

Filtros Ativos Paralelos: Um Enfoque Quanto a Eficácia de Três Estratégias de Controle

M. Aredes, COPPE/UFRJ, J. A. Moor Neto, COPPE/UFRJ; M. J. V. Siqueira, Bandeirante Energia S.A., J.C. Montenegro, Bandeirante Energia S.A

RESUMO

Este documento apresenta uma análise comparativa entre três estratégias de controle para filtros ativos paralelos em sistemas de distribuição. As estratégias de controle utilizadas são a teoria da potência instantânea (teoria pq), sistema de referência síncrona e correntes senoidais de Fryze. O uso do circuito de sincronismo (circuito PLL) permite a determinação de correntes de referência, permitindo que as correntes drenadas na fonte sejam senoidais e balanceadas, mesmo que as tensões medidas na fonte contenham desbalanços e distorções. Simulações e resultados experimentais com o DSP TMS320F2812 da TEXAS INSTRUMENTS das estratégias de controle para determinação das correntes de compensação, são apresentadas, comprovando assim a viabilidade das estratégias em condições não ideais de operação.

PALAVRAS-CHAVE

Filtros Ativos Paralelos, Teoria pq, Correntes Senoidais de Fryze, Sistema de Referência Síncrona, DSP.

I. INTRODUÇÃO

Os problemas relacionados à qualidade de energia elétrica têm merecido cada vez mais a atenção de profissionais da área. Os prejuízos econômicos decorrentes de uma energia de baixa qualidade podem ser muito acentuados. Isto porque nos últimos anos, ocorreu um considerável aumento do número equipamentos residenciais e industriais que são extremamente sensíveis a qualidade da potência entregue para o consumo [2].

Estes tipos de equipamentos, por apresentarem características não-lineares, são os maiores responsáveis pelas distorções das formas de onda observadas nas correntes e, dependendo da potência de curto circuito da barra do sistema de distribuição, a forma de onda da tensão poderá também ser afetada. Ao mesmo tempo, estes equipamentos são muito sensíveis às variações de tensões, operando de forma indevida, se a mesma não for de boa qualidade.

Diante desta situação, verifica-se a necessidade de minimizar o impacto no funcionamento destas cargas. Uma proposta interessante é a utilização do Condicionador Universal de Potência (UPQC) [3], [10], que é a integração dos filtros ativos série e paralelo. Deste modo, o UPQC possui condições de propiciar uma melhoria da qualidade da energia a partir do seu ponto de instalação no sistema elétrico.

O filtro ativo paralelo que compõe o UPQC compensa as correntes da carga não linear para garantir que as correntes compensadas, drenadas da rede tornem-se senoidais e equilibradas.

Um dos aspectos mais importantes no projeto do filtro ativo é a estratégia de controle considerada na determinação das correntes e/ou tensões de compensação. Este tema vem sendo discutido nos últimos 20 anos com publicações de diversos trabalhos. Entretanto, em vários trabalhos publicados, os resultados de aplicações de filtros ativos foram apresentados de forma imprecisa, quer seja pelo fato do sistema básico modelado não condizer com a realidade prática, ou mesmo devido a problemas de interpretação errônea de algumas estratégias de controle já desenvolvidas [4]-[7].

Por exemplo, como relatado em [8], deve-se atentar que em situações em que as tensões de suprimento forem distorcidas e/ou desbalanceadas, nenhuma estratégia de controle possibilitará que de forma simultânea os seguintes aspectos sejam atendidos por meio da aplicação de filtros ativos:

- a potência ativa fornecida pela fonte seja constante;
- as correntes na fonte sejam senoidais;
- as tensões e correntes na fonte sejam proporcionais.

O princípio básico da compensação do filtro ativo paralelo, pode ser verificado por intermédio do diagrama unifilar ilustrado na Figura 1.

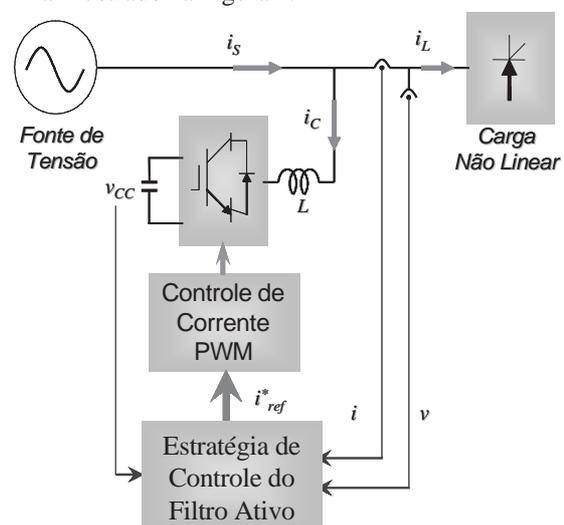


FIGURA 1. Configuração típica do filtro ativo paralelo

Este trabalho foi apoiado financeiramente pela Bandeirante Energia S.A..

M. J. V. Siqueira trabalha na Bandeirante Energia S.A. (e-mail: jovita@bandeirante.com.br).

J. C. Montenegro trabalha na Bandeirante Energia S.A. (e-mail: montenegro@bandeirante.com.br)

Deste modo, este trabalho mostra um estudo conciso a respeito de três diferentes estratégias de controle, consideradas na determinação das correntes de compensação em filtros ativos a três fios. Neste estudo, na implementação da configuração do sistema foi verificado o cuidado em dimensioná-lo, de tal sorte que a tensão da barra de suprimento seja afetada pela atuação da carga não-linear considerada. Este aspecto denota que o sistema de suprimento não é um barramento infinito. O estudo foi baseado em simulações no programa PSCAD/EMTDC, além de resultados experimentais utilizando o sistema de desenvolvimento eZdsp™ F2812 DSP.

Considerou-se que as tensões da fonte de tensão apresentavam distorções e desbalanços, comprovando a eficácia das estratégias em condições não ideais de operação.

II. ESTRATÉGIAS DE CONTROLE

A metodologia utilizada para gerar as correntes de compensação é o fator preponderante na eficácia da operação do filtro ativo. Várias estratégias de controle podem ser utilizadas na obtenção de correntes de compensação, como mostram [4]-[7].

Os aspectos gerais das três estratégias de controle no domínio do tempo, utilizadas neste estudo relacionado com a atuação de filtro ativo paralelo, são apresentadas a seguir.

A. Teoria pq

Com base na teoria pq [1], a estratégia de controle para correntes senoidais na fonte pode ser implementada de acordo com [10], conforme mostrado na Figura 2.

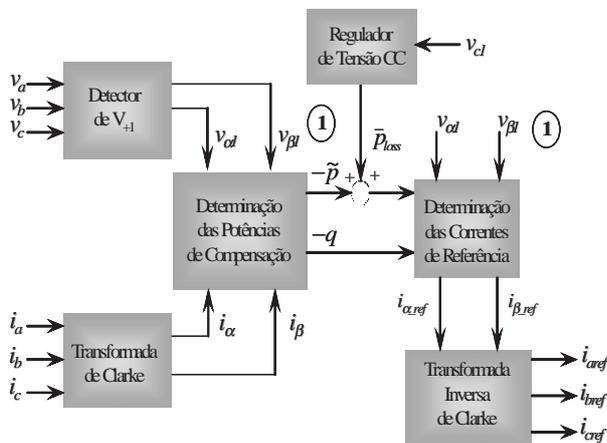


FIGURA 2. Diagrama de blocos para a estratégia de correntes senoidais na fonte.

As tensões e correntes medidas são transformadas em coordenadas α - β por (1).

As potências de compensação são dadas por (2). A componente CA da potência ativa de compensação \tilde{p} , é obtida por meio de um filtro passa-alta sintonizado em 50 hz. Caso não haja interesse de compensar a potência reativa da carga, a componente CA da potência imaginária de compensação \tilde{q} também deverá ser extraída. Neste trabalho, as potências de compensação da atuação da carga são dadas por (3).

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} p_c \\ q_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_\alpha & i_\beta \\ -i_\beta & i_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{\alpha 1} \\ v_{\beta 1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{cases} p_{cl} = -\tilde{p} + p_{loss} \\ q_{cl} = -q \end{cases} \quad (3)$$

As correntes de referência são calculadas por (4). O sinal de saída do regulador p_{loss} é considerado nos cálculos que determinam a corrente de referência a ser entregue ao inversor PWM, conforme dado em (4). Este sinal reflete em um balanço no fluxo de potência entre o elo CC e a saída do inversor, ou seja, o inversor pode injetar ou absorver potência da rede de suprimento CA.

Finalmente, as correntes de referência $i_{\alpha ref}$ e $i_{\beta ref}$ são transformadas para o sistema de referência a-b-c por (5).

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha ref} \\ i_{\beta ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha 1}^2 + v_{\beta 1}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha 1} & v_{\beta 1} \\ v_{\beta 1} & -v_{\alpha 1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{cl} \\ q_{cl} \end{bmatrix} \quad (4)$$

O detalhe fundamental desta estratégia que não foi considerado em [4]-[7], foi à utilização do detector de seq. Positiva \mathbf{V}_{+1} , o qual determina $v_{\alpha 1}$ e $v_{\beta 1}$. Este circuito é esclarecido na Figura 3.

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha ref} \\ i_{\beta ref} \\ i_{c ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha ref} \\ i_{\beta ref} \end{bmatrix} \quad (5)$$

O circuito de sincronismo (PLL) é o parte mais importante do detector de seqüência positiva, pois calcula os valores da freqüência e do ângulo de fase da componente fundamental de seqüência positiva da tensão medida. Detalhes específicos sobre o PLL em questão, bem como do detector de seqüência positiva, podem ser obtidos em [10].

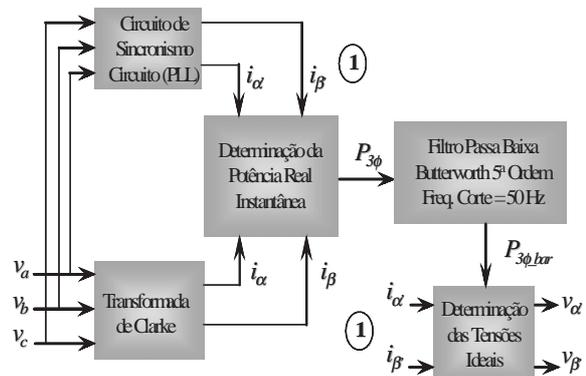


FIGURA 3. Diagrama de blocos do método da referência síncrona

B. Sistema de Referência Síncrona

Proposta em [9], esta metodologia de controle é baseada na aplicação da Transformada de Park. Deste modo, origina-se um sistema de referência composto de dois eixos ortogonais (coordenadas dq) girando de acordo com a frequência da rede de suprimento. A Figura 4 esclarece as características desta estratégia. Utilizando (6) as correntes de carga medidas são convertidas para a coordenada dq, ou seja, i_d e i_q (referência síncrona), sendo a matriz que a matriz T é dada por (7).

Utilizando filtros adequados, as componentes de frequência fundamental (quantidades CC), são separados dos componentes em frequências superiores (quantidades CA). Semelhante a estratégia anterior, pode-se optar por compensar ou não a potência reativa da carga. Optando pela sua compensação, a componente i_{qdc} deve ser ajustada para zero. A componente CC da corrente relativa a componente fundamental da corrente i_{ddc} é adicionada ao sinal p_{loss} , visando como no caso da estratégia anterior, refletir em um balanço no fluxo de potência entre o elo CC e a saída do inversor.

Deste modo, as componentes fundamentais das correntes de carga são obtidas por (8). As correntes de referência são obtidas com (9).

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} T \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

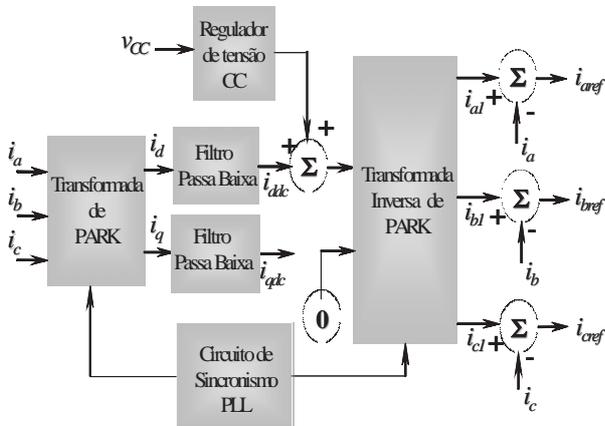


FIGURA 4. Diagrama de blocos do método da referência síncrona

$$T = \begin{bmatrix} \cos wt & \cos(wt - 2\pi/3) & \cos(wt + 2\pi/3) \\ -\sin wt & -\sin(wt - 2\pi/3) & -\sin(wt + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{b1} \\ i_{c1} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos wt & -\sin wt \\ \cos(wt - 2\pi/3) & -\sin(wt - 2\pi/3) \\ \cos(wt + 2\pi/3) & -\sin(wt + 2\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dc} + p_{loss} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$i_{refk} = i_{k1}(t) - i_k(t) \quad k = (a, b, c) \quad (9)$$

A posição angular do sistema de referência wt é obtida também por meio do PLL mostrado em [10].

C. Método das Correntes Senoidais de Fryze

A referência [8] apresenta uma estratégia bastante interessante pela sua simplicidade, além de ser eficaz na ta-

refa de compensar as componentes harmônicas das correntes de carga. A Figura 5 ilustra como as correntes de compensação são determinadas nesta metodologia. Salienta-se que nesta estratégia não é possível compensar o fator de potência da carga, pois as tensões do sistema não estão sendo utilizadas no controle. A vantagem está na simplicidade do controle, inclusive com a redução em um filtro passa baixa de quinta ordem.

As correntes medidas na carga são utilizadas como entradas no circuito de sincronismo. As saídas deste controle v_{a1}, v_{b1}, v_{c1} são senóides puras em fase com a sequência positiva das correntes medidas. Maiores detalhes sobre este circuito de sincronismo podem ser observados em [8].

A condutância G , determinada conforme mostra o diagrama de blocos da Figura 5, apresenta um valor médio e um valor oscilante. O uso do filtro passa baixa, serve então para extrair a componente média desta condutância G , sendo esta componente média denominada como G_{bar} . Com isto, G_{bar} é um sinal de controle que contém a magnitude da componente fundamental das correntes medidas na carga.

Sendo o conversor utilizado no circuito de potência alimentado por um capacitor, há a necessidade de um controle para manter a tensão do elo CC do conversor no valor desejado.

Este controle irá fornecer o sinal de controle G_{loss} , sendo este responsável por forçar o conversor a drenar ou receber energia da rede mantendo a tensão no elo CC no valor de referência ajustada. O produto entre as tensões de controle v_{a1}, v_{b1}, v_{c1} e sinal de controle G_c irão fornecer correntes de controle i_{ap}, i_{bp}, i_{cp} , cujos sinais são senóides puras e em fase com sequência positiva das correntes medidas. As correntes de referência $i_{aref}, i_{bref}, i_{cref}$ são determinadas pela diferença entre as correntes ideais i_{ap}, i_{bp}, i_{cp} e as correntes medidas na carga i_a, i_b, i_c .

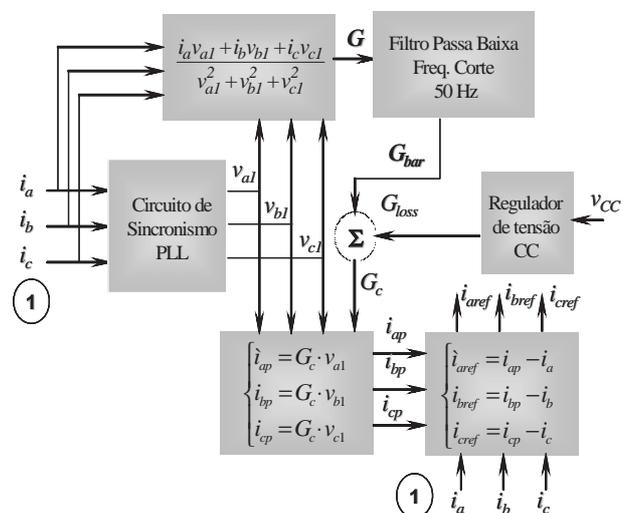


FIGURA 5. Diagrama de blocos do método das correntes senoidais de Fryze

III. RESULTADOS DE SIMULAÇÕES

Os parâmetros do sistema modelado no simulador digital PSCAD/EMTDC são apresentados na Tabela 1. A situação considerada foi a de tensões de suprimento desbalanceadas e distorcidas, visto que estes tipo de situação apresentou problemas de discussões. O fator de desbalanço considerado foi de $f_d = 4.8\%$. Também foi adotada a inclusão de um harmônico de sétima ordem (420 Hz) de $V_7 = 7.87\%$.

Salienta-se que a carga foi representada por uma ponte conversora de seis pulsos, com uma resistência no lado CC de $R_{cc} = 100 \Omega$.

TABELA I

Parâmetros do sistema a três fios modelado

Tensão de linha $V_l = 220V$ (rms)	Frequência do sistema $f_s = 60Hz$
Impedância do sistema $Z_s = (0,107 + j 7,539)$	Indutância do inversor $L_i = 5 mH$
Capacitância do lado CC do inversor $C_{cc} = 1200\mu F$	Tensão de referência do lado CC do inversor $V_{cc} = 700 V$
Filtro passivo passa alta do inversor $R_p = 100e C_p = 8\mu F$	Largura da banda de histerese = 0.22 A

A Figura 6 mostra as tensões fornecidas pela fonte de suprimento com o níveis de distorção e desbalanço considerados na análise. Pode-se também verificar a forte influência da atuação da carga nas tensões.

As Figuras 7, 8 e 9 ilustram os comportamentos das correntes na fonte e na carga nrelativas a fase “a”, as quais foram obtidas com as três estratégias em um determinado intervalo.

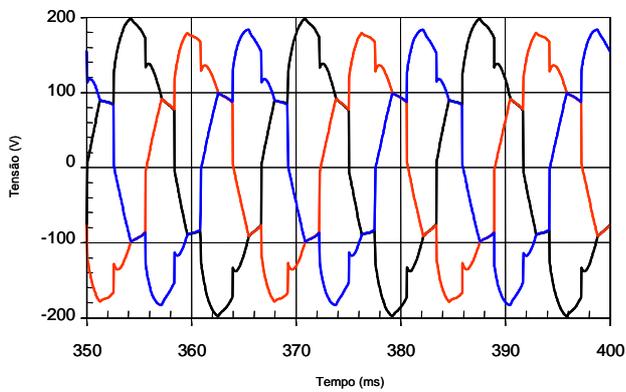


FIGURA 6. Tensões de suprimento

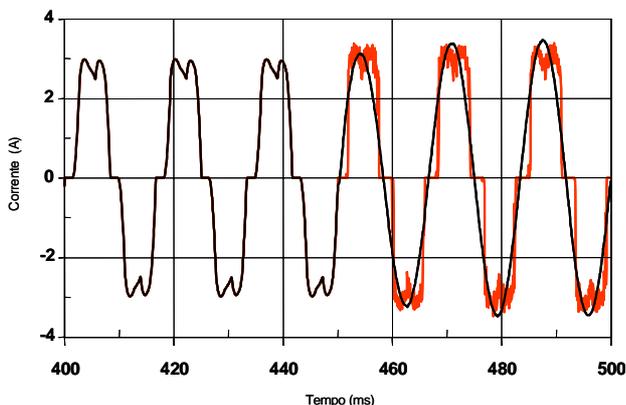


FIGURA 7. Resultados obtidos com a teoria pq

As figuras 10, 11 e 12, ilustram o comportamento das correntes na fonte obtidas em cada uma das três estratégias.

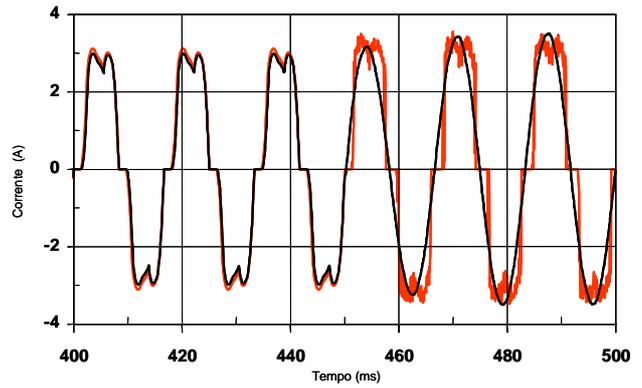


FIGURA 8. Resultados obtidos com o Sist. Ref. Síncrona

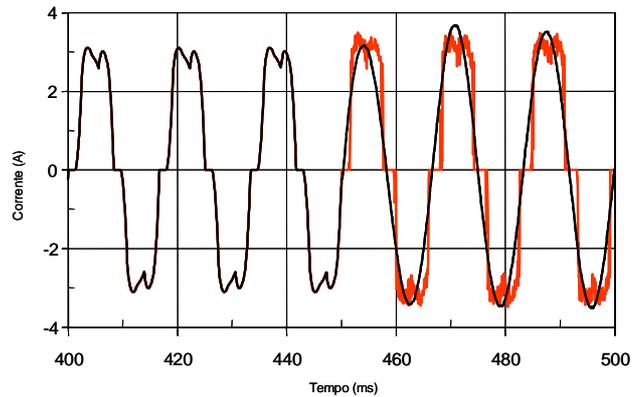


FIGURA 9. Resultados obtidos com as Corr. Sen. de Fryze

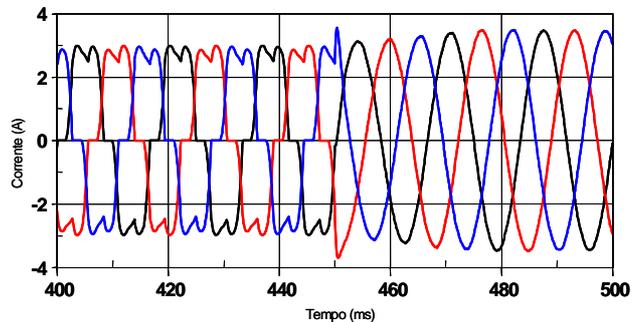


FIGURA 10. Correntes na fonte com a teoria pq

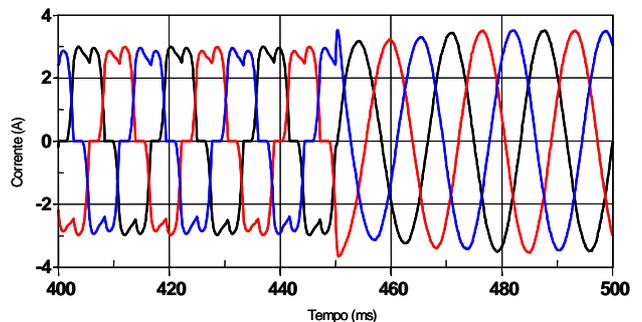


FIGURA 11. Correntes na fonte com o Sist. de Ref. Síncrona

Já as correntes de referências, obtidas por meio da modelagem de cada uma das estratégias de controle analisadas, constam nas Figuras 13, 14 e 15.

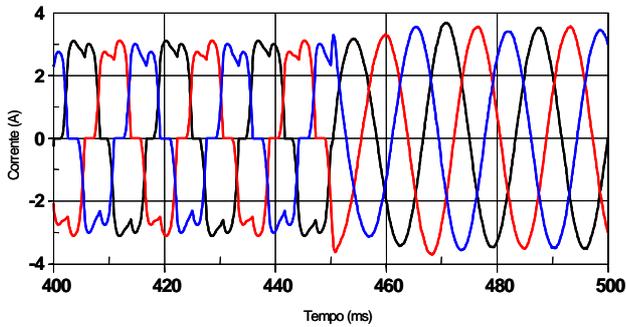


FIGURA 12. Correntes na fonte com as Corr. Sen. de Fryze

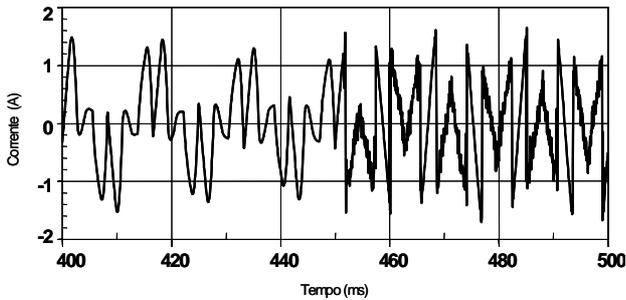


FIGURA 13. Corrente de Ref. com a Teoria pq

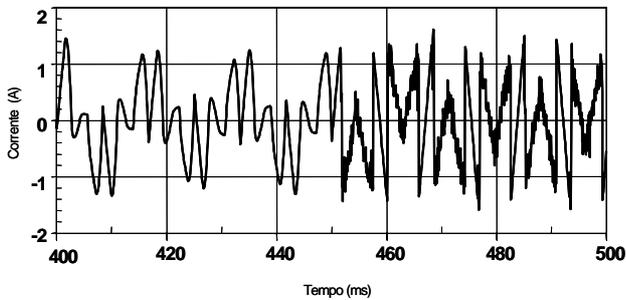


FIGURA 14. Corrente de Ref. com o Sist. de Ref. síncrona

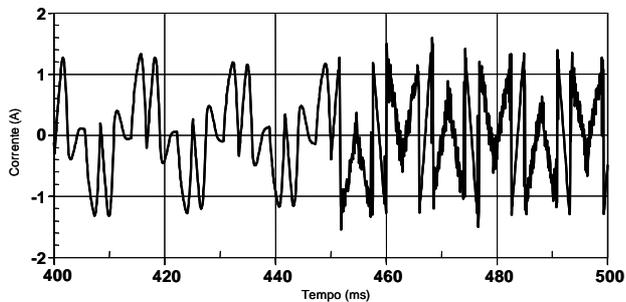


FIGURA 15. Corrente de Ref. com as Corr. Sen. de Fryze

IV. UTILIZAÇÃO DO DSP

Foram implementados os três algoritmos relativos as três estratégias de controle citadas neste trabalho no DSP TMS320F2812, considerando as premissas de [11]-[13]. Deste modo, foi possível verificar as correntes de compensação de referência geradas pelas três estratégias.

As principais características deste Processador Digital de Sinais são: Frequência de operação 150 MHz, 16 canais de conversão A/D de 12 – Bit (12.5 MSPS), 128 K x 16 Flash, dois geradores de eventos (EVA e EVB), temporizadores de 32 – bits.

Utilizou-se no sistema de condicionamento de sinal três transdutores de corrente, e outros três de tensão de efeito hall para efetuar a medição das correntes e tensões na carga não-linear considerada.

A Figura 16 mostra o diagrama de blocos representativo do sistema implementado.

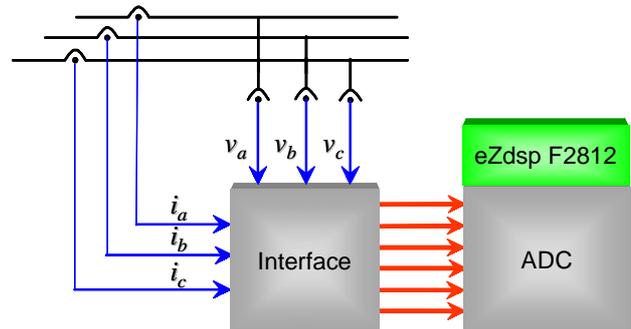


FIGURA 16 – Diagrama de blocos do sistema

V. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O sistema implementado permitiu verificar as correntes de referências necessárias a compensar a distorção da corrente de linha da mesma carga adotada nas simulações, e que esclarecida na seção III. O sistema de suprimento também era similar aquele simulado, em termos de potência de curto-circuito.

A Figura 17 mostra as formas de ondas das tensões de fase do sistema de suprimento.

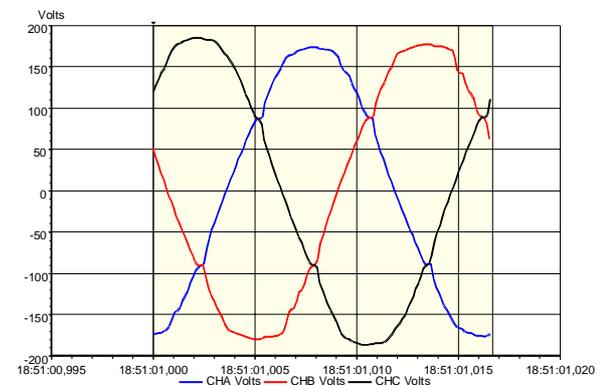


FIGURA 17. Formas de ondas das tensões de suprimento

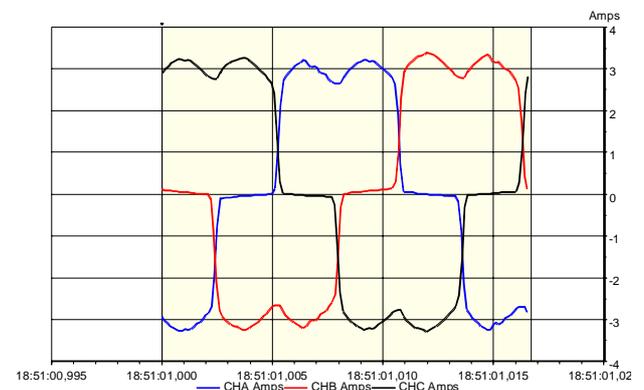


FIGURA 18. Formas de ondas das correntes de carga

Foi verificado que o fator de desbalanço de $f_d = 2.8320$ % netas tensões. O conteúdo harmônico verificado foi de: $V_3 = 1,366\%$ $V_5 = 1,463\%$ e $V_7 = 1,778\%$. Já a Figura 18 ilustra as formas de ondas das correntes de linha drenada pela carga não-linear considerada.

As Figuras 19, 20 e 21, mostram as correntes de compensação (em pu na base 3.1A), as quais foram determinadas por meio da utilização do DSP, utilizando as estratégias da Teoria pq, Sistema de Referência Síncrona e Correntes Senoidais de Fryze, respectivamente. .

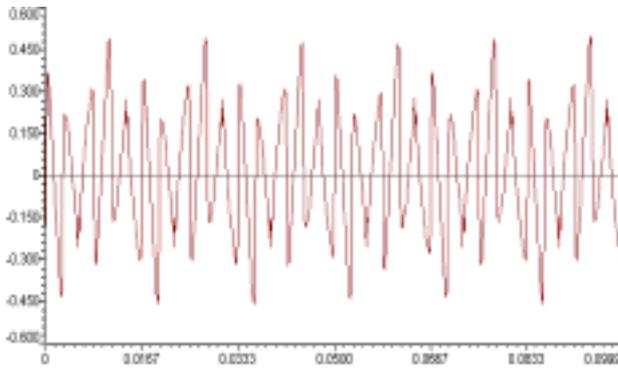


FIGURA 19. Teoria pq

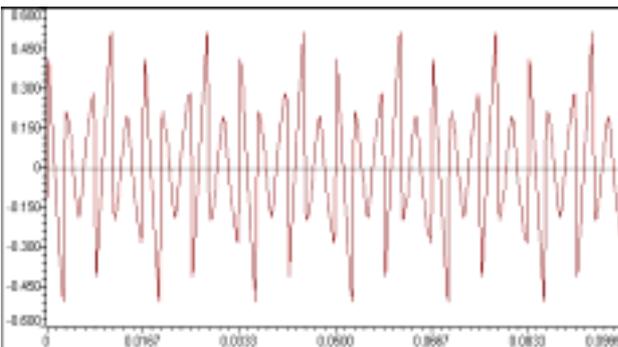


FIGURA 20. Sistema de Referência Síncrona

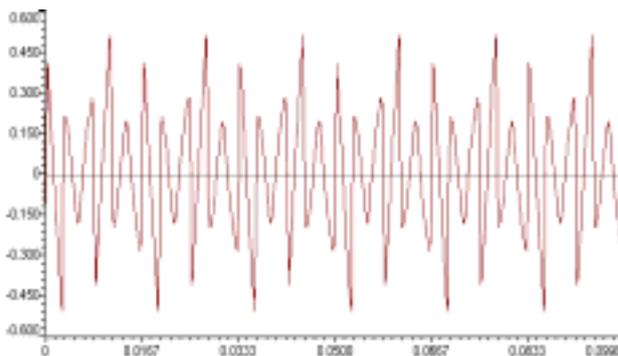


FIGURA 21. Correntes Senoidais de Fryze

VI. CONCLUSÕES

Foi apresentada a aplicação de três estratégias de controle visando a determinação das correntes de compensação em filtros ativos paralelos em sistemas a três fios. O detalhe fundamental considerado nestas metodologias é a utilização de circuitos de sincronismos (PLL). Este fato possibilita que as estratégias citadas possam ser utilizadas para compensar harmônicos de corrente, mesmos quando

o sistema de suprimento apresentar tensões distorcidas e/ou desbalanceadas, conforme verificado pelas simulações realizadas.

Os resultados experimentais obtidos na implementação das estratégias de controle por meio do DSP, mostraram resultados similares de correntes de compensação.

Deste modo, foi ratificada a viabilidade destas metodologias na determinação de correntes de compensação para filtros ativos paralelos operando isoladamente, ou para atuação conjunta com filtros série em um UPQC.

Ressalta-se que, em situações nas quais não seja prioritária a compensação do fator de potência, a estratégia das Correntes Senoidais de Fryze seria a mais interessante, pois não é necessária a medição das tensões, bem como o fato de todas as operações serem feitas sem a necessidade de transformações no sistema de referência das correntes.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae, "Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components in Three-Phase Circuits", *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, Vol. IA-20, No. 3, pp.625-630, May/June 1984.
- [2] R. J. Gilleskie, "Utility Expertise in Providing Power Quality and Other Engineering Services", in *Proceedings of the National Science Foundation Conference on Unbundled Power Quality Services in Power Industry*, Nov. 1996, pp. 21-27.
- [3] F. Kamran, T. G. Habetler, "Combined Deadbeat Control of a Series-parallel Converter Combination Used as a Universal Power Filter" the 1995 IEEE Power Electronics Specialist Conference, pp. 196-201, 1995.
- [4] G. W. Chang, T.-C. Shee, "A Comparative Study of Active Power Filter Reference Compensation Approaches", *Power Engineering Summer Meeting, 2002 IEEE, Vol. 2*, pp.1017-1021.
- [5] G. Bonifacio, A. Lo Schiavo, P. Marino, A. Testa, "A New High Performance Shunt Active Filter Based on Digital Control", *Power Engineering Society Winter Meeting 2000IEEE, Vol.4*, pp.2961-2966.
- [6] G. Bonifacio, A. Lo Schiavo, P. Marino A. Testa, "Comparative Analysis of Shunt Active Filters in non Ideal Operating Conditions", *Proceedings of the Conference on Harmonics and Quality of Power ICHQP2000, Vol.1*, pp.226-231.
- [7] G. D. Marques, "A Comparison of Active Filter Control Methods in Unbalanced and Non-Sinusoidal Conditions", *Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society IECON '98, Vol.1, 31Ag.-4Sept.*, pp. 444-449.
- [8] M. Aredes, Luís F. C. Monteiro, "A Control Strategy for Shunt Active Filter", *Proceedings of the International Conference on Harmonis and Power Quality-ICHQP2002*, Rio de Janeiro, Brazil.
- [9] A. Bhattacharya, D. M. Divan, B. Banerjee, "Synchronous Frame Harmonic Isolator Using Active Series Filter", *Proceedings of the European Power Electronics Conference EPE'91*, Firenze, Italy, pp. 3-030-3-035.
- [10] M. Aredes, "Active Line Power Line Conditioners", Dr.-Ing Thesis, Technischen Universität Berlin, Berlin, Germany, 1996.
- [11] TMS320F28x Analog-to-Digital Converter (ADC) Peripheral Reference Guide, Texas Instruments.
- [12] TMS320C28x Optimizing C/C++ Compiler User's Guide, Texas Instruments.
- [13] eZdsp F2812 Technical Reference B, Spectrum Digital.