

# CLASSIFICAÇÃO DE BARRAS DE UM SEP UTILIZANDO ALGORITMO DE FORMIGAS

MICHELLE F. LEITE<sup>1</sup>, BENEMAR A. DE SOUZA<sup>1</sup>

1. *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande  
Caixa Postal 10053, 822, 58429-970, Campina Grande, PB, Brasil  
E-mails: mfleite@gmail.com, benemar@ieee.org*

**Abstract**— This article presents an optimization technique for bus classification at Electric Power System using an index of voltage stability called Fast Voltage Stability Index (FVSI) and metaheuristic Ant Colony Optimization (ACO). At each increment of reactive power are obtained index values FVSI the lines of the system, so that they are evaluated for their loads. If any line of the system has value FVSI close to unity (stability condition of the system), the bus connected to this line stops receiving reactive power increments. The ant colony metaheuristic is employed in order to obtain the critical buses of the power system on the capacity of these have to be incremented with reactive power. The algorithm makes decisions on how to classify the buses by varying the FVSI index lines of the system. A major contribution of this method is the construction of a quick and effective way to evaluate the stability of power system voltage and may then be used by system operators to form on-line.

**Keywords**— Electric power system, voltage stability, FVSI, critical buses, ant colony optimization.

**Resumo**— Este trabalho apresenta uma técnica de otimização para a classificação de barras de um Sistema Elétrico de Potência (SEP) utilizando conjuntamente um índice de estabilidade de tensão denominado *Fast Voltage Stability Index* (FVSI) e a metaheurística de otimização por colônia de formigas (ACO). A cada incremento de potência reativa, são obtidos os valores do índice FVSI das linhas do sistema, de modo que elas sejam avaliadas quanto aos seus carregamentos. Caso alguma linha do sistema apresente valor de FVSI próximo à unidade (condição de estabilidade do sistema), a barra ligada a essa linha para de receber incrementos de potência reativa. A metaheurística colônia de formigas é empregada com a finalidade de obter as barras críticas do sistema de potência quanto à capacidade que essas possuem em serem incrementadas com potência reativa. O algoritmo toma decisões de como classificar as barras através da variação do índice FVSI das linhas do sistema. Uma grande contribuição do método é a construção de uma alternativa rápida e eficaz para avaliação da estabilidade de tensão de sistemas de potência, podendo posteriormente ser utilizada pelos operadores dos sistemas de forma *on-line*.

**Palavras-chave**— Sistema elétrico de potência, estabilidade de tensão, FVSI, barras críticas, algoritmo de formigas.

## 1 Introdução

Nos últimos anos o setor elétrico vem sofrendo grandes modificações em sua estrutura, principalmente as decorrentes do rápido crescimento da demanda de potência e interconexões, o que têm levado os sistemas elétricos a operarem próximos aos limites de capacidade de transferência de potência.

Segundo Kundur (1994), a estabilidade de tensão está intimamente ligada à capacidade que um sistema de potência possui em manter um perfil de tensão adequado, seja em condições normais de operação ou em casos de perturbações. Não sendo satisfeita a condição de estabilidade de tensão, ocorrerá o fenômeno denominado de instabilidade de tensão, caracterizado por uma queda (ou aumento) progressiva e irreversível na tensão de uma ou mais barras de um sistema de potência.

Avaliar a estabilidade de tensão é uma tarefa que exige cautela, pois se trata de um fenômeno complexo e não linear. Técnicas tradicionais para avaliação da problemática são mundialmente utilizadas, a exemplo da curva PV e da curva QV, que são índices de barras, e os índices de linha, como o índice  $L_{mn}$  e o Fast Voltage Stability Index (FVSI), pesquisados por Reis (2005). Na tentativa de desenvolver métodos rápidos e eficazes para avaliação da estabilidade de tensão, várias outras técnicas são propostas na literatura. São utilizados conjuntamente os métodos tradi-

cionais com técnicas de Inteligência Artificial (IA), como em Machado et al (2009), assim como com algoritmos bio-inspirados.

O algoritmo de formigas ou ACO (do inglês Ant Colony Optimization) foi concebido para resolver problemas de otimização combinatória e foi apresentado por Dorigo & Gambardella (1997). Em trabalhos posteriores, o método foi proposto para resolver o problema da estabilidade de tensão, analisando o máximo carregamento de um sistema de potência, como em Kalil et al (2006).

Neste artigo se propõe uma técnica para avaliação da estabilidade de tensão em que é empregado conjuntamente o índice de linha FVSI e o ACO, de forma que as peculiaridades do problema da estabilidade de tensão sejam consideradas para que o sistema testado opere de forma estável, sem riscos de ocorrência do colapso de tensão. A avaliação da estabilidade de tensão é feita calculando-se a variação do índice de estabilidade FVSI para obtenção de um conjunto de barras críticas do sistema.

## 2 Índice de Estabilidade FVSI

Os índices de estabilidade de tensão indicam o quão próximo o sistema está do colapso. Estes índices podem ser usados em tempo real ou não para auxiliar na avaliação do estado de um determinado sistema elétrico de potência. Os índices têm uma forma predefinida e, geralmente, são facilmente calculados compu-

tacionalmente. Dentre os diversos índices já existentes na literatura, este artigo irá se restringir ao índice de linha FVSI, de forma que o mesmo auxilie na determinação do carregamento máximo de potência reativa das barras de um sistema, permitindo a sua operação de forma estável, sem riscos de desligamentos provocados por colapso de tensão.

O FVSI foi formulado, inicialmente, derivando a equação quadrática da tensão para um sistema de duas barras, na extremidade da recepção, como é apresentado na Figura 1.

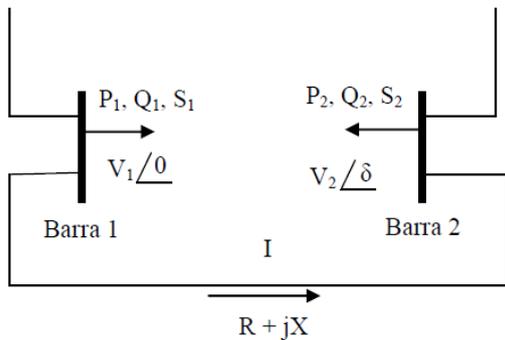


Figura 1. Modelo de sistema de potência com duas barras.

Sendo:

- $V_1$  e  $V_2$  as tensões nos barramentos 1 e 2 respectivamente;
- $P_1$ ,  $Q_1$  e  $S_1$  os fluxos de potência ativa, reativa e a potência aparente, respectivamente, do barramento 1;
- $P_2$ ,  $Q_2$  e  $S_2$  os fluxos de potência ativa, reativa e a potência aparente, respectivamente, do barramento 2;
- $I$  é a corrente da barra 1 para a barra 2;
- $R$  e  $X$  é a resistência e reatância, respectivamente, da linha que liga a barra 1 à barra 2.

A potência aparente chegando ao barramento 2 pode ser expressa por (1):

$$S_2 = V_2 I^* \quad (1)$$

$$I = \left( \frac{S_2}{V_2} \right)^* = \left( \frac{P_2 + jQ_2}{V_2 e^{j\delta}} \right)^* = \frac{P_2 - jQ_2}{V_2 e^{-j\delta}} \quad (2)$$

A corrente  $I$  pode ser expressa por:

$$I = \frac{V_1 - V_2}{Z} = \frac{V_1 e^{j\theta} - V_2 e^{j\delta}}{R + jX} \quad (3)$$

Igualando as equações (2) e (3), obtém-se (4):

$$\frac{P_2 - jQ_2}{V_2 e^{-j\delta}} = \frac{V_1 e^{j\theta} - V_2 e^{j\delta}}{R + jX} \quad (4)$$

Expandindo a equação na forma trigonométrica e isolando  $P_2$  obtém-se (5):

$$P_2 = \frac{-V_2 V_1 \text{Sen} \delta - Q_2 R}{X} \quad (5)$$

Substituindo-se a equação (5) na equação (4) e realizando manipulações algébricas obtém-se a relação (6):

$$\frac{4(X^2 + R^2)Q_2}{XV_1^2} \leq 1 \quad (6)$$

A equação (7) é a formulação do índice de estabilidade FVSI:

$$\text{FVSI}_{12} = \frac{4(X^2 + R^2)Q_2}{XV_1^2} \quad (7)$$

### 3 Algoritmo de Formigas ACO

O primeiro algoritmo colônia de formigas, denominado de Ant System (AS) foi proposto no início da década de 90 por Marco Dorigo (1992) em sua tese de Ph.D. A inspiração do algoritmo tem fundamentos na observação do comportamento das formigas quando estas saem da sua colônia à procura de alimento.

Aplicações iniciais para o algoritmo colônia de formigas foram sugeridas por Dorigo & Gambardella (1997) na busca de solução para um problema clássico do caixeiro viajante. A metaheurística colônia de formigas (Ant Colony Optimization - ACO) foi introduzida por Dorigo, Di Caro e Gambardella, sendo um método baseado em probabilidade e foi concebida para solucionar problemas de otimização.

Várias aplicações do ACO vêm sendo desenvolvidas em sistemas de potência, algumas delas são: reconfiguração de sistemas de distribuição, a exemplo de Souza et al (2009); alocação de bancos de capacitores, como em Pimentel Filho et al (2008); otimização do despacho econômico de energia elétrica, em Coelho et al (2008); planejamento da expansão da geração, trabalho desenvolvido por Guedes et al (2009).

O ACO é uma metaheurística inspirada no comportamento das formigas, que conseguem descobrir os menores caminhos entre o formigueiro e uma fonte de alimento através da cooperação mútua e de um mecanismo de comunicação indireta. Quando uma formiga se movimenta sobre o meio e descobre uma fonte de alimento, ela deposita uma substância química no trajeto, denominada feromônio, quando está voltando para o formigueiro. Esta substância atrai as outras formigas da colônia para a coleta do alimento encontrado. Logo, as formigas que percorrem a trilha menor até a fonte de alimento retornam ao formigueiro.

ro antes daquelas que escolhem trilhas maiores. A trilha menor possuirá uma maior concentração de feromônio que as demais, atraindo um número maior 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 Figura 2.

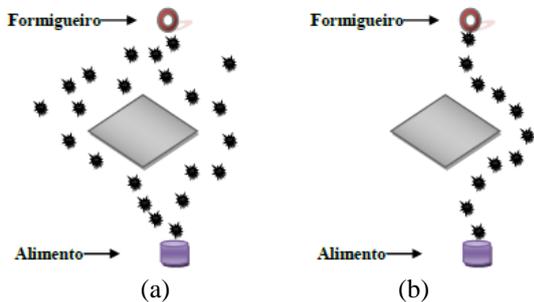


Figura 2. (a) Escolha aleatória do caminho; (b) Escolha do menor caminho.

Inicialmente, as formigas partem do formigueiro de forma aleatória em busca de alimento (Figura 2a). Com o tempo, elas passam a percorrer o menor caminho, já que se constitui o trajeto que possui maior concentração de feromônio (Figura 2b).

Um fato a ser observado é que devido à volatilidade do feromônio, há evaporação dessa substância nos caminhos em que as formigas percorrem. Essa evaporação se dá a uma determinada taxa por unidade de tempo e se constitui de um processo natural com a finalidade de evitar que as formigas persistam em caminhos que não sejam os melhores. Essa propriedade do feromônio possibilita que as formigas encontrem o caminho ótimo até a fonte de alimento.

A probabilidade de uma formiga  $K$  que se encontra em um local  $i$  visitar um outro local  $j$  é dada pela equação a seguir:

$$P_{ij} = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha \eta_{ij}^\beta}{\sum_{u \in \Psi} \tau_{ij}^\alpha \eta_{ij}^\beta}, & \text{se } j \in \Psi \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (8)$$

Sendo:

- $P_{ij}$  a probabilidade de uma formiga ir de um local  $i$  para um local  $j$ ;
- $\tau_{ij}$  a quantidade de feromônio sobre o caminho  $ij$ ;
- $\eta_{ij}$  o conhecimento individual de cada formiga sobre o caminho (informação heurística);
- $\alpha$  e  $\beta$  os pesos que ponderarão a concentração de feromônio e a informação heurística;
- $\Psi$  o conjunto dos caminhos que podem ser escolhidos pelas formigas.

## 4 O Algoritmo Proposto

O problema foi estabelecido de modo que as formigas obtivessem um conjunto de barras do sistema classificadas como críticas quanto à capacidade de incremento de potência reativa, ou seja: quanto maior a capacidade de reativos de uma barra, mais forte essa barra foi considerada, da mesma forma que, quanto menos reativos uma barra suportou, essa foi classificada como fraca ou crítica.

A capacidade de um sistema em suportar reativos está intimamente ligada à estabilidade de tensão: sistemas mais fortes e mais seguros estão melhores condicionados para suportarem uma quantidade razoável de reativos demandados pelas cargas que possam a ele serem ligadas, operando de forma estável e dentro de condições confiáveis quanto ao seu perfil de tensão, em condições normais ou em perturbações.

Para que a condição de estabilidade de tensão fosse satisfeita, evitando assim o fenômeno denominado de instabilidade de tensão, caracterizado por uma queda (ou aumento) progressiva e irreversível na tensão de uma ou mais barras de um sistema de potência, a função objetivo do problema foi definida de modo a englobar tais características, sendo formulada em (9):

$$FO = \Delta f_{ij} \quad (9)$$

Onde  $\Delta f_{ij}$  é a variação do índice FVSI de uma linha  $ij$  após o incremento de reativos. A escolha de calcular a variação do índice FVSI de uma linha entre os incrementos de potência reativa teve a finalidade de sinalizar as maiores variações de tensão proporcionalmente ao incremento de reativos nas barras e, dessa forma, identificar mais rapidamente quais as barras que suportariam menores quantidades de reativos e as que estariam mais susceptíveis à instabilidade de tensão.

A atualização de feromônio foi dada por:

$$\tau_{ij} = (1 - \rho)\tau_{ij} + \rho \Delta f_{ij} \quad (10)$$

Sendo:

- $\rho$  o coeficiente definido heurísticamente para evaporação de feromônio ( $0 < \rho < 1$ ).

## 5 Estudo de caso

Para realização do estudo foi escolhido o sistema do IEEE 14 barras, que representa uma parte do sistema de energia elétrica americano e são fornecidos para teste, com acesso mundial. A Figura 3 ilustra o sistema.

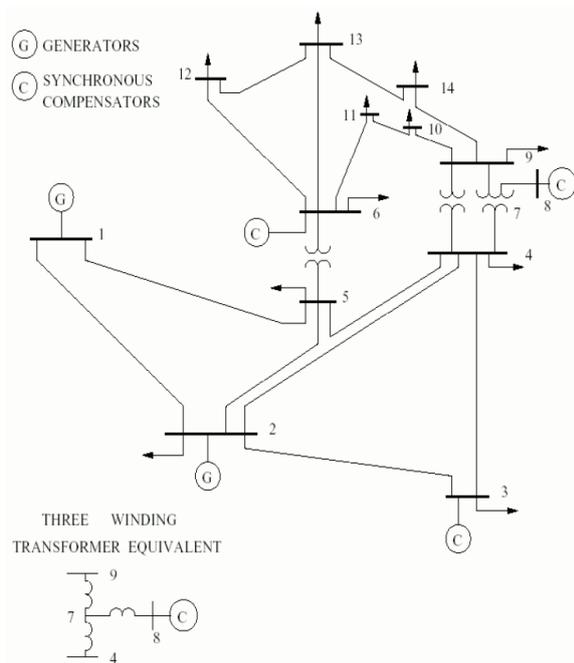


Figura 3. Sistema teste IEEE 14 barras.

Inicialmente, para verificação do índice FVSI das linhas do sistema frente à variações de reativos, um conjunto de barras do sistema IEEE 14 barras foi escolhido para que fosse feito incremento gradativo e simultâneo de potência reativa. As barras selecionadas foram: 10, 11, 12, 13 e 14. Foram realizados incrementos de 2% de seus reativos em cada uma delas ao mesmo tempo para obtenção de seus carregamentos máximos e dos valores de FVSI.

Após cada incremento de potência reativa foram obtidas as tensões nas barras escolhidas para teste e os índices de estabilidade FVSI das linhas do sistema, até ser realizado o último incremento de potência, em que o índice FVSI de uma das linhas fosse próximo da unidade. Os valores para FVSI encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1. Índice FVSI para o sistema IEEE 14 barras: caso base e caso pós-carregamento das barras 10, 11, 12, 13 e 14.

VALORES DO ÍNDICE FVSI		
DE-PARA	CASO BASE	CASO PÓS-CARREGAMENTO DAS BARRAS 10, 11, 12, 13 e 14
Linha 1-2	0,0407	0,0128
Linha 1-5	0,0394	0,1306
Linha 2-3	0,0294	0,0240
Linha 2-4	0,0037	0,1307
Linha 2-5	0,0030	0,1059
Linha 3-4	0,0334	0,2061
Linha 4-5	0,0248	0,0412
Linha 4-7	0,1538	0,1771
Linha 4-9	0,1246	0,5889
Linha 5-6	0,1752	0,1716
Linha 6-11	0,0334	0,7100
Linha 6-12	0,0265	0,5588
Linha 6-13	0,0403	0,7895
Linha 7-8	0,1057	0,4937
Linha 7-9	0,0236	0,4816
Linha 9-10	0,0129	0,3347
Linha 9-14	0,0365	0,9595
Linha 10-11	0,0169	0,5486
Linha 12-13	0,0129	0,4686
Linha 13-14	0,0302	0,9974

De acordo com a Tabela 1, percebe-se que o maior índice FVSI é o da linha 13-14, com um valor

máximo de índice FVSI de 0,9974. Tal linha está conectada a uma das barras escolhidas para incremento de potência reativa, que é a barra 14.

Como o valor 0,9974 de FVSI representa o limite que a linha 13-14 possui para que o sistema opere de forma estável, foram finalizados os incrementos de potência reativa no conjunto de barras e o carregamento máximo obtido para o conjunto de barras foi de um adicional de 294,78 Mvar. Os valores de potência reativa para cada barra são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Conjunto de barras selecionadas e seus respectivos carregamentos máximos para o caso pós-carregamento simultâneo.

BARRA	CARREGAMENTO MÁXIMO (Mvar)
10	85,48
11	26,53
12	23,58
13	85,49
14	73,70
<b>TOTAL</b>	<b>294,78</b>

Ao realizar-se uma comparação dos valores de FVSI para o caso base e caso pós-carregamento das barras 10, 11, 12, 13 e 14, percebe-se que com o carregamento simultâneo das barras foram obtidos valores de FVSI mais elevados para as linhas que estavam ligadas às barras que foram incrementadas, o que pode ser comprovado pela Figura 4.

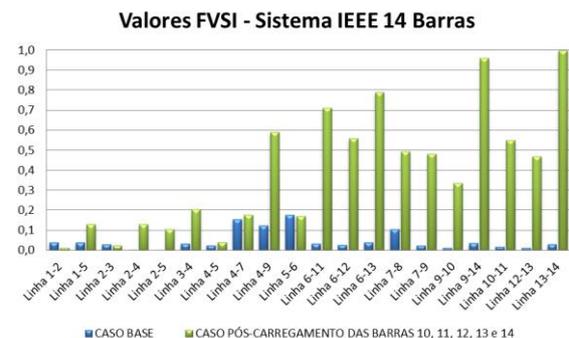


Figura 4. Comparação do índice FVSI para o IEEE 14 barras.

A partir da Figura 4 foi observado que os índices FVSIs das linhas que ligam as barras incrementadas durante todos os incrementos realizados foram os que mais variaram. Através dessa constatação decidiu-se utilizar tal variação como função objetivo para que o ACO obtivesse um conjunto de barras críticas do sistema testado.

A utilização do ACO como metaheurística para escolha de barras críticas foi feita com o intuito de reduzir o esforço computacional empregado em sucessivos cálculos de fluxo de carga para sucessivos incrementos de potência reativa.

O algoritmo proposto é apresentado pelo fluxograma da Figura 5 e foi programado em Matlab®.

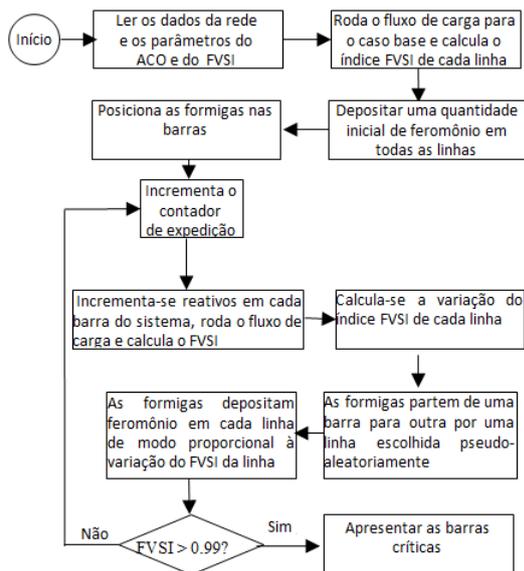


Figura 5. Fluxograma ACO para barras críticas.

Foi escolhido para o algoritmo um grupo formado por 20 formigas. Elas partiram das barras do sistema e percorreram todas as linhas desse sistema, depositando ou evaporando feromônio proporcionalmente à variação do índice FVSI da linha após incremento de reativos nas barras de carga do sistema IEEE 14 barras.

Com o passar das expedições, elas tenderam a um movimento repetitivo nas linhas com mais feromônio, encontrando mais rapidamente as barras críticas do sistema.

Na Tabela 3 são apresentadas as quatro barras mais críticas do sistema IEEE 14 barras:

Tabela 3. Conjunto de barras críticas do sistema IEEE 14 barras.

QUATRO BARRAS MAIS CRÍTICAS - IEEE 14 BARRAS	
	14
	12
	10
	11

## 6 Conclusão

Foi programado um algoritmo de formigas com o objetivo de escolher um conjunto de barras críticas do sistema IEEE 14 barras através da variação do índice de linha FVSI.

As linhas mais fracas do sistema (linhas com pouca capacidade de transportar reativos) tiveram variações altas de índices FVSI, o que pode ser comprovado através do cálculo do índice FVSI para o carregamento das barras 10, 11, 12, 13 e 14 do sistema IEEE 14 barras.

O algoritmo foi programado para avaliar a variação de índice FVSI e decidir depositar ou evaporar feromônio nas linhas do sistema, se mostrando efici-

ente ao encontrar um conjunto de barras críticas para o sistema testado.

Nas simulações realizadas verificou-se que a quantidade fracionada de feromônio deixada sobre as linhas é um fator preponderante na rapidez da descoberta da topologia que representa o ótimo global.

Atualmente, estão sendo realizados experimentos com sistemas de maior porte (da ordem de centenas de barras e ligações), a fim de comprovar a capacidade de generalização do método aqui apresentado.

## Referências Bibliográficas

- Kundur, P. (1994). Power System Stability and Control, McGraw-Hill, Inc.
- Reis, C. S. M. M. (2005). Determinação de Índices de Estabilidade de Tensão. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Machado, F. F.; Leite, M. F.; Mota, W. S.; Souza, B. A.; Sodré, E. A. (2009). Avalia o de Estabilidade de Tensão Via Técnicas de Inteligência Artificial. VIII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, Blumenau – SC.
- Dorigo, M. & Gambardella, L. M., (1997). Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem, in: IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1(1), 53-66.
- Kalil, M. R., Musirin, I. & Othman, M. M., (2006). Ant Colony Optimization for Maximum Loadability Search in Voltage Control Study, in: First International Power and Energy Conference-PECon, Putrajaya - Malaysia.
- Dorigo, M. (1992). Optimization, Learning and Natural Algorithms (in Italian). PhD thesis, Dipartimento di Elettronica e Informazione, Politecnico di Milano, IT.
- Souza, B. A., Cabral Neto, J. P., Leite, M. F. & Vittori, K., (2009). Configura o de Redes de Distribui o Via Algoritmo de Formigas, in: Anais do S mpoio Brasileiro de Automa o Inteligente – SBAI, Brasília – DF, p. 861-865.
- Pimentel Filho, M. C., Lacerda, E. G. M. & Medeiros Júnior, M. F., (2008). Aloca o de Capacitores usando Colônia de Formigas e o Gradiente, in: Conferência Internacional de Aplica es Industriais – Induscon, Poços de Caldas - Minas Gerais.
- Coelho, L. S., Sierakowski, C. A. & Mariani, V. C., (2008). Algoritmo Inspirado em Colônia de Formigas e Método de Busca Local Aplicado   Otimiza o de Despacho Econ mico de Energia Elétrica: Fundamentos de um Estudo de Caso, in: Congresso Brasileiro de Automática – CBA, Juiz de Fora - Minas Gerais.
- Guedes, D. F., Vieira, J. M., Melo, G. H. S., Sodré, E., Alves, F., Silva, C. A. L., (2009). Uma Proposta para o Planejamento da Expansão de Longo Prazo Utilizando Otimiza o Colônia de

Formigas, in: XIII Encontro Regional Iberoamericano do Cigré – ERIAC, Puerto Iguazú – Argentina.