

## APLICAÇÃO DO ALGORITMO DE BUSCA GRAVITACIONAL PARA ALOCAÇÃO ÓTIMA DE COMPENSADOR SÉRIE SÍNCRONO ESTÁTICO EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Maria Eduarda Gomes Veloso<sup>1</sup> (IC), Camila Paes Salomon (PQ)<sup>1</sup>  
Universidade Federal de Itajubá

**Palavras-chave:** Alocação ótima. GSA. SSSC. Fluxo de Potência. Sistema de Transmissão.

### Introdução

A energia elétrica se configura em uma necessidade essencial para a sociedade atual, haja vista que as atividades humanas, em sua grande maioria, estão intrinsecamente ligadas ao uso da eletricidade. Nesse sentido, com o constante avanço tecnológico, cada vez mais cargas são inseridas no sistema elétrico, tornando-o cada vez mais robusto e complexo. Dessa forma, a ocorrência de falhas e faltas no sistema elétrico torna-se inevitavelmente mais suscetível, podendo ocasionar falhas e danos nos equipamentos do sistema, levar o sistema próximo aos seus limites de operação, causar sobrecargas e instabilidade, que podem levar ao colapso do sistema (KUNDUR, 1993).

Em face da grande importância do fornecimento contínuo de energia, tem-se realizado cada vez mais estudos nas áreas de qualidade, proteção e condicionamento de energia, de modo a permitir a redução das interrupções, proporcionando uma maior qualidade, confiabilidade e eficiência no suprimento de energia para os consumidores.

Dessa forma, o estudo proposto neste trabalho tem como principal objetivo a otimização do sistema de transmissão, com base na inserção de dispositivos eletrônicos de potência, de modo a garantir o controle e otimização do sistema, aumentando a capacidade de transmissão de energia. Nesse sentido, a partir da alocação de equipamentos de Sistemas de Transmissão Flexível em Corrente Alternada (do Inglês, *Flexible Alternating Current Transmission System* – FACTS), é possível promover a compensação controlada do sistema, eliminando a necessidade de construção de novas linhas de transmissão, reduzindo custos e danos ambientais (SONG; JOHNS, 1999).

Para a alocação de um dispositivo FACTS, foi realizada a análise do fluxo de potência do sistema teste IEEE 9 barras, com o intuito de reduzir as perdas das linhas de transmissão do sistema. Por conseguinte, de modo a garantir o controle e otimização das linhas, fez-se uso do Compensador Série Síncrono Estático (do

Inglês, *Static Synchronous Series Compensator* – SSSC), de modo a controlar o fluxo de potência, aumentar os limites de transmissão de energia, melhorar a estabilidade transitória, amortecer as oscilações do sistema de potência e reduzir as perdas de potência do sistema (SONG; JOHNS, 1999).

Diante deste cenário, destaca-se a relevância do estudo em questão, que possibilitou o desenvolvimento de um método de redução das perdas de um sistema elétrico por meio da alocação de um dispositivo SSSC. Como o custo para a conexão de um dispositivo FACTS no sistema elétrico é demasiado alto, a existência de um algoritmo que identifica a melhor posição para alocar o dispositivo no sistema, possibilita a redução de custos, além de maximizar o aproveitamento do equipamento e viabiliza a otimização da linha de transmissão.

O Algoritmo de Busca Gravitacional (do Inglês, *Gravitational Search Algorithm* – GSA), é um algoritmo meta-heurístico desenvolvido com o intuito de resolver problemas de otimização, fundamentado nas leis da gravitação e da dinâmica de Newton. Nesse sentido, a solução ótima do problema é determinada a partir das maiores massas das partículas, sendo atualizadas a cada iteração. Como as partículas de maior massa se atraem, as possíveis soluções ótimas tendem a ficar próximas de acordo com a lei da gravitação, fazendo com que o algoritmo possa identificar a melhor solução, por meio do movimento das partículas. Dessa forma, a implementação dessa técnica é ideal para aplicação em diversos problemas de otimização, utilizado principalmente em problemas com grande espaço de busca (RASHEDI et al., 2009).

Desse modo, com base na aplicação de técnicas meta-heurísticas, como o GSA espera-se desenvolver um modelo para determinação da melhor posição para alocação de compensadores série SSSC no sistema de transmissão, buscando uma redução nas perdas e, conseqüentemente, uma otimização na transmissão, aumentando a confiabilidade, estabilidade e eficiência do sistema, assim como, a qualidade de energia elétrica fornecida (SONG; JOHNS, 1999).

### Metodologia

A princípio, para o desenvolvimento do algoritmo, foi realizado um estudo no reconhecido *Western System Coordinated Council (WSCC) 3 – machine, 9-bus system*, comumente denominado como P. M. Anderson Test Case. O sistema em questão é composto por três geradores, oito barras, uma barra de referência, nove linhas, três cargas, três transformadores e com potência base de 100 MVA. Dessa forma, o sistema foi convertido em um arquivo “.m”, que corresponde à extensão do MATLAB/Octave, em seguida, foram iniciados os testes de fluxo de potência, por meio da aplicação da Ferramenta de Análise de Sistema de Potência (do Inglês, *Power System Analysis Toolbox – PSAT*), que utiliza o método de Newton-Raphson para a resolução dos cálculos de fluxo de potência. Posteriormente, o SSSC foi alocado ao sistema, através de uma linha de comando, baseada no manual do PSAT, disponibilizado e desenvolvido pelo criador da *toolbox*, (MILANO, 2011). Dessa forma, a posição do dispositivo foi gradualmente variada de 1 a 9, permitindo que o fluxo de potência fosse calculado para cada variação da posição do SSSC no sistema. Assim, foi possível obter as perdas totais do sistema para cada posição em que o compensador foi alocado, permitindo identificar a posição na qual o sistema apresenta a menor perda, para a posterior validação da metodologia baseada em GSA.

Para o desenvolvimento do algoritmo de alocação ótima, foi criada uma função objetivo, responsável pelo cálculo do fluxo de potência e determinação das perdas para cada variação da posição do SSSC no sistema. Dessa forma, a função objetivo foi inserida no GSA, de modo que a posição do SSSC pudesse assumir a posição de cada partícula do algoritmo, limitada entre valores de 1 a 9. Assim, o valor das perdas foi atribuído a função objetivo, permitindo a determinação da menor perda para o sistema, que corresponde ao melhor global, e a posição ideal para o SSSC, que corresponde a posição do melhor global. Nesse sentido, foram realizadas as simulações, alterando o número de partículas do algoritmo de modo a comparar os resultados obtidos e validar a funcionalidade do algoritmo implementado. O passo a passo da metodologia proposta é resumido a seguir.

*Passo 1.* Geração da população inicial;

*Passo 2.* Inicialização das posições (X) das partículas com valores aleatórios entre 1 e 9;

*Passo 3.* Avaliação da função objetivo para cada partícula:

- Cada partícula é avaliada em uma posição L;
- A posição (line) do SSSC recebe a posição L;

- Criação do sistema teste de 9 barras com SSSC alocado na posição L;
- Cálculo do fluxo de potência e das perdas ativas do sistema pelo PSAT;
- A função objetivo recebe o valor das perdas para cada posição das partículas avaliadas;

*Passo 4.* Atualização da constante gravitacional (G);

*Passo 5.* Cálculo das forças que todas as partículas exercem sobre cada partícula;

*Passo 6.* Cálculo da força total sobre cada partícula;

*Passo 7.* Cálculo da massa (M) e a aceleração (a) para cada partícula;

*Passo 8.* Atualização da velocidade e a posição de cada partícula;

*Passo 9.* Verificação da condição de parada: se não foi atendida, ir para o passo 10; caso contrário, retornar para o Passo 3;

*Passo 10.* Retorno da melhor solução: a posição ótima para alocação do SSSC.

### Resultados e discussão

O método proposto foi desenvolvido e avaliado a partir de simulações realizadas na ferramenta de programação Octave, com o auxílio da *toolbox PSAT*, utilizada nos cálculos do fluxo de potência e na alocação do dispositivo SSSC no sistema teste, possibilitando a determinação das perdas referentes a potência ativa do sistema.

Para dar início às simulações, foram calculados o fluxo de potência e as perdas de potência ativa para o sistema de 9 barras, sem alocação de SSSC e em seguida, com o dispositivo alocado individualmente em cada linha do sistema. Dessa forma, ao realizar a simulação foi possível obter os resultados dispostos na Figura 1. Estes cálculos foram realizados para se ter uma base para a posterior validação do algoritmo baseado em GSA, de forma a verificar se ele encontraria a posição ótima associada às menores perdas totais no sistema.

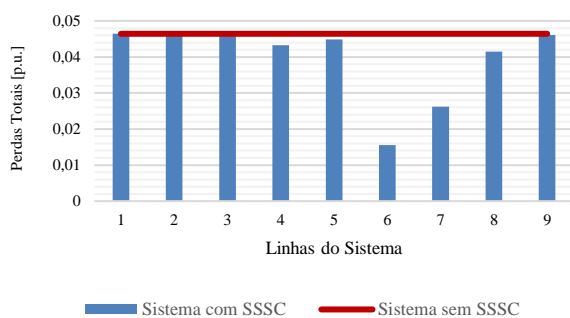
Ao alocar o dispositivo no sistema e comparar os resultados obtidos com as perdas do sistema sem o SSSC, pode-se inferir que houve uma redução nas perdas de potência ativa quando o compensador foi conectado nas linhas 1, 4, 5, 6, 7, 8 e 9. No entanto, ao dispor o equipamento nas linhas 2 e 3, pode-se observar que houve um aumento nas perdas, tornando inviável a aplicação do dispositivo FACTS nestas posições.

A partir da comparação entre as posições referentes às perdas do sistema, pode-se inferir que a melhor posição para alocação do SSSC corresponde a linha 6. Dessa forma, com o desenvolvimento do algoritmo de otimização, com base na aplicação do GSA, espera-se que a melhor posição, proveniente da

minimização das perdas do sistema, a ser encontrada seja a linha 6.

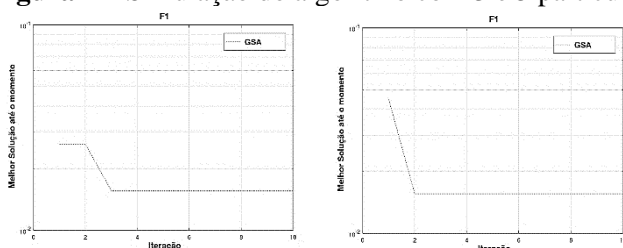
Para dar início à simulação do algoritmo de otimização, o número de partículas ( $N$ ) foi inicialmente ajustado para que apenas 3 partículas fossem criadas aleatoriamente e o número de iterações escolhido foi de 10. Em seguida, para fins comparativos, o número de partículas foi aumentado para 5, 8 e 10, no entanto, o número de iterações permaneceu o mesmo. Dessa forma, ao dar início as simulações, foi possível obter os resultados expressos em gráficos gerados pelo Octave apresentados nas Figuras 2 e 3. Ademais, os resultados referentes à melhor posição, melhor global, tempo de simulação, número de iterações e número de partículas, obtidos a partir do algoritmo, encontram-se dispostos na Tabela 1.

**Figura 1** – Testes “manuais” de alocação de SSSC nas linhas do sistema



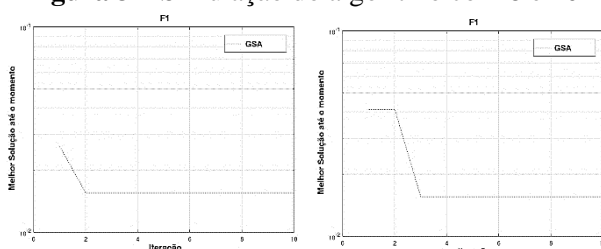
Fonte: Autoria própria

**Figura 2** – Simulação do algoritmo com 3 e 5 partículas



Fonte: Autoria própria

**Figura 3** – Simulação do algoritmo com 8 e 10 partículas



Fonte: Autoria própria

**Tabela 1** – Resultados das Simulações

Posição do Melhor Global (Lbest)	Posição para Alocação do SSSC no Sistema	Valor da Função <i>fitness</i> do Melhor Global (Fbest)	Nº de Partículas (N)
6,3714	6	0,015557	3
6,0274	6	0,015557	5
6,2582	6	0,015557	8
5,8874	6	0,015557	10

Fonte: Autoria própria.

A partir dos resultados obtidos para a simulação do algoritmo, utilizando 3 partículas para cada iteração, é possível observar a minimização das perdas do sistema, realizada pela aplicação do GSA, através do gráfico gerado pelo algoritmo. Ao observar as Figuras 2 e 3 pode-se inferir que logo nas primeiras iterações o algoritmo foi capaz de realizar a minimização, partindo de uma perda mais elevada e logo em seguida, convergindo para o melhor global, que equivale a menor perda do sistema.

Ao analisar os resultados obtidos para a simulação do algoritmo, utilizando 5 partículas para cada iteração, pode-se observar, a partir do gráfico gerado, a eficácia do GSA na minimização das perdas do sistema. Assim como observado na análise do algoritmo implementado com 3 partículas, a minimização das perdas ocorreu nas primeiras iterações, para a primeira simulação, permitindo uma rápida convergência para a melhor solução.

Com o aumento do número de partículas, como observado para as simulações com 8 e 10 agentes, pode-se observar que os resultados das simulações foram semelhantes aos obtidos para os casos com 3 e 5 partículas, apresentando uma rápida convergência para o ponto ótimo do sistema, o que implica na eficácia e confiabilidade da aplicação do algoritmo. Desse modo, a partir dos dados fornecidos pelo programa, dispostos na Tabela 1 pode-se observar que a melhor posição obtida, para todas as simulações, foi a linha 6, comprovando a efetividade do algoritmo desenvolvido.

Dessa forma, com base nos resultados obtidos, pode-se validar a eficácia da aplicação do GSA na alocação ótima de equipamentos FACTS em sistemas elétricos, visto que as simulações realizadas com a implementação do GSA convergiram para a posição esperada.

## Conclusões

A partir do estudo realizado, foi possível determinar um método para a alocação ótima do dispositivo FACTS, SSSC, em um sistema teste de 9

barras, por meio da aplicação do algoritmo GSA no sistema em análise.

Ao realizar as simulações do algoritmo implementado no estudo, variando o número de partículas geradas aleatoriamente pelo GSA, obteve-se o resultado esperado para todos os testes, visto que o algoritmo convergiu para a posição almejada, linha 6, que corresponde a posição do melhor ponto da otimização. Dessa forma, pode-se comprovar a eficácia, validade e confiabilidade da utilização da técnica meta-heurística de otimização, para alocação de SSSC, desenvolvida neste estudo.

Com base na análise do fluxo de potência do sistema teste de 9 barras, foi possível determinar as perdas do sistema considerando duas vertentes, sistema com SSSC e sistema sem SSSC. Para o sistema original, sem a presença do SSSC, foi possível obter as perdas referentes a potência ativa total do sistema, por meio da *toolbox* PSAT. Ao alocar o SSSC em cada linha do sistema, individualmente, foi realizado o cálculo do fluxo de potência e obtidas as perdas ativas do sistema. Dessa forma, pode-se comprovar que com a inserção do dispositivo houve redução das perdas do sistema, sendo a menor perda equivalente a alocação do dispositivo na linha 6. No entanto, as linhas 2 e 3 apresentaram um aumento nas perdas devido a inserção do SSSC, visto que, o compensador pode aumentar ou reduzir o fluxo de potência nas linhas.

A realização desta pesquisa foi de extrema importância para o desenvolvimento profissional e acadêmico, possibilitando a obtenção de uma maior experiência na área de pesquisa. Assim, como um conhecimento mais aprofundado acerca dos temas envolvendo o trabalho, os quais podem ser aplicados de forma real para otimização de um sistema elétrico. Em face da grande relevância do tema proposto neste estudo, destaca-se a possibilidade de aperfeiçoamento do algoritmo desenvolvido, possibilitando uma solução para alocação de dispositivos FACTS em sistemas mais complexos de grande porte, a variação do número de equipamentos alocados, a variação de parâmetros do algoritmo GSA, entre outras possibilidades.

Por fim, com base nos resultados obtidos no estudo, pode-se atestar a contribuição do presente estudo na determinação efetiva da melhor posição para alocação do compensador série SSSC em sistemas elétricos de potência, para a redução de perdas de potência ativa do sistema.

### Agradecimento

Em especial, agradeço aos professores Camila P. Salomon, Maurício C. Passaro e Robson B. Gonzatti, pela

oportunidade e confiança na elaboração deste estudo, pela atenção e dedicação à pesquisa, pelo apoio e ensinamentos que foram essenciais para o desenvolvimento desta pesquisa. Agradeço a meus amigos e colegas de pesquisa, Thallia Fernanda, João Luiz e Gustavo, por toda colaboração, pelos aprendizados e experiências adquiridas. Por fim, agradeço a todo apoio oferecido pela Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI e pela PIBIC UNIFEI.

### Referências

ACHA, E. (ED.). **FACTS: modelling and simulation in power networks**. Chichester; Hoboken, NJ: J. Wiley, 2004.

ANDERSON, P. M.; FOUAD, A. A., **Power System Control and Stability**, 2nd ed. New York: IEEE Press, 2003.

FUCHS, R. D. **Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica**. Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI), Itajubá, 1973.

KUNDUR, P. S., **Power System Stability and Control**, McGraw-Hill, New York, 1993.

LAZAR, A; REYNOLDS, R. G. **Heuristic knowledge discovery for archaeological data using genetic algorithms and rough sets, Artificial Intelligence Laboratory, Department of Computer Science**, Wayne State University, 2003.

MATHUR, R. M.; VARMA, R. K. **Thyristor Based FACTS Controllers for Electric Power Transmission Systems**, IEEE Press and Wiley Interscience, New York, 2002.

MILANO, F. **PSAT: Power System Analysis Toolbox, Documentation for PSAT**. V 2.1.6, 2011.

MOHANTY, A. K.; BARIK, A. K. **Power System Stability Improvement Using FACTS Devices**. 666 672, International Journal of Modern Engineering Research (IJMER), vol. 1, no. 2, p. 666 672, 2013.

MONTICELLI, A. J. **Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 1983.

RASHEDI, E.; NEZAMABADI-POUR, H.; SARYAZDI, S. **Gsa: A gravitational search algorithm**. **Information Sciences**, v. 179, p. 2232–2248, 2009.

SATO, F.; FREITAS, W. **Análise de Curto-Circuito e Princípios de Proteção em Sistemas de Energia Elétrica**. Elsevier, Editora Ltda. 2014.

SONG, Y. H., JOHNS, A. T., 1999, **Flexible AC Transmission Systems (FACTS)**, Institution of Electrical Engineers, London.