

OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DOS CONTROLADORES DE UM FAPP USANDO ALGORITMOS DE INTELIGÊNCIA EM ENXAMES

NELSON H. B. SANTANA*, HELDER R. O. ROCHA†, FLAVIO D. C. OLIVEIRA†, WANDERLEY C. CELESTE†

**Coordenadoria do Curso Técnico em Eletrotécnica
IFES - Campus São Mateus
São Mateus, Espírito Santo, Brasil*

†*Departamento de Computação e Eletrônica
UFES - Campus São Mateus
São Mateus, Espírito Santo, Brasil*

Emails: `nelson.santana@ifes.edu.br`, `helder.rocha@ufes.br`, `flavio.oliveira@ufes.br`,
`wanderley.celeste@ufes.br`

Abstract— The voltage and current harmonics occurs in the grid mainly due to the utilization of non-linear equipments. Their nocive effects are known and its mitigation down to acceptable levels contributes to the improvement of grid reliability. Within this content, the active power filters have demonstrated high operational performance in compensation of harmonics in the grid. The PI in the synchronous reference frame is a classic alternative to control this class of equipment, however, the tuning of the controllers parameters still is a relevant difficult issue. In this work, the utilization of Gain Scheduling in the operation of a shunt active power filter (FAPP) is proposed, setting to the controllers the optimal parameters obtained by optimization algorithms, according to the instantaneous load total harmonic distortion (THD). PSO and ABC parameters have been utilized and their results have been compared. PSO presented better results than ABC, and the implementation of its parameters in a Gain Scheduling strategy improved the FAPP performance when compared to the utilization of fixed parameters. In the present case, the results were improved in 32,7%.

Keywords— Shunt Active Power Filter, Optimization, Gain Scheduling

Resumo— Os componentes harmônicos de tensão e corrente surgem na rede principalmente em decorrência da utilização de equipamentos não lineares. Seus efeitos danosos são conhecidos e sua mitigação para níveis aceitáveis contribui para o aumento da confiabilidade da rede elétrica. Nesse contexto, os filtros ativos de potência apresentam bom desempenho operacional para compensar os harmônicos presentes na rede. O controle PI no referencial síncrono é uma alternativa clássica para o controle desse tipo de equipamento e a dificuldade de sintonia dos parâmetros dos controladores ainda é uma questão relevante. Neste trabalho, propõe-se a utilização do *Gain Scheduling* durante a operação de um filtro ativo de potência paralelo (FAPP), alternando entre parâmetros ótimos obtidos por algoritmos de otimização de acordo com a distorção harmônica total (THD) da carga. Algoritmos PSO e ABC são utilizados para essa finalidade e seus resultados são comparados. Os resultados apontam para um melhor desempenho do algoritmo PSO. Apontam ainda que o uso da técnica *Gain Scheduling* melhora o desempenho do FAPP utilizando parâmetros fixos. No caso analisado, a superioridade aferida foi de 32,7%.

Palavras-chave— Filtro Ativo de Potência Paralelo, Otimização, *Gain Scheduling*

1 Introdução

A poluição harmônica na rede elétrica é um problema de qualidade de energia conhecido desde o início do século XX, cujo interesse por parte dos pesquisadores tem crescido com o aumento da oferta de equipamentos que geram grande quantidade de componentes harmônicos em seus processos de conversão de energia (Owen, 1998). Esse fenômeno provoca diversos efeitos nocivos para a rede elétrica, tais como sobreaquecimento de transformadores e condutores, desarme não intencional de disjuntores, interferências eletromagnéticas, entre outros (J. Arrillaga e Watson, 2003).

Para a mitigação desses problemas, o filtro ativo de potência tem sido uma alternativa cada vez mais explorada, devido ao seu bom desempenho operacional (Akagi, 2005). Esses equipamentos fazem a compensação dos harmônicos presentes na rede a partir de um sistema de controle

que utiliza sensores e uma ponte inversora para injetar no PAC (ponto de acoplamento comum) a corrente ou tensão que elimina os componentes harmônicos.

No caso dos FAPP (filtros ativos de potência paralelos), sua conexão em paralelo permite a compensação das correntes por meio da injeção de corrente no PAC. Com isso, a fonte passa a fornecer corrente apenas em sua componente fundamental, livre de componentes harmônicos, uma vez que os harmônicos gerados no processo de conversão de energia da carga são compensados pelo FAPP (Akagi et al., 2007).

Para executar essa função, diversas estratégias de controle foram desenvolvidas, estando entre as mais clássicas a de controle PI no referencial síncrono, controle *deadbeat* e o controle por histerese. O controle *deadbeat* consiste em uma estratégia de controle preditivo que apresenta bons resultados, porém possui uma dependência muito

grande dos parâmetros do filtro, o que prejudica seu desempenho quando ocorre a variação desses parâmetros. O controle por histerese, por sua vez, foi apontado em (Buso et al., 1998) como o que apresentou o melhor desempenho em relação aos demais. Entretanto, esse método possui a desvantagem de não possuir frequência de chaveamento fixa, dificultando o projeto do filtro de saída do FAPP. Já a estratégia de controle PI no referencial síncrono apresenta bons resultados para o controle de corrente. Porém, a sintonia dos parâmetros dos controladores é um tema muito debatido na literatura, mostrando-se como um fator de dificuldade na implementação dessa estratégia (Yepes et al., 2014; Holmes et al., 2009).

Nesse contexto, alguns trabalhos foram desenvolvidos com o objetivo de sintonizar os controladores PI no referencial síncrono de filtros ativos paralelos. Em (Gowtham e Shankar, 2016), foi feita a comparação de desempenho entre um algoritmo *Particle Swarm Optimization* (PSO) e um *Genetic Algorithm* (GA) buscando minimizar a distorção harmônica total (THD) da fonte de sistema com harmônicos compensados por um FAPP. Nesse caso, o PSO obteve melhores resultados com um tempo computacional menor. Em (Yamarthi et al., 2016), são utilizados os algoritmos *Artificial Bee Colony* (ABC) e *Genetic Algorithm* (GA) para otimização de um controlador PI utilizando o erro do capacitor do *link* CC como função objetivo. Nesse trabalho, o algoritmo ABC apresentou melhores resultados em comparação com o GA.

Na literatura também são encontrados trabalhos que utilizam o *Gain Scheduling* para a sintonia de controladores PI (Pradeepkannan e Sathiyamoorthy, 2014; Coswosk et al., 2016). Entretanto, não foram encontrados trabalhos que utilizam o *Gain Scheduling* aplicado à operação de filtros ativos de potência utilizando parâmetros otimizados.

Neste trabalho, são comparados os desempenhos dos algoritmos PSO e ABC para otimização dos coeficientes da malha de controle de tensão (K_{pV} e K_{iV}) e de corrente (K_{pI} e K_{iI}) de um FAPP que compensa as correntes de cargas não lineares. Essa otimização é realizada para quatro cargas diferentes e com níveis de THD diferentes, para que, conhecendo os valores ótimos dos parâmetros do controlador para cada situação de carga, possa ser utilizada a técnica de *Gain Scheduling* durante a operação do referido sistema de potência. Para isso, os algoritmos de controle calculam uma função custo que engloba os resultados das 4 cargas em conjunto, totalizando assim 16 parâmetros a serem otimizados (4 coeficientes para cada carga).

O artigo encontra-se estruturado da seguinte forma: a Seção 2 aborda o funcionamento dos FAPP e as especificações do modelo utilizado

neste trabalho; a Seção 3 trata do funcionamento dos algoritmos de otimização utilizados; na Seção 4, a proposta utilizada neste trabalho, de utilização dos algoritmos de otimização e a utilização dos resultados na técnica de *Gain Scheduling*, é detalhada; na Seção 5 são apresentados os resultados das otimizações e da utilização do *Gain Scheduling* em uma situação hipotética de comutação de cargas; por fim, na Seção 6 são apresentadas as conclusões do trabalho.

2 Filtro Ativo de Potência Paralelo

O FAPP analisado neste trabalho é composto por uma ponte inversora com 6 chaves e um barramento CC que armazena energia em forma de tensão, constituindo assim um inversor fonte de tensão, ou *Voltage Source Inverter* (VSI) e utiliza a topologia de 3 pernas e 3 fios sem conexão com o neutro. Os dados do FAPP utilizado encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1: Dados do filtro ativo de potência paralelo utilizado.

Parâmetro	Valor
Tensão de linha do sistema (RMS)	220 V
Frequência fundamental	60 Hz
Topologia do FAPP	Sem transformador
Tipo de filtro de saída	Filtro L
Indutância do filtro de saída	1 mH
Capacitância do link CC	2200 μ F
Estratégia de controle	PI no ref. síncrono
Geração das correntes de Referência	Método Indireto

São necessárias duas malhas de controle em cascata para que esse filtro possa compensar as componentes harmônicas da corrente da carga: uma malha de controle de tensão (a mais externa) cujo sinal de controle alimenta a malha de controle de corrente (a mais interna). Esta deve ser capaz de sintetizar correntes com frequências de até 40 vezes a frequência fundamental. Esse requisito afasta a possibilidade de utilização de um controle PI tradicional, uma vez que esta técnica apresenta valores consideráveis de erro em estado estacionário quando opera em frequências elevadas (Kazmierkowski e Malesani, 1998).

Uma alternativa clássica para esse problema é a utilização do controlador PI no referencial síncrono, utilizando a transformada de Park para a mudança de referencial. Dessa forma, as componentes senoidais à frequência fundamental passam a ser representadas por variáveis contínuas, melhorando a performance desse tipo de sistema. Uma representação simplificada dessa malha de controle é exibida na Figura 1.

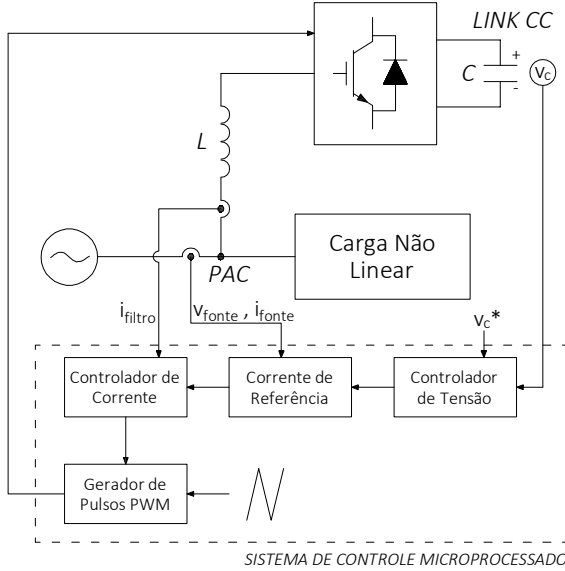


Figura 1: Representação do FAPP e seu sistema de controle.

Entretanto, a sintonia dos controladores PI para o controle de corrente de inversores fontes de tensão não possui uma solução trivial, sendo objeto de estudos em (Yepes et al., 2014) e (Holmes et al., 2009). Dessa forma, a determinação inicial dos parâmetros da malha de controle de corrente e tensão foi feita de forma empírica, chegando-se aos valores $K_{pV} = 0,1$, $K_{iV} = 0,5$, $K_{pI} = 0,5$, $K_{iI} = 0,2$.

3 Algoritmos de Otimização

Otimização é uma área da ciência que lida com a detecção de soluções ótimas para problemas, dentro de um conjunto de alternativas (Parsopoulos e Vrahatis, 2010). Nesse contexto, os algoritmos de inteligência em enxames realizam a otimização de problemas por meio da interação social entre os componentes de uma "população" de soluções, onde as melhores soluções obtidas influenciam a busca dos demais componentes da população. Tais algoritmos são inspirados no comportamento de seres vivos na natureza, tais como cardume de peixes, revoada de pássaros, colônias de insetos, etc. Como exemplos desse tipo de algoritmo, podem ser citados o *Ant Colony Optimization* (ACO), *Bacterial Foraging*, *Particle Swarm Optimization* (PSO), *Artificial Bee Colony* (ABC), entre outros. Neste trabalho, serão utilizados os métodos PSO e ABC.

3.1 Particle Swarm Optimization

O PSO é um algoritmo de otimização estocástico baseado em modelos de simulação social (Kennedy e Eberhart, 1995) desenvolvido por Kennedy e Eberhart em 1995 (Parsopoulos e Vrahatis, 2010).

Seu princípio de funcionamento se baseia na experiência pessoal de cada "indivíduo" e pela experiência global da população. Para buscar a solução ótima, a cada iteração, os "indivíduos" têm sua posição alterada com base em uma ponderação entre sua velocidade anterior, sua distância atual de sua melhor experiência e sua distância atual da melhor experiência do grupo. Matematicamente, a criação do enxame e a atualização das velocidades são determinadas nas equações 1 e 2.

$$x_i = x_{min} + rand(-1, 1) * (x_{max} - x_{min}) \quad (1)$$

$$v_i(t) = w * v_i(t-1) + c_1 * (p_i - x_i(t-1)) + c_2 * (g - x_i(t-1)) \quad (2)$$

Em que:

- x_i - componente i do enxame, uma das soluções analisadas;
- $rand(-1,1)$ - número aleatório entre -1 e 1;
- $v_i(t)$ - velocidade do componente i do enxame na iteração t;
- w - fator de inércia;
- c_1 - fator de aceleração 1;
- c_2 - fator de aceleração 2;
- p_i - melhor resultado obtido pelo componente i;
- g - melhor resultado obtido pelo enxame;

O resumo a seguir explica concisamente o funcionamento do PSO:

1. Inicializar o vetor de soluções, utilizando a equação 1.
2. Avaliar a função objetivo de cada uma das soluções.
3. Guardar o melhor resultado individual e global, bem como o valor das partículas que deram origem a esses resultados.
4. Atualizar o vetor de soluções utilizando a equação 2.
5. Voltar à etapa 2, repetindo o procedimento até que o critério de parada seja atingido.

Neste trabalho, o algoritmo foi implementado seguindo as etapas acima descritas e utilizando os valores numéricos descritos na Tabela 2.

Tabela 2: Valores numéricos dos parâmetros do algoritmo PSO.

Parâmetro	Valor
Número de Partículas	20
Número máximo de Iterações	30
Fator de inércia	0,7213
Fator de aceleração	1,1931

3.2 Artificial Bee Colony

O algoritmo ABC foi desenvolvido por Karaboga em 2005 e posteriormente aperfeiçoado por Karaboga e Basturk em 2007, incluindo funcionalidades de restrição das variáveis. Seu funcionamento se baseia na rotina de uma colônia de abelhas que possui regras sociais para a descoberta de comida (Karaboga, 2005; Karaboga e Basturk, 2007). Para isso, há três grupos de abelhas com funções distintas: abelhas operárias, abelhas espectadoras e abelhas exploradoras. As abelhas exploradoras buscam fontes de alimento aleatoriamente no espaço de busca e, após essa etapa se tornam abelhas operárias, que explorarão aquela fonte até que a mesma se esgote. As abelhas espectadoras recebem as informações das abelhas exploradoras e operárias e, dentre as fontes existentes, tendem a explorar as fontes com maior quantidade de néctar disponível.

Esse processo continua até que cada fonte seja explorada por completo, quando a abelha operária que estava fazendo buscas na região próxima à fonte esgotada se torna uma abelha exploradora, buscando uma nova fonte. O lançamento inicial das abelhas exploradoras é matematicamente idêntico à inicialização do enxame do PSO, seguindo a equação 1; já a busca no entorno dos pontos que estão sendo explorados é determinado pelas equações 3 e 4.

$$v_i = x_i + \phi_i(x_i - x_k) \quad (3)$$

$$\phi_i = a * rand(-1, 1) \quad (4)$$

Em que:

- v_i - velocidade do componente i do enxame;
- x_i - componente i do enxame;
- ϕ_i - fator de aceleração ajustado;
- a - fator de aceleração;
- $rand(-1,1)$ - número aleatório entre -1 e 1;
- x_k - componente aleatório do enxame, diferente de x_i ;

Resumidamente, o fluxo do programa segue os passos mostrados a seguir:

1. Inicializar o vetor de soluções, utilizando a equação 1 (enviar abelhas exploradoras)
2. Avaliar a função objetivo de cada uma das partículas.
3. Designar as abelhas operárias para a busca no entorno de cada fonte de comida.
4. Calcular a função fitness de cada fonte de comida.
5. Enviar abelhas espectadoras com base nos melhores resultados obtidos pelo enxame.
4. Atualizar o vetor de partículas utilizando a equação 3.
5. Verificar se há fontes de comida esgotadas. Em caso positivo, transformar a abelha operária em abelha exploradora para buscar uma nova fonte.
6. Memorizar o melhor resultado obtido pelo enxame.
7. Voltar à etapa 3, repetindo o procedimento até que o critério de parada seja atingido.

Os valores numéricos dos parâmetros do algoritmo utilizados neste trabalho estão relacionados na Tabela 3.

Tabela 3: Valores numéricos dos parâmetros do algoritmo ABC.

Parâmetro	Valor
Número de abelhas operárias	20
Número de abelhas espectadoras	20
Número máximo de Iterações	20
Fator de aceleração	0,08

4 Implementação do Gain Scheduling

Neste trabalho, a técnica de sintonia dos controladores é aplicada a um caso hipotético onde o FAPP deve compensar os harmônicos de uma carga não linear ligada em paralelo com 3 cargas lineares distintas. Nesse caso, 4 situações de compensação podem existir: apenas carga não linear funcionando ou carga não linear funcionando com uma das 3 cargas lineares em paralelo. A THD de cada uma das combinações de cargas utilizada está relacionado na Tabela 4.

Tabela 4: Dados das combinações de cargas utilizadas.

Carga	Descrição	THD(%)
Carga 1	Carga não linear	28,67
Carga 2	Carga não linear + linear 1	20,07
Carga 3	Carga não linear + linear 2	15,49
Carga 4	Carga não linear + linear 3	10,66

Com a variação das cargas e, consequentemente, das correntes de compensação do FAPP, é natural que o valor ótimo dos parâmetros dos controladores também mudem, tornando conveniente a utilização de uma estratégia de modificação

dos parâmetros dos controladores, buscando a melhoria do desempenho do FAPP.

Dessa forma, propõe-se a utilização da técnica de sintonia dos controladores por algoritmos de otimização utilizando o *Gain Scheduling*, onde os melhores valores de K_p e K_i , que minimizam a função objetivo, são previamente adquiridos para cada situação de carga e, durante a operação do sistema, convenientemente e automaticamente alterados no sistema de controle.

Como o FAPP possui duas malhas de controle, uma para o controle da tensão do capacitor do link CC e a outra para o controle da corrente do filtro, é natural que haja mais de um requisito de desempenho para a avaliação do desempenho do conjunto de parâmetros dos controladores utilizados. Os requisitos aqui utilizados são: a minimização do nível de distorção harmônica total na fonte para malha de controle de corrente; e o erro quadrático médio da tensão do capacitor para a malha de controle de tensão. Para considerar ambos os requisitos, a função objetivo do problema é composta por esses dois valores de forma ponderada, de acordo com a equação 5. Vale ressaltar que nessa equação, o erro quadrático médio está dividido por $5 * 10^4$ como forma de ajuste numérico, para que a diferença de ordem de grandeza entre os números não influencie no resultado da otimização.

$$FO = 0,6 * THD_{fonte} + 0,4 * \frac{EQM}{5 * 10^4} \quad (5)$$

em que:

- THD_{fonte} - nível de distorção harmônica total na fonte;
- EQM - erro quadrático médio da tensão do capacitor do link CC;

Essa função objetivo foi aplicada a dois algoritmos de otimização distintos, um PSO e um ABC, que buscam o conjunto de 16 parâmetros (4 parâmetros do FAPP para cada uma das cargas) que minimizam o seu valor.

Para a implementação do *Gain Scheduling*, os coeficientes determinados pelo algoritmo de otimização que obtiveram os melhores resultados foram selecionados para compor o conjunto de parâmetros aplicados aos controladores durante a operação do FAPP. Na Figura 2, há uma representação da alteração do sistema de controle do FAPP com a implementação do *Gain Scheduling*. Nessa figura, são destacados os blocos que realizam o cálculo da THD e a seleção dos parâmetros. A lógica da seleção dos parâmetros é descrita a seguir:

```
if (THD_carga > (Limite inferior Carga 1) &&
    THD_carga < (Limite superior Carga 1))
```

```
set (Parâmetros Carga 1)
```

```
else if (THD_carga > (Limite inferior Carga 2) &&
    THD_carga < (Limite superior Carga 2))
```

```
set (Parâmetros Carga 2)
```

```
else if (THD_carga > (Limite inferior Carga 3) &&
    THD_carga < (Limite superior Carga 3))
```

```
set (Parâmetros Carga 3)
```

```
else
```

```
set (Parâmetros Carga 4)
```

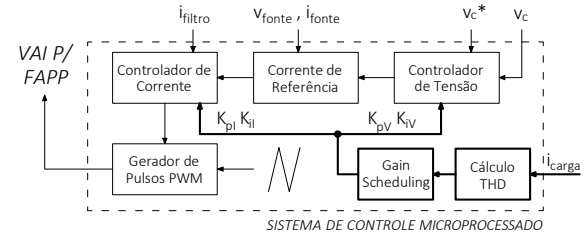


Figura 2: Diagrama de blocos do sistema de controle do FAPP com *Gain Scheduling*.

5 Resultados

Após a implementação dos algoritmos de otimização, os melhores resultados gerados por cada um deles são exibidos nas Tabelas 5 e 6. Pela análise dessas informações, pode-se verificar que o algoritmo PSO é o mais eficiente, pois sua função objetivo atinge o menor valor, isto é, 0,113 contra 0,186 do algoritmo ABC. O algoritmo PSO demandou um tempo computacional de 3h 8min 47s para rodar o algoritmo de otimização, enquanto o algoritmo ABC rodou por 6h 6min 20s.

Tabela 5: Melhor resultado do algoritmo PSO.

# Carga	FO	THD(%)	EQM(x2x10 ⁻⁵)
Carga 1	0,113	3,36	0,020
Carga 2		3,21	0,022
Carga 3		3,07	0,024
Carga 4		2,81	0,029

Tabela 6: Melhor resultado do algoritmo ABC.

# Carga	FO	THD(%)	EQM(x2x10 ⁻⁵)
Carga 1	0,186	3,85	0,031
Carga 2		2,36	0,064
Carga 3		2,46	0,077
Carga 4		1,52	0,140

A dinâmica de convergência do algoritmo PSO pode ser visualizado na Figura 3, onde são representadas com linhas tracejadas os melhores valores obtidos por cada partícula ao longo das iterações e com uma linha mais escura o melhor valor global obtido pelo algoritmo ao longo das iterações. Verifica-se nesse gráfico que todas as

partículas do algoritmo convergiram até a 14ª iteração e o melhor valor global foi alcançado na 11ª iteração.

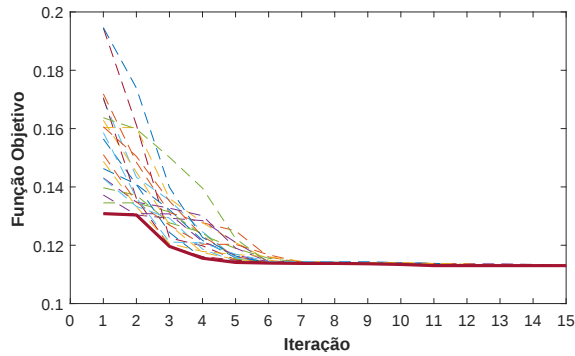


Figura 3: Melhores resultados de cada partícula e melhor resultado com o PSO.

Os coeficientes do *Gain Scheduling* são então definidos para as faixas de operação de acordo com a Tabela 7.

Tabela 7: Coeficientes utilizados na programação do *Gain Scheduling*.

#	THD(%)	KpV	KiV	KpI	KiI
1	5 - 12,5	0,13	0,35	0,85	0,26
2	12,5 - 17,5	0,13	0,85	0,7276	0,26
3	17,5 - 24	0,13	0,8102	0,85	0,26
4	>24	0,07	0,6254	0,6493	0,26

5.1 Implementação do *Gain Scheduling*

Para validar os resultados obtidos pelos otimizadores, realiza-se uma simulação onde as cargas são ligadas e desligadas no sistema. Simultaneamente, os parâmetros ótimos dos controladores previamente determinados para cada carga (Tabela 7), são automaticamente modificados no controlador, de acordo com o nível de THD da carga alimentada. Os tempos de acionamento das chaves que ligam e desligam cada uma das cargas pode ser visualizado na Figura 4.

Após a implementação do *Gain Scheduling*, os resultados de THD e da integral do erro obtidos são listados na Tabela 8. Nessa tabela, também é exibido o resultado de uma função de avaliação

(FA) dos resultados, que neste caso é idêntica à função objetivo, descrita na equação 5. Porém, no presente caso, além do cálculo envolvendo as 4 cargas simultaneamente, expresso aqui como o valor "total", também é calculado o valor individual da função avaliação. Vale ressaltar, entretanto, que o parâmetro utilizado pelos otimizadores para selecionar os coeficientes em questão é a função objetivo calculada para as 4 cargas simultaneamente e, portanto, esse é o parâmetro cuja avaliação é mais coerente com a estratégia de otimização utilizada.

Tabela 8: Resultados após a implementação do *Gain Scheduling* com os parâmetros do PSO.

# Carga	THD(%)	EQM($\times 10^{-5}$)	FA
Carga 1	3,4	0,023	0,030
Carga 2	2,48	0,042	0,031
Carga 3	2,14	0,036	0,027
Carga 4	2,30	0,115	0,060
Total			0,148

Na Tabela 9 são apresentados os resultados do emprego do *Gain Scheduling* mediante o uso de parâmetros de controladores não otimizados. Tais resultados são obtidos para um cenário idêntico àquele onde os parâmetros dos controladores são otimizados através do PSO, isto é, com as mesmas cargas e os mesmos tempos de acionamento (mostrados na Figura 4).

Tabela 9: Resultados do *Gain Scheduling* com os parâmetros não otimizados.

# Carga	THD(%)	EQM($\times 10^{-5}$)	FA
Carga 1	3,94	0,062	0,048
Carga 2	2,83	0,075	0,047
Carga 3	2,28	0,085	0,047
Carga 4	1,83	0,166	0,077
Total			0,220

Comparando os resultados da Tabela 9 com os da Tabela 8, é possível verificar que os níveis de THD são menores quando utiliza-se os coeficientes otimizados em 3 das 4 cargas testadas e que o erro quadrático médio e a função de avaliação foram menores para todas as cargas individualmente. Além disso, considerando-se a função avaliação aplicada a todas as cargas simultaneamente, situação idêntica à atribuída ao algoritmo PSO

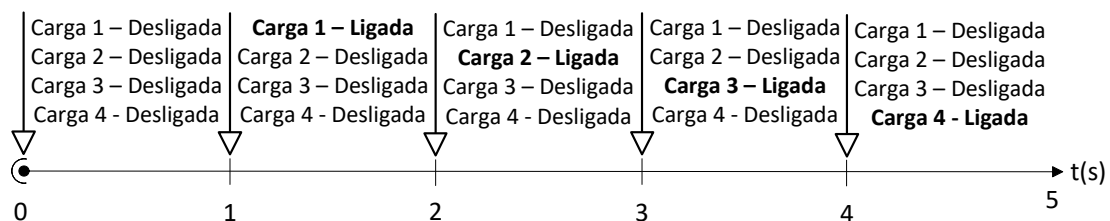


Figura 4: Tempos de acionamento das cargas para a validação dos parâmetros obtidos.

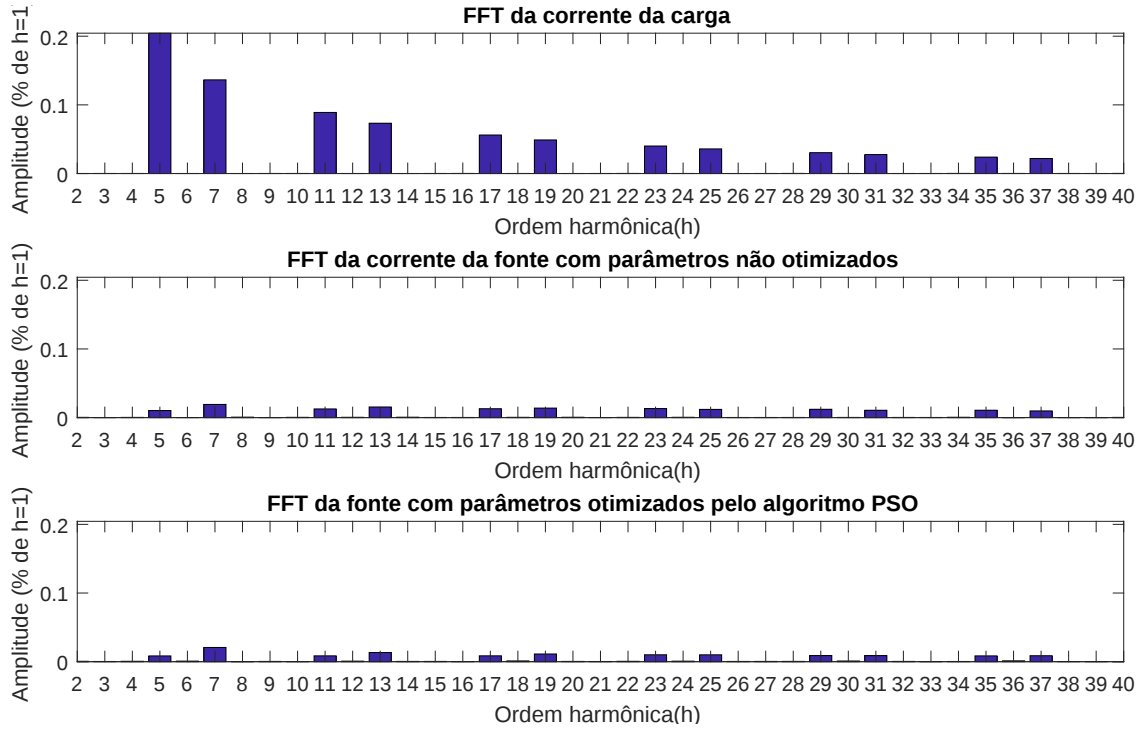


Figura 5: THD da corrente da Carga 1, THD da corrente da fonte com parâmetros não otimizados e THD da corrente da fonte com parâmetros otimizados pelo PSO.

como função objetivo a ser minimizada, percebe-se uma diminuição de 48,65% em seu valor quando se utilizam os parâmetros otimizados no lugar dos parâmetros não otimizados, o que evidencia a superioridade da utilização dos parâmetros otimizados para a sintonia dos parâmetros dos controladores do FAPP.

Na Figura 5 são mostradas as transformadas discretas de Fourier para a Carga 1 em 3 situações: carga não compensada, carga compensada pelo controlador com parâmetros otimizados pelo PSO e controlador com parâmetros não otimizados. Nessa figura, é possível verificar que o FAPP atenua bastante os componentes harmônicos tanto com parâmetros otimizados quanto com parâmetros não otimizados.

Adicionalmente, na Figura 6, são mostradas as formas de onda da corrente da carga 1 e da fonte após a compensação das componentes harmônicas pelo FAPP. Nesses gráficos, é possível observar que a corrente da carga de fato apresenta uma grande distorção, ou seja, possui um formato bastante distinto de uma onda senoidal, como também é indicado pelo alto nível de THD obtido. Já a corrente da fonte apresenta um formato bastante próximo a uma senóide, concordando com o baixo valor de THD calculado. Além disso, é possível verificar a presença de componentes de chaveamento de alta frequência, resultantes das correntes de compensação sintetizadas pelo FAPP.

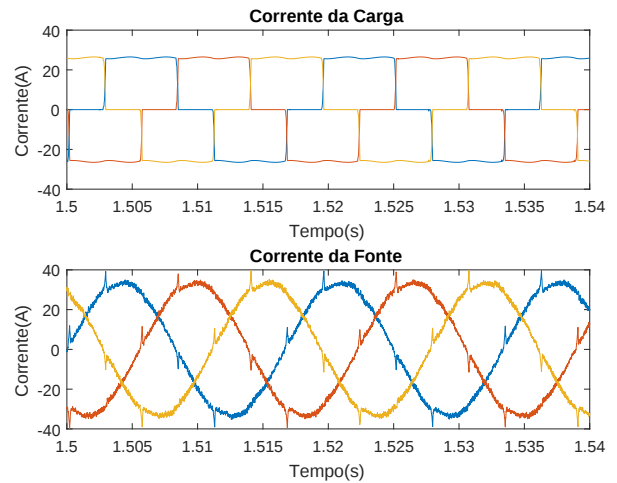


Figura 6: Formas de onda da corrente da carga 1 e da fonte após a compensação pelo FAPP.

6 Conclusões

De acordo com os resultados obtidos, pode-se concluir que a utilização do *Gain Scheduling* utilizando parâmetros otimizados é uma boa alternativa para a operação de filtros ativos de potência em instalações com cargas variáveis, superando a utilização de parâmetros fixos.

Pode-se também, a partir dos resultados dos algoritmos de otimização, concluir que o algoritmo PSO, mesmo sendo mais simples e demandando menor tempo computacional, apresenta melhores

resultados que o algoritmo ABC para a obtenção de parâmetros ótimos de operação do FAPP. Esse resultado está alinhado com os resultados de (Gowtham e Shankar, 2016) que indicam a superioridade do PSO em relação a um algoritmo genético.

O estudo aqui desenvolvido pode ser mais aprofundado, analisando-se o desempenho dos algoritmos de otimização com alterações em relação à aqui utilizada, tais como funções objetivos diferentes, espaços de busca dos coeficientes maiores e maior quantidade de cargas, aumentando também a quantidade de faixas de atuação do *Gain Scheduling*. Tais alterações possuem o potencial de melhorar ainda mais a eficiência do *Gain Scheduling* em relação à utilização de parâmetros fixos.

Referências

- Akagi, H. (2005). Active harmonic filters, *Proceedings of the IEEE* **93**(12): 2128–2141.
- Akagi, H., Watanabe, E. H. e Aredes, M. (2007). *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*, John Wiley & Sons.
- Buso, S., Malesani, L. e Mattavelli, P. (1998). Comparison of current control techniques for active filter applications, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **45**(5): 722–729.
- Coswosk, B. C., Lima, E. S. M., Rocha, H. R. O. e Fiorotti, R. (2016). Otimização usando PSO no controle PI de vazão de um túnel de vento atmosférico utilizando a técnica de Gain Scheduling, *Latin American Journal of Energy Research* **3**(2): 30–41.
- Gowtham, N. e Shankar, S. (2016). PI tuning of Shunt Active Filter using GA and PSO algorithm, *2016 2nd International Conference on Advances in Electrical, Electronics, Information, Communication and Bio-Informatics (AEEICB)*, number Aeeicb 16, IEEE, Chennai, India, pp. 207–213.
- Holmes, D. G., Lipo, T. A., McGrath, B. P. e Kong, W. Y. (2009). Optimized design of stationary frame three phase AC Current regulators, *IEEE Transactions on Power Electronics* **24**(11): 2417–2426.
- J. Arrillaga e Watson, N. R. (2003). *Power System Harmonics*, John Wiley & Sons.
- Karaboga, D. (2005). An idea based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization, *Technical Report TR06*, Erciyes University (TR06): 10.
- Karaboga, D. e Basturk, B. (2007). A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: Artificial bee colony (ABC) algorithm, *Journal of Global Optimization* **39**(3): 459–471.
- Kazmierkowski, M. e Malesani, L. (1998). Current control techniques for three-phase voltage-source PWM converters: a survey, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **45**(5): 691–703.
- Kennedy, J. e Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization, *International Conference on Neural Networks*, Vol. 4, IEEE, Perth, WA, Australia, pp. 1942–1948.
- Owen, E. L. (1998). A History of Harmonics in Power Systems, *IEEE Industry Applications Magazine* **4**(1): 6–12.
- Parsopoulos, K. E. e Vrahatis, M. N. (2010). *Particle Swarm Optimization and Intelligence*, Information Science Reference, Hershey, New York.
- Pradeepkannan, D. e Sathiyamoorthy, S. (2014). Implementation of Gain scheduled PID controller for a nonlinear coupled spherical tank process, *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering* **14**(6): 93–98.
- Yamarthi, R. B., Rao, R. S. e Reddy, P. L. (2016). Optimal Load Compensation by Shunt Active Power Filter Employing Artificial Bee Colony Optimization, *International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*, IEEE, Chennai, India, pp. 2197–2201.
- Yepes, A. G., Vidal, A., Malvar, J., Lopez, O. e Doval-Gandoy, J. (2014). Tuning method aimed at optimized settling time and overshoot for synchronous proportional-integral current control in electric machines, *IEEE Transactions on Power Electronics* **29**(6): 3041–3054.