	2	
65	1	90	1	
79	1	100	1	
88	1			
97	1			
Redução (kW)		51,301	Redução (kW)	51,3695
F.P. (cos(□))		0,9939	F.P. (cos(□))	0,9912
Menor Tensão (kV)		1,3054	Menor Tensão (kV)	1,3070



Maior Tensão (kV)	1,3746	Maior Tensão (kV)	1,3748
Tempo (min)	1,9213	Tempo (min)	0,2653

6. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um algoritmo baseado na meta-heurística colônia de formigas para a alocação ótima de bancos de capacitores em redes de distribuição radiais. O método proposto foi comparado com uma técnica já muito utilizada que são os algoritmos genético e microgenético e mostraram que as novas meta-heurísticas baseadas no comportamento da natureza também se mostram eficientes na solução de problemas na engenharia elétrica, neste caso na área de qualidade da energia elétrica e planejamento do setor elétrico. Os resultados obtidos foram bons, mas melhorias devem ser feitas para melhorar o tempo de processamento do algoritmo, uma delas deve ser a implementação de um fluxo de potência com memória para o mesmo salvar os resultados dos últimos fluxos de potência calculados e assim na repetição de uma configuração de alocação de bancos de capacitores apenas buscar na memória sem a necessidade realizar novamente a rotina de cálculo de fluxo de potência.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo a Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão (FAPEMA) e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão (IFMA) pelo apoio à pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ALVES, H. N. B. A. SOUZA, E H. A. FERREIRA (2005) **Banks of automatic capacitors in electrical distribution systems: a hybrid algorithm of control**. SBA Controle & Automação, Volume 16, Nº. 1, pp. 93–99.
- ALVES, H. N., B. A. SOUZA, H. D. M. BRAZ E N. KAGAN (2004). **Optimal capacitor allocation in electrical distribution systems based on typical load profiles**. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, São Paulo, SP, pp. 441–447.
- ANANTHAPADMANADHA, T.; KULKARNI, A. D., GOPALA RAO, A. S. E SAGHAVENDRA SAO, K. **Knowledge-based Expert System for Optimal Reactive Power Control in Distribution System Electrical Power & Energy Systems**, Vol. 18, No. 1, pp. 27-31, 1996.
- ANEEL (2010). **Resolução Nº 424, de 17 de dezembro de 2010**. 2 p. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/>>. Acesso em: 10/02/2011.
- DORIGO, M., & DI CARO, G. (1999a). The ant colony optimization meta-heuristic. In D. Corne, M. Dorigo, & F. Glover (Eds.), **New Ideas in Optimization** (pp. 11–32). London, McGraw Hill.
- DORIGO, M.; DI CARO, G.; (1999b) , "Ant colony optimization: a new meta-heuristic". Evolutionary Computation, CEC 99. Proceedings of the 1999 Congress on , vol.2, no., pp.3 vol. (xxxvii+2348), 1999 doi: 10.1109/CEC.1999.782657.
- HUANG, Y. C., H. T. YANG AND C. L. HUANG (1996). **Solving the capacitor placement problem in a radial distribution system using Tabu Search approach**. IEEE Trans. on Power Systems, Volume 11, Nº. 4, pp. 1868–1873.



- MONTICELLI, A. **Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica**, Ed. Edgar Blücher Ltda., 1983.
- ROMERO R. AND R. TAKEHARA (2006). **Artificial immune systems applied to optimal capacitor placement in radial distribution networks**. IEEE PES Transmission & Distribution Conference & Exposition Latin America, Caracas, Venezuela, pp. 1–7.
- RUDNICK, H., MUNOZ, M. **“Three phase load flow analysis in radial power systems”**, 1º SIDEE, 1990.
- SANTOSO, N. I. AND O. T. TAN (1990). **Neural-net based real-time control of capacitors installed on distribution systems**. IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 5, Nº 1, pp. 266-272.