

APLICAÇÃO DE OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS PARA A ALOCAÇÃO ÓTIMA DE FILTROS ATIVOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

João Luiz A. Santos (IC), Camila P. Salomon (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI.

Palavras-chave: Sistema de distribuição. Harmônicos. Filtro ativo. Enxame de Partículas.

Introdução

O aumento da demanda por energia elétrica, elemento primordial da sociedade, provocado pelo desenvolvimento tecnológico, acarretou um grande incremento no nível de complexidade dos sistemas elétricos de potência, os quais possuem o papel de gerar, transmitir e distribuir energia elétrica aos diversos consumidores. A inserção de novas cargas não lineares no sistema compromete cada vez mais a qualidade da energia elétrica. Isso ocorre, principalmente, devido a presença de harmônicos – sinais periódicos não senoidais com frequência múltipla inteira da frequência fundamental do sistema – que provocam distorções na tensão e corrente, podendo acarretar em desequilíbrio, instabilidade, perdas maiores e diminuição da vida útil de equipamentos (PAULILO & TEIXEIRA, 2013). Com isso, de modo a mitigar esses impactos negativos, uma alternativa interessante que pode ser empregada é a alocação de filtros ativos. Eles podem ser conectados em série (minimizando a distorção da tensão) ou em paralelo (minimizando a distorção da corrente). Eles atuam injetando as mesmas distorções harmônicas já presentes no sistema, de modo a compensá-las (PIRES, 2006). O foco desse trabalho é reduzir a taxa de distorção harmônica total da corrente (do Inglês, *Total Harmonic Distortion* – THD), por isso, será empregado o filtro ativo paralelo (ou *shunt*). Ele pode ser modelado como uma fonte de corrente monofásica em paralelo, injetando correntes harmônicas que anularão as já presentes, oriundas das cargas não lineares.

Como a instalação destes equipamentos acarreta em custos, é importante não somente atingir critérios técnicos, mas também critérios econômicos, de forma a escolher as melhores posições na rede para sua instalação. A alocação ótima de filtro ativo na rede de distribuição consiste em um problema de otimização não linear e multimodal. Para resolver este tipo de problema, há diversos métodos, incluindo os tradicionais de otimização e técnicas não-convencionais. Alguns algoritmos biológicos, chamados de algoritmos baseados em inteligência de enxame, possuem uma abordagem baseada em seres vivos, como abelhas, cupins, formigas

e pássaros, que são agentes que vivem em grupo (bando) (PAIVA, 2018).

A Otimização por Enxame de Partículas (do Inglês, *Particle Swarm Optimization* – PSO), por exemplo, é um algoritmo e método de otimização baseado nos comportamentos sociais de pássaros, que foi desenvolvido por Eberhart (engenheiro eletricitista) e Kennedy (psicólogo) (PACHECO, 2016). O objetivo dessa técnica é encontrar a melhor solução, em um espaço de busca, através da interação entre os indivíduos das populações (EBERHART & KENNEDY, 1995).

Dessa forma, a proposta do presente trabalho consiste em alocar um filtro ativo, em uma melhor posição em um sistema de distribuição teste, de forma a reduzir as taxas de distorções harmônicas, melhorando, assim, a qualidade da energia elétrica. Para isso, será utilizado um algoritmo baseado em PSO, a fim de se obter a alocação ótima do filtro. Para tanto, serão utilizados os *softwares* MATLAB e OpenDSS para a implementação e um sistema teste de 13 barras (KERSTING, 2000) é utilizado para a verificação do método.

Metodologia

A metodologia utilizada neste trabalho consistiu nas etapas descritas a seguir.

1. Estudo do *software* OpenDSS: Nesta etapa, foram feitas simulações de dois sistemas de poucas barras, contendo principais comandos de criação de circuitos, linhas e cargas, a fim de se familiarizar com o *software*. O primeiro sistema possui 3 barras, enquanto o segundo possui 4 barras.
2. Estudo do sistema IEEE 13 barras modificado: A partir dos sistemas estudados foi possível modelar o sistema IEEE de 13 barras modificado (SANTOS, 2020), que seria utilizado posteriormente para a validação da metodologia proposta.
3. Simulação do sistema no OpenDSS no modo harmônico: O sistema IEEE de 13 barras foi simulado, a fim de se obter os resultados de harmônicos obtidos em cada barra do sistema.

4. Criação dos espectros harmônicos e filtros ativos: A partir dos resultados obtidos, foram criados os espectros harmônicos, tanto das cargas, quanto dos filtros, que injetariam os mesmos harmônicos já presentes no sistema.
5. Estudo da interface COM: A partir da interface COM, que tem por objetivo integrar a rotina computacional do OpenDSS com diversos programas diferentes, foi possível migrar para o MATLAB, a fim de integrar os dois *softwares* (MARQUES, 2018).
6. Implementação do sistema através do MATLAB com a interface COM: No MATLAB, desenvolveu-se o programa principal que contém a execução dos programas do OpenDSS. Até chegar à função objetivo a ser implementada pelo algoritmo PSO, seguiu-se as seguintes etapas:
 - a. Criação dos monitores;
 - b. Execução do programa;
 - c. Apresentação dos monitores;
 - d. Extração dos resultados dos monitores;
 - e. Cálculo das distorções de tensão e corrente;
 - f. Média das piores taxas de distorção harmônica total de cada fase.
7. Simulações manuais: Antes de prosseguir para o PSO, foram feitas simulações manuais, inserindo cada filtro em cada barra por vez, com o objetivo de salvar os resultados do THD, para avaliar posteriormente o desempenho do algoritmo na alocação ótima do filtro. Com isso, montou-se “manualmente” a Tabela 1.

Tabela 1 – Taxas de distorções harmônicas em função da posição do filtro.

Posição do filtro	THD _v [%]	THD _i [%]
0	3,1245	20,7526
1	1,7637	11,2860
2	3,4234	21,4770
3	3,1253	20,7495
4	12,0277	44,8542
5	3,1244	20,7523
6	3,1245	20,7526
7	3,1245	20,7526
8	3,1245	20,7526
9	13,4372	50,0850
10	2,7998	20,4694
11	2,7734	20,4942
12	3,1252	20,7489

Fonte: Autoria própria.

É perceptível que, a posição do filtro que mais diminuiria as taxas de distorções harmônicas totais da tensão e corrente do sistema, é a posição 1.

8. Implementação do algoritmo PSO: A metodologia de solução do problema baseada em PSO foi implementada no MATLAB em um *script*, o qual contém a função objetivo $Thd(x)$ e

o seu argumento, que é a melhor posição da rede para alocar o filtro.

9. Simulações: A partir dos programas descritos, foram feitas as simulações do problema da alocação ótima. Ele foi modelado para ser solucionado pelo algoritmo PSO do seguinte modo:
 - a. Meio em que as partículas vivem: Sistema de distribuição;
 - b. Posições das partículas: Posições dos filtros;
 - c. Espaço de busca: Barras do sistema;
 - d. Função objetivo: Taxa de distorção harmônica total da corrente;
 - e. Melhor global: Melhor posição do sistema para a alocação do filtro.

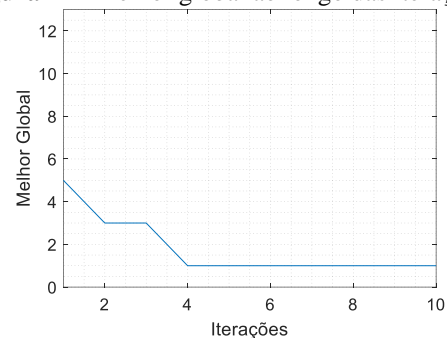
Resultados e discussão

A partir dos programas implementados, foram simuladas as alocações ótimas dos filtro ativos divididas em estudos de caso:

1. 3 partículas e 10 iterações;
2. 3 partículas e 20 iterações;
3. 5 partículas e 10 iterações;
4. 5 partículas e 20 iterações.

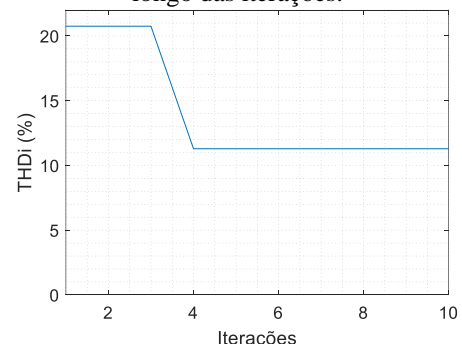
Para o estudo de caso 1, foram obtidos os resultados presentes nas Figuras 1 e 2.

Figura 1 – Melhor global ao longo das iterações.



Fonte: Autoria própria.

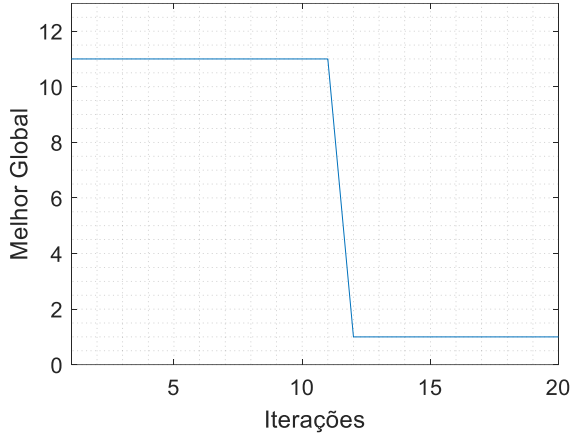
Figura 2 – Taxa de distorção harmônica total da corrente ao longo das iterações.



Fonte: Autoria própria.

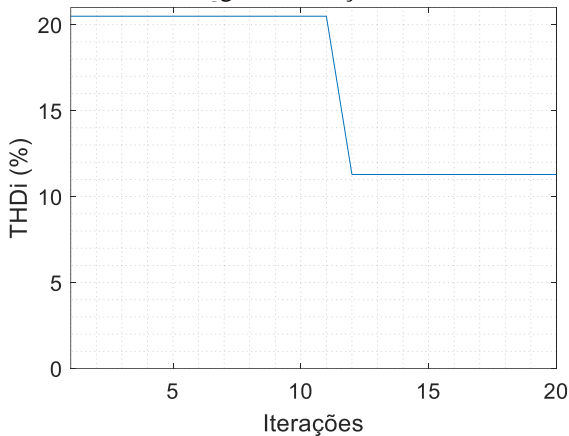
Para o estudo de caso 2, foram obtidos os resultados presentes nas Figuras 3 e 4.

Figura 3 – Melhor global ao longo das iterações.



Fonte: Autoria própria.

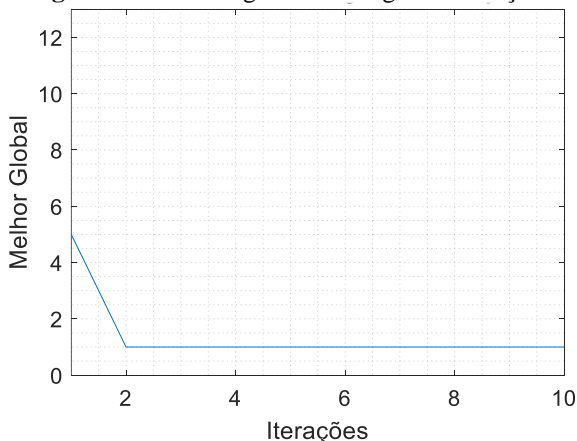
Figura 4 – Taxa de distorção harmônica total da corrente ao longo das iterações.



Fonte: Autoria própria.

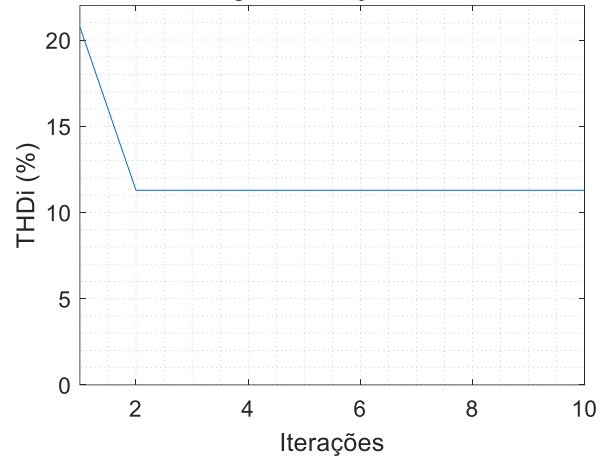
Para o estudo de caso 3, foram obtidos os resultados presentes nas Figuras 5 e 6.

Figura 5 – Melhor global ao longo das iterações.



Fonte: Autoria própria.

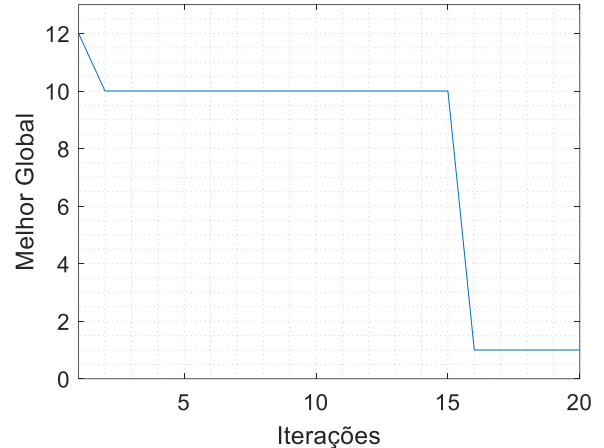
Figura 6 – Taxa de distorção harmônica total da corrente ao longo das iterações.



Fonte: Autoria própria.

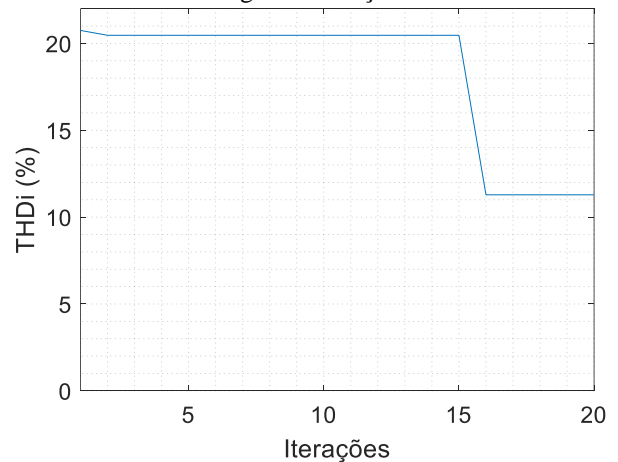
Para o estudo de caso 4, foram obtidos os resultados presentes nas Figuras 7 e 8.

Figura 7 – Melhor global ao longo das iterações.



Fonte: Autoria própria.

Figura 8 – Taxa de distorção harmônica total da corrente ao longo das iterações.



Fonte: Autoria própria.

As simulações convergiram ao melhor global esperado: posição 1 do filtro. Com isso, tem-se uma taxa de distorção harmônica total da corrente de 11,2860%. A Tabela 2 exibe um resumo dos resultados das simulações.

Tabela 2 – Resumo dos resultados.

Estudo de caso	Iteração da convergência	Posição	THDi [%]
1	4	1	11,2860
2	12		
3	2		
4	16		

Fonte: Autoria própria.

Conclusões

Com a finalidade de solucionar o problema da alocação ótima de filtro ativos numa rede de distribuição, foi utilizada a Otimização por Enxame de Partículas, a qual consiste em uma técnica meta-heurística baseada em inteligência de enxame. Ao aplicar a técnica juntamente com as rotinas computacionais capazes de integrar os dois *softwares* utilizados neste trabalho, OpenDSS e MATLAB – por meio da interface COM, foi possível manipular o sistema de maneira prática e alocar o filtro de maneira ótima na posição esperada. Assim, foram obtidos todos os resultados corresponderam à primeira posição, sendo ela a que apresenta a menor taxa de distorção harmônica da corrente.

Este trabalho foi de suma importância para o desenvolvimento de um perfil de pesquisador e bastante útil na aplicação do aprendizado do curso de Engenharia Elétrica. Portanto, profissionalmente e academicamente foram obtidos ganhos com a realização do trabalho presente; ganhos que terão frutos colhidos no futuro, na investigação de problemas reais que atingem o cotidiano da ciência e o bem-estar social da humanidade.

Como sugestões para trabalhos futuros, podem ser citados: utilização de sistemas teste maiores, variação no número de filtros alocados, modificação de alguns outros parâmetros do algoritmo, inclusão de operadores de mutação e penalização de partículas.

Agradecimento

Agradeço primeiramente a Deus, pelas bênçãos na minha vida. Agradeço à minha família pelo apoio e motivação. Agradeço aos professores presentes no projeto de pesquisa: Camila, Maurício e Robson. Agradeço aos meus colegas e amigos pela troca de informações e ajuda. Agradeço ao órgão de fomento CNPq por todo o apoio à pesquisa em todo o Brasil, em especial por ser responsável pela bolsa financiada a mim.

Referências

- KENNEDY, J. & EBERHART, R., "Particle swarm optimization," Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks, 1995, pp. 1942-1948 vol.4, doi: 10.1109/ICNN.1995.488968.
- KERSTING, W. H. **Radial Distribution Test Feeders**. IEEE Distribution System Analysis Subcommittee. Seattle: [s.n.]. 2000. p. 908-912.
- MARQUES, R. C.; EICHKOFF, H. S.; MELLO, A. P. C. **Analysis of the distribution network reconfiguration using the OpenDSS software**. 2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE). Niterói: [s.n.]. 2018. pp. 1-6, doi: 10.1109/SBSE.2018.8395703.
- PACHECO, André. **Otimização por enxame de partículas – PSO**. 2016. Disponível em: <http://computacaointeligente.com.br/algoritmos/otimizacao-por-enxame-de-particulas/>. Acesso em: 16 set. 2022.
- PAIVA, Fábio Augusto Procópio de. **Otimização por enxame de partículas: Usando uma adaptação de serendipidade**. Natal: Editora IFRN, 2018. 96 p. v. 1. ISBN 978-85-94137-45-6.
- PAULILO, Gilson & TEIXEIRA, Mateus Duarte. **Qualidade de energia: Harmônicos - conceitos**. Cap. 2. Revista O Setor Elétrico, 2013. Disponível em: https://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2013/03/Ed85_fasciculo_qualidade_cap2.pdf. Acesso em: 16 set. 2022.
- PIRES, Igor Amariz. **Caracterização de harmônicos causados por equipamentos eletro-eletrônicos residenciais e comerciais no sistema de distribuição de energia elétrica**. Orientador: Manuel Losada y Gonzalez. 2006. 173 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006. Disponível em: <https://www.ppgee.ufmg.br/defesas/252M.PDF>. Acesso em: 16 set. 2022.
- SANTOS, Y. A. **SIMULAÇÃO E AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA INSERÇÃO DE UM FILTRO ATIVO PARALELO DE POTÊNCIA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO**. Orientador: Camila Paes Salomon. 2020. 104 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, Itajubá - MG, 2020.