ANÁLISE COMPARATIVA DE TÉCNICAS META-HEURÍSTICAS APLICADAS PARA A ALOCAÇÃO ÓTIMA DE EQUIPAMENTOS FACTS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Diúllie Millena da Silva (IC), Camila Paes Salomon (PQ)[1]
[1]*Universiade Federal de Itajubá.*

Palavras-chave: Compensadores Série Síncrono Estáticos. Fluxo de potência. Sistemas de transmissão. Técnicas meta-heurísticas.

Introdução

Nos últimos anos, o aumento da complexidade e da demanda nas redes elétricas modernas trouxe desafios significativos para a otimização dos sistemas de energia. Entre os dispositivos que contribuem para melhorar a estabilidade e a eficiência das redes de transmissão, os Compensadores Série Síncronos Estáticos (do inglês, *Static Series Synchronous Compensators* – SSSCs) têm se destacado. Eles fazem parte do grupo equipamentos de sistemas de transmissão flexível em corrente alternada (do inglês, *Flexible AC Transmission Systems* – FACTS) e atuam no controle do fluxo de potência e na estabilidade transitória do sistema (HINGORANI, 1999). Determinar os melhores locais para sua instalação na rede, bem como suas melhores configurações, é algo importante para o bom aproveitamento dos benefícios destes equipamentos, tanto por questões técnicas quanto por econômicas. Contudo, a alocação ótima desses dispositivos é um problema complexo e não linear, que exige técnicas avançadas de otimização.

Nesse contexto, técnicas meta-heurísticas surgem como uma solução promissora. Elas são conhecidas por sua capacidade de explorar eficientemente espaços de solução complexos, proporcionando respostas quase ótimas em problemas de difícil resolução para métodos tradicionais (SHI & EBERHART, 1998). Neste trabalho, serão aplicadas duas técnicas meta-heurísticas: a Otimização por Enxame de Partículas (do inglês, *Particle Swarm Optimization* - PSO) e o Algoritmo de Busca Gravitacional (do inglês, *Gravitational Search Algorithm* – GSA) para a alocação ótima de SSSCs em sistemas de potência, buscando minimizar as perdas de potência ativa.

O PSO, inspirado no comportamento social de animais como pássaros e peixes, permite que partículas (soluções) se movam em direção às melhores soluções já encontradas, refinando progressivamente os resultados (KENNEDY & EBERHART, 1995). O GSA, por sua vez, baseia-se na gravitação universal, onde soluções candidatas interagem com base em forças gravitacionais que as aproximam de uma solução ótima (RASHEDI et al., 2009).

Desta forma, este trabalho tem por objetivo comparar o desempenho dessas técnicas aplicadas à alocação de SSSCs em sistemas de potência, fornecendo *insights* valiosos para o uso eficiente de dispositivos FACTS na otimização de sistemas de potência. Estudos de caso foram realizados com simulações computacionais das metodologias propostas para dois sistemas de potência teste do IEEE.

Metodologia

A metodologia apresentada é utilizada para comparar duas técnicas meta-heurísticas, PSO e GSA, na alocação ótima de Compensadores Série Síncronos Estáticos (SSSC) em sistemas elétricos. O objetivo é obter os melhores locais para instalação dos equipamentos, considerando a minimização das perdas de potência ativa.

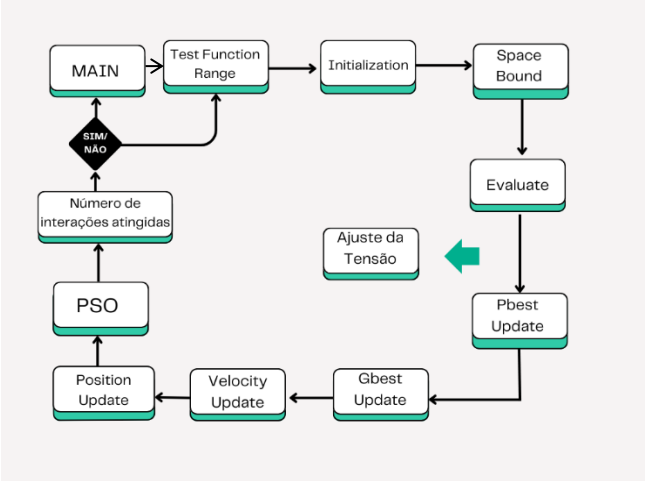
Os algoritmos utilizados foram adaptados de (SILVA, 2023). Este desenvolveu uma rotina computacional baseada em GSA para alocação ótima de SSSCs, incluindo um procedimento de automatização de execuções do programa para verificar a repetibilidade de soluções. O presente trabalho também utiliza uma implementação baseada em PSO, que foi desenvolvida a partir de (SILVA, 2023).

Tanto o PSO quanto o GSA foram modelados para analisar onde alocar os SSSCs nas linhas de transmissão, utilizando como objetivo a minimização das perdas de potência ativa. O PSO utilizou partículas que representavam as possíveis localizações dos SSSCs, enquanto o GSA seguiu a mesma lógica, adaptando as fórmulas e parâmetros específicos de cada técnica. A solução do fluxo de potência do sistema do sistema foi obtida com a *toolbox* PSAT. A execução do estudo de fluxo de potência era necessária nos algoritmos PSO e GSA a cada iteração, a cada partícula, para posterior

obtenção das perdas de potência ativa, adotada como função objetivo. Ao final, ambos os algoritmos foram implementados de forma semelhante, permitindo uma comparação justa entre as duas técnicas.

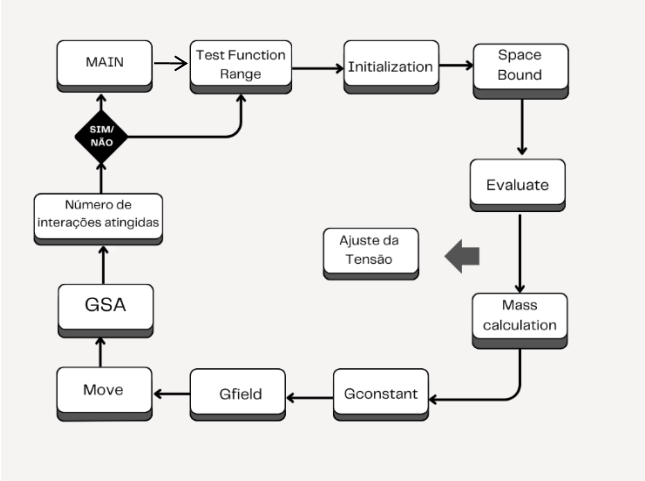
As Figuras 1 e 2 apresentam os fluxogramas dos algoritmos baseados em PSO e GSA, respectivamente, utilizados neste trabalho.

FIGURA 1 – Fluxograma do algoritmo baseado em PSO



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.

FIGURA 2 – Fluxograma do algoritmo baseado em GSA



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.

A comparação entre PSO e GSA considerou quatro aspectos principais: capacidade de convergência para soluções ótimas, repetibilidade dos resultados, eficiência na redução de perdas de potência e o tempo necessário para cada simulação. Para tal fim, foram realizadas simulações com os sistemas teste do IEEE de 14 e 30 barras, organizando os resultados em tabelas e histogramas para facilitar a análise.

Resultados e discussão

Inicialmente, foi realizada uma simulação para se obter as perdas ativas nos sistemas de 30 e 14 barras, resultando em 17,81 MW e 29,45 MW respectivamente. Com isso, determinaram-se os parâmetros necessários para os quatros cenários para iniciar as simulações, onde em cada caso realizaram-se 30 simulações para verificação da repetibilidade da alocação e da redução de perdas de potência ativa. Os parâmetros definidos são apresentados na Tabela 1.

TABELA 1 – Parâmetros de Simulação

Técnica meta-heurística	Sistema teste	Número de partículas	Número de iterações
PSO/ GSA	14 barras 1 SSSC	15	30
	14 barras 2 SSSC	20	30
	30 barras 1 SSSC	20	30
	30 barras 2 SSSC	25	40

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.

SISTEMA DE 14 BARRAS COM UM EQUIPAMENTO

Para o sistema de 14 barras com a alocação de um equipamento, foram realizadas as simulações de acordo com os parâmetros já especificados e chegou-se nos resultados da Tabela 2.

TABELA 2: Resultados Referentes à Alocação de um SSSC no Sistema de 14 Barras

Técnica	Linha de alocação	Perdas (MW)	Média Tempo de Simulação (s)	
PSO	14	10,85	212,72	
GSA	14	10,85	237,35	

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.

Nesse caso, a alocação do equipamento nas duas meta-heurísticas ocorreu na linha 14 e com uma redução de perdas de 29,45 MW para 10,85 MW, sendo uma redução de perdas de 63,16% para o sistema. Nesse caso, as duas técnicas apresentaram mesma alocação e redução de perdas. O tempo médio de simulação teve uma pequena diferença entre as simulações, com o PSO apresentando o menor tempo.

SISTEMA DE 14 BARRAS COM DOIS EQUIPAMENTOS

Para o sistema de 14 barras com a alocação de dois equipamentos, foram realizadas as simulações de acordo com os parâmetros já especificados e foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 3.

TABELA 3: Resultados Referentes à Alocação de Dois SSSCs no Sistema de 14 Barras

Técnica	Linha de alocação	Perdas (MW)	Média Tempo de Simulação (s)
PSO	12 e 14	5,46	307,58
GSA	12 e 14	5,46	310,08

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.

No segundo caso, a melhor alocação foi nas linhas 12 e 14, resultando em perdas totaisde 5,46 MW (redução de 81,46% de perdas), com 96,67% de repetibilidade. Houve 3,33% do total de simulações em que a alocação ocorreu nas linhas 11 e 16, com as perdas ativas totais ficando em 6,50 MW. As duas técnicas se mostraram eficientes, apresentando os mesmos resultados de alocação e perdas. Novamente, nota-se que o tempo médio de simulação do PSO ficou ligeiramente menor que o do GSA.

SISTEMA DE 30 BARRAS COM UM EQUIPAMENTO

Para o sistema de 30 barras, foi realizada a mesma análise, com os resultados apresentados na Tabela 4.

TABELA 4: Resultados Referentes à Alocação de um SSSC no Sistema de 30 Barras

Técnica	Linha de alocação	Perdas (MW)	Média Tempo de Simulação (s)
PSO	2	11,01	482,04
GSA	2	11,01	305,12

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.

Para o sistema de 30 barras, as simulações das duas técnicas retornaram a mesma solução, indicando perdas totais de 11,01 MW, ou seja, uma redução de 38,18%. O tempo médio de simulação do PSO ficou consideravelmente maior que o GSA neste caso.

SISTEMA DE 30 BARRAS COM DOIS EQUIPAMENTOS

Para o sistema de 30 barras com dois equipamentos, foi realizada a mesma análise, sendo os resultados apresentados na Tabela 5.

TABELA 5: Resultados Referentes à Alocação de Dois SSSCs no Sistema de 30 Barras

Técnica	Linha de alocação	Perdas (MW)	Média Tempo de Simulação (s)
PSO	1 e 6	5,26	532,36
GSA	2 e 5	6,89	490,03

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.

Neste caso, os resultados tiveram alocação em várias posições. A Tabela 5 indica o resultado com maior repetibilidade obtido por cada técnica. Nota-se a solução mais frequente do PSO levou a redução de 70,47% de perdas, e a obtida pelo GSA, 61,31%. Para fins de análise, construíram-se dois gráficos indicando todas as alocações que as simulações retornaram, ilustrados nas Figuras 9 e 10. Nas Figuras 9 e 10, o eixo horizontal indica os pares de linhas em que os equipamentos foram alocados, o eixo vertical indica o número de vezes em que aquela solução foi encontrada dentre as 30 simulações, e o valor acima de cada barra indica a perda de potência obtida, em MW, para aquela solução. A solução escolhida para apresentação na Tabela 5 do PSO foi a que representou 46,67% de repetibilidade e a do GSA, com 26,67% de repetibilidade. A melhor redução de perdas, considerando-se a repetibilidade das soluções, foi obtida pelo PSO.

FIGURA 9: Soluções obtidas para a alocação de dois SSSCs no sistema de 30 barras com a técnica PSO

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.

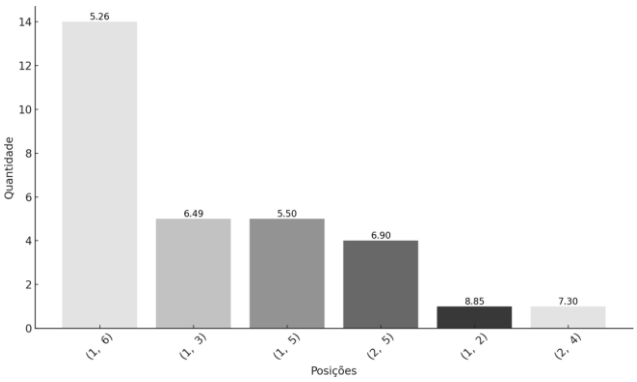
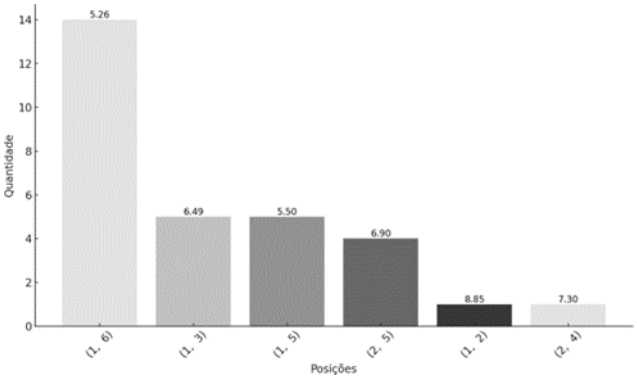


FIGURA 10: Soluções obtidas para a alocação de dois SSSC no sistema de 30 barras com a técnica GSA



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.

Finalmente, como no caso anterior, o tempo médio de simulação do PSO ficou consideravelmente

maior que o GSA.

Conclusões

Este trabalho apresentou uma análise comparativa entre duas técnicas meta-heurísticas, PSO e GSA, aplicadas à alocação ótima de Compensadores Série Síncronos Estáticos (SSSC) em sistemas de potência. O objetivo foi minimizar as perdas de potência ativa, utilizando, para validação dos métodos, sistemas teste de 14 e 30 barras. Os resultados mostraram que ambas as técnicas foram eficazes obtenção de soluções ótimas e apresentaram, em geral, repetibilidade de soluções.

O algoritmo baseado em PSO obteve menor tempo médio de simulação para o sistema menor (14 barras) e o GSA obteve menor tempo médio de simulação para o sistema maior (30 barras). Embora o tempo de simulação tenha variado entre as técnicas, esse fator não impactou significativamente os resultados finais.

A utilização de dispositivos FACTS, como o SSSC, provou ser uma estratégia eficiente para melhorar a estabilidade e a operação econômica dos sistemas de transmissão. O estudo demonstrou que as técnicas meta-heurísticas são ferramentas valiosas na otimização de sistemas de potência.

Futuras pesquisas podem explorar a alocação de múltiplos dispositivos FACTS e a aplicação dessas técnicas em sistemas de maior escala, visando validar e aprimorar os resultados.

Agradecimentos

Agradeço a professora Camila Paes Salomon pelos os conhecimentos compartilhados, pela paciência, correções e dedicação que tornou esse trabalho possível e guiou meu aprendizado.

Aos colegas de pesquisa e que contribuíram de alguma forma para este trabalho e me auxiliaram.

Agradeço a CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pelo suporte à pesquisa e, em particular, pela bolsa de financiamento que me foi concedida.

Referências

HINGORANI, N.G. **Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible ACTransmission Systems**, 1st ed. Wiley-IEEE Press, 1999.

KENNEDY, J. and Eberhart, R. (1995) **Particle Swarm Optimization**. Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, 4, 1942-1948.

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

SHI, Y., & Eberhart, R. (1998). **A modified particle swarm optimizer**. In 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings. IEEE World Congress on Computational Intelligence (Cat. No. 98TH8360) (pp. 69-73). IEEE.

SILVA, A. A. **Avanços na Aplicação do Algoritmo de Busca Gravitacional para a Alocação Ótima de Compensadores Séries Síncronos Estáticos em Sistema de Potência.** Relatório. Universidade Federal de Itajubá, 2023.

Sistema de Potência IEEE de 14 Barras. IEEE DataPort. Disponível em: http://labs.ece.uw.edu/pstca/pf14/pg_tca14bus.htm. Acesso em: 5 out. 2024.

Sistema de Potência IEEE de 30 Barras. IEEE DataPort. Disponível em: http://labs.ece.uw.edu/pstca/pf30/pg_tca30bus.htm. Acesso em: 5 out. 2024.