

ALOCAÇÃO ÓTIMA DE UM COMPENSADOR ESTÁTICO EM SÉRIE SÍNCRONO APLICADO A SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO-SE OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS

Gustavo Takeshi Sasaki¹ (IC), Mauricio Campos Passaro (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá

Palavras-chave: Eletrônica de Potência. Fluxo de Potência. Meta-heurística. Redução de Perdas. Transmissão de Energia Elétrica.

Introdução

O elemento fundamental para a realização de trabalho é a energia, seja para realizar uma simples tarefa doméstica até a construção de obras públicas. O desenvolvimento da sociedade está diretamente atrelado ao quão bem a energia gerada por ela é aproveitada. A boa gestão de energia garante a quem a usa que o mínimo está sendo desperdiçado e o máximo está sendo entregue conforme a demanda solicitada. Garantir que este trabalho seja feito com excelência depende diretamente dos responsáveis pelo sistema elétrico. Deve contar com uma equipe técnica especializada em sistemas elétricos de potência capaz de analisar e tomar as melhores decisões para operar o sistema elétrico.

Com o crescimento da sociedade é necessário que o sistema elétrico que a atende seja capaz de suprir as demandas e acompanhar seu crescimento. Para isto o sistema elétrico deve ser periodicamente avaliado e modificações devem ser feitas de forma a ter o maior aproveitamento da energia. Muitas vezes uma mudança drástica na topologia do sistema não se torna viável, porém existem técnicas que com modificações simples podem solucionar os problemas, ou prorrogar a reforma no sistema, essas soluções acabam se tornando mais interessantes por conta de seu custo benefício.

A aplicação dos dispositivos de Sistema de Transmissão de Corrente Alternada Flexível (do inglês, *Flexible Alternating Current Transmission System - FACTS*), pode ser uma solução economicamente mais viável que a reforma na topologia do sistema elétrico. O impacto desses elementos no sistema pode trazer diversos benefícios.

O impacto do dispositivo FACTS no sistema dependerá de quantos e onde serão instalados. Identificar essas variáveis se torna então um problema complexo e multiobjetivo. O presente trabalho apresenta uma proposta para a resolução do problema de alocação ótima de compensador estático em série síncrono (do

inglês, *Static Synchronous Series Compensator - SSSC*) com o objetivo de redução de perdas, aplicando técnicas meta-heurísticas para encontrar de forma rápida uma solução que atenda o que é necessário. O algoritmo aplicado será a Otimização de Enxame de Partículas (do inglês, *Particle Swarm Optimization - PSO*).

Metodologia

Um ponto de grande relevância para a simulação do sistema com os dispositivos FACTS são os modelos utilizados, que garantem a validade dos resultados da simulação. Sua composição consiste de um conversor conectado a um conversor composto por um tiristor GTO e um diodo em antiparalelo de um lado e conectado à linha de transmissão por um transformador, como mostra a Figura 1.

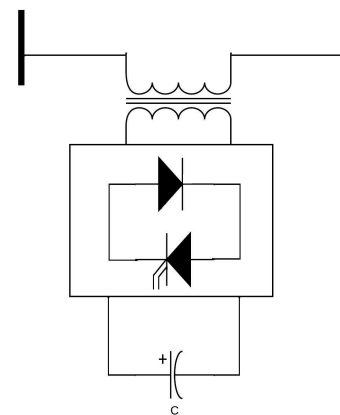


Figura 1 – Diagrama esquemático do SSSC, adaptado de (AL Ahmad; SIRJANI, 2020).

O SSSC pode ser modelado por uma fonte de tensão em série com a impedância de um transformador de acoplamento (Figura 2). Dessa forma, é possível controlar o fluxo de potência através da magnitude e fase da tensão injetada na linha.

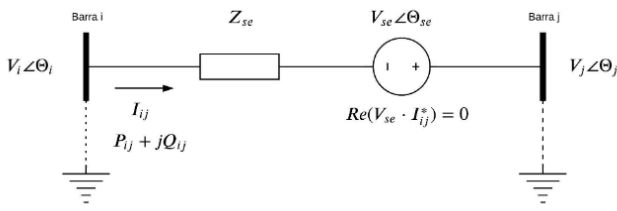


Figura 2 – Circuito equivalente do SSSC, adaptado de (GALVANI et al., 2021).

Resolver o problema de forma iterativa demanda uma maneira rápida e dinâmica de avaliar sistemas diferentes. Decidiu-se avaliar de forma a simular o sistema teste escolhido nas condições desejadas. A ferramenta escolhida para a simulação foi o PSAT: Desenvolvido como uma toolbox para o MATLAB, também compatível com GNU Octave. É uma ferramenta de código aberto de análise de sistemas elétricos de potência. Seu principal diferencial são os modelos de FACTS inclusos na biblioteca (MILANO, 2006).

Entre as opções estudadas a única que oferece a possibilidade de incluir um modelo pronto de dispositivo FACTS na análise do sistema foi a biblioteca PSAT, sendo o escolhido para o projeto.

O algoritmo de PSO foi implementado utilizando a linguagem de programação python 3.8.10. A biblioteca escolhida para validar a função objetivo existe apenas para o GNU Octave, essa integração foi realizada através da biblioteca Oct2Py (SILVESTER, 2022). A integração é melhor explicada na figura 3.

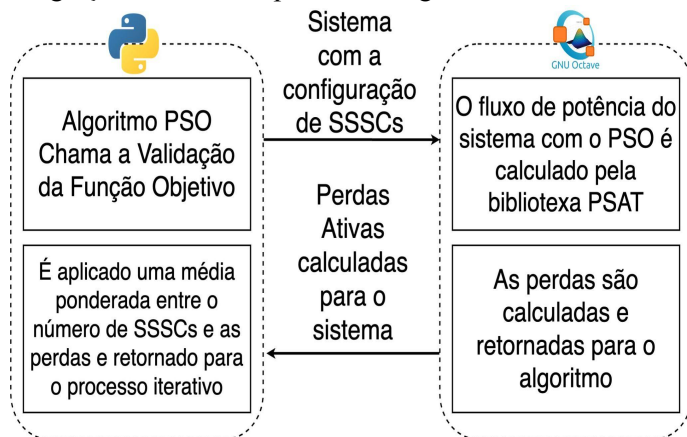


Figura 3 – Integração entre a linguagem de programação Python e o GNU Octave.

O processo de otimização é explicado através do fluxograma na Figura 4.

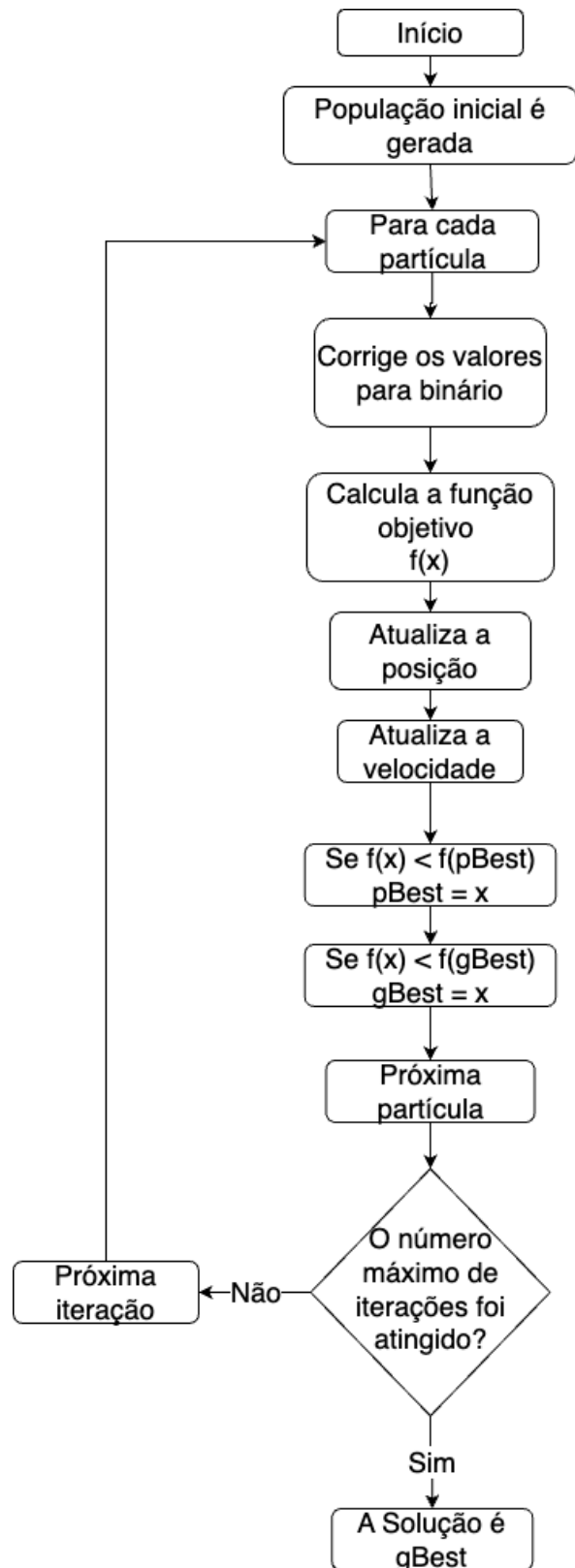


Figura 4 – Fluxograma do processo de otimização.

Inicialmente as variáveis do problema foram definidas como a linha de transmissão onde o SSSC seria instalado e o nível de compensação do dispositivo. Segundo o artigo original do algoritmo PSO (KENNEDY; EBERHART, 1995) o número de partículas deve ser dez vezes o número de dimensões do problema, foi criado então um enxame de vinte partículas. Para esta versão foi necessário arredondar a variável correspondente à linha de transmissão uma vez que ela deveria sempre ser um valor inteiro dentro do intervalo de quatro a nove (linhas de transmissão do sistema).

A função objetivo utilizada considera apenas as perdas de potência ativa para o processo de otimização. Como mostra a equação 1.

$$f(x) = Perdas + SSSC_{Quantidade} \quad (1)$$

O resultado para o problema de alocação de apenas um SSSC no sistema de 9 barras (sistema teste: WSCC 9-Bus) apontou para uma alocação do dispositivo na linha de transmissão número seis e uma compensação 100% da potência reativa na linha de transmissão onde o dispositivo é instalado. Para validar este resultado, plotou-se um gráfico do espaço de busca, como mostra a Figura 5.

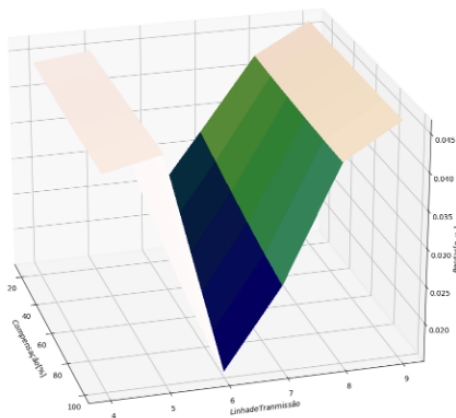


Figura 5 – Gráfico das perdas de potência ativa em função do nível de compensação e da linha de transmissão.

A Figura 5 confirma a alocação ótima na linha de transmissão 6 porém também mostra que a variação no nível de compensação pouco impacta na redução de perdas de potência ativa do sistema. Dessa forma, retirou-se a compensação como uma variável da otimização e foi implantada a opção de alocação de mais de um SSSC.

Ao trocar o sistema para o IEEE-30 (Figura 6), o

número foi atualizado para 25 partículas. Para que o algoritmo pudesse alocar mais de um SSSC no sistema o número de variáveis passou a ser o número de linhas do sistema e os valores passaram a ser binários, indicando a presença ou não do dispositivo.

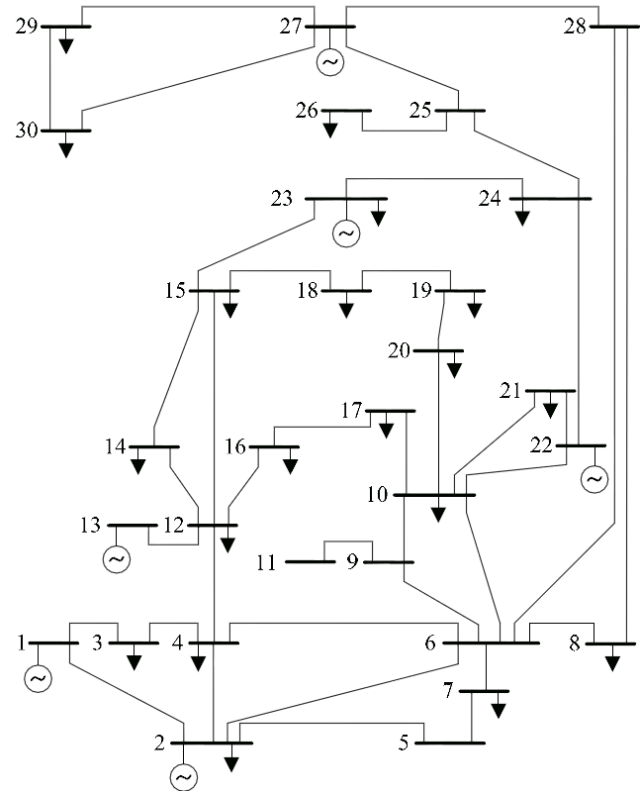


Figura 6 – Sistema teste IEEE-30.

Em busca de se obter um resultado mais equilibrado em termos da otimização dos valores de que deseja minimizar e deixar o processo mais livre para encontrar soluções com mais dispositivos alocados, foi feita uma média ponderada entre o número de dispositivos alocados e as perdas de potência ativa do sistema.

Como existe uma disparidade muito grande entre as grandezas a serem comparadas, elas foram traduzidas para uma escala de 0 à 100 considerando os seus valores máximos e mínimos.

No caso das perdas, o sistema sem nenhum SSSC apresentava perdas de 0,17557 [p.u.] sendo o seu valor máximo e o seu valor mínimo seria nulo. Assim as perdas para a média ponderada são calculadas através de uma regra de três como mostra a equação 2.

$$Perdas_{media\ ponderada} = \frac{Perdas_{p.u.} \cdot 100}{0,17557} \quad (2)$$

Da mesma forma para o número de dispositivos alocados foi aplicada a regra de três considerando o valor máximo de 41 linhas. Como é mostrado na

equação 3.

$$SSSC_{\text{media ponderada}} = \frac{SSSC_{\text{Quantidade}} \cdot 100}{41} \quad (3)$$

Como o objetivo era que o maior peso fosse para a quantidade de dispositivos alocados essa variável recebeu o peso de 9 enquanto as perdas receberam peso 1. A função objetivo é expressa pela média ponderada mostrada na equação 4.

$$f(x) = \frac{10 \cdot SSSC_{\text{Media Ponderada}} + 1 \cdot \text{Perdas}_{\text{Media Ponderada}}}{10} \quad (4)$$

De modo a validar a solução implementada o algoritmo foi executado 5 vezes. Apesar de ter obtido diferentes resultados, devido aos parâmetros aleatórios do PSO, todas as soluções apresentaram reduções significativas nas perdas de potência ativa do sistema. A classificação ordenada pelo menor número de dispositivos alocados entre os resultados obtidos estão apresentados na tabela 1.

Tabela 1 – Resultados da otimização no sistema IEEE-30.

Linhas de Transmissão	Perdas de Potência Ativa [p.u.]	Redução das Perdas
1, 3, 17, 19	0,0649	63,01%
2, 5, 27, 30, 38	0,0647	63,14%
2, 5, 21, 23, 39	0,0688	60,79%
2, 4, 19, 22, 34, 38	0,0690	60,70%
1, 5, 15, 17, 20, 31, 39	0,0540	69,22%

Conclusões

Diante da implementação e resultados obtidos observa-se que o método escolhido para resolver o problema funciona de maneira ótima. Há compatibilidade técnica entre todas as tecnologias escolhidas para solucionar para etapa da otimização, sendo que cada tecnologia apresentada foi previamente validada pela bibliografia listada nas referências.

A partir dos resultados apresentados na seção 5 é possível concluir que o algoritmo PSO foi aplicado com sucesso para solucionar problemas de alocação ótima de dispositivos SSSC em sistemas de transmissão de energia elétrica. Os resultados obtidos foram plausíveis e de acordo com o que era esperado. Além do que foi proposto no início do projeto foi possível também comprovar que o algoritmo pode ser utilizado para a

alocação de mais de um dispositivo, realizando uma otimização multiobjetivo para a redução não apenas das perdas de potência ativa mas também do número de SSSCs.

Por fim, ressalta-se a importância do trabalho de pesquisa realizado no aprendizado do aluno. A pesquisa tornou possível que o conteúdo fosse além da teoria, sendo aplicado na prática em uma caso de sistema teste, muito próximo da realidade. Foi possível adquirir uma grande experiência acadêmica e profissional.

Agradecimento

Aos professores Camila Paes Salomon, Maurício Campos Passaro e Robson Bauwelz Gonzatti pelos conhecimentos compartilhados, pelas correções, pelos conselhos e paciência com a qual guiaram o meu aprendizado.

Aos meus colegas do grupo de pesquisa que por muitas vezes trabalhamos juntos, tirando dúvidas uns dos outros para conseguir progredir com o projeto.

Ao órgão de fomento Fapemig responsável pela bolsa. Aos amigos e familiares pelo apoio e compreensão dos momentos que tive que abdicar de estar com eles para me dedicar ao projeto.

A todos aqueles que contribuíram, de alguma forma, para a realização deste trabalho.

Referências

AL Ahmad, A.; SIRJANI, R. Optimal placement and sizing of multi-type facts devices in ower systems using metaheuristic optimisation techniques: An updated review. *Ain Shams Engineering Journal*, v. 11, n. 3, p. 611–628, 2020. ISSN 2090-4479. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447919301510>>.

GALVANI, S.; MOHAMMADI-IVATLOO, B.; NAZARI-HERIS, M.; REZAEIAN-MARJANI, S. Optimal allocation of static synchronous series compensator (sssc) in wind-integrated power system considering predictability. *Electric Power Systems Research*, v. 191, p. 106871, 2021. ISSN 0378-7796. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877920306696>>.

MILANO, F. An open source power system analysis toolbox. In: 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting. [S.l.: s.n.], 2006.

SILVESTER, S. oct2py 5.5.1 - Python Library. 2022. Disponível em: <<https://pypi.org/project/oct2py/>>.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization. In: Proceedings of ICNN'95 -International Conference on Neural Networks. [S.l.: s.n.], 1995. v. 4, p. 1942–1948.