

CONTRIBUIÇÕES NA APLICAÇÃO DO ALGORITMO DE BUSCA GRAVITACIONAL PARA A ALOCAÇÃO ÓTIMA DE COMPENSADORES SÉRIE SÍNCRONO ESTÁTICOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

Lucas Vinicius Inácio Pires (IC), Camila Paes Salomon (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá

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

Introdução

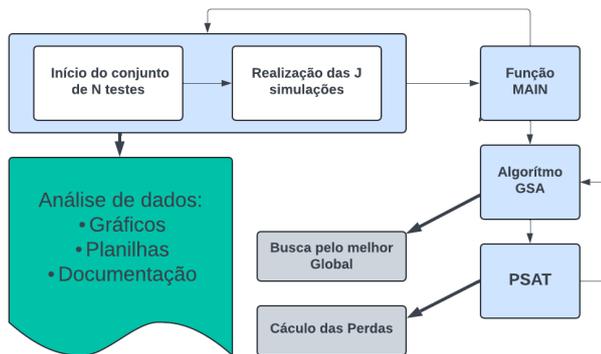
Os Sistemas Flexíveis de Transmissão em Corrente Alternada (do Inglês, *Flexible AC Transmission System* - FACTS) têm se destacado nos estudos relacionados à busca por eficiência e otimização em sistemas de transmissão de energia elétrica. Tal cenário vem evoluindo uma vez que o Sistema Interligado Nacional (SIN) segue adquirindo complexidade, aumentando sua malha e pontos de geração distribuída com objetivo de atender à crescente demanda da carga. Mediante a isso, surgem muitos desafios relacionados a questões operativas, como aquelas relacionadas com a estabilidade e a eficiência dos sistemas de transmissão. Logo, é neste contexto que os equipamentos FACTS (HINGORANI, 1999) podem se destacar como uma solução de grande parte dos problemas do SIN. Isso porque eles permitem o controle de potências ativa e reativa, tornando possível uma melhor utilização da infraestrutura já existente da rede. Levando em consideração o elevado custo de implementação dos FACTS, destaca-se a importância da alocação ótima destes equipamentos. Trata-se de um problema de otimização que pode ser resolvido por diversas abordagens, incluindo a aplicação de técnicas meta-heurísticas. O presente trabalho 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. As contribuições desta pesquisa visam acrescentar, ao estudo do ano anterior (SILVA, 2023), um cenário mais realista ou condizente no que diz respeito às variações de carga que um sistema elétrico de potência interligado está sujeito durante um período de tempo predeterminado. Para isso, uma nova função objetivo é proposta, considerando-se as perdas ativas em diferentes cenários de demanda de carga: nominal, subcarregado e sobrecarregado. Com o valor das perdas em cada cenário operativo, o algoritmo aproxima uma função senoidal que

simula a curva de perdas do sistema, a qual busca ser minimizada pela função objetivo. A metodologia foi verificada através de simulações com o algoritmo desenvolvido, considerando-se sistemas teste do IEEE, e os resultados obtidos foram promissores.

Metodologia

O artigo teve como principal objetivo realizar a otimização da alocação de SSSC em sistemas de potência utilizando uma metodologia baseada em GSA (RASHEDI, 2009). O algoritmo desenvolvido retorna a melhor posição encontrada de alocação do compensador em função da minimização da função objetivo. Esta se baseia nas perdas de potência ativa no sistema considerando perfis diferentes de carga, sendo provenientes do resultado fornecido para o fluxo de potência pela *toolbox* PSAT (MILANO, 2011). O presente trabalho consiste na continuação de dois trabalhos anteriores, em que o último estágio foi o desenvolvimento de um *script* em MATLAB cujas principais características serão descritas a seguir (VELOSO, 2022; SILVA, 2023). O *script* desenvolvido 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 do algoritmo baseado em GSA para alocação ótima de SSSC. Nesta rotina também foi implementada a exportação dos resultados para um arquivo .CSV, contendo os parâmetros de tempo de simulação, quantidade de partículas utilizadas e número de iterações, bem como as linhas alocadas e as perdas obtidas pelo arranjo do sistema teste. Além disso, essa automatização gerou dois ou três conjuntos de arquivos PDF por conjunto de simulação, contendo cada um a evolução do processo iterativo, abordando as posições alocadas e as perdas do sistema. Em suma, o objetivo era aplicar a metodologia baseada em GSA para a alocação ótima de SSSC, considerando-se mais de um equipamento, e analisando a repetibilidade das soluções, uma vez que várias simulações eram realizadas. A Figura 1 apresenta um diagrama ilustrando o algoritmo.

Figura 1 – Diagrama do Algoritmo GSA



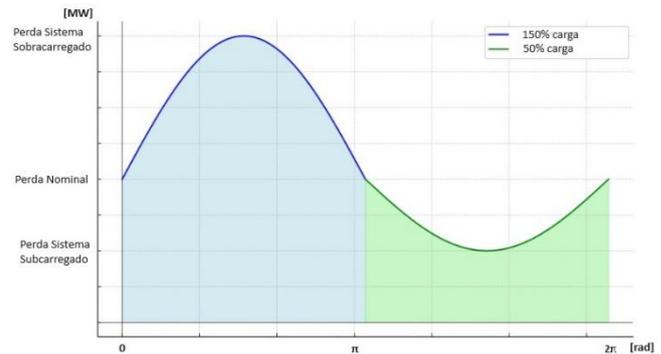
Fonte: Autoria Própria

Visando acrescentar, ao estudo anterior apresentado, um cenário mais realista ou condizente no que diz respeito às variações de carga que um sistema elétrico de potência interligado está sujeito durante um período de tempo pré-determinado, o estudo de caso do presente trabalho levou em conta dois sistemas teste de 14 e 30 barras (IEEE-14 Barras e IEEE-30 Barras, respectivamente), os quais tiveram modificações nos seus perfis operacionais, considerando-se os sistemas em 50% de demanda (denominado *sistema subcarregado*) e 150% de demanda (denominado *sistema sobrecarregado*) além de sua configuração de carga nominal.

Com as características do perfil de carga de cada sistema, implementou-se uma nova função objetivo para o problema de otimização. A nova função se baseia em uma curva de perdas cujas características buscam simular a curva de demanda de um sistema elétrico de potência. Esta foi estruturada com base no comportamento de uma curva típica de demanda do SIN (Sistema Interligado Nacional) durante o período de 24 horas. A Figura 2 ilustra a característica de perdas de um sistema ao longo de um dia, considerando-se que as perdas são proporcionais ao nível de carga. O eixo horizontal foi traçado em forma de ângulo, onde o intervalo 0 a 2π [rad] corresponde ao intervalo de 24 horas, iniciando às 6:00. Nota-se que a função parte do nível de perdas na condição nominal até o pico máximo, correspondente ao nível de perdas do sistema sobrecarregado, em seguida o valor de perdas chega a um nível mínimo, que corresponde ao nível de perdas do sistema subcarregado, assemelhando-se a uma função senoidal.

Assim, o comportamento das perdas foi aproximado para uma senoide, com os valores notáveis indicados na Figura 2. Com esta nova função objetivo proposta, foram realizadas 30 simulações do algoritmo baseado em GSA para cada sistema (14 e 30 barras), com alocação de 1 e 2 equipamentos para verificação da repetibilidade do método.

Figura 2 - Função discretizada de Perdas



Fonte: Autoria Própria

Resultados e discussão

Primeiramente, foram realizadas simulações para obter as perdas ativas dos sistemas, através da curva estruturada pela função objetivo que leva em conta os patamares de carga e o período de variação. Os resultados obtidos foram 20,24 MW e 27,12 MW para os sistemas de 30 e 14 barras, respectivamente. A seguir, apresentam-se os resultados obtidos pelo algoritmo baseado em GSA.

a) Sistemas IEEE-14 Barras e 30 Barras com 1 SSSC

Para a alocação de apenas um equipamento, tanto o sistema de 14 barras quanto o de 30 barras apresentaram 100% de repetibilidade. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 1.

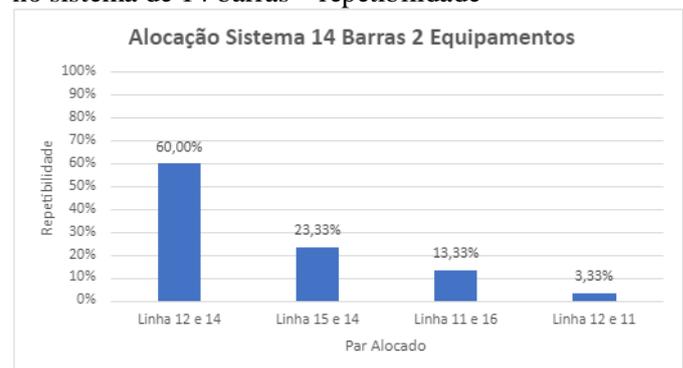
Tabela 1 – Resultados obtidos para a alocação de 1 equipamento para os sistemas de 14 e 30 barras

	Sist. 14 barras	Sist. 30 barras
Alocação ótima	Linha 14	Linha 2
Perdas Ativas	11,75 MW	12,87 MW
Redução de Perdas	56,37%	36,41%

b) Sistema IEEE-14 Barras com 2 SSSC

Para a alocação de 2 equipamentos no sistema de 14 barras, diferentes soluções foram obtidas. A Figura 3 apresenta os pares de equipamentos alocados e a frequência de ocorrência de cada um dentre as 30 simulações.

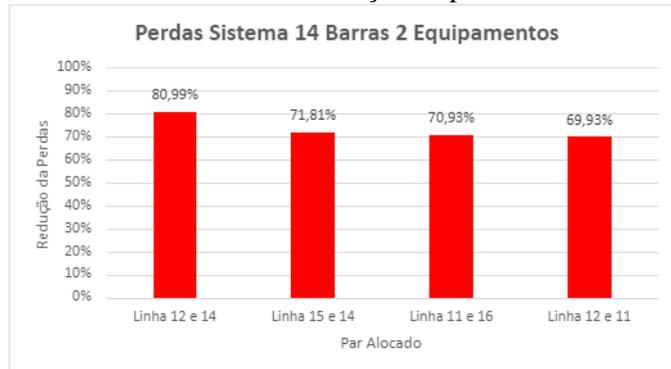
Figura 3 – Resultados para a alocação de 2 equipamentos no sistema de 14 barras – repetibilidade



Fonte: Autoria Própria

A Figura 4 apresenta a redução de perdas ativas obtida para cada solução encontrada.

Figura 4 - Resultados para a alocação de 2 equipamentos no sistema de 14 barras – redução de perdas



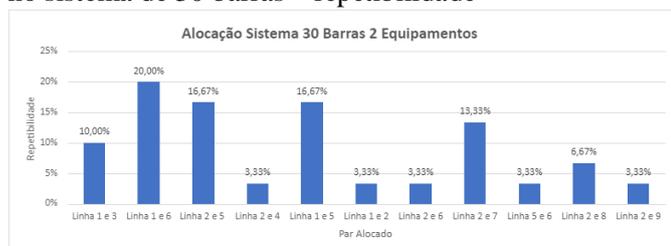
Fonte: Autoria Própria

Ao dobrar o número de equipamentos, o método apresentou combinações distintas de pares de linhas, porém nota-se uma maior frequência de alocação em certas linhas (linhas 11, 12 e 14), mesmo em pares distintos. Pode-se, assim, concluir que dentre os quatro pares de linhas aferidos, há candidatos que possivelmente têm mais relevância para serem o ótimo global, o que é evidenciado pela repetibilidade atingida. A maior repetibilidade ocorreu para o caso qual a redução de perdas foi mais significativa. Além disso, as soluções denominadas “sub-ótimas” também têm relevância, uma vez que também apresentam redução de perdas e, em cenários reais, poderiam ser locais mais factíveis de alocação de equipamentos.

c) Sistema IEEE-30 Barras com 2 SSSC

Para a alocação de 2 equipamentos no sistema de 30 barras, também foram obtidas soluções distintas. A Figura 5 apresenta os pares de equipamentos alocados com sua respectiva frequência de ocorrência. Já a Figura 6 apresenta a redução de perdas ativas obtida para cada solução encontrada.

Figura 5 – Resultados para a alocação de 2 equipamentos no sistema de 30 barras – repetibilidade



Fonte: Autoria Própria

Semelhantemente ao resultado do sistema de 14 barras, houve diferentes soluções encontradas pelo método, revelando um nível menor de repetibilidade, porém agora apresentando uma vasta variedade de pares

candidatos ao melhor global. Isso devido ao número de linhas de transmissão e combinações possíveis de equipamentos alocados. Ainda assim nota-se a maior relevância de algumas linhas ao se avaliar a frequência na qual são escolhidas para formarem pares (como as linhas 1, 2, 5 e 6). Além disso, todas levaram a significativa redução de perdas.

Figura 6 - Resultados para a alocação de 2 equipamentos no sistema de 30 barras – redução de perdas



Fonte: Autoria Própria

A Tabela 2 resume a alocação dos compensadores para cada caso, isto é, a solução ótima (linha de transmissão foi designada para alocação do SSSC que compreendeu o menor nível de perdas ativas dentro das 30 simulações realizadas), e a respectiva perda ativa associada ao sistema, bem como a redução das perdas quando comparada ao sistema original.

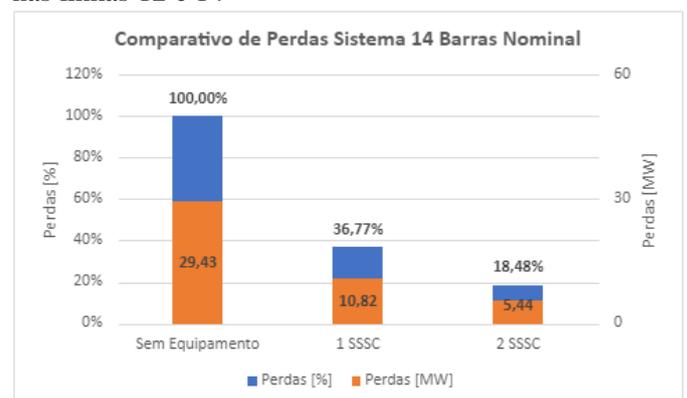
Tabela 2 - Alocação e perdas ótimas obtidas

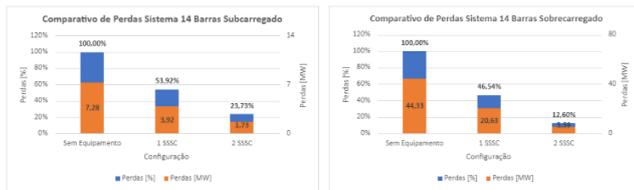
Perdas Originais	Sistema 14 Barras		Perdas Originais	Sistema 30 Barras	
	SSSC nas linhas 12 e 14	SSSC na linha 14		SSSC nas linhas 1 e 5	SSSC na linha 2
27,12 MW	5,16 MW	11,75 MW	20,24 MW	6,00 MW	12,87 MW
Redução das Perdas:	80,99%	56,67%	Redução das Perdas:	70,34%	36,41%
	2 Equipamentos	1 Equipamento		2 Equipamentos	1 Equipamento

Fonte: Autoria Própria

Finalmente, os gráficos nas Figuras 7 e 8 apresentam uma comparação de perdas para os dois sistemas teste, após a alocação ótima feita anteriormente, em seus três níveis de carga - carregamento nominal, sistema subcarregado e sistema sobrecarregado.

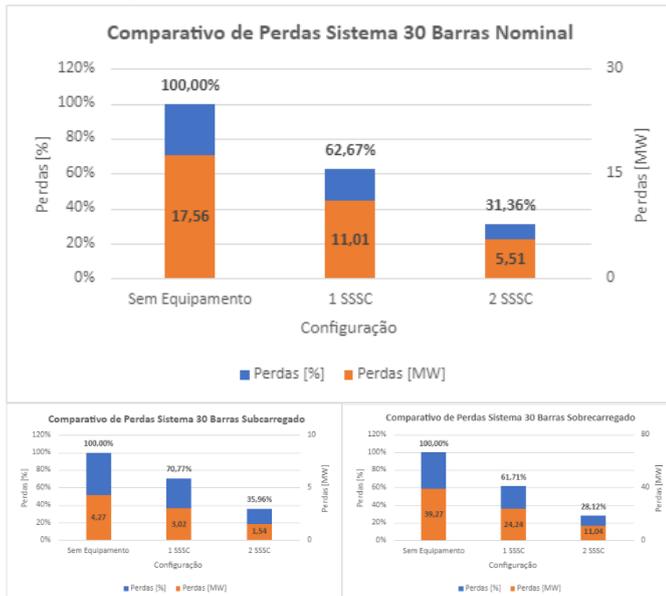
Figura 7 - Sistema de 14 barras: perdas para o sistema original, com alocação de SSSC na linha 14 e alocação nas linhas 12 e 14





Fonte: Autoria Própria

Figura 8 - Sistema 30 barras: perdas para o sistema original, com alocação de SSSC na linha 2 e alocação nas linhas 1 e 5



Fonte: Autoria Própria

Vale destacar que as perdas das Figuras 7 e 8 são obtidas pelos resultados de fluxo de potência (perdas “reais”), enquanto as obtidas na Tabela 2 provêm da aproximação realizada pela função objetivo ilustrada na Figura 2, por isso as diferenças entre os valores. Nota-se que o nível de perdas é proporcional ao carregamento do sistema, uma vez que estas são função da corrente ao quadrado, e que os compensadores alocados levaram a redução de perdas para todas as condições verificadas.

Conclusões

A aplicação de compensadores série síncronos de forma estratégica em sistemas de potência pode trazer diversos benefícios e, conforme apresentado nos resultados, permitiu a redução das perdas ativas de cerca de 36% a 81%, dependendo do caso. Ao se levar em conta as condições operacionais, seu estado de carregamento e fluxos de potência em um período definido, há uma maior afinidade quanto a escolha da melhor alocação do compensador, uma vez que se considera agora características inerentes de um sistema real. Os resultados obtidos através da metodologia evidenciaram a alocação do SSSC em linhas adjacentes às barras *swing* de cada sistema, possivelmente devido ao maior fluxo de energia demandada associado a elas.

Ressalta-se, assim, a aplicação da técnica meta-heurística para obtenção de pontos ótimos, a qual pode ofertar uma variedade de opções para alocação de equipamentos em estudos de viabilidade de implementação. Logo, tais resultados indicam a eficácia da metodologia de implementação do GSA para alocação ótima de SSSC.

Agradecimento

Agradeço primeiramente à minha orientadora Camila Paes Salomon. Também agradeço à Universidade Federal de Itajubá-UNIFEI e ao programa de fomento PIBIC por todo o auxílio financeiro oferecido durante a pesquisa.

Referências

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.

IEEE-30 Barras. Sistema de Potência IEEE de 30 Barras. IEEE DataPort. Disponível em: http://labs.ece.uw.edu/pstca/pf30/pg_tca30bus.htm Acesso em 02/10/2024.

IEEE-14 Barras. Sistema de Potência IEEE de 14 Barras. IEEE DataPort. Disponível em: http://labs.ece.uw.edu/pstca/pf14/pg_tca14bus.htm Acesso em 02/10/2024.

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.

SILVA, A. E. G.; SALOMON, C. P. Avanços na Aplicação de Algoritmo de Busca Gravitacional para a Alocação Ótima de Compensador Série Síncrono Estático em Sistemas Elétricos de Potência. In: VI Simpósio de Iniciação Científica da UNIFEI - Ciência como Ferramenta de Transformação da Sociedade, 2023. Anais do VI Simpósio de Iniciação Científica da UNIFEI - Ciência como Ferramenta de Transformação da Sociedade, Itajubá / Itabira - MG: UNIFEI, 2023.