

## Algoritmo de busca gravitacional aplicado para a alocação ótima de compensadores série síncrono estáticos em sistemas de potência

Augusto Almeida Silva<sup>1</sup> (IC), Camila Paes Salomon (PQ)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Itajubá

**Palavras-chave:** Algoritmo de busca gravitacional. Compensador série síncrono estático. Meta-heurísticas. Sistemas elétricos de potência.

### Introdução

Os Sistemas Flexíveis de Transmissão em Corrente Alternada (do Inglês, *Flexible AC Transmission System* - FACTS) têm ganhado espaço nos estudos relacionados à busca por eficácia e otimização em sistemas de transmissão de energia elétrica. Esse cenário vem surgindo uma vez que o Sistema Interligado Nacional (SIN) vem crescendo, aumentando sua malha e pontos de geração distribuída com a finalidade de atender a crescente demanda da carga. Apesar de ser um cenário próspero, uma vez que a capacidade de geração e transmissão de energia elétrica pode ser associada ao crescimento econômico de um país, surgem muitos desafios relacionados a questões operativas, como a instabilidade e redução da eficiência dos sistemas de transmissão. Logo, é neste contexto que os equipamentos FACTS (HINGORANI, 1999) são fortes candidatos para a solução de grande parte dos problemas do SIN, como a instabilidade, confiabilidade e eficiência. Isso porque eles permitem o controle de potências ativa e reativa, tornando possível uma melhor utilização da infraestrutura já existente da rede. Com isto posto e dado o elevado custo de implementação dos FACTS, destaca-se a importância da alocação ótima destes equipamentos, o que vem sendo proposto em diversos trabalhos na área, com destaque para a aplicação de técnicas meta-heurísticas. O presente artigo tem como objetivo a aplicação da técnica meta-heurística Algoritmo de Busca Gravitacional (do Inglês, *Gravitational Search Algorithm* - GSA) para alocação ótima de compensadores série síncronos estáticos (do Inglês, *Static Series Synchronous Compensator* - SSSC) (PINGALE, 2020) em sistemas de potência, com o objetivo de minimização de perdas de potência ativa. Este trabalho é uma continuação de um trabalho anterior (VELOSO, 2022), sendo que as principais contribuições incluem a consideração de sistemas de potência teste maiores (sistemas teste do IEEE de 14 e 30 barras), um número maior de equipamentos SSSC alocados (dois equipamentos), e

ajustes em parâmetros do algoritmo GSA. Para a otimização, o algoritmo desenvolvido integra uma *toolbox* do Matlab, o PSAT, para análise de fluxo de potência. Considerando-se as novas contribuições, foi desenvolvido um algoritmo que automatiza a simulação e geração de resultados, para planejamento da alocação dos equipamentos. Tal algoritmo integra o GSA, o qual define a posição de linha do compensador no sistema, e solicita à *toolbox* PSAT o cálculo de fluxo de potência, seguindo os parâmetros ditados pelo GSA, e, por fim, exporta os resultados para um arquivo .CSV e os gráficos do processo iterativo para .PDF. A metodologia foi verificada através de simulações com o algoritmo desenvolvido, e os resultados obtidos foram promissores.

### Metodologia

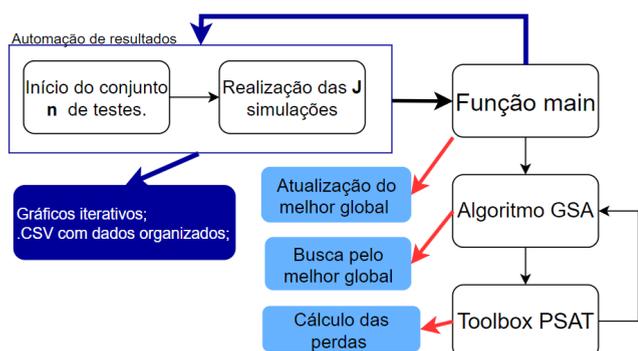
O principal objetivo deste trabalho é realizar a otimização da alocação de SSSC em sistemas de potência via utilização do GSA (RASHEDI, 2009). O algoritmo desenvolvido retorna a melhor posição encontrada de alocação em função da minimização da função objetivo, que considera as perdas de potência ativa no sistema, sendo provenientes do resultado ofertado pela análise de fluxo de potência pela *toolbox* PSAT.

A pesquisa foi dividida em três principais etapas. A primeira consistiu no entendimento dos parâmetros que poderiam ser otimizados em relação ao equipamento SSSC e inicialmente foi estruturada uma rotina de programação para definir a posição de dois equipamentos SSSC com variação da tensão de funcionamento e taxa de compensação, com auxílio da *toolbox* PSAT (MILANO, 2011). Nesta etapa, também foi definido o espaço de busca, no qual as partículas iriam se movimentar, sendo definido pelas possíveis posições de alocação. Desta etapa, foi notável que as perdas mínimas do sistema só eram obtidas com a compensação máxima do sistema pelos equipamentos alocados e que este parâmetro aumenta muito o espaço de busca, inviabilizando uma taxa de convergência alta do processo iterativo do GSA.

A segunda etapa consistiu na criação de uma rotina para automatizar a realização de um conjunto de simulações com variação no número de partículas e quantidade de iterações. Nesta rotina também foi implementada a exportação dos resultados para um arquivo .CSV de forma organizada, contendo os parâmetros de tempo de simulação, quantidade de partículas utilizadas e número de iterações, bem como as linhas alocadas e as perdas obtidas com aquele arranjo do sistema teste. Além disso, essa automatização gerou três conjuntos de PDF por conjunto de simulação, contendo cada um a evolução do processo iterativo, abordando as duas posições alocadas e as perdas do sistema. A última etapa consistiu na expansão dos casos de estudo, aplicando dois novos sistemas maiores, os quais continham 14 e 30 barras (sistemas teste IEEE 14-bus e IEEE-30 bus, respectivamente).

Por fim, com todo o algoritmo estruturado, o qual pode ser resumido pelo diagrama da Figura 1, realizou-se um conjunto de simulações para verificar a repetibilidade do algoritmo, no total foram realizadas 100 simulações para os casos contendo 1 e 2 equipamentos, nos dois sistemas de 14 e 30 barras. Além disso, para verificar o impacto da variável  $G_0$  no algoritmo foram executadas mais 100 simulações para o sistema de 30 barras com dois equipamentos, com a finalidade de verificar o impacto na convergência do algoritmo.

Figura 1 - Diagrama do algoritmo



Fonte: Autoria própria.

### Resultados e discussão

Inicialmente, foi realizada uma simulação para obter as perdas ativas dos sistemas de 30 e 14 barras, as quais são, respectivamente, 17,81% e 29,45%. Com os resultados de perdas originais em mãos, foram executadas 100 simulações para cada cenário. Vale salientar que a aplicação de 1 equipamento reduziu as perdas do sistema para patamares de 10% nos dois

sistemas e com 2 equipamentos para patamares de 5%, conforme resumido as menores perdas obtidas na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados obtidos da alocação

Perdas Original	14 BARRAS			Perdas Original	30 BARRAS			
	SSSC nas linhas 14 e 12	SSSC nas linhas 11 e 16	SSSC na linha 14		SSSC nas linhas 1 e 6	SSSC nas linhas 1 e 5	SSSC na linha 2	SSSC na linha 1
29,45%	5,46%	6,59%	10,85%	17,81%	5,26%	5,50%	11%	11,54%
Redução das perdas:	81,46%	77,62%	63,16%	Redução das perdas:	70,47%	69,12%	38,24%	35,20%
	2 Equipamentos		1 Equipamento		2 Equipamentos		1 Equipamento	

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 1 resume as menores perdas obtidas do sistema, dentro de todas as simulações realizadas. Entretanto, ao utilizar algoritmos de meta-heurística, é esperado que a convergência não seja sempre para os mesmos resultados, devido aos parâmetros aleatórios envolvidos, e isso pode ser mais notório em sistemas cujo espaço de busca é maior. Tal efeito foi notado ao se comparar os resultados para os sistemas de 14 e 30 barras, conforme os gráficos de barras apresentados nas Figuras 1 a 9, os quais resumem a repetibilidade das simulações.

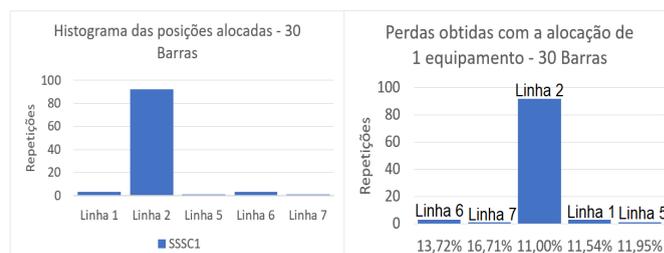
As Figuras 1 e 2 apresentam os resultados para a alocação de 1 equipamento nos sistemas de 14 e 30 barras, respectivamente.

Figura 2 – Resultados do sistema de 14 barras com 1 SSSC



Fonte: Autoria própria.

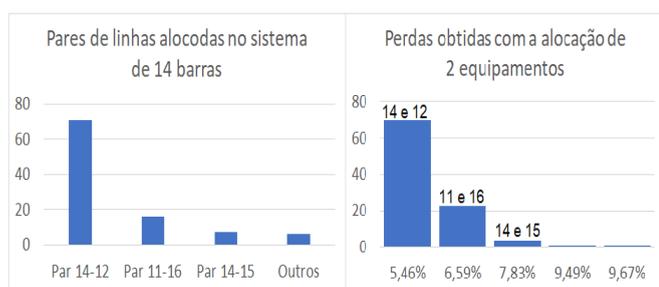
Figura 3 – Resultados do sistema de 30 barras com 1 SSSC



Fonte: Autoria própria.

Observa-se que ao aumentar o número de barras, mantendo as características de quantidade de partículas e número de iterações, bem com o valor de  $G_0$ , há um aumento da divergência, mesmo que pequeno. Tal efeito manifesta-se com maior força no sistema com 2 equipamentos, conforme apresentado nas Figuras 4 a 6.

**Figura 4** – Resultados do sistema de 14 barras com 2 SSSC



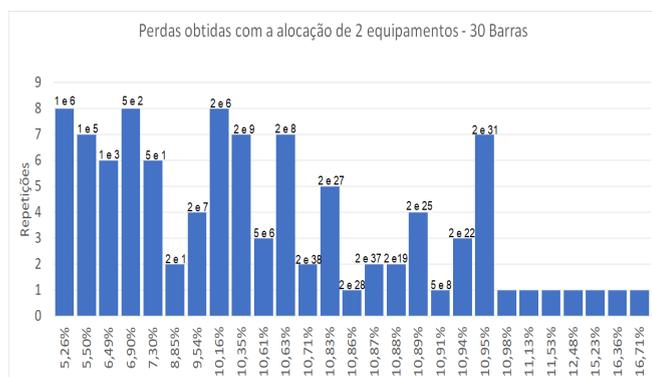
Fonte: Autoria própria.

**Figura 5** – Pares de linhas do sistema de 30 barras



Fonte: Autoria própria.

**Figura 6** – Perdas obtidas no sistema de 30 barras com 2 SSSCs

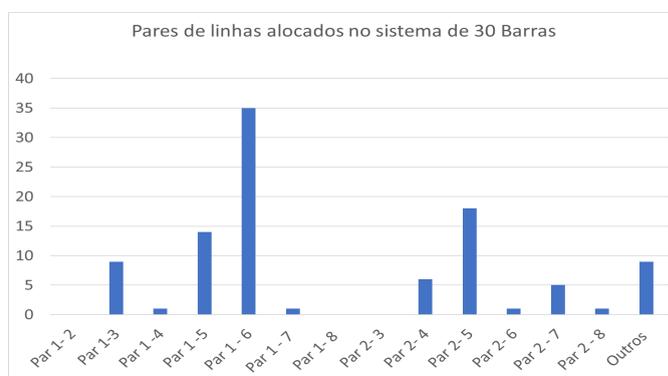


Fonte: Autoria própria.

Observa-se pelas Figuras 4 e 5 que a repetibilidade do algoritmo não é mais tão evidente, apesar de haver uma concentração de alocação nas linhas 1 e 2.

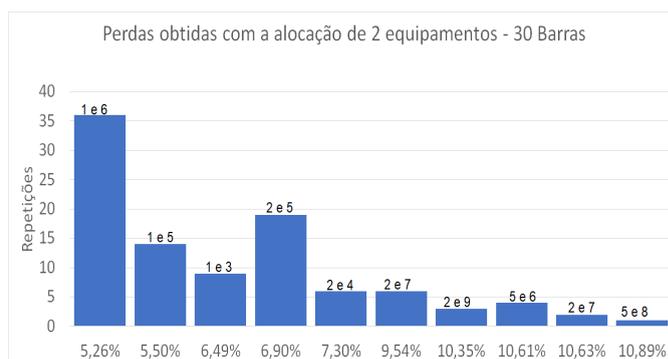
Dentro desse cenário, com a finalidade de verificar o impacto da variável  $G_0$  na repetibilidade do algoritmo, foi realizada uma outra simulação com o dobro da variável  $G_0$ . Observou-se um aumento da repetibilidade nos resultados, como apresentado nas Figuras 7 e 8.

**Figura 7** – Pares de linhas do sistema de 30 barras com dobro do  $G_0$



Fonte: Autoria própria.

**Figura 8** – Repetibilidade, com dobro de  $G_0$ , das perdas obtidas no sistema de 30 barras com 2 compensadores

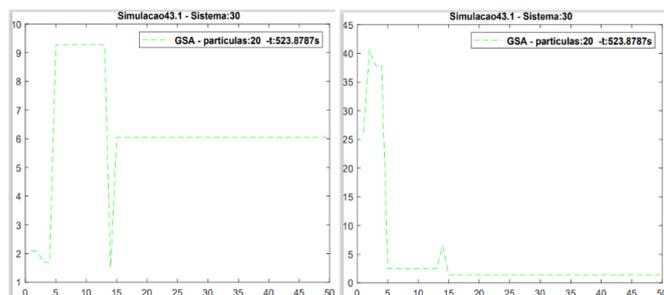


Fonte: Autoria própria.

É visível ao comparar as Figuras 8 e 5 o aumento da repetibilidade da alocação de pares de barras com o aumento da constante  $G_0$ .

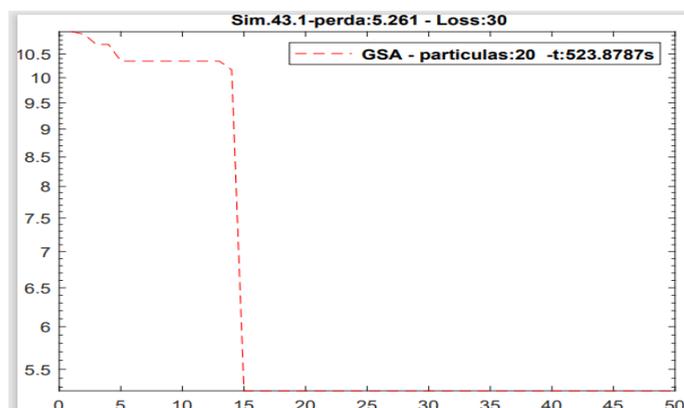
Por fim, para verificar se o algoritmo apresentou evolução entre as iterações, foram traçados os gráficos de posição e perda de acordo com as iterações, sendo gerado mais de 1300, destacando-se aqui alguns exemplos conforme apresentados nas Figuras 9 a 10.

**Figura 9** – Evolução das posições dos 2 equipamentos SSSC alocados no sistema para o sistema de 30 barras



Fonte: Autoria própria.

**Figura 10** – Evolução da perda ativa no sistema de 30 barras conforme a alocação de 2 SSSCs



Fonte: Autoria própria.

### Conclusões

A aplicação de compensadores série síncronos de forma estratégica em uma sistema de potência pode trazer diversos benefícios e, conforme apresentado nos resultados, permite a redução das perdas ativas em patamares de porcentagem de 30% a 80% das perdas originais. Entretanto, esses valores de perdas são obtidos com os melhores globais das funções objetivo e, porventura, esses pontos de alocação encontrados podem não estar disponíveis para a aplicação dos equipamentos de compensação. Logo, o algoritmo de busca gravitacional também estabelece mínimos locais da função objetivo, os quais oferecem também uma redução grande das perdas ativas do sistema. Logo é visível que a aplicação de uma técnica metaheurística para a obtenção de pontos estratégicos de alocação de compensação mostra-se muito útil para sistema cuja dimensão é grande, pois reduz o custo computacional e oferta uma gama de opções para a aplicação dos equipamentos num estudo de viabilidade e implementação. Finalmente, destaca-se que os

resultados obtidos com a metodologia proposta foram satisfatórios.

### Agradecimentos

Agradeço primeiramente à minha orientadora Camila Paes Salomon pela atenção, empenho e conhecimento ofertados durante o ano de execução desta pesquisa, os quais foram essenciais para, não só, o desenvolvimento deste trabalho, mas também da minha formação como futuro engenheiro electricista. Por fim, sou grato à Universidade Federal de Itajubá-UNIFEI e ao programa de fomento PIBIC por todo o auxílio financeiro oferecido durante o período de execução desta pesquisa.

### Referências

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

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

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

PINGALE, S.; MAHEVASH, A.; JOSHI, N. **An overview of Static Synchronous Series Compensator**. *Journal of Research in Engineering and Applied Sciences*, v. 5, n. 3, p. 108-113, 2020.

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

Sistema de Potência IEEE de 30 Barras. IEEE DataPort. Disponível em: [http://labs.ece.uw.edu/pstca/pf30/pg\\_tca30bus.htm](http://labs.ece.uw.edu/pstca/pf30/pg_tca30bus.htm)

Sistema de Potência IEEE de 14 Barras. IEEE DataPort. Disponível em: [http://labs.ece.uw.edu/pstca/pf14/pg\\_tca14bus.htm](http://labs.ece.uw.edu/pstca/pf14/pg_tca14bus.htm)

VELOSO, M. E. G.; SALOMON, C. P. **Aplicação de Algoritmo de Busca Gravitacional para a Alocação Ótima de Compensador Série Síncrono Estático em Sistemas Elétricos de Potência**. In: V Simpósio de Iniciação Científica da UNIFEI - Ciência, Tecnologia e Inovação no Brasil, 2022. Anais do V Simpósio de Iniciação Científica da UNIFEI - Ciência, Tecnologia e Inovação no Brasil, Itajubá / Itabira - MG: UNIFEI, 2022.