

## Filtros Activos de Potência para Melhoria da Qualidade de Energia Eléctrica

JOÃO L. AFONSO, JOÃO SEPÚLVEDA, JÚLIO S. MARTINS

### 1. Introdução

O número de conversores electrónicos de potência utilizados, sobretudo na indústria, mas também pelos utilizadores em geral, não pára de aumentar. Em resultado disso é possível observar uma crescente deterioração das formas de onda da tensão e da corrente dos sistemas de potência. A razão é simples: de acordo com a Figura 1, que representa um sistema monofásico, a tensão disponível aos terminais dos receptores seria,

$$v_L = v_s - 2 \cdot \Delta v$$

onde  $\Delta v$  é a queda de tensão nas impedâncias das linhas de distribuição de energia eléctrica. Contudo, a corrente de entrada dos conversores electrónicos de potência (como a de qualquer carga não linear) não é sinusoidal, mesmo que a tensão de alimentação ( $v_s$ ) o seja. Logo a corrente na fonte,

$$i_s = i_{L1} + i_{L2}$$

possui harmónicos que fazem com que a queda de tensão  $\Delta v$  e, em consequência disso, a tensão aos terminais dos receptores, não seja sinusoidal.

Para além da distorção das formas de onda, a presença de harmónicos nas linhas de transporte e distribuição de energia origina maiores perdas, problemas de interferência electromagnéticas com equipamentos de comunicação, bem como o mau funcionamento ou falha de outros equipamentos electrónicos ligados à rede de energia eléctrica. Existem dados provenientes de diversas fontes que indicam que os prejuízos económicos resultantes destes problemas são muito elevados e por isso a questão da qualidade da energia eléctrica entregue aos

consumidores finais é hoje, mais do que nunca, objecto de grande preocupação.

Normas internacionais relativas ao consumo de energia eléctrica impõem que os novos equipamentos não introduzam na rede harmónicos de amplitude superior a determinados valores. Entretanto é importante resolver os problemas causados pelos equipamentos que já estão instalados.

Os filtros passivos têm sido utilizados como uma solução para os problemas resultantes dos harmónicos de corrente, mas apresentam várias desvantagens, nomeadamente: apenas filtram as frequências para as quais foram previamente sintonizados; podem ocorrer fenómenos de ressonância entre o filtro passivo e as outras cargas ligadas à rede, com resultados imprevisíveis.

Para ultrapassar estas desvantagens, têm sido feitos recentemente esforços no sentido de desenvolver filtros activos de potência.

### 2. Filtro Activo Paralelo

O filtro activo de potência do tipo paralelo tem como função compensar os harmónicos das correntes e o factor de potência da carga. Dessa forma, as correntes à montante do filtro activo tornam-se sinusoidais e em fase com as tensões da rede eléctrica. Ou seja, a rede eléctrica passa a ver o conjunto constituído pelo filtro activo e pelas cargas como se fosse uma carga linear (sem harmónicos de corrente) e com factor de potência unitário.

A Figura 2 apresenta o mesmo sistema eléctrico da figura 1, mas agora operando em conjunto com um filtro activo paralelo. Assim todos os harmónicos de corrente da carga não-linear e os reactivos de ambas as cargas são compensados. Dessa forma, a corrente fornecida pela

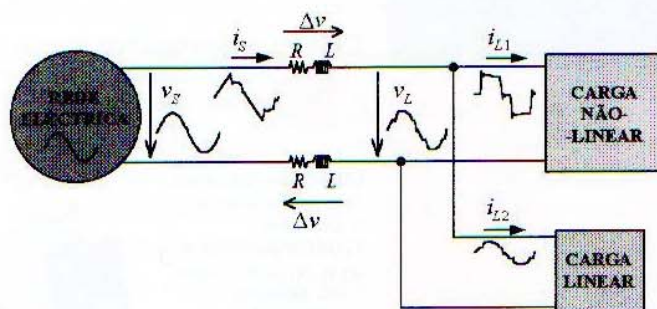


Fig. 1. Problemas causados pela ligação à rede de uma carga não linear.

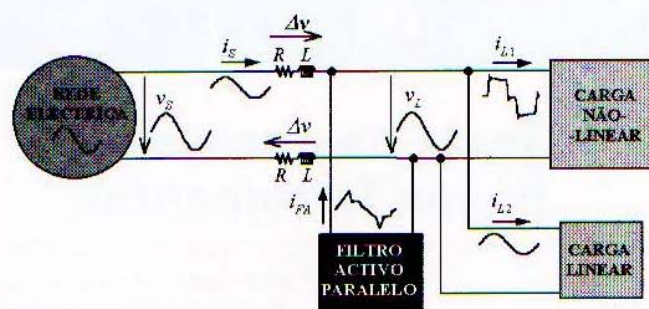


Fig. 2. Solução recorrendo a um filtro activo paralelo.

rede eléctrica ( $i_s$ ) torna-se sinusoidal e em fase com a tensão de entrada, passando ainda a ter um menor valor eficaz. Com isto a queda de tensão  $v$  passa a ser sinusoidal, bem como a tensão e a corrente nos receptor linear.

Na Figura 3 apresenta-se o esquema eléctrico de um filtro activo paralelo trifásico, que além de compensar os harmónicos e reactivos de corrente, também permite equilibrar as correntes das três fases, eliminando assim a corrente no neutro da rede eléctrica. Este filtro é, basicamente, composto por um inversor fonte de tensão com controlo de corrente e o respectivo controlador. O controlador, a partir da medida dos valores instantâneos das tensões das fases ( $v_a, v_b, v_c$ ) e das correntes na carga ( $i_a, i_b, i_c$ ), produz as correntes de compensação de referência ( $i_{ca}^*, i_{cb}^*, i_{cc}^*, i_{cn}^*$ ) para o inversor. O inversor injecta as correntes de compensação ( $i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}, i_{cn}$ ) requeridas pela carga, de forma que as correntes nas fases da rede eléctrica ( $i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$ ) passam a ser sinusoidais e equilibradas, fazendo com que a corrente no neutro da rede eléctrica ( $i_{sn}$ ) assuma um valor nulo.

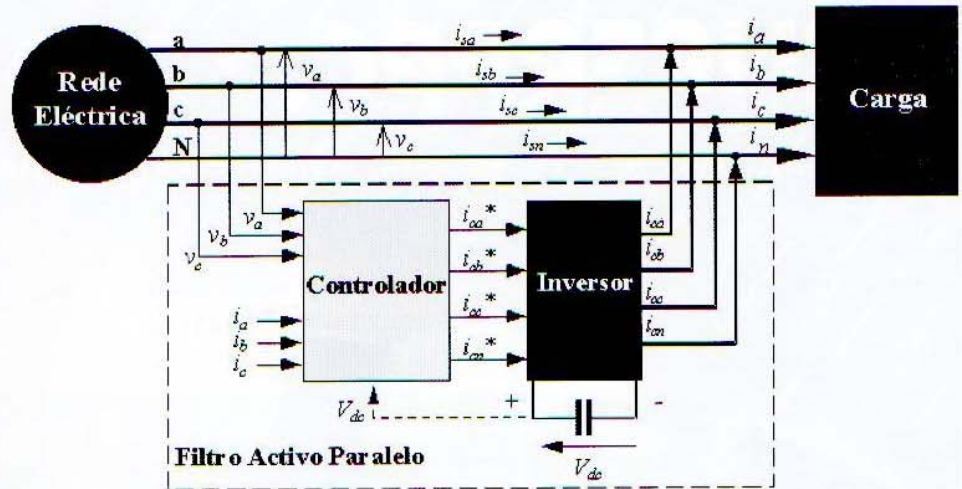


Figura 3: Filtro activo paralelo para um sistema trifásico

### 3. Filtro activo série

O filtro activo de potência do tipo série (Figura 4) é o dual do filtro activo paralelo. Sua função é compensar as tensões da rede eléctrica ( $v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}$ ), para os casos em que estas contenham harmónicos, de forma a tornar as tensões na carga ( $v_a, v_b, v_c$ ) sinusoidais.

### 4. Teoria p-q

Existem várias teorias onde se pode basear a implementação dos sistemas de controlo dos filtros activos. Destas teorias destaca-se a “teoria geral da potência reactiva instantânea em sistemas trifásicos”, desenvolvida pelo Prof. Akagi, e aqui designada por teoria p-q. [1, 2]. Basicamente esta teoria consiste numa transformação de coordenadas das tensões e correntes dos eixos a-b-c (sistema trifásico normal) para os eixos  $\alpha$ - $\beta$ -0, e do sub-

sequente cálculo das potências nesses novos eixos:  $p$  (potência real instantânea),  $q$  (potência imaginária instantânea) e  $p_o$  (potência de sequência zero). Após análise à teoria p-q, conclui-se que, os filtros activos atingem seus objectivos através da compensação das potências  $q, p_o$ , e do valor alternado da potência  $p$ . A teoria p-q simplifica os cálculos necessários aos controladores dos filtro activos, possibilitando dessa forma a implementação dos mesmos com microcontroladores *standard*.

### 5. Conclusões

A qualidade da energia eléctrica é um factor fundamental para um bom desempenho de, praticamente, todas actividades económicas. O Grupo de Electrónica de Potência e Actuadores do Departamento de Electrónica Industrial da Universidade do Minho concentra esforços no desenvolvimento de filtros activos que possam ser usados em subestações de distribuição, indústrias e prédios comerciais, para resolver problemas relacionados com harmónicos, desequilíbrio de cargas e compensação do factor de potência. Neste âmbito estão em curso dois projectos de doutoramento, um deles em fase de conclusão. Foi desenvolvido um filtro de potência activo do tipo paralelo que utiliza um controlador totalmente digital baseado na teoria p-q, cujas características principais são as seguintes:

- Correção dinâmica do factor de potência.
- Compensação dinâmica de quaisquer harmónicos de corrente para frequências até 5 kHz.

- Compensação dinâmica de correntes de sequência zero (desequilíbrio de fases).
- Utiliza apenas um conversor de potência – um inversor com um único condensador do lado *DC*.
- Andar de potência a IGBT's capaz de compensar harmônicos em sistemas trifásicos para potências até cerca de 75 kVA (para o protótipo desenvolvido em laboratório).

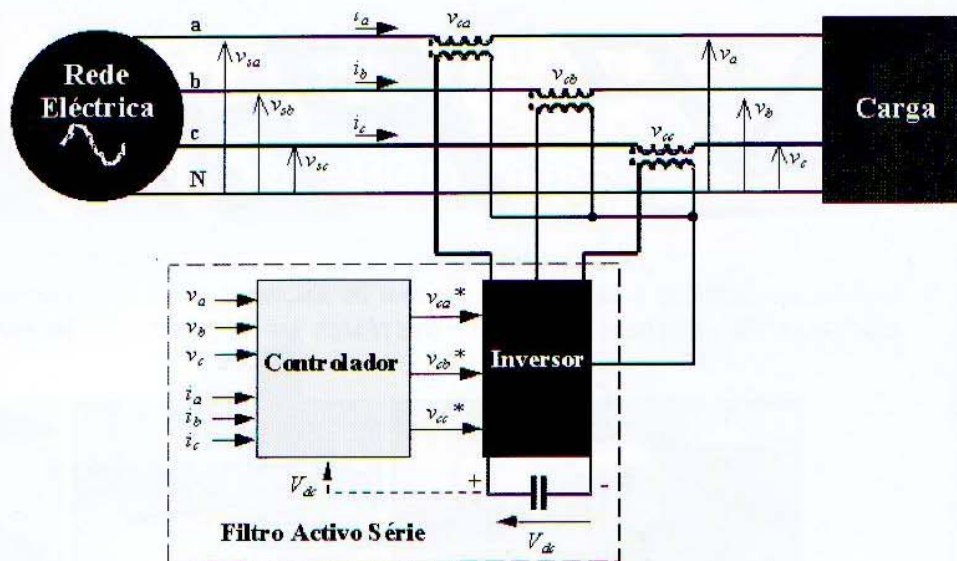


Fig. 4. Filtro ativo série para um sistema trifásico.

O sistema de controlo baseia-se na utilização de um microcontrolador *standard* (o 80296SA da *Intel*), conforme se mostra na Figura 5. A figura 6 detalha o andar de potência do filtro activo. Trata-se de um inversor fonte de tensão com controlo de corrente, que possui apenas um condensador no seu lado *DC*. A tensão do condensador ( $V_{dc}$ ) também é controlada por forma a que seja mantida praticamente constante durante a operação do filtro activo. O inversor é constituído por um módulo de IGBTs, por um circuito que implementa o controlo de corrente (gerando os sinais de comando dos IGBTs a partir da comparação das correntes de referência com as correntes de compensação) e ainda por um circuito de *drive* e protecção para os IGBT's, que inclui geração de "tempo morto" (para evitar curto-circuitos provocados

pela condução simultânea de IGBTs de um mesmo ramo) e detecção de sobrecorrente.

A Figura 7 ilustra resultados experimentais do filtro activo paralelo desenvolvido. É possível observar, para a fase *a*, a tensão e a corrente na rede eléctrica, bem como as correntes de referência ( $i_{ca}^*$ ) e de compensação ( $i_{ca}$ ) do filtro activo (os valores para as fases *b* e *c* são idênticos, apenas desfasados de  $-120^\circ$  e  $+120^\circ$ ). Observa-se que ao ser ligado, o filtro activo passa a produzir uma corrente de compensação igual ao valor da sua corrente de referência, compensando os harmónicos e os reactivos da corrente da carga, e fazendo com que a corrente da rede eléctrica fique sinusoidal e em fase com a tensão.

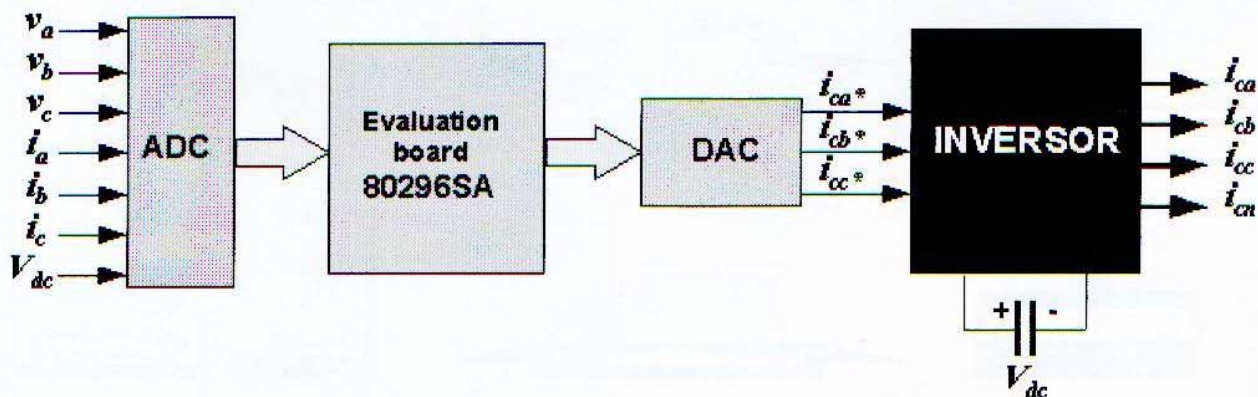


Fig. 5. Diagrama de blocos do sistema de controlo digital implementado.

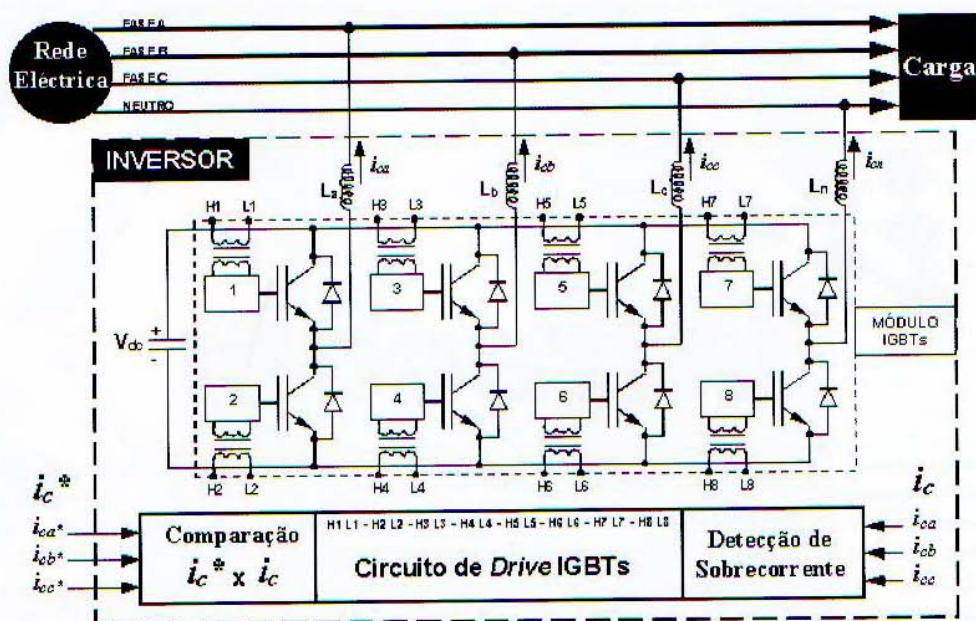


Fig. 6: Detalhe do inversor do filtro activo paralelo implementado.

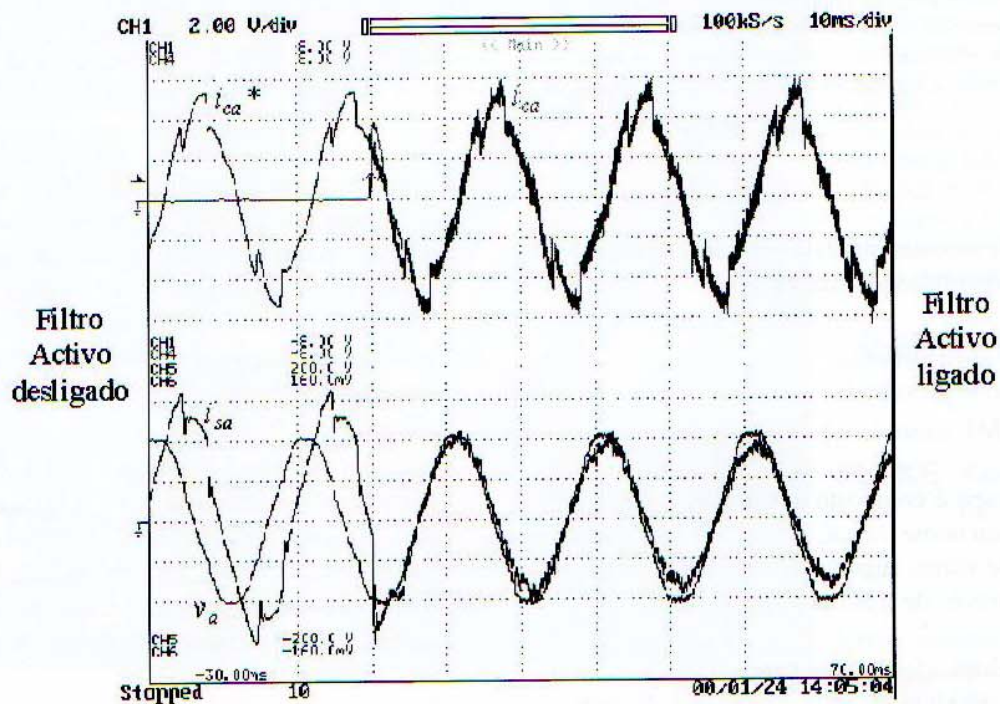


Fig. 7. Comportamento do filtro paralelo (resultados experimentais).

## Referências

- [1] H. Akagi, Y. Kanazawa and A. Nabae, "Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits", IPEC'83 - Int. Power Electronics Conf., Tokyo, Japan, 1983, pp. 1375-1386.
- [2] M. Aredes, 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, July 1995, pp. 1.