



IV SBQEE

Porto Alegre/RS, 12 a-17 de agosto de 2001



Homepage: <http://www.ee.pucrs.br/~sbqee>

FILTRO ATIVO PARALELO COM CONTROLE DIGITAL DE BAIXO CUSTO

João L. Afonso * – lafonso@dei.uminho.pt

Júlio S. Martins – jmartins@dei.uminho.pt

Dept. Electrónica Industrial
Universidade do Minho – Portugal

Maurício Aredes – aredes@coe.ufrj.br

Edson H. Watanabe – watanabe@coe.ufrj.br

COPPE/UFRJ
Universidade Federal do Rio de Janeiro – Brasil

RESUMO

Este artigo descreve o desenvolvimento de um filtro ativo paralelo de baixo custo utilizado para a melhoria da qualidade de energia elétrica. O filtro permite a correção dinâmica do fator de potência e a compensação dinâmica dos harmônicos e da componente de sequência zero de corrente. O sistema de controle do filtro ativo é baseado na teoria p-q (teoria da potência instantânea), e foi implementado com um microcontrolador *standard* de 16 bits. Neste artigo a teoria p-q é apresentada de forma sucinta, o filtro ativo paralelo desenvolvido é descrito e são apresentados alguns resultados experimentais.

Palavras-Chave: Qualidade de Energia Elétrica, Filtro Ativo Paralelo, Compensação de Harmônicos, Correção de Fator de Potência.

1 - INTRODUÇÃO

O número de conversores eletrônicos de potência utilizados sobretudo na indústria, mas também pelos consumidores em geral, não pára de aumentar. Em resultado disso é possível observar uma crescente deterioração das formas de onda de corrente e tensão dos sistemas de potência.

A presença de harmônicos nas linhas de distribuição de energia origina problemas em equipamentos e componentes do sistema elétrico, nomeadamente:

- aumento das perdas (aquecimento), saturação, ressonâncias, vibrações nos enrolamentos e redução da vida útil de transformadores;
- aquecimento, binários pulsantes, ruído audível e redução da vida útil das máquinas elétricas rotativas;

- disparo indevido dos semicondutores de potência em retificadores controlados e reguladores de tensão;
- problemas na operação de relés de proteção, disjuntores e fusíveis;
- aumento nas perdas dos condutores elétricos;
- aumento considerável na dissipação térmica dos capacitores, levando à deterioração do dielétrico;
- redução da vida útil das lâmpadas e flutuação da intensidade luminosa (*flicker* – para o caso de ocorrência de subharmônicos);
- erros nos medidores de energia elétrica e instrumentos de medida;
- interferência electromagnética com equipamentos de comunicação;
- mau funcionamento ou falhas de operação em equipamentos eletrônicos ligados à rede elétrica, tais como computadores, controladores lógicos programáveis (PLCs), sistemas de controle comandados por microcontroladores, etc. (cabe lembrar que estes equipamentos controlam processos de fabrico).

Os prejuízos económicos resultantes destes problemas são muito elevados e por isso a questão da qualidade da energia elétrica entregue aos consumidores finais é hoje, mais do que nunca, objecto de grande preocupação [1].

Normas internacionais relativas ao consumo de energia elétrica, tais como IEEE 519, IEC 61000 e EN 50160, limitam o nível de distorção harmónica nas tensões com os quais os sistemas eléctricos podem operar, e impõem que os novos equipamentos não introduzam na rede harmónicos de corrente de amplitude superior a determinados valores [2-5]. É dessa forma evidenciada a importância em resolver os problemas dos harmónicos, quer para os novos

* Dept. Electrónica Industrial – Universidade do Minho – Campus de Azurém – 4800 Guimarães – Portugal
Tel.: +351 253604705 – Fax: +351 253510189

equipamentos a serem produzidos, quer para os equipamentos já instalados.

Os filtros passivos têm sido utilizados como uma solução para os problemas resultantes dos harmônicos de corrente, mas apresentam várias desvantagens, nomeadamente: apenas filtram as frequências para as quais foram previamente sintonizados; precisam frequentemente de ser sobredimensionados, uma vez que como não é possível limitar a sua operação a uma certa carga, acabam por absorver harmônicos do próprio sistema elétrico; podem ocorrer fenômenos de ressonância entre o filtro passivo e as outras cargas ligadas à rede, com resultados imprevisíveis; o dimensionamento dos filtros passivos deve ser coordenado com as necessidades de potência reativa da carga, sendo difícil fazê-lo de forma a evitar-se que o conjunto opere com fator de potência capacitivo em algumas condições de funcionamento.

Para ultrapassar as desvantagens dos filtros passivos, têm sido feitos esforços no sentido de desenvolver filtros ativos de potência. Estes filtros utilizam-se da electrónica de potência para produzir harmônicos que cancelem os harmônicos originados pelas cargas não lineares. Este tipo de equipamento é relativamente recente, havendo sido proposto em um grande número de diferentes topologias e sistemas de controle [6-8].

2 - TEORIA p-q

Esta teoria foi proposta em 1983 por *Akagi et al.* [9, 10] para o controle de filtros ativos de potência. O facto de ser baseada no domínio do tempo torna-a válida para operação em regime permanente ou transitório, bem como para formas de onda genéricas de tensões e correntes, permitindo o controle dos filtros ativos em tempo real. Seus cálculos correspondem apenas a operações algébricas, com excepção feita à necessidade de separar os valores médios e alternados das potências calculadas. Observa-se ainda que as grandezas desta teoria apresentam significados físicos que facilitam a compreensão da operação de qualquer sistema elétrico trifásico, desequilibrado ou não, com ou sem harmônicos. A teoria p-q foi desenvolvida inicialmente para sistemas trifásicos a 3 fios, com uma pequena menção a sistemas trifásicos com neutro. Posteriormente foi estendida de forma detalhada por *Watanabe et al.* [11] e *Aredes et al.* [12] para sistemas trifásicos a 4 fios, sendo apresentada desta forma a seguir.

Esta teoria faz uma transformação de um sistema de referência estacionário de coordenadas *a-b-c*,

para um sistema de coordenadas $\alpha\text{-}\beta\text{-}0$. Tal corresponde a uma transformação algébrica, conhecida como transformação de Clarke, que produz um sistema de referência também estacionário, onde as coordenadas $\alpha\text{-}\beta$ são ortogonais entre si e a coordenada 0 corresponde à componente de sequência zero. A transformação da teoria p-q aplicada às tensões das fases e às correntes de carga é dada por:

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

Potência instantânea de sequência zero:

$$p_0 = v_0 \cdot i_0 \quad (3)$$

Potência real instantânea:

$$p = v_\alpha \cdot i_\alpha + v_\beta \cdot i_\beta \quad (4)$$

Potência imaginária instantânea:

$$q \equiv v_\alpha \cdot i_\beta - v_\beta \cdot i_\alpha \quad (\text{por definição}) \quad (5)$$

A descrição do significado físico das potências da teoria p-q é feita a seguir, e apresentada na Fig. 1 para as coordenadas *a-b-c*:

\bar{p} = valor médio da potência real instantânea.

Corresponde à energia por unidade de tempo transferida da fonte de alimentação para a carga através dos eixos $\alpha\text{-}\beta$, ou seja, pelas fases *a-b-c* do sistema trifásico.

\tilde{p} = valor alternado da potência real instantânea.

Corresponde à energia por unidade de tempo trocada entre a fonte de alimentação e a carga, ora da fonte para a carga, ora da carga para a fonte, através dos eixos $\alpha\text{-}\beta$, ou seja, através das fases *a-b-c*.

q = potência imaginária instantânea. Corresponde a uma potência que obrigatoriamente tem que circular entre as coordenadas $\alpha\text{-}\beta$, ou seja, entre as fases *a-b-c* do sistema trifásico, sem que com isso haja qualquer transferência ou troca de energia entre a fonte e a carga. Esta potência dá normalmente origem a correntes indesejáveis. A potência imaginária instantânea pode também ser dividida em duas componentes, uma constante, \bar{q} , e outra alternada, \tilde{q} . Para alguns casos particulares de sistemas trifásicos, o valor de \bar{q}

corresponde à potência reativa trifásica convencional.

\bar{p}_0 = valor médio da potência instantânea de sequência zero. Corresponde à energia por unidade de tempo transferida da fonte para a carga através do eixo zero do sistema de coordenadas α - β -0, ou seja, através das componentes de sequência zero das tensões e correntes. Nas coordenadas a - b - c esta energia é transportada através do neutro e de uma ou mais fases.

\tilde{p}_0 = valor alternado da potência instantânea de sequência zero. Corresponde à energia por unidade de tempo trocada entre a fonte e a carga através do eixo zero do sistema de coordenadas α - β -0. Nas coordenadas a - b - c esta energia é transportada através do neutro e de uma ou mais fases.

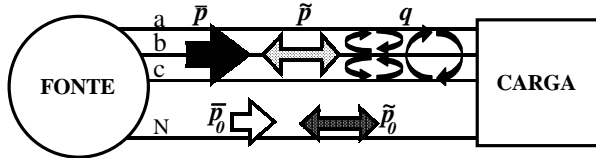


Fig. 1 – Potências da teoria p-q.

2.1 Controle de filtros ativos paralelos

A teoria p-q permite duas estratégias de controle para filtros ativos paralelos: “Potência Constante na Fonte” e “Correntes Senoidais na Fonte”.

Adotando-se a primeira estratégia todas as potências indesejáveis devem ser compensadas pelo filtro ativo, conforme mostrado na Fig. 2. Dessa forma a potência fornecida pela fonte será constante e igual a $\bar{p} + \bar{p}_0$.

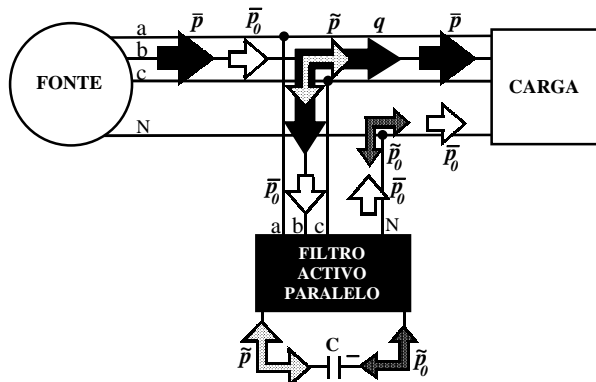


Fig. 2 – Compensação das potências indesejáveis.

Para que isto ocorra o filtro ativo paralelo deve produzir as seguintes correntes de compensação:

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha}^* \\ i_{c\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \cdot \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{p} - \bar{p}_0 \\ q \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$i_{c0}^* = i_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (i_a + i_b + i_c) \quad (7)$$

Observa-se que ao compensar toda a potência instantânea de sequência zero o valor de i_{c0}^* torna-se igual ao valor da corrente de sequência zero da carga (i_0). Esta expressão permite a compensação da corrente no neutro mesmo nos casos em que não exista potência de sequência zero (casos em que $v_0 = 0$).

Para obter-se as correntes de compensação no sistema trifásico aplica-se a transformação das coordenadas α - β -0 para as coordenadas a - b - c :

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \\ i_{cc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1 & 0 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{c0}^* \\ i_{c\alpha}^* \\ i_{c\beta}^* \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$i_{cn}^* = -(i_{ca}^* + i_{cb}^* + i_{cc}^*) \quad (9)$$

Os cálculos da teoria p-q para a “Estratégia para Potência Constante na Fonte” são resumidos na Fig. 3, onde é ainda apresentado um método simples para a regulação da tensão no capacitor do filtro ativo paralelo.

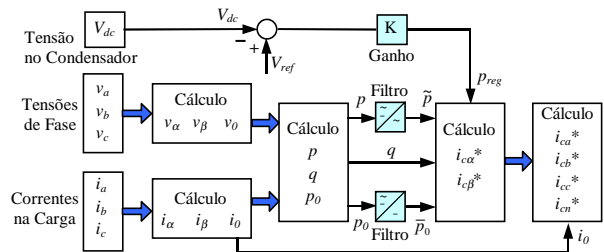


Fig. 3 – Estratégia para potência constante na fonte.

Para casos em que as tensões do sistema trifásico sejam senoidais e equilibradas as duas estratégias de controle para o filtro ativo paralelo levam a resultados idênticos, que são os seguintes (para qualquer tipo de carga):

- as correntes na fonte tornam-se também senoidais e equilibradas, e em fase com as tensões (a fonte passa a ver uma carga simétrica e puramente resistiva);
- a corrente no neutro é tornada nula (mesmo os harmônicos de 3ª ordem são compensados);
- a potência na fonte é tornada constante.

Caso as tensões do sistema trifásico não sejam senoidais e/ou equilibradas, para que as correntes na fonte se tornem senoidais e

equilibradas é necessário utilizar a “Estratégia para Correntes Senoidais na Fonte”, onde os cálculos são feitos a partir dos valores da componente de sequência positiva da fundamental das tensões [13, 14].

3 - FILTRO ATIVO DESENVOLVIDO

A Fig. 4 apresenta o esquema elétrico do filtro ativo desenvolvido. Basicamente é composto por um inversor e pelo sistema de controle (controlador). A partir da medida dos valores instantâneos das tensões das fases (v_a, v_b, v_c) e das correntes na carga (i_a, i_b, i_c), o controlador calcula as correntes de compensação de referência ($i_{ca}^*, i_{cb}^*, i_{cc}^*, i_{cn}^*$) para o inversor. O inversor produz as correntes de compensação ($i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}, i_{cn}$).

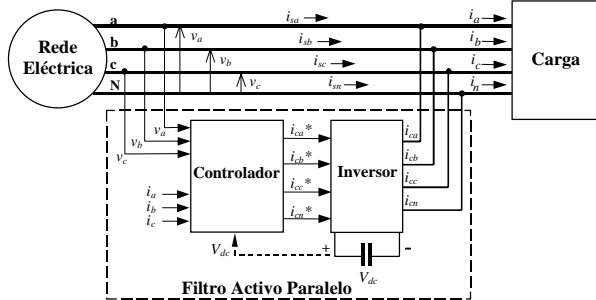


Fig. 4 – Esquema do filtro ativo paralelo desenvolvido.

A teoria p-q permitiu a implementação do sistema de controle do filtro ativo paralelo de uma forma simples e eficaz, uma vez que os cálculos consistem apenas em operações algébricas que podem ser realizadas com aritmética do tipo inteiro. Foi assim possível implementar o controlador digital do filtro ativo utilizando um microcontrolador *standard* de 16 bits (Intel 80296SA) com um mínimo de *hardware* adicional (Fig. 5). Os valores das tensões e correntes necessários aos cálculos são obtidos com ADCs de 8 bits.

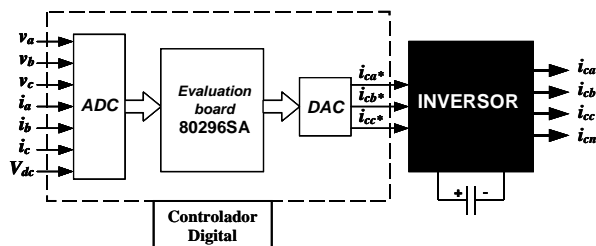


Fig. 5 – Diagrama de blocos do controlador digital

A Fig. 6 mostra, de forma detalhada, o inversor implementado. Consiste essencialmente de um inversor do tipo fonte de tensão com controle de corrente, que possui apenas um capacitor no seu lado *DC*. O inversor é acoplado às fases e neutro da rede elétrica através de indutâncias. É ainda utilizado um filtro passa-baixo à sua saída. O inversor utiliza IGBTs com frequência máxima de comutação de 20 kHz.

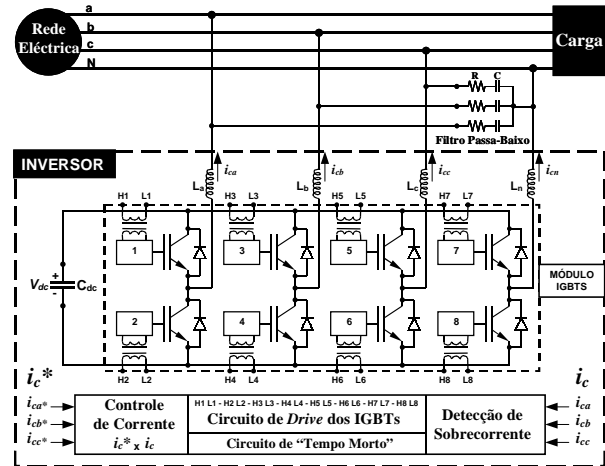


Fig. 6 – Detalhes do inversor do filtro ativo paralelo.

As principais características do filtro ativo paralelo desenvolvido são:

- compensação dinâmica de quaisquer harmônicos de corrente;
- correção dinâmica do fator de potência;
- compensação dinâmica de correntes de sequência zero;
- utiliza apenas um conversor de potência com um único capacitor do lado *DC*;
- sistema de controle digital implementado com microcontrolador e baseado na teoria p-q;
- sistema de baixo custo.

4 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

As próximas figuras apresentam formas de onda obtidas com um osciloscópio, que ilustram o desempenho do filtro ativo paralelo desenvolvido para diferentes condições de operação. De forma a facilitar a compreensão, são apresentados os resultados apenas para a fase *a*, sendo mostradas a corrente de compensação de referência (i_{ca}^*), a corrente de compensação produzida pelo filtro ativo (i_{ca}), a corrente na fonte (i_{sa}), e a tensão do sistema elétrico (v_a).

As figuras 7 a 9 apresentam o transitório de ligação do filtro ativo para 3 diferentes cargas do sistema trifásico: carga RL; carga RL e retificador

trifásico; e apenas retificador trifásico. Para os 3 casos observa-se que, após a entrada em operação do filtro ativo, a corrente na fase a da fonte torna-se senoidal e em fase com a tensão.

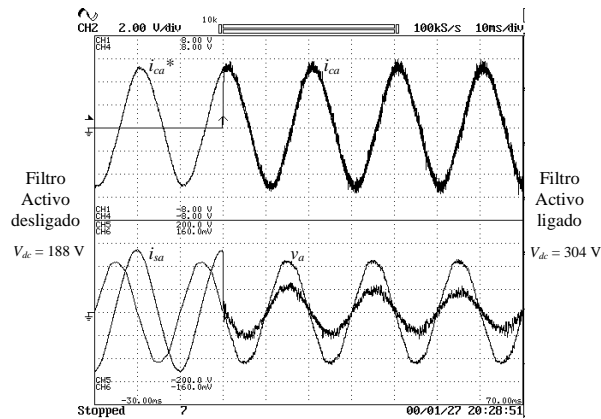


Fig. 7 – Operação com carga RL.

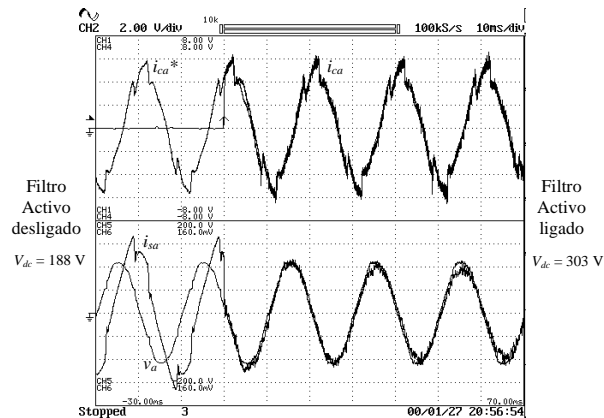


Fig. 8 – Operação com carga RL e retificador trifásico.

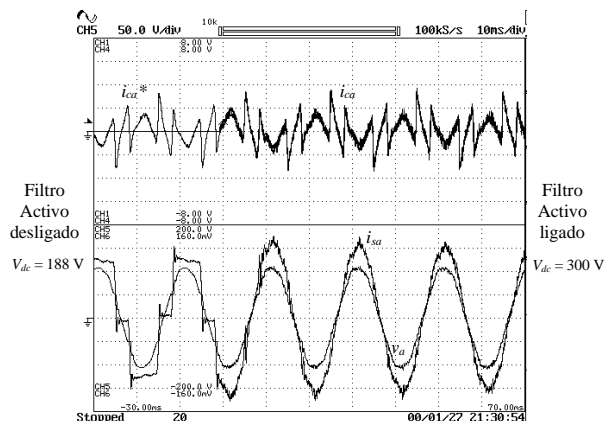


Fig. 9 – Operação com retificador trifásico.

A Fig. 10 refere-se à mesma condição de operação da Fig. 9, porém agora mostram-se separadamente a tensão do sistema e a corrente na fonte para o filtro ativo respectivamente desligado e ligado. Dessa forma é possível

visualizar melhor o desempenho em regime permanente do filtro ativo, e notar ainda que a operação deste evita o aparecimento de cortes na forma de onda da tensão, que ocorrem devido as variações bruscas das correntes na carga.

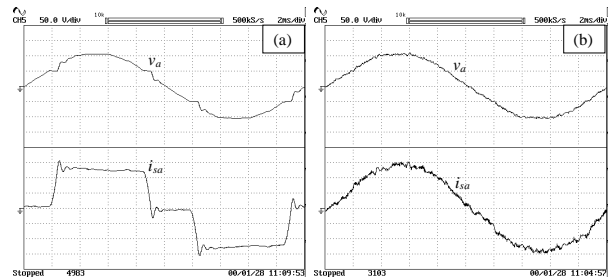


Fig. 10 – Operação com retificador trifásico: (a) Filtro ativo desligado; (b) Filtro ativo ligado.

A Fig. 11 ilustra a resposta dinâmica do filtro ativo paralelo quando do transitório de ligação de uma nova carga. Observa-se que em meio ciclo da tensão da rede o filtro ativo tem um novo valor de corrente de compensação, e volta a operar em regime permanente, compensando também a nova carga.

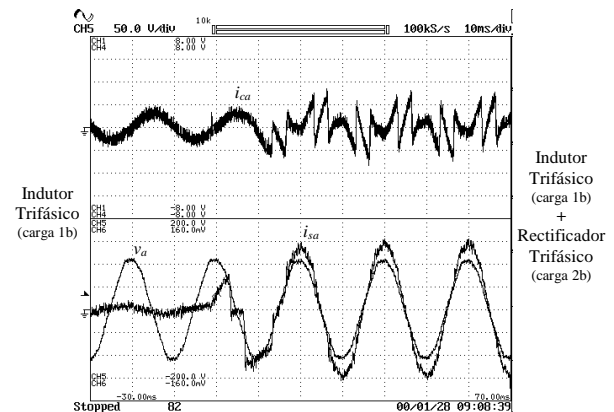


Fig. 11 – Resposta dinâmica do filtro ativo para aplicação de uma nova carga.

5 - CONCLUSÕES

A qualidade da energia elétrica é um fator fundamental para o bom desempenho de praticamente todas as atividades econômicas. O presente artigo trata do desenvolvimento de um filtro ativo de potência do tipo paralelo, que pode ser utilizado em subestações de distribuição, indústrias e prédios comerciais ou residenciais, para resolver problemas relacionados com harmônicos, desequilíbrio de cargas e compensação do fator de potência.

A teoria p-q, utilizada no sistema de controle do filtro ativo, mostra-se bastante eficaz, e ao mesmo tempo de tal forma simples que permite a implementação do controlador digital com um microcontrolador *standard*, de baixo custo, e um mínimo de *hardware* adicional.

O filtro ativo desenvolvido apresenta boa resposta dinâmica e em regime permanente, e pode ser melhor para a compensação de fator de potência e de harmônicos de corrente do que as soluções convencionais (bancos de capacitores para a correção de fator de potência e filtros passivos para a compensação de harmônicos de corrente). Além disso, o filtro ativo paralelo pode compensar os desequilíbrios das cargas, eliminando a corrente no neutro. Dessa forma, uma carga não linear, desequilibrada e com consumo de reativos passa a ser vista pela fonte como uma carga resistiva simétrica (para o caso das tensões serem senoidais e equilibradas).

A implementação de filtros ativos paralelos com controle digital baseado na teoria p-q mostra ser uma solução econômica. Este é um aspecto importante, pois pode permitir a utilização de vários filtros ativos próximos às cargas mais problemáticas de uma instalação, evitando-se a circulação de harmônicos de corrente, correntes reativas e correntes de neutro no sistema elétrico.

6 - REFERÊNCIAS

- [1] R. Redl, P. Tenti e J. Van Wyk, "Power Electronics Polluting Effects", *IEEE Spectrum*, Maio 1997, pp. 33-39.
- [2] IEEE Standard 519-1992, Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, 1992.
- [3] EN 50160, Caractéristiques de la Tension Fournie par les Réseaux Publics de Distribution, 1994.
- [4] IEC 61000-3-2, Limits for Harmonic Current Emissions (Equipment Input Current ≤ 16 A per phase), Amendment 2, 1998.
- [5] IEC 61000-3-4, Limitation of Emission of Harmonic Currents in Low-Voltage Power Supply Systems for Equipment with Rated Current Greater than 16 A, 1998.
- [6] M. Aredes, "Active Power Line Conditioners", Tese de Doutorado, Technische Universität Berlin, 1996.
- [7] H. Akagi, "Trends in Active Power Line Conditioners," *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 9, no. 3, Maio 1994, pp. 263-268.
- [8] J. Afonso, M. Aredes, E. Watanabe e J. Martins, "Shunt Active Filter for Power Quality Improvement", Conference UIE 2000, Lisboa, 2000, pp. 683- 691.
- [9] H. Akagi, Y. Kanazawa e A. Nabae, "Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits", *IPEC'83 - Int. Power Electronics Conf.*, Tokio, 1983, pp. 1375-1386.
- [10] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae, "Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices without Energy Storage Components", *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 1A-20, no.3, Maio/Jun. 1984, pp. 625-630.
- [11] E. H. Watanabe, R. Stephan e M. Aredes "New Concepts of Instantaneous Active and Reactive Powers in Electrical Systems with Generic Loads", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 8, no. 2, Abril 1993, pp. 697-703.
- [12] M. Aredes e E. H. Watanabe "New Control Algorithms for Series and Shunt Three-Phase Four-Wire Active Power Filters", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 10, no. 3, Julho 1995, pp. 1649-1656.
- [13] J. Afonso, "Filtro Ativo Paralelo com Controlo Digital para a Melhoria da Qualidade de Energia Eléctrica", Tese de Doutorado, Universidade do Minho, 2000.
- [14] J. Afonso, C. Couto e J. Martins, "Active Filters with Control Based on the p-q Theory", *IEEE Industrial Electronics Society Newsletter*, vol. 47, nº 3, Set. 2000, pp. 5-10.