

AJUSTE COORDENADO DE ESTABILIZADORES PARA SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA UTILIZANDO UM ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO POR COLÔNIA DE FORMIGAS

ANDRÉ L. M. TAKAHASHI¹, PERCIVAL B. ARAUJO²

*GAESEF, Departamento de Engenharia Elétrica, UNESP – Ilha Solteira
Avenida Brasil, 56, Centro, CEP 13385000, Ilha Solteira, SP, Brasil
andre.miyahara@yahoo.com¹, percival@dee.feis.unesp.br*

Abstract— This paper uses an ant colony optimization metaheuristic algorithm to define parameters of power system stabilizers. The main goal is to provide more damping to electric power systems via coordinated stabilizer action. The algorithm performance is evaluated using computer simulations that analyses the small signal stability of a two area four machine power system. Results show that the ant colony algorithm can optimize the system's performance, although the specified damping has not been achieved. The fast convergence of the algorithm is the major advantage observed. Nevertheless, it should be noted the need for diversification mechanisms as a way to achieve even better quality solutions.

Keywords— stability, PSS, ant colony optimization, bio-inspired algorithms

Resumo— Este trabalho apresenta o uso de um algoritmo baseado na meta-heurística de colônia de formigas para definição dos parâmetros de estabilizadores de sistemas de potência. O objetivo é fornecer maior amortecimento para o sistema elétrico de potência por meio da ação coordenada dos estabilizadores. A avaliação da performance do algoritmo é feita através de simulações computacionais, nas quais analisa-se a estabilidade a pequenos sinais do sistema simétrico de duas áreas. Os resultados obtidos mostram que a técnica empregada é capaz de otimizar a performance do sistema teste, embora o amortecimento especificado em projeto não tenha sido atingido. A rápida convergência do algoritmo para soluções de boa qualidade é a principal vantagem observada. Em contrapartida; nota-se a necessidade de implantar mecanismos de diversificação como meio de obter soluções de melhor qualidade.

Palavras-chave— estabilidade, ESP, otimização por colônia de formigas, algoritmos com inspiração biológica

1 Introdução

A interligação de unidades geradoras e consumidores (cargas) do Sistema Elétrico de Potência (SEP) permitiu uma melhora na capacidade de manobra, aumentando sua confiabilidade. Em contrapartida, tal fato, em conjunto com o uso de reguladores automáticos de tensão (RAT), sobretudo quando estes são ajustados com ganhos elevados, resultam na deterioração do amortecimento de oscilações eletromecânicas, podendo acarretar instabilidade ao SEP (DeMello and Concordia, 1969).

Para fornecer amortecimento adicional ao SEP, uma proposta é a inclusão de um controlador suplementar junto à malha do RAT, o Estabilizador de Sistemas de Potência (ESP). Logo, ajustar de forma adequada os parâmetros do ESP tem consequências diretas sobre a performance do SEP.

Em sistemas multimáquinas equipados com vários ESPs, se os seus ajustes não levarem em conta a interação existente entre eles, pode-se ter uma atuação ineficiente, em que um controlador atrapalha a atuação especificada para o outro. É necessário, portanto, que os ajustes dos parâmetros permitam que os vários ESPs atuem de forma coordenada. Por outro lado, otimizar os parâmetros dos ESPs, de maneira a obter um funcionamento coordenado, não é tarefa simples, dadas as dimensões do SEP e pelo fato de seu modelo matemático ser altamente não-linear.

Inicialmente, a alternativa proposta para a ob-

tenção de ajustes coordenados entre vários ESPs foi o uso de métodos iterativos voltados à solução de problemas não-lineares (Arcidiacono et al, 1980, Gooi et al, 1981, Sivakumar et al, 1984 e Ostojic, 1991).

Visto que o ajuste coordenado de ESPs pode ser formulado como um problema de otimização e que, via de regra, não há necessidade de se atingir o ótimo global, as meta-heurísticas passaram a ser cada vez mais usadas para solução desse tipo de problema (Abido and Abdel-Magid, 2003; Zhijian et al, 2009).

Uma dessas meta-heurísticas é a otimização por colônia de formigas (ACO – Ant Colony Optimization). A ACO é uma meta-heurística baseada no comportamento forrageiro de algumas espécies de formigas (Dorigo et al, 1996). Ainda que os resultados da ACO não sejam, em geral, melhores do que os obtidos por outras meta-heurísticas (Wong and Komarudin, 2008), esta tem sido empregada nesse tipo de problema de otimização (Hamid et al, 2010 e Lu et al, 2013) pelo fato de encontrar com relativa rapidez soluções de boa qualidade.

Neste trabalho é utilizado um algoritmo baseado na ACO para realizar o ajuste coordenado de ESPs. A representação matemática do SEP, bem como do ESP, é feita com base no Modelo de Sensibilidade de Corrente (MSC) (Pádua Júnior et al, 2013). Trata-se de um modelo cuja formulação é semelhante ao Modelo de Sensibilidade de Potência (MSP) proposto em (Deckmann, Da Costa, 1994), diferenciando-se por suas equações algébricas representarem o balanço nodal de corrente ao invés do balanço nodal de

potência.

2 Materiais e Métodos

2.1 Modelo de Sensibilidade de Corrente do SEP

Para uma barra k genérica (ver Figura 1), a equação do balanço nodal de corrente, linearizada em torno de um ponto de operação, é mostrada em (1).

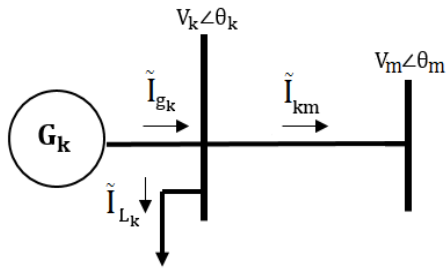


Figura 1. Barra genérica do sistema elétrico de potência

$$\Delta \tilde{I}_{gk} - \Delta \tilde{I}_{km} - \Delta \tilde{I}_{Lk} = 0 \quad (1)$$

Além das equações do balanço nodal de corrente, o MSC é composto por um conjunto de equações diferenciais que representam a dinâmica das variáveis de estado do SEP. Considerando um ESP acoplado a um gerador genérico k , com um RAT de 1ª ordem, tal conjunto é mostrado nas equações (2) a (8).

$$\Delta \dot{\omega}_k = \frac{1}{M} (\Delta P_{mk} - \Delta P_{ek} - D_k \omega_k) \quad (2)$$

$$\Delta \dot{\delta}_k = \omega_k \Delta \omega_k \quad (3)$$

$$\Delta \dot{E}'_{qk} = \frac{1}{T'_{d0k}} \left(\Delta E_{fdk} - \frac{x_{dk}}{x'_{dk}} \Delta E'_{qk} + K_{V_k} \Delta V_k + K_{A_k} \Delta \theta_k \right) \quad (4)$$

$$\Delta \dot{E}_{fdk} = \frac{1}{T_{rk}} \left(-\Delta E_{fdk} + K_{rk} \Delta V_{refk} + K_{rk} \Delta V_{supk} - K_{rk} \Delta V_k \right) \quad (5)$$

$$\Delta \dot{V}_{1k} = K_{PSSk} \Delta \omega_k - \frac{1}{T_{Wk}} \Delta V_{1k} \quad (6)$$

$$\Delta \dot{V}_{2k} = \frac{1}{T_{2k}} (T_{1k} \Delta \dot{V}_{1k} + \Delta V_{1k} - \Delta V_{2k}) \quad (7)$$

$$\Delta \dot{V}_{supk} = \frac{1}{T_{4k}} \left(T_{3k} \Delta \dot{V}_{2k} + \Delta V_{2k} - \Delta V_{supk} \right) \quad (8)$$

2.2 Otimização por Colônia de Formigas

A ACO é uma meta-heurística de inspiração biológica. Baseia-se nas técnicas utilizadas por algumas espécies de formigas, em especial no uso de trilhas de feromônio, para otimizar o forrageamento (processo de busca por alimento) (Deneuborg et al, 1990).

A aplicação da ACO a um problema de otimização consiste em, através de um processo iterativo, fazer com que as formigas artificiais encontrem a melhor solução possível, em uma analogia clara entre solução e fonte de alimento. A estrutura básica da ACO pode ser resumida em quatro passos:

Passo 1: Definir o número de formigas artificiais, o número de estados, quais as rotas disponíveis (definição do espaço de busca), as taxas de evaporação e reposição de feromônio nas rotas, assim como os demais parâmetros da meta-heurística.

Passo 2: Para cada formiga, constrói-se um trajeto (uma solução). A escolha de qual rota será selecionada durante a transição de um estado i para um estado j baseia-se em uma análise probabilística com amostragem estratificada. A probabilidade de uma rota ser escolhida é, genericamente definida por (9) (Dorigo et al, 1996).

$$p_{ij}^k = \frac{[\tau_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{u \in M_k} [\tau_{iu}]^\alpha [\eta_{iu}]^\beta} \quad (9)$$

Em (9) os parâmetros α e β controlam a influência da quantidade de feromônio sobre a rota (τ_{ij}) e da informação heurística (η_{ij}) correspondente, na analogia com as formigas reais, com a distância a ser percorrida, sobre a probabilidade de seleção de um determinado caminho.

Passo 3: Após os agentes completarem suas rotas, cada uma é analisada (cálculo da função objetivo) e é feita a atualização do feromônio depositado sobre cada trecho do espaço de busca. A atualização do feromônio leva em conta sua evaporação com o passar do tempo, o que tem por efeito reduzir a probabilidade de escolha de um determinado trajeto enquanto que, ao mesmo tempo, é feito um acréscimo de feromônio sobre as rotas utilizadas ou sobre as rotas mais atraentes, se for adotado um critério elitista. Tal acréscimo acaba por fazer com que tais rotas tenham uma maior possibilidade de serem escolhidas pela próxima geração de formigas artificiais.

Passo 4: Se alguma das soluções encontradas é melhor do que a melhor solução obtida até então, atualiza-se a solução incumbente. Após o processo de atualização (ou não), volta-se ao passo 2 até que o critério de parada estabelecido seja atingido.

2.3 ACO aplicada ao ajuste coordenado de ESPs

O fluxograma da ACO, aplicada à otimização

dos ajustes dos ESPs, é mostrado na Figura 2.

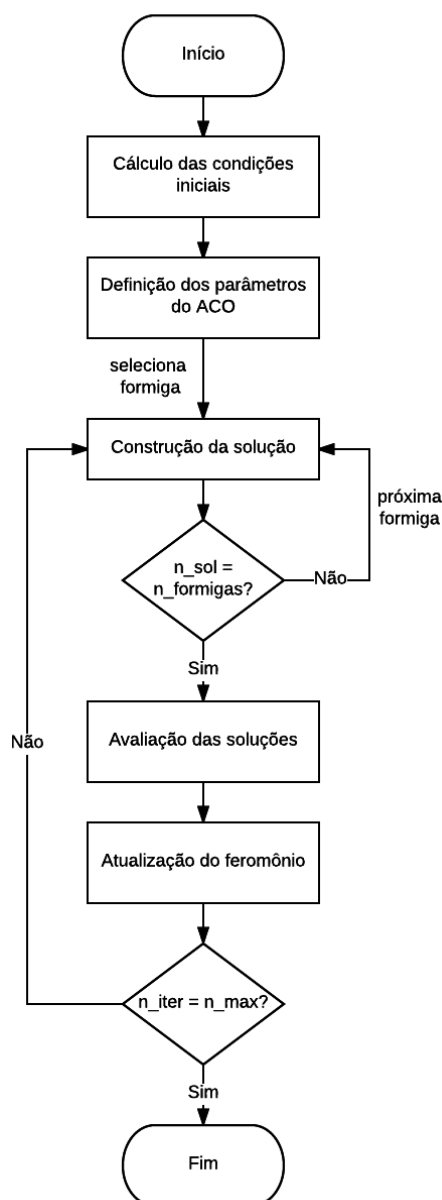


Figura 2. Fluxograma - ACO aplicada ao ajuste de ESPs

As condições iniciais são obtidas a partir da solução do fluxo de potência do sistema teste e do cálculo dos autovalores de referência utilizando o MSC. A partir dos autovalores, definem-se os modos oscilatórios candidatos a serem amortecidos e, analisando os fatores de participação, são escolhidos os melhores geradores para a instalação dos ESPs. Inicia-se o algoritmo de otimização, com a definição dos parâmetros fixos (Passo 1): os números de nós e a quantidade de estados disponíveis em cada nó. A quantidade de nós e de estados define o tamanho das matrizes de feromônio e de probabilidade. O número de nós de cada solução pode ser obtido a partir de (10).

$$nós = n_{ESP} \times n_{parametros} \quad (10)$$

Em (10), n_{ESP} representa a quantidade de ESPs a serem ajustados e $n_{parametros}$ é a quantidade de variáveis a serem ajustadas para cada ESP. A quantidade de estados em cada nó é obtida a partir de uma discretização das variáveis contínuas ou a partir da quantidade de valores contidos dentro do intervalo $[V_{mín} V_{máx}]$ para variáveis inteiras.

Após a definição dos parâmetros, inicia-se o Passo 2, ou seja, a construção do trajeto por parte de cada uma das n formigas que compõem a colônia artificial. O primeiro trajeto de cada formiga é feito de maneira aleatória. Cada formiga artificial desloca-se de nó em nó, escolhendo aleatoriamente um dos diversos estados que formam um nó. Nas iterações seguintes, a escolha baseia-se nas probabilidades atreladas à presença de feromônio em cada estado. Para facilitar o entendimento, considere a Figura 3, em que uma formiga artificial deve construir um trajeto passando por 3 nós, A, B e C, com 3, 2 e 3 estados cada, respectivamente. Cada estado representa um valor associado a uma das variáveis, representada pelos nós.

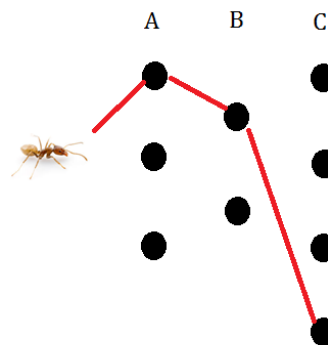


Figura 3. Construção de um trajeto por parte de uma formiga artificial

A avaliação das soluções é feita a partir da solução de um problema de minimização como em (11).

$$\begin{aligned}
 &\min f(\lambda, \xi) \\
 &s.a. \\
 &K_{ESP_{min}} \leq K_{ESP} \leq K_{ESP_{max}} \\
 &T_{w_{min}} \leq T_w \leq T_{w_{max}} \\
 &T_{1_{min}} \leq T_1 \leq T_{1_{max}} \\
 &T_{2_{min}} \leq T_2 \leq T_{2_{max}} \\
 &T_3 = T_1 \\
 &T_4 = T_2
 \end{aligned} \quad (11)$$

A função objetivo, mostrada em (12), é composta por uma função de penalização, $p(\lambda)$, responsável por aumentar de forma significativa o valor de $f(\lambda, \xi)$ quando for detectado um ou mais autovalores com parte real positiva, em conjunto com a medição da diferença entre o coeficiente de amortecimento desejado e o coeficiente de amortecimento obtido para um determinado modo oscilatório de interesse; j

representa a quantidade de modos oscilatórios de interesse e g é um valor numérico utilizado para amplificar o valor da função que compara o amortecimento desejado e o obtido.

$$f(\lambda, \xi) = p(\lambda) + g \sum_{i=1}^j (\xi_d - \xi_i) \quad (12)$$

Com base nos valores da função objetivo, é feita a atualização das matrizes de feromônio. Neste trabalho foi utilizado um critério semi-elitista para atualização do feromônio. Em todas as rotas utilizadas é feito o depósito de feromônio, mas nas rotas em que são obtidas as melhores, a quantidade depositada é maior. O algoritmo executa então o Passo 4, retornando à etapa de construção de soluções até que o limite de iterações seja atingido.

3 Simulações e Resultados

O algoritmo implementado é aplicado ao SEP de duas áreas simétricas entre si, conectadas por três linhas de transmissão entre as barras 7 e 8, onde se encontram as cargas (diagrama unifilar mostrado na Figura 4).

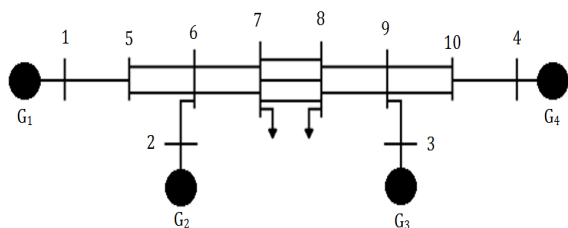


Figura 4. Sistema simétrico de duas áreas

O sistema teste possui três modos oscilatórios, dos quais um é instável e, embora seja um sistema de pequeno porte, é bastante empregado em estudos de estabilidade, facilitando a análise dos resultados obtidos.

Os autovalores referentes aos modos oscilatórios de interesse do sistema teste (λ_i), seus coeficientes de amortecimento (ξ_i) e frequência natural não amortecida (f_{ni}) são listados na Tabela 1.

Tabela 1. Autovalores dominantes: SEP simétrico de duas áreas.

λ_i	ξ_i	f_{ni} (Hz)
$-0,2310 \pm j6,2932$	0,0367	1,002
$-0,1545 \pm j5,8769$	0,0263	0,936
$0,0400 \pm j4,1443$	-0,0096	0,660

Observa-se que, além do par de autovalores instável, associado ao modo interárea, os demais autovalores, relacionados com modos locais de oscilação, embora estáveis, possuem baixo amortecimento. As-

sim, a instalação de controladores no SEP simétrico tem por objetivo fornecer amortecimento adicional ao modo interárea, estabilizando-o, além de aumentar o amortecimento fornecido aos modos locais.

São analisadas duas configurações distintas. Na 1ª configuração, apenas duas das quatro máquinas recebem ESPs. Essa é uma situação crítica, visto que o número de modos a serem controlados é maior do que o número de ESPs instalados. Na 2ª configuração, todas as máquinas recebem um ESP e o número de ESPs instalados é maior do que o número de modos a serem controlados.

Em ambas as configurações foram estipulados 0,10 e 0,05 como valor de amortecimento desejado para os modos locais e interárea, respectivamente. O critério de parada adotado é o número limite de iterações, fixado em 1000. O número de formigas artificiais é fixado em 5, os valores de $p(\lambda)$ e g são adotados como 10^7 e 10^3 , respectivamente. É estabelecido um valor mínimo de feromônio para as trilhas, equivalente a 30% do valor inicial. A taxa de evaporação de feromônio foi fixada em 0,1% do valor inicial. A escolha de tal percentual visa garantir que, dentro das 1000 iterações, não existisse um processo de intensificação acelerado. As simulações foram executadas em um computador com processador Intel® Core™ i3 de 3.30 GHz com 8 Gb de memória RAM utilizando-se o software MATLAB®.

3.1 Sistema teste equipado com dois ESPs

Para decidir quais geradores receberão o ESP, é analisada a participação da variável velocidade angular ($\Delta\omega_k$) dos geradores sobre os modos oscilatórios do sistema de duas áreas (Tabela 2).

Tabela 2. Participação dos geradores sobre os modos oscilatórios

λ_i	Participação (%)			
	$\Delta\omega_1$	$\Delta\omega_2$	$\Delta\omega_3$	$\Delta\omega_4$
$-0,2310 \pm j6,2932$	21,3	26,3	0,4	0,0
$-0,1545 \pm j5,8769$	0,3	0,0	23,9	21,4
$0,0400 \pm j4,1443$	15,6	10,1	8,63	12,3

Uma vez que o ESP atua de maneira mais adequada no trato das oscilações locais, a escolha dos geradores que receberão a instalação dos ESPs levará em conta quais as máquinas com maior participação nesses modos. Assim, os ESPs serão instalados junto aos geradores 2 e 3.

Executando o ACO para essa situação, notou-se que em todos os casos simulados o algoritmo foi capaz de encontrar ajustes que estabilizassem o SEP. Ao se analisar os resultados de um conjunto de 30 execuções, verificou-se uma dada região de estagnação, representada por valores de função objetivo semelhantes (vide Figura 6).

Para a 1ª configuração, os ajustes ótimos encontrados pela ACO são apresentados na Tabela 3.

Considerando a atuação dos ESPs ajustados com os parâmetros mostrados na Tabela 3, o SEP teste passa a ser estável, apresentando os autovalores dominantes (e coeficiente de amortecimento e frequência natural não amortecida associados) dados na Tabela 4.

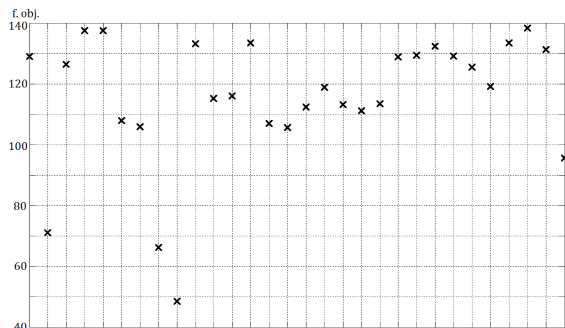


Figura 6. Variação da função objetivo considerando 30 execuções da meta-heurística ACO

Tabela 3. Ajuste ótimo dos ESPs obtidos pela ACO

ESP	Ajustes			
	K_{ESP}	T_w	T_1	T_2
G_2	9,58	4	0,6226	0,1196
G_3	4,45	8	4,4173	3,5359

Tabela 4. Autovalores dominantes obtidos com o ajuste ótimo fornecido pela ACO

λ_i	ξ_i	$f_{ni}(\text{Hz})$
$-0,4520 \pm j 6,0883$	0,0740	0,971
$-0,3012 \pm j 3,1901$	0,0940	0,510
$-0,2159 \pm j 4,4132$	0,0489	0,703

Analisando os dados da Tabela 4 observa-se que o amortecimento desejado não foi atendido, embora exista uma sensível melhora em relação aos valores da Tabela 1.

3.2 ESPs instalados em todos os geradores

Considerando a instalação de estabilizadores em todos os geradores do SEP observou-se novamente que em todos os casos a ACO foi capaz de encontrar soluções que tornam o sistema teste estável, mas que não atendem com exatidão os valores de amortecimento desejado. Embora não seja apresentado neste trabalho, verificou-se ao longo da execução de diversas simulações que a função objetivo apresenta um comportamento qualitativamente semelhante ao visto na Figura 6. Os melhores ajustes encontrados e o valor dos autovalores dominantes obtidos com tais ajustes são apresentados nas Tabelas 5 e 6.

Analisando os coeficientes de amortecimento associados aos modos oscilatórios mostrados na Tabela 6, observa-se que apesar de tornar o SEP de duas

áreas estável para o ponto de operação considerado, o amortecimento estipulado em projeto não é atingido.

Tabela 5. Ajuste ótimo dos ESPs obtidos pela ACO

ESP	Ajustes			
	K_{ESP}	T_w	T_1	T_2
G_1	4,69	3	1,4194	0,2590
G_2	0,22	13	0,5927	1,0060
G_3	3,19	4	3,9293	3,7948
G_4	7,42	9	1,5987	2,0120

Tabela 6. Autovalores dominantes obtidos com o ajuste ótimo fornecido pela ACO

λ_i	ξ_i	$f_{ni}(\text{Hz})$
$-0,5644 \pm j 6,1459$	0,0914	0,983
$-0,2174 \pm j 4,5955$	0,0473	0,732
$-0,2239 \pm j 2,5495$	0,0875	0,407

Entre várias razões para tal fato, pode-se citar a rápida intensificação da busca por parte das formigas artificiais, levando o problema a uma estagnação, como pode ser visto pela curva de convergência apresentada na Figura 7. Outra dificuldade está em caracterizar de forma adequada os modos oscilatórios em interárea e local.

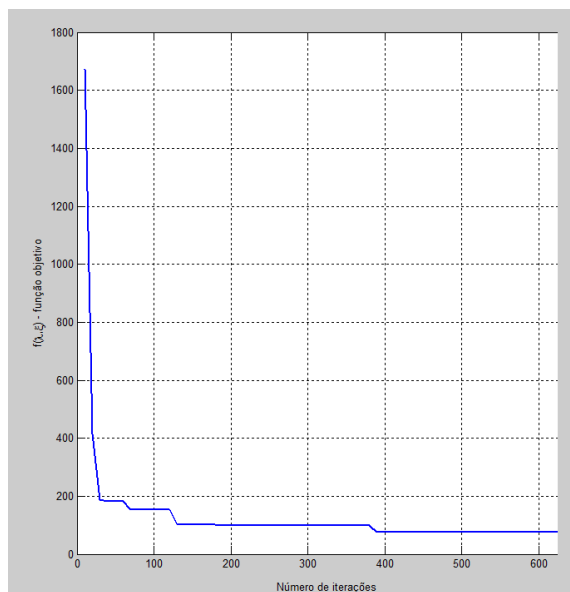


Figura 7. Curva de convergência para a ACO aplicada a otimização de ajustes de ESPs

Na mesma Figura 7 pode-se observar a razão pela qual se utilizou uma técnica baseada na ACO, qual seja, a rápida convergência para soluções de boa qualidade. Desconsiderada a questão da alocação exata de coeficientes de amortecimento e/ou autovalores, verificou-se que o algoritmo pode ser implementado como forma de obter condições mínimas de operação com um pequeno número de iterações. Esta qualidade permite cogitar o uso da técnica em aplicações on-line para a solução do problema de ajuste de

controladores adicionais do SEP.

4 Conclusão

Este trabalho apresentou a utilização da meta-heurística otimização por colônia de formigas para a solução do problema de ajuste coordenado de sinais adicionais estabilizadores de sistemas elétricos de potência. Dos resultados apresentados foi possível concluir que a aplicação do algoritmo permite obter ajustes que melhoram a estabilidade a pequenas perturbações do SEP. Por outro lado, há uma dificuldade em se atender exatamente os valores de amortecimento estipulados. Uma provável razão para isto está na estagnação de soluções da função objetivo.

Como trabalhos futuros serão investigadas alternativas para aumentar a diversificação das soluções, diminuindo a estagnação encontrada, além de procurar novas estratégias que permitam reduzir ainda mais a diferença entre o amortecimento desejado e o amortecimento obtido a partir dos ajustes.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro.

Referências Bibliográficas

- Abido, M.A. and Abdel-Magid, Y.L. (2003). Power system stability enhancement via coordinated design of a PSS and an SVC-based controller, *Proceedings of the 2003 10th IEEE ICECS*, Vol. 2, pp. 850- 853.
- Arcidiacono, V.; Ferrari, E.; Marconato, R.; Dosghali, J. and Grandez, D. (1980). Evaluation and Improvement of Electromechanical Oscillation Damping by Means of Eigenvalue-Eigenvector Analysis, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-99, No.2, pp. 769- 778.
- Deckmann, S. M. and Costa, V.F. (1994). A Power Sensitivity Model for Electromechanical Oscillations Studies, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, No. 2, pp. 965- 971.
- DeMello, F. P. and Concordia, C. (1969). Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-88, No. 4, pp. 316-329.
- Deneubourg, J. M.; Aron, S.; Goss, S.; Pasteels, J. M. (1994). The self-organizing exploratory pattern of the Argentine ant., *Insect Behavior*, Vol. 3, No. 2, pp. 159- 168.
- Dorigo, M.; Stützle, T. and Coloni, A. (1996). Ant system: optimization by a colony of cooperating agents, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics – Part B*, Vol. 26, No. 1, pp. 1- 13.
- Gooi, H. B.; Hill, E. F.; Mobarak, M. A.; Thorne, D. H. and Lee, T. H. (1981) Coordinated Multi-Machine Stabilizer Settings Without Eigenvalue Drift, *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-100, No.8, pp 3879-3887
- Hamid, Z., Musirin, I., Othman, M. M. and Khalil, M. R. (2010). Optimum Tuning of Unified Power Flow Controller via Ant Colony Optimization Technique, 2010 4th Power Engineering and Optimization Conference, pp. 170-177.
- Lu, C., Hsu, C. and Juang, C. (2013). Coordinated Control of Flexible AC Transmission Systems Devices Using an Evolutionary Fuzzy Lead-Lag Controller with Advanced Continuous Ant Colony Optimization, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 28, No. 1, pp. 385- 392.
- Ostojić, D. (1991). Stabilization of Multimodal Electromechanical Oscillations by Coordinated Application of Power System Stabilizers, Vol. 6, No. 4, pp. 1439- 1445.
- Pádua Jr., C.R.; Takahashi, A.L.M.; Furini, M.A. and Araujo, P.B. (2013). Proposta de um modelo para análise de estabilidade a pequenas perturbações baseado na lei de Kirchhoff para correntes,. *Anais do DINCON 2013/XI SBAI 2013*, pp. 1-6.
- Sivakumar, S., Sharaf, A. M. and Hamed, H. G. (1984). Coordinated Tuning of Power System Stabilizers in Multimachine Power Systems, *Electric Power Systems Research*, Vol 8, No. 3, pp. 275-284.
- Wong, K. Y., Komarudin (2008). Parameter Tuning for Ant Colony Optimization: A Review, *International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE 2008)*, pp. 542-545.
- Zhijian, L.; Hongchun, S. and Jilai, Y. (2009). Coordination control between PSS and SVC based on improved genetic-tabu hybrid algorithm, 2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, pp. 1-5.