

ANÁLISE E SIMULAÇÕES DE UM FILTRO BANDA ADAPTATIVO APLICADO A UM FILTRO ACTIVO SÉRIE

RICARDO G. PREGITZER, TIAGO N. SOUSA, MANUEL J. SEPULVEDA, JOÃO L. AFONSO

*Departamento de Electrónica Industrial, Universidade do Minho
Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal*

*E-mails: rpregitzer@dei.uminho.pt, tsousa@dei.uminho.pt
mjs@dei.uminho.pt, jla@dei.uminho.pt*

Abstract— The objective of this paper is to explain the steps taken in the project, simulation, analysis and adjustment of the parameters of an Adaptive Band-Pass Filter used to generate a reference signal, consisting of the direct positive sequence of the fundamental currents of a three-phase system. This signal is required to the control approach of a Series Active Power Filter. Various simulations were performed in order to study the behavioural tendency of the Adaptive Filter. In order to obtain highly distorted current wave-shapes, three phase and single phase rectifiers with RC loads were used. To obtain unbalanced currents different types of loads were used in the single phase rectifiers. For both cases the line impedances were considered. Several simulations were run for different values of the Adaptive Filter gain in order to observe the variation of the Filter outputs.

Keywords— Adaptive Band-Pass Filter, Series Active Filter, Power Quality, Harmonics, PSCAD

Resumo— Neste artigo apresenta-se o trabalho de projecto, simulação, análise e ajuste de parâmetros de um Filtro Banda Adaptativo (FBA), utilizado para, a partir das correntes medidas, gerar um sinal de referência que consiste na componente positiva à frequência fundamental das correntes do sistema trifásico. A necessidade deste sinal de referência deve-se à abordagem seguida no controlo de um Filtro Activo Série. Foram efectuadas várias simulações visando estudar o comportamento do FBA com cargas que originam elevados índices de distorção harmónica e desequilíbrio, nomeadamente rectificadores trifásicos e monofásicos com cargas do tipo RC e RL, sendo consideradas as impedâncias das linhas. As simulações foram efectuadas para diversos valores de ganho do filtro de forma a se observar as tendências de variação das saídas do mesmo.

Palavras-chave— Filtro Banda Adaptativo, Filtro Activo Série, Qualidade de Energia Eléctrica, Harmónicos, PSCAD

1. Introdução

O projecto de um Filtro Banda Adaptativo (FBA) surge como uma possibilidade para atender uma necessidade na implementação do sistema de controlo de um Filtro Activo Série, que utiliza a Teoria p-q proposta por *Akagi et Al.* (1983). Caso seja adoptada a estratégia para obtenção de tensões sinusoidais na carga, é imperativo obter a componente de sequência positiva à frequência fundamental das correntes do sistema trifásico em que o Filtro Activo Série está inserido, tal como

indicado por *Freitas et Al.* (2003).

A Figura 1 ilustra os elementos principais de um Filtro Activo Série, em que o FBA tem como entrada as correntes distorcidas e/ou desequilibradas da fonte (i_a, i_b, i_c), e apresenta como saída a componente de sequência positiva na fundamental dessas correntes (i_{aF}, i_{bF}, i_{cF}).

A utilização de um filtro adaptativo para gerar as componentes descritas anteriormente poderá surgir como uma solução simples, em comparação com outras alternativas propostas, como indicado por *Karimi et Al.* (2003).

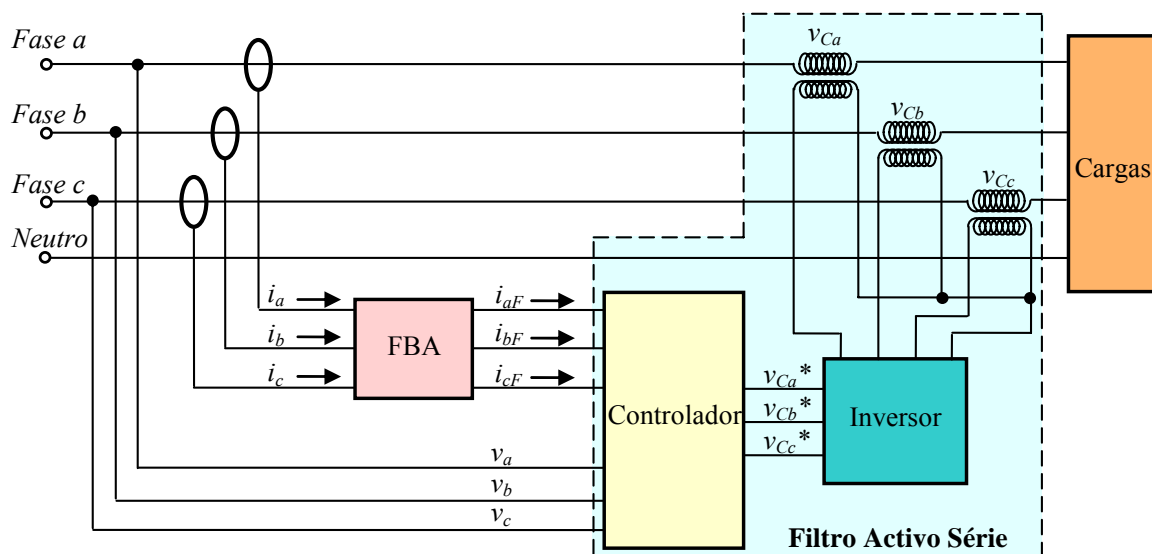


Figura 1. Esquema da aplicação de um Filtro Banda Adaptativo a um Filtro Activo Série.

2. Filtro Banda Adaptativo (FBA)

A Figura 2 apresenta o diagrama de blocos do FBA proposto por Esteve (2002). Esta representação tem os seguintes parâmetros:

- K - ganho do FBA;
- ω - velocidade angular pretendida para as variáveis de saída no referencial α - β ($\omega = 2\pi f$, onde $f = 50$ Hz);
- i_α e i_β - variáveis de entrada do FBA (que correspondem às correntes na fonte) no referencial α - β ;
- $i_{\alpha-out}$ e $i_{\beta-out}$ - variáveis de saída do FBA representadas no referencial α - β .

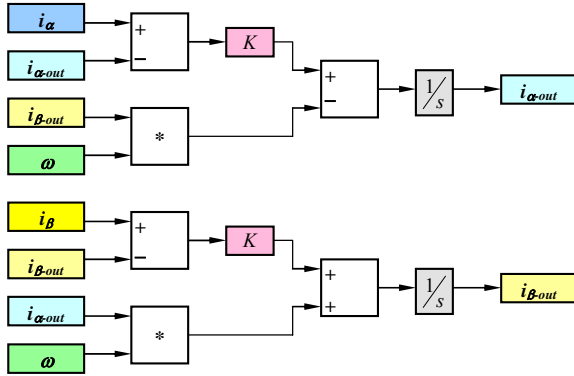


Figura 2. Diagrama de blocos do FBA.

O FBA recorre à transformada de Clarke (Clarke, 1943) para converter as correntes medidas no sistema trifásico a - b - c para o referencial α - β . Com esta transformação obtém-se uma simplificação dos cálculos realizados, uma vez que se passa a operar com apenas duas variáveis em vez das três presentes no sistema original. Assim sendo:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

Para se obter os resultados finais emprega-se a transformada inversa de Clarke:

$$\begin{bmatrix} i_{aF} \\ i_{bF} \\ i_{cF} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

É de notar que, muito embora o sistema eléctrico tenha neutro, não foi preciso calcular a componente de sequência zero, pois esta não é necessária para a determinação da componente positiva à frequência fundamental.

Sendo X um vector genérico, de amplitude A e velocidade angular ω , cujas coordenadas ortogonais são (x_α, x_β) , dadas por:

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} \cos(\omega \cdot t) \\ \sin(\omega \cdot t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Então a variação temporal de X é dada por.

$$\frac{dX}{dt} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \omega \cdot \begin{bmatrix} -x_\beta \\ x_\alpha \end{bmatrix} \quad (4)$$

A expressão (5) dá a derivada dos valores de saída do FBA ($i_{\alpha-out}$ e $i_{\beta-out}$), sendo obtida a partir da equação geral (4), com a introdução da realimentação das variáveis de saída nas coordenadas α - β ($i_{\alpha-out}$ e $i_{\beta-out}$), o que garante a controlabilidade do filtro adaptativo.

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha-out}' \\ i_{\beta-out}' \end{bmatrix} = K \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha - i_{\alpha-out} \\ i_\beta - i_{\beta-out} \end{bmatrix} + \omega \cdot \begin{bmatrix} -i_{\beta-out} \\ i_{\alpha-out} \end{bmatrix} \quad (5)$$

As variáveis de saída do FBA, dadas por (6), são calculadas pela integral do sistema de equações (5).

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha-out} \\ i_{\beta-out} \end{bmatrix} = \int \begin{bmatrix} i_{\alpha-out}' \\ i_{\beta-out}' \end{bmatrix} \cdot dt \quad (6)$$

Pode-se concluir que, se o sinal de entrada apresentar um determinado conteúdo harmónico e/ou desequilíbrio, os vectores das variáveis de entrada (i_α, i_β) e das variáveis de saída ($i_{\alpha-out}, i_{\beta-out}$) do FBA serão diferentes, provocando um erro, e , que nunca se anula, dado por:

$$e = K \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha - i_{\alpha-out} \\ i_\beta - i_{\beta-out} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Adicionalmente, através da análise do sistema de equações (5) conclui-se que, para o caso particular em que os vectores constituídos pelas variáveis de entrada e saída do FBA sejam iguais, tal significa que as correntes do sistema não apresentam distorção harmónica ou desequilíbrio, sendo compostas apenas pela componente de sequência positiva à frequência fundamental, conforme é mostrado em (8).

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} i_{\alpha-out}' \\ i_{\beta-out}' \end{bmatrix} &= \omega \cdot \begin{bmatrix} -i_{\beta-out} \\ i_{\alpha-out} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \begin{bmatrix} i_{\alpha-out} \\ i_{\beta-out} \end{bmatrix} &= \int \left(\omega \cdot \begin{bmatrix} -i_{\beta-out} \\ i_{\alpha-out} \end{bmatrix} \right) \cdot dt = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

3. Simulações

O comportamento em regime transitório e permanente do Filtro Banda Adaptativo foi estudado através da utilização do *software* de simulação PSCAD.

3.1 Modelo de Simulação

O modelo utilizado para testar o comportamento do FBA consistiu no diagrama de blocos representado na Figura 2 e no circuito eléctrico apresentado na Figura 3, onde as correntes de entrada do filtro adaptativo são as correntes fornecidas pela fonte de alimentação.

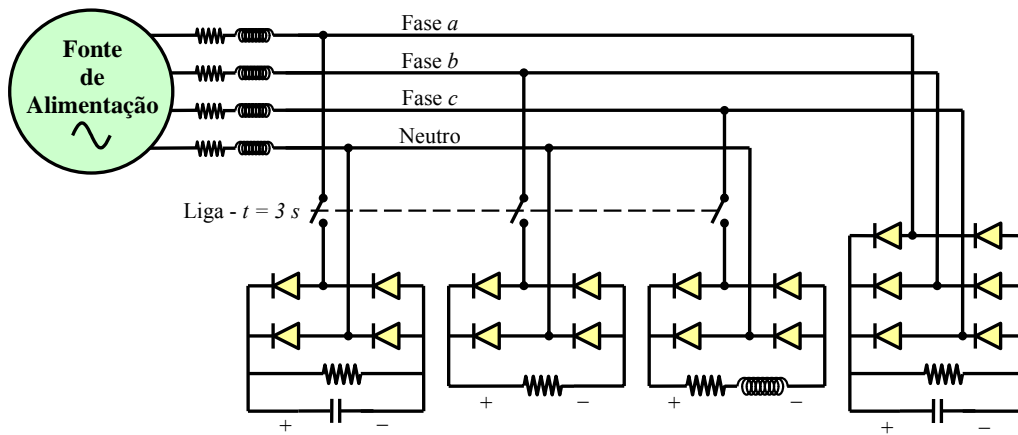


Figura 3. Circuito eléctrico.

Este circuito é constituído por rectificadores não controlados em ponte completa, sendo um trifásico e três monofásicos, cada um ligado a uma fase e ao neutro. O rectificador trifásico opera com uma carga do tipo RC paralela ($R = 10 \Omega$, $C = 10 \text{ mF}$). Já os rectificadores monofásicos operam com as seguintes cargas:

- Fase a - tipo RC paralela ($R = 10 \Omega$, $C = 100 \text{ mF}$);
- Fase b - puramente resistiva ($R = 8 \Omega$);
- Fase c - tipo RL série ($R = 10 \Omega$, $L = 10 \text{ mH}$).

Para tornar os resultados das simulações mais próximos da realidade foi também incluída a impedância das linhas, tendo sido considerado um valor de indutância de 1 mH e um valor de resistência de $0,5 \Omega$, que são valores típicos para uma instalação eléctrica trifásica de baixa potência.

A escolha das cargas para o circuito eléctrico prende-se com o facto destas consumirem correntes com elevados valores de conteúdo harmónico, o que permite testar o desempenho do FBA aqui apresentado para valores de distorção harmónica superiores aos normalizados pela CENELEC (1994). Além disso, os rectificadores monofásicos, ao operarem com diferentes tipos de cargas consomem, no seu conjunto, correntes desequilibradas.

A sequência de procedimentos de simulação consistiu em iniciar a simulação apenas com o rectificador trifásico ligado, e passados 3 segundos, ligar simultaneamente os rectificadores monofásicos.

3.2 Resultados das Simulações

Na Figura 4 é possível observar o sistema trifásico de correntes na fonte a partir do qual o FBA determina a componente de sequência positiva da fundamental. Estas formas de onda são válidas para os primeiros 3 segundos de simulação, após a entrada em regime permanente do sistema eléctrico. Já a Figura 5 apresenta as formas de onda das mesmas correntes após o 3º segundo de simulação, também com o sistema eléctrico em regime permanente.

As figuras 6 a 11 demonstram a evolução da resposta do FBA em função do ganho K , para operação com as correntes de entrada da Figura 4.

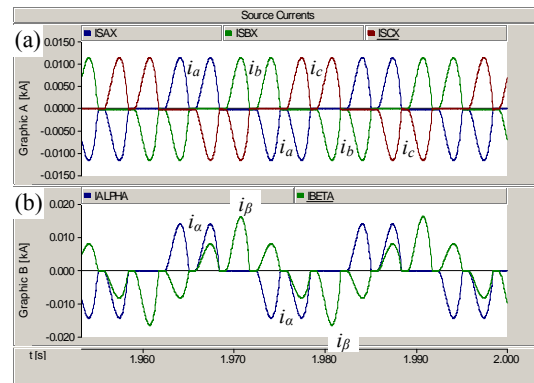


Figura 4. Sistema trifásico de correntes com a carga equilibrada: (a) No referencial $a-b-c$; (b) No referencial $\alpha-\beta$.

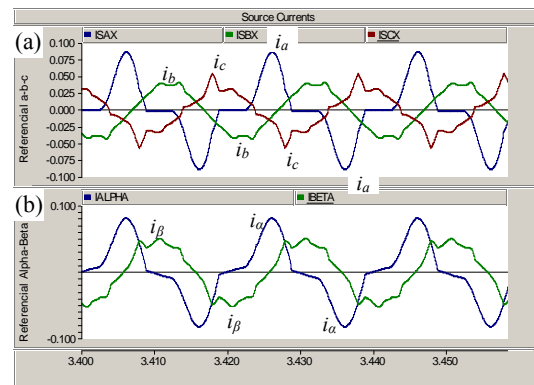


Figura 5. Sistema trifásico de correntes para carga desequilibrada: (a) No referencial $a-b-c$; (b) No referencial $\alpha-\beta$.

Os resultados patentes na Figura 6 e na Figura 7 foram obtidos com um ganho K de 10, após o sistema entrar em regime permanente. A Figura 6 refere-se aos valores instantâneos da corrente da fase a da fonte (i_a) e da saída do FBA (i_{aF}). Na Figura 7 é possível observar os valores eficazes desses sinais desde o início da simulação até após a estabilização.

A Figura 8 e a Figura 9 demonstram os resultados obtidos com um ganho K de 40, após a estabilização do FBA. Já a Figura 10 e a Figura 11 referem-se ao comportamento do filtro adaptativo para um ganho K de 100, nas mesmas condições do teste anterior.

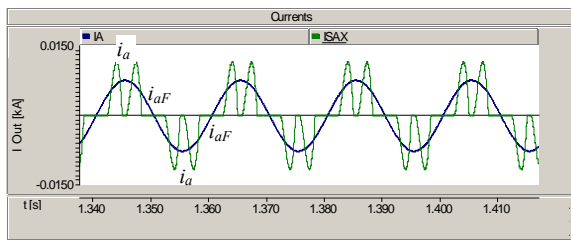


Figura 6. Corrente na fonte e sinal de saída do FBA – $K = 10$.

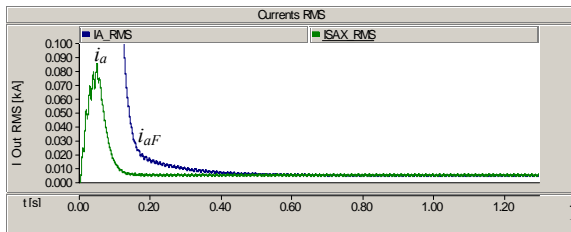


Figura 7. Valores eficazes dos sinais (corrente e saída) – $K = 10$.

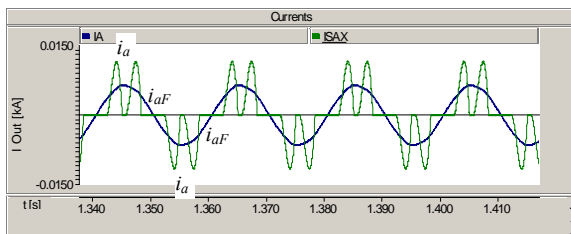


Figura 8. Corrente na fonte e sinal de saída do FBA – $K = 40$.

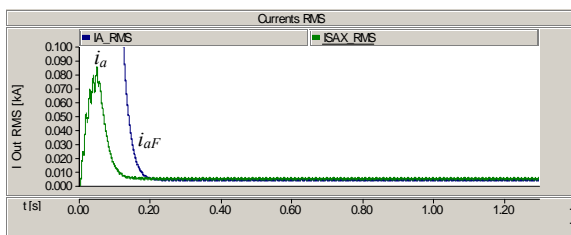


Figura 9. Valores eficazes dos sinais (corrente e saída) – $K = 40$.

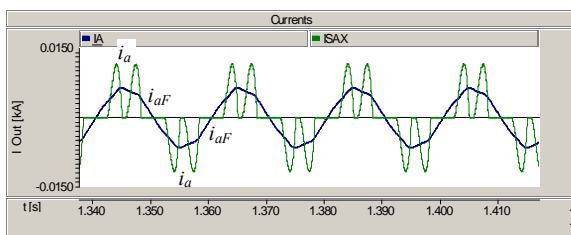


Figura 10. Corrente na fonte e sinal de saída do FBA – $K = 100$.

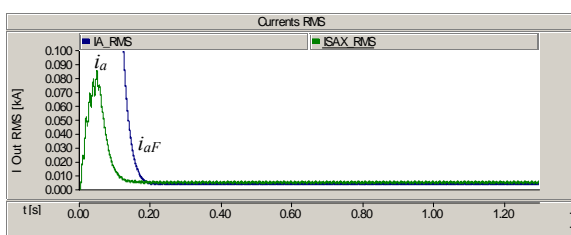


Figura 11. Valores eficazes dos sinais (corrente e saída) – $K = 100$.

3.3 Análise dos Resultados

Inicialmente pretendeu-se analisar o efeito das variações do parâmetro K (ganho do filtro) na distorção harmónica total (THD – *Total Harmonic Distortion*) do sinal de saída do FBA, assim como na diferença entre o valor eficaz dos sinais de entrada e de saída. Isto foi feito apenas com o rectificador trifásico ligado (primeiros 3 segundos de simulação). Para tal foram definidos os seguintes parâmetros:

- THD – distorção harmónica total dos valores de saída do FBA em regime permanente;
- Erro RMS – diferença entre o valor eficaz da fundamental das correntes de entrada e dos sinais de saída do FBA, em regime permanente.

Os valores de THD foram medidos em regime permanente apenas com a ponte trifásica ligada pois este é o caso simulado em que a distorção harmónica das correntes de entrada do FBA alcança o maior valor, sendo igual a 84%. Com a ligação dos rectificadores monofásicos o THD da corrente da fase a passa a apresentar um valor de 61%, e as correntes do sistema trifásico passam a ser desequilibradas.

Em seguida observou-se o comportamento do FBA em regime transitório, que ocorre com a ligação dos três rectificadores monofásicos, no instante $t = 3$ s, sendo definidos os parâmetros:

- TR – tempo de reacção - intervalo de tempo entre o pico transitório máximo das correntes do sistema eléctrico e o pico transitório máximo na saída do FBA (este parâmetro indica o tempo de reacção do filtro).
- TE – tempo de estabilização - intervalo de tempo entre a estabilização das correntes do sistema eléctrico e a estabilização dos sinais de saída do FBA.

Com um valor de ganho $K = 10$ constata-se que o valor de THD do sinal de saída é baixo, no entanto, os restantes parâmetros apresentam valores elevados, que podem fazer com que este valor de ganho não seja adequado para a aplicação em causa, devido à resposta lenta do FBA. O erro RMS, apesar de elevado, não tem implicações na aplicação em causa (Filtro Activo Série com controlo baseado na teoria p-q), pois esta não necessita do valor RMS correcto das variáveis de saída do filtro adaptativo, conforme comprovado no item 3.4.

Para a operação com $K = 40$ observa-se uma diminuição no tempo de estabilização e de reacção do FBA, bem como no valor do erro RMS. No que concerne ao valor de THD constatou-se que com este ganho a resposta piora, mas continua a ser satisfatória.

Para a operação do FBA com $K = 100$ o valor de THD aumenta para 4,35%, sendo este um valor demasiado elevado e comprometedor para o desempenho do sistema de controlo do Filtro Activo Série. Com este ganho o erro RMS diminuiu para 2%.

Na Tabela 1 são apresentados os valores destes parâmetros para os ganhos K mencionados acima, e também para valores intermédios, de forma a constatar a tendência comportamental do filtro adaptativo.

Tabela 1. Resultados das simulações do FBA

K	THD (%)	Erro RMS (%)	TE (ms)	TR (ms)
5	0,13	39,6	>1000	208
10	0,35	19,8	155	108
25	1,02	8,5	61	59
40	1,68	5,0	42	39
75	3,24	2,8	9	19
100	4,35	2,0	6	18

Constata-se que com o aumento do ganho K todos os parâmetros melhoram, diminuindo seus valores, com excepção do THD que piora, aumentando seu valor.

Os resultados dos parâmetros do FBA em função do ganho K , apresentados na Tabela 1, são também mostrados em gráficos, nas figuras 12 a 15. Da análise desses gráficos constata-se que o valor de THD aumenta linearmente com o aumento de K , sendo este o único parâmetro que é penalizado com o aumento do ganho do filtro. Os restantes parâmetros analisados apresentam uma queda exponencial com o aumento de K , sendo que, para valores de K superiores a 20 o tempo de estabilização (TE) passa a apresentar um baixo índice de variação. O erro RMS e o tempo de reacção (TR) apresentam variações significativas para valores de K entre 20 e 80, tendendo a tornar-se constantes para valores superiores.

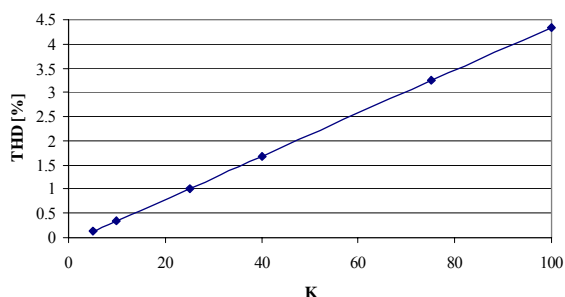


Figura 12. Evolução do THD do Sinal de Saída em função de K .

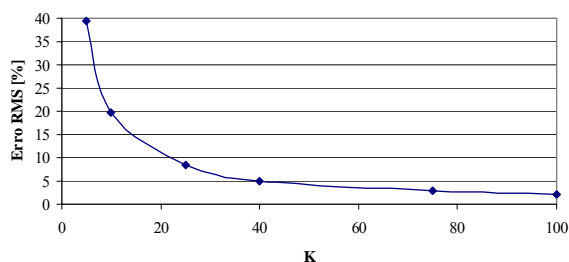


Figura 13. Evolução do “Erro RMS” em função de K .

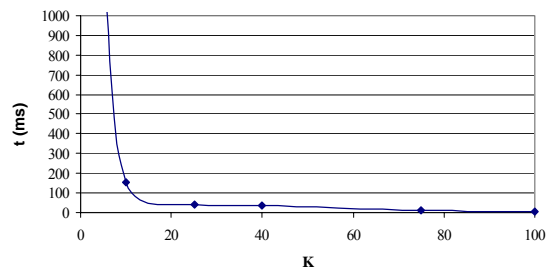


Figura 14. Evolução de TE em função de K

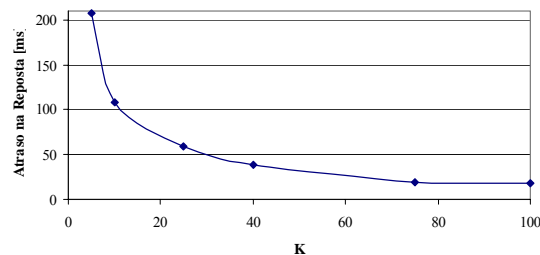


Figura 15. Evolução de TR em função de K

A Figura 16 apresenta os sinais de saída do FBA em regime permanente, para funcionamento com ganho $K = 40$, quando as correntes de entrada são as apresentadas na Figura 5 (rectificador trifásico e rectificadores monofásicos ligados). Verifica-se que, apesar das correntes de entrada serem desequilibradas, em amplitude e fase, e de terem diferentes conteúdos harmónicos, o filtro adaptativo é razoavelmente bem sucedido na obtenção dos sinais de saída, que devem apenas conter a componente de sequência positiva à frequência fundamental das correntes de entrada. O seu desempenho, contudo, não é perfeito, pois os sinais de saída apresentam um erro de amplitude entre fases máximo de 3 %, e um valor de THD de 2 %.

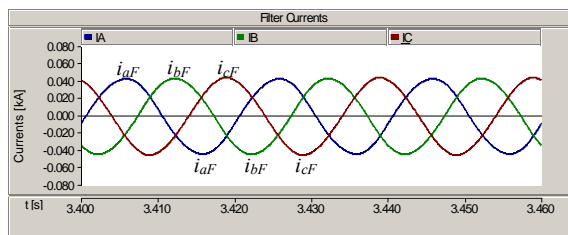


Figura 16. Sinais de saída do FBA para operação com correntes desequilibradas na entrada.

3.4 Implicação do Erro RMS no Desempenho do Filtro Activo Série

Conforme anteriormente referido, o sistema de controlo do Filtro Activo Série com base na Teoria p-q, prescinde do valor eficaz correcto dos sinais de corrente. Ou seja, para a aplicação em causa, em que o FBA deve determinar a componente de sequência positiva à frequência fundamental das correntes do sistema trifásico, o valor eficaz certo do sinal de saída do filtro adaptativo não é necessário. Dessa forma, para esta aplicação, o erro RMS não é um parâmetro crítico.

De forma a comprovar esta afirmação, realizaram-se simulações em que foram inseridos sinais de corrente idênticos, mas de diferentes amplitudes (100 A e 500 A respectivamente), no sistema de controlo do Filtro Activo Série. A Figura 17 apresenta os sinais de referência para a compensação de tensão da fase *a* obtidos com essas duas simulações (V_{Ca1} e V_{Ca2}). Verifica-se que estes sinais são idênticos o que confirma a afirmação anteriormente proferida.

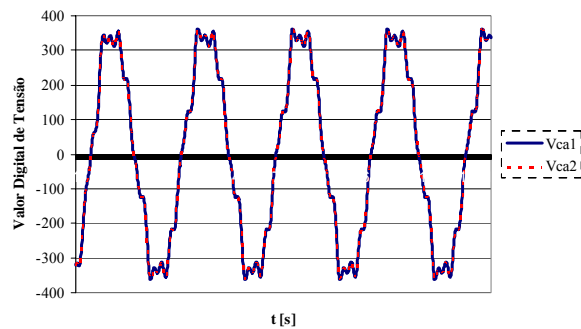


Figura 17. Comparação das tensões de compensação geradas pelo Filtro Activo Série com sinais de corrente de saída do FBA de amplitudes diferentes.

4. Conclusões

Este artigo sugeriu a utilização de um Filtro Banda Adaptativo (FBA) para a detecção da componente de sequência positiva à frequência fundamental das correntes num sistema eléctrico trifásico, necessária ao sistema de controlo de um Filtro Activo Série.

Foram realizadas simulações deste filtro adaptativo de forma a analisar-se o seu desempenho num sistema eléctrico com conteúdo harmónico elevado, e também com desequilíbrios de cargas.

Para determinar o comportamento do FBA, realizaram-se simulações para diferentes valores de ganho *K* do filtro, que foi analisado através de 4 parâmetros de desempenho: THD dos sinais de saída, erro entre o valor eficaz da fundamental das correntes de entrada e dos sinais de saída, tempo de estabilização e tempo de reacção dos sinais de saída.

A partir da análise dos resultados das simulações mostradas neste artigo, é possível concluir que, para o filtro adaptativo aqui apresentado o melhor valor de ganho *K*, para as situações analisadas é de 40. Este valor é o que garante o melhor compromisso para a aplicação em causa, com um valor de distorção harmónica do sinal de saída inferior a 2 %, e com uma resposta dinâmica, caracterizada pelo tempo de estabilização e pelo tempo de reacção, na ordem dos 2 ciclos da rede eléctrica. Além disso, com este ganho o FBA apresenta um erro não muito elevado entre o valor eficaz da fundamental das correntes de entrada e dos seus sinais de saída, para operação em regime permanente (5%).

Agradecimentos

Os autores agradecem à FCT (Fundação para a Ciência e a Tecnologia), financiadora do Projecto POCTI/ESE/41170/2001.

Referências Bibliográficas

- Akagi, H., Kanazawa, Y., Nabae, A. (1983). Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits, *IPEC'83 – Int. Power Electronics Conf.*, Tokyo, Japan, pp. 1375-1386.
- Freitas, M. J. S., Afonso, J. L., Tavares, A., Martins, J. S. (2003). A personal Computer Based Controller for an Active Power Filter, *ISIE'03*, Rio de Janeiro, Brasil, ISBN: 0-7803-7912-8.
- Karimi, H., Karimi-Ghartemani, M., Iravani, M. R., Bakhshai, A. R. (2003). An Adaptive Filter for Synchronous Extraction of Harmonics and Distortions, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol 18, NO. 4, October 2003, pp. 1350-1356.
- Esteve, M. A. P. (2002). Aplicación de Nuevas Técnicas de Control para el Desarrollo de Reguladores Activos de Potencia, *Tesis Doctoral*, Escuela Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla, España, Abril 2002, pp. 163-181.
- CENELEC (1994). Caractéristiques de la tension fournie par les réseaux publics de distribution, Ref. N° EN 50160:1994 F.
- Clarke, E. (1943). Circuit Analysis of A-C Power Systems, Vol I – Symmetrical and Related Components, John Wiley and Sons.