

**APLICAÇÃO DE ALGORITMO DE BUSCA GRAVITACIONAL PARA A ALOCAÇÃO ÓTIMA DE FILTROS ATIVOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

Thallia F. D. Fagundes<sup>1</sup> (IC), Robson B. Gonzatti (PQ)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI.

**Palavras-chave:** Compensação harmônica. filtro ativo paralelo. GSA. OpenDSS. otimização.

**Introdução**

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) tem se tornado cada vez mais robusto e complexo, de forma a atender a demanda de energia elétrica do país. Todavia, como consequência, inúmeros problemas na operação do sistema têm prejudicado o seu perfeito funcionamento. Nesse sentido, as principais perturbações são causadas por efeitos de fonte de corrente ou de tensão harmônicas, que são introduzidas por dispositivos de chaveamento eletrônicos e por outras cargas não lineares, como os fornos à arco (VARIZ, 2006). Dessa forma, esses componentes harmônicos são disseminados pelo sistema, ocasionando ressonâncias, aquecimento e diminuição da vida útil dos equipamentos elétricos. Além disso, prejudicam a forma de onda da tensão e da corrente, a telecomunicação de dispositivos e interferem negativamente no fator de potência da rede (SANTOS, 2020).

De modo a contornar essa situação, são feitos estudos e planejamentos para a adequação dos equipamentos e para o condicionamento dos dados da rede, a fim de manter a qualidade de energia elétrica, regida por norma, entregue ao consumidor. Dessa forma, dispositivos da eletrônica de potência, como os Sistemas de Transmissão Flexível em Corrente Alternada (do inglês, *Flexible AC Transmission System* – FACTS) têm sido utilizados para limitar as distorções harmônicas da rede, a fim de garantir o pleno desempenho do sistema.

Posto isso, este trabalho propõe avaliar a alocação ótima de um filtro ativo paralelo no sistema de distribuição para compensação de harmônicos, utilizando o *Gravitational Search Algorithm* – GSA de otimização. Desse modo, será utilizado um sistema teste de distribuição do IEEE de 13 barras modificado, tendo como base o trabalho feito por (SANTOS, 2020). Nesse sentido, esse sistema será testado no *Open Distribution System Simulator* – OpenDSS e, posteriormente, fará uma comunicação com o Matlab, a partir da interface *Component Object Model* – COM, com intuito de conhecer as ferramentas dos softwares e descobrir as lógicas do programa. Com base nisso, serão criados 27

filtros ativos monofásicos shunts na plataforma de programação, referentes a cada barra do sistema, de modo a variá-los e condicioná-los, a partir de uma função objetivo no GSA.

Dessa forma, espera-se que o algoritmo de otimização obtenha sucesso na simulação e mostre a melhor alocação para o filtro ativo, cuja a Taxa de Distorção Harmônica (THD) apresenta-se em menor valor. Ademais, nesta pesquisa, prevê uma aprendizagem quanto à compensação de harmônicos do SEP e a novas formas de aplicação da metaheurística em problemas relacionados à energia elétrica.

**Metodologia**

A pesquisa iniciou-se com o estudo bibliográfico dos temas do projeto e foi dividida em cinco principais etapas. Sendo assim, na primeira etapa fez-se um estudo do sistema teste de distribuição radial do IEEE de 13 barras, cuja operação encontra-se na faixa de 4,16 kV.

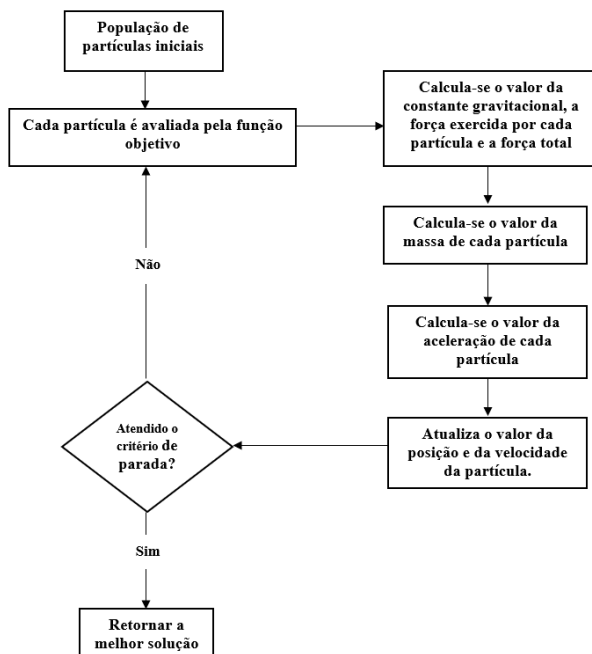
Após isso, começou a segunda etapa do trabalho, a qual tinha o intuito de aprender as ferramentas do software OpenDSS e de desenvolver as lógicas de programação para a criação dos filtros ativos, a partir do trabalho realizado por (SANTOS, 2020). Nesse sentido, manteve-se as duas cargas não lineares criadas pelo autor, 674 e 610, representando, respectivamente, um perfil industrial e um perfil residencial.

Dessa forma, na primeira simulação, o código foi configurado para executar apenas com o sistema modificado, visto que, com os resultados de corrente de cada barra, seria possível criar manualmente o espectro harmônico em arquivos .CSV, para a configuração de cada filtro ativo paralelo. Ao finalizar esse processo, iniciou-se a terceira etapa da metodologia. Nesse estágio da pesquisa, estudou-se a interface COM, a qual é responsável por interligar a programação do OpenDSS à vários softwares, como o Matlab, e confeccionou-se, a partir disso, o código base, para a alocação ótima de filtros ativos.

Nesse sentido, o algoritmo criado utilizava a interface COM como comunicação e controle do

OpenDSS, além de estar configurado para o usuário escolher o filtro, que seria inserido no sistema, de forma manual. Depois dessa etapa e da execução dos comandos de resolução, o código atualizava os resultados dos monitores e os exibia em arquivos *.TXT*. Para finalizar, tais dados eram agrupados em tabelas e matrizes, a fim de calcular os valores da Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) e da Distorção Harmônica Total de Corrente (DTI) parciais e totais, além de verificar o THD a partir do DTT de duas possíveis formas, utilizando o valor do pior caso ou aplicando a média dos valores gerados. Após a validação do código, estreou-se a quarta fase da metodologia com estudo e desenvolvimento do algoritmo GSA (Figura 1) criado por (RASHEDI et al. em 2009). Assim, utilizou-se o programa desenvolvido na terceira etapa para criar a função objetivo do algoritmo GSA, a qual tinha o objetivo de avaliar o valor do THD em cada iteração feita, de acordo com os limites máximos de iterações e do número de agentes configurados nas funções iniciais do programa.

Figura 1 – Diagrama representativo do GSA, adaptado de (RASHEDI et al. em 2009).



Finalmente, após esses ajustes, iniciou-se a quinta etapa com a simulação do código e análise dos dados gerados.

## Resultados e discussão

Inicialmente, utilizando o código manual feito no Matlab, calculou-se o DTT e o DTI total para o sistema sem filtro e com filtro, levando em conta as duas formas de cálculo mencionadas na *Metodologia* (Tabela 1).

Tabela 1 – DTT e DTI totais para condições de sistema com filtro e sem filtro.

Primeira forma de cálculo													
	Sem filtro	674	610c	632	671	680	633	645bc	646bc	675	684ac	611c	652a
DTT [%]	3,12	1,76	3,42	3,13	12,03	3,12	3,12	3,12	3,12	13,44	2,80	2,77	3,13
DII [%]	20,75	11,29	21,48	20,75	44,85	20,75	20,75	20,75	20,75	50,09	20,47	20,49	20,75
Segunda forma de cálculo													
	Sem filtro	674	610c	632	671	680	633	645bc	646bc	675	684ac	611c	652a
DTT [%]	1,38	0,78	1,49	1,38	4,22	1,38	1,38	1,38	1,38	4,06	1,25	1,24	1,38
DII [%]	9,01	5,06	9,04	9,53	17,23	7,49	9,01	9,01	9,01	18,36	8,41	8,21	9,01

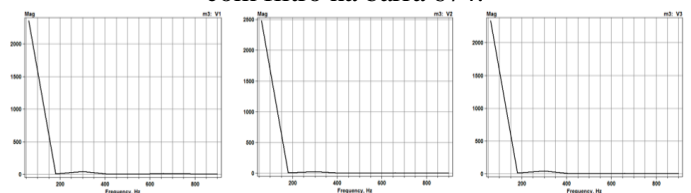
Sendo assim, conforme o módulo 8 do PRODIST, o THD (assume o mesmo valor do DTT) precisa ter uma taxa menor ou igual a 5%. Nesse sentido, avaliando esse fator na tabela acima, nota-se que o sistema sem filtro está dentro da norma, porém, ao acoplar um filtro ativo *shunt* em uma das barras, há uma diminuição do DTT total, principalmente na barra 674, caracterizando-a como o melhor lugar para alocação do filtro ativo. Como observação, a diminuição de taxa harmônica não ocorre quando colocado nas barras 671 e 675, uma vez que não correspondem aos possíveis locais ótimos dos filtros e, dessa forma, na presença destes, comportam-se como cargas harmônicas não lineares e provocam ainda mais distúrbios harmônicos ao sistema.

De maneira a complementar tal análise, utilizou-se o OpenDSS para gerar os gráficos (Figuras 2 e 3) de quando o sistema está sem filtro e de quando o sistema está com o filtro na barra 674, com intuito de avaliar as ondas da tensão nas duas situações descritas. Sendo assim, a seguir, estão dispostos os valores de todos gráficos, considerando, como exemplificação, apenas a barra 674 e suas respectivas fases.

Figura 1 – Curva de tensão nas fases A, B e C (esquerda para a direita) da barra 674, para a condição do sistema sem filtros.



Figura 2 – Curva de tensão nas fases A, B e C (esquerda para a direita) da barra 674, para a condição do sistema com filtro na barra 674.



A partir desses dados, nota-se que para o sistema sem o filtro, as curvas apresentam-se mais distorcidas e quando se coloca o filtro shunt na barra 674, há uma melhora nesse cenário, salientando que tal barra é um bom local para a implementação do dispositivo FACTS.

No Matlab, foram feitas simulações utilizando o

algoritmo GSA. Para isso, cada filtro assumiu uma determinada posição, a qual é exibida na tabela 2, com intuito de facilitar a análise.

Tabela 2 – Posição de cada filtro.

Barra	674	610c	632	671	680	633	645bc	646bc	675	684ac	611c	652a	Sem filtro
Posição	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	0

Nesse sentido, no algoritmo, manteve-se o número de partículas (13) e variou-se o número de iterações em 3, 10, 20 e 30. Dessa maneira, abaixo, (Figuras 4 a 7) estão dispostos todos os resultados das simulações, dado que em (a) representa a primeira forma do cálculo do THD total e em (b) a segunda forma.

Figura 4 – Simulação do algoritmo GSA utilizando 3 iterações.

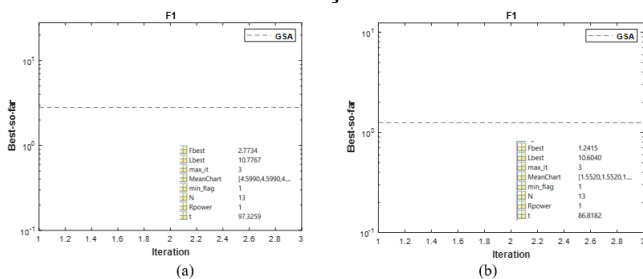


Figura 5 – Simulação do algoritmo GSA utilizando 10 iterações.

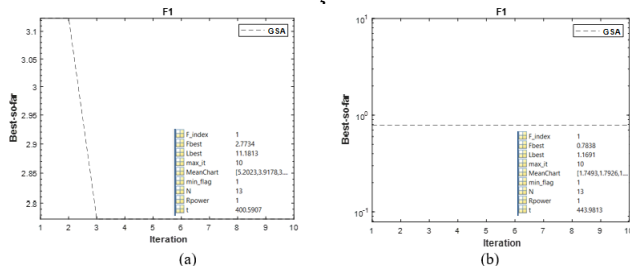


Figura 6 – Simulação do algoritmo GSA utilizando 20 iterações.

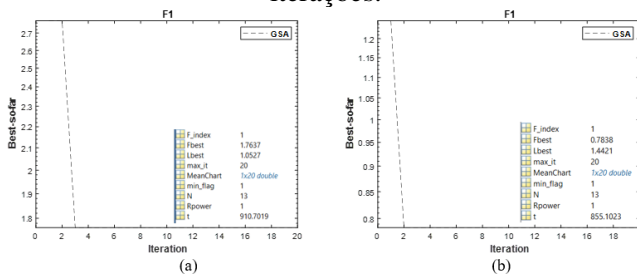
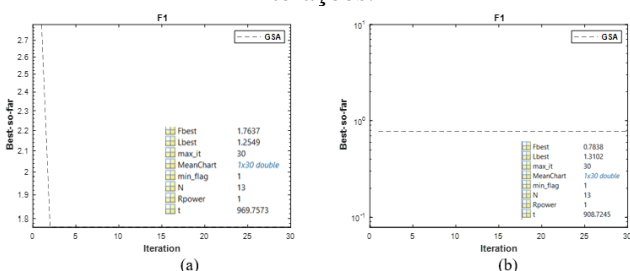


Figura 7 – Simulação do algoritmo GSA utilizando 30 iterações.



A partir dos gráficos gerados, nota-se que na maioria das simulações, independentemente da forma de cálculo do THD, a alocação ótima do filtro é na barra 674, posição 1, conforme analisado anteriormente. Esse resultado pode ser visualizado nos gráficos pelo Lbest, que mostra a melhor posição, e pelo Fbest, responsável por exibir a “melhor força”, que neste caso é dado pelo valor do THD. Para o algoritmo, o filtro na barra 674 representa a partícula de maior massa e a de maior influência de força sobre as demais.

Além disso, é possível observar o princípio de diversificação e de intensificação no sistema, uma vez que, para a simulação com pequeno número de iterações máximas (Figura 3), há muitas partículas para pouco espaço de busca. Dessa forma, infere-se uma maior diversificação de soluções, resultando em respostas questionáveis e pouco seguras.

Na simulação de 10 iterações é possível notar que, em (a), o resultado de alocação ótima do dispositivo manteve-se na barra 611. Isso pode ser justificado pelo campo de busca ainda estar pequeno para a diversificação de partículas. Ademais, é notório que a curva iniciou o processo de busca com um valor do THD muito alto e ele foi diminuindo, conforme o esperado, até intensificar para segundo melhor resultado de THD, mostrando que o GSA é funcional. Nesse sentido, em (b), apesar de apresentar o mesmo número máximo de iterações (10), conseguiu encontrar o melhor resultado para o sistema na barra 674, haja vista que as partículas geradas aleatoriamente no programa levaram o algoritmo a encontrar desde o início a melhor posição do filtro ativo, conforme observado no formato constante da curva. Nas demais simulações (Figuras 5 e 6), pode-se observar que o número máximo de iterações foi suficiente para encontrar o melhor resultado de Fbest e Lbest.

## Conclusões

Na pesquisa realizada, foi possível adquirir um maior conhecimento acerca dos estudos relacionados à eletrônica de potência, aos harmônicos, ao fluxo de potência e aos algoritmos metaheurísticos, como o GSA, de modo que a familiarização desses temas foram cruciais para o desenvolvimento deste trabalho. Além disso, a aprendizagem dos softwares OpenDSS e Matlab foi muito importante para a aplicação de alocação ótima de filtro ativos “shunt” no sistema de 13 barras do IEEE, principalmente por permitir uma comunicação entre os dois programas, a partir da interface COM.

A partir do código criado no Matlab para a alocação manual dos dispositivos FACTS no sistema estudado, notou-se que o melhor local para sua instalação foi na barra 674, uma vez que apresentou o menor THD.

Dessa forma, foi possível verificar que o GSA estava funcionando adequadamente, apesar de nas primeiras simulações convergir para o segundo melhor resultado de alocação ótima do filtro. Com isso, analisou-se que para iterações máximas maiores ou iguais a 20, o resultado convergia para o esperado. Esse fenômeno foi justificado pelo algoritmo possuir um espaço de busca maior para o número de soluções diversificadas, garantindo uma maior probabilidade de convergência e intensificação para o resultado ótimo. Já, para iterações máximas menores que 20, dispunha de um espaço de busca menor para o mesmo número de soluções diversificadas. Assim, o GSA tinha menos probabilidade de passar pela partícula ótima.

Todavia, conforme analisado em *Resultados e discussão*, como as posições são geradas aleatoriamente, pode ocorrer divergência de resultado, uma vez que o algoritmo não conseguiu avaliar todas as possibilidades. O contrário também é válido, visto que o algoritmo pode passar de imediato pela melhor partícula, intensificando esse resultado até o fim da simulação.

Partindo dessas observações, percebe-se que o GSA é um bom algoritmo para problemas de alocação ótima, considerando um bom ajuste de suas variáveis. Todavia, o sistema de distribuição estudado é muito pequeno comparado a outros do SEP. Desse modo, é importante que em pesquisas futuras, nessa área, sistemas mais complexos sejam explorados, a fim de analisar a semelhança e a diferença nos parâmetros e nas condições de simulação entre sistemas de pequeno, médio e grande porte.

Conforme todos os resultados e análises apresentados, nota-se que esta pesquisa foi extremamente importante para o aperfeiçoamento profissional, uma vez que contribuiu para a aprendizagem de temas relacionados à Engenharia Elétrica, além envolver problemas reais do SEP. Desse modo, esses conhecimentos adquiridos serão lembrados e farão parte de futuras pesquisas e projetos.

### Agradecimento

Primeiramente, sou muito grata a Deus por essa grande oportunidade de fazer uma pesquisa científica na área de Engenharia Elétrica com pessoas empenhadas e capacitadas. Posteriormente, agradeço imensamente à minha família e aos meus amigos por todo o apoio e carinho dedicados a mim nesse período de aprendizagem. Nesse sentido, minha maior gratidão vai para os professores Camila P. Salomon, Maurício C. Passao e, em especial ao meu orientador, Robson B. Gonzatti, por toda atenção dada e por todo o conhecimento compartilhado até aqui, que foram essenciais para meu desenvolvimento no projeto.

Com grande carinho, agradeço por toda a amizade, por todo o aprendizado e por toda ajuda que recebi dos meus colegas de pesquisa Maria Eduarda, João Luiz e Gustavo, que foram muito importantes para meu crescimento profissional e pessoal. Por fim, sou grata a Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI e a todas as pessoas que contribuíram para a pesquisa, em particular, ao ex-aluno Yago, que compartilhou os resultados de seu trabalho de TFG com os envolvidos neste projeto.

### Referências

ANEEL. PRODIST: Módulo 8 - **Qualidade da energia elétrica. Departamento de Energia.**[S.l.], p. 4-88. 2022.

DURAN, R. C.; MONTENEGRO, D. **The open distribution system simulator (OpenDSS)**. EPRI. Washington, p. 1-214. 2019.

IEEE STD 519-1992. **Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems**. New York. 1993

KERSTING, W. H. Radial Distribution Test Feeders. IEEE **Distribution System Analysis Subcommittee**. Seattle: [s.n.]. 2000. p. 908-912

LIMONGI, Leonardo. **Filtros Ativos de Potência para Compensação de Harmônicos de Corrente e Potência Reativa**. Orientador: Prof. Marcelo Cabral Cavalcanti, D.Sc. 2006. 141 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife - PE, 2006.

PIZZALI, Luiz. **Cálculo de Fluxo de Potência em Redes de Distribuição com Modelagem a Quatro Fios**. Orientador: Antonio Padilha Feltrin. 2003. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira - SP, 2003.

RASHEDI, Esmat; NEZAMABADI-POUR, Hossein; SARYAZDI, Saeid. **GSA: A Gravitational Search Algorithm**. ScienceDirect, Department of Electrical Engineering, Kerman, Iran, v. 179, ed. 13, p. 2232-2248, 13 jun. 2009.

SANTOS, Yago. **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.

VARIZ, Abilio. **Cálculo do Fluxo de Harmônicas em Sistemas Trifásicos Utilizando o Método de Injeção de Correntes**. Orientador: Sandoval Carneiro Jr. 2006. 258 p. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, 2006.