

# Compensador de Tensão do Tipo Activo Série Controlado por Computador Pessoal

M. João Sepúlveda <sup>(1)</sup>, João L. Afonso <sup>(2)</sup>, Júlio S. Martins <sup>(3)</sup>

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

<sup>(1)</sup> mjs@dei.uminho.pt; <sup>(2)</sup> jla@dei.uminho.pt; <sup>(3)</sup> jmartins@dei.uminho.pt

## Resumo

Os filtros activos do tipo série são equipamentos de electrónica de potência capazes de compensar alguns dos problemas de qualidade de energia dos sistemas eléctricos, nomeadamente: interrupções, sobretensões e subtensões momentâneas, distorção da tensão causada por harmónicos, desequilíbrio de tensões em sistemas trifásicos, flutuação de tensão (*flicker*), sobretensões e subtensões momentâneas, e podem também realizar a correcção dinâmica do factor de potência.

O objectivo principal deste trabalho consistiu no estudo, simulação, desenvolvimento, e teste de um filtro activo série com sistema de controlo implementado num computador pessoal (PC) munido de uma placa de aquisição de dados genérica para o barramento PCI. Esta opção justifica-se devido ao seu baixo custo, elevada capacidade de processamento e versatilidade.

Neste artigo apresenta-se o esquema eléctrico do compensador activo série desenvolvido, o seu algoritmo de controlo e resultados experimentais obtidos.

**Palavras Chave:** Filtro Activo Série; Filtro Activo de Potência; Qualidade de Energia Eléctrica; Controlo por Computador; Controlo em Tempo Real.

## 1. Introdução

A utilização cada vez mais intensa, tanto a nível industrial e comercial, como a nível doméstico, de equipamentos electrónicos dos mais variados tipos e potências, de sistemas de iluminação recorrendo a lâmpadas de descarga, e de outros tipos de cargas de natureza não linear, tem vindo a criar problemas de qualidade da energia eléctrica cada vez maiores, relacionados com a distorção de correntes e tensões dos sistemas eléctricos. Estes problemas devem ser resolvidos, pois os harmónicos causam problemas a curto e a longo prazo, tais como funcionamento incorrecto de alguns equipamentos mais sensíveis e diminuição do tempo de vida útil de grande parte dos equipamentos devido ao aquecimento excessivo provocado pelos harmónicos [1].

Os filtros activos de potência são equipamentos electrónicos capazes de compensar alguns dos problemas de qualidade de energia eléctrica clássicos (correcção de factor de potência, por exemplo), bem como alguns dos problemas identificados mais recentemente (distorção de tensões e correntes, por exemplo).

## 2. Filtro Activo Série

As cargas não lineares consomem uma corrente que não é sinusoidal, mesmo que a tensão que lhes está aplicada o seja. A corrente que consomem é constituída por uma componente fundamental e por harmónicos cujas amplitudes e frequências dependem da

própria carga. As cargas deste tipo têm vindo a aumentar nos últimos tempos. As lâmpadas de descarga têm um rendimento energético muito superior às de incandescência, sendo por isso cada vez mais utilizadas, principalmente em conjunto com os balastros electrónicos. Os equipamentos electrónicos são também cada vez mais utilizados e consomem, em geral, diversos harmónicos de corrente. São exemplos disso os variadores de velocidade para motores de indução, os televisores, os computadores pessoais, e todo um infindável conjunto de equipamentos de escritório e industriais. O consumo de corrente distorcida reflecte-se também numa distorção da tensão, tal como o exemplificado na Fig. 1. Partindo do princípio de que a rede eléctrica fornece uma tensão sem distorção, e introduzindo uma carga não linear, esta consome uma corrente não sinusoidal. As linhas eléctricas possuem impedância, logo, a corrente distorcida vai provocar uma queda de tensão também distorcida nas linhas. Ao ligar-se uma carga linear nas proximidades, esta vai ser alimentada com uma tensão que não é sinusoidal.

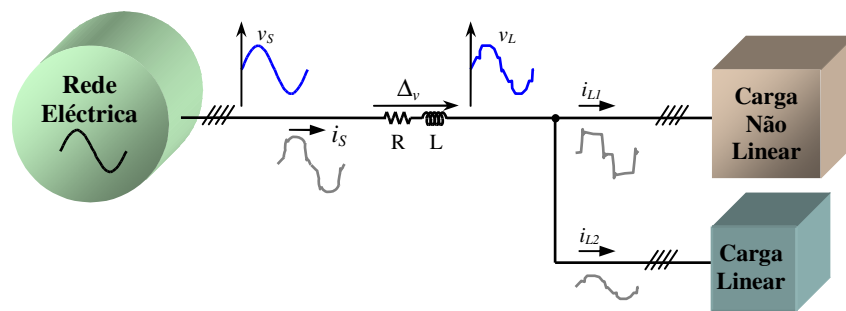


Fig.1 – Carga linear ligada nas proximidades de uma carga não linear.

O filtro activo série é um dispositivo electrónico construído de forma a compensar a distorção das tensões da rede, de modo que uma carga situada a jusante possua a tensão aos seus terminais isenta de distorção e com uma amplitude de valor correcto. No caso de se tratar de um sistema polifásico, os ângulos de defasamento entre as tensões devem ser também compensados de forma a serem todos iguais entre tensões adjacentes.

### 3. O Compensador Série Desenvolvido

Um sistema de compensação do tipo série deve comportar-se como uma fonte de tensão capaz de estabelecer aos seus terminais uma diferença de potencial tal que, somada à tensão da rede, perfaça a tensão que se pretende fornecer a uma determinada carga. Assim sendo, o compensador série deve ser intercalado entre a fonte (rede eléctrica) e a carga. A Fig. 2 mostra o diagrama de blocos do sistema desenvolvido.

A rede eléctrica, transformador abaixador de tensão e uma impedância constituída por uma resistência e por uma indutância, representam o modelo de um sistema de eléctrico, que alimenta duas cargas: uma não linear, que causa distorção da tensão, e uma carga linear crítica (sensível), que se pretende que tenha uma alimentação regulada e isenta de harmónicos de tensão. O inversor comutado, alimentado por uma fonte de corrente contínua, juntamente com o transformador de isolamento (de relação 3:1), constituem o andar de potência do filtro activo série. A necessidade da existência desse transformador prende-se com o facto de ser necessário ligar circuitos com potenciais eléctricos diferentes. A fonte de corrente contínua utilizada neste caso é um rectificador não controlado, que é alimentado pela própria rede eléctrica. Os blocos do canto superior

esquerdo da Fig. 2 constituem a parte de comando do filtro activo série. O sistema de controlo é implementado através de um computador pessoal e os outros blocos fazem a interface do computador com o andar de potência. Na Fig.3 pode ver-se uma panorâmica da bancada de trabalho, incluindo o osciloscópio digital, e os reóstatos que emulam uma carga linear crítica. No canto inferior esquerdo da Fig. 3 podem ver-se também a caixa de terminais do sistema de controlo e o inversor (acoplado a um dissipador).

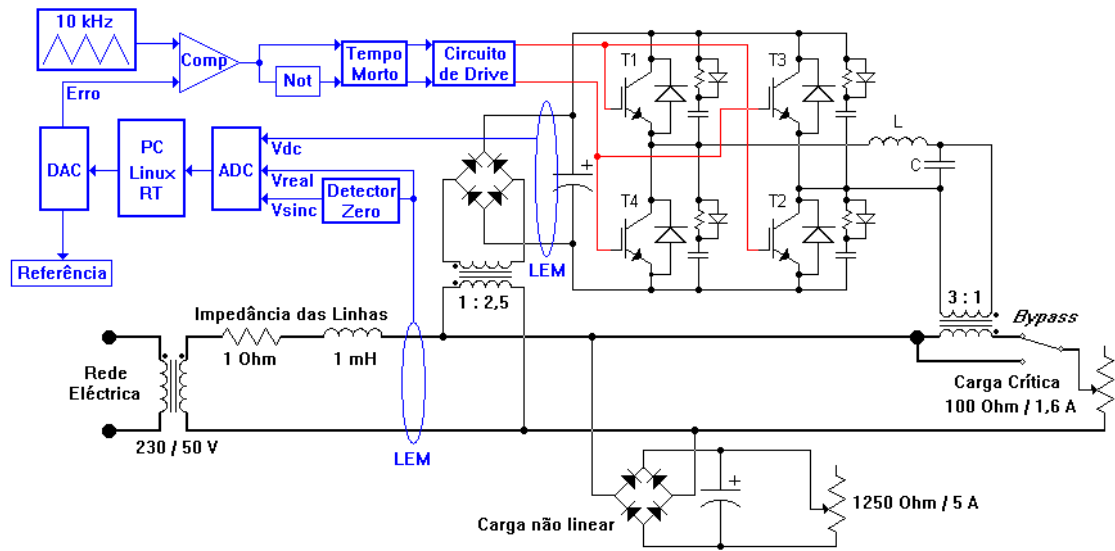


Fig.2 – Diagrama de blocos do filtro activo série (monofásico).

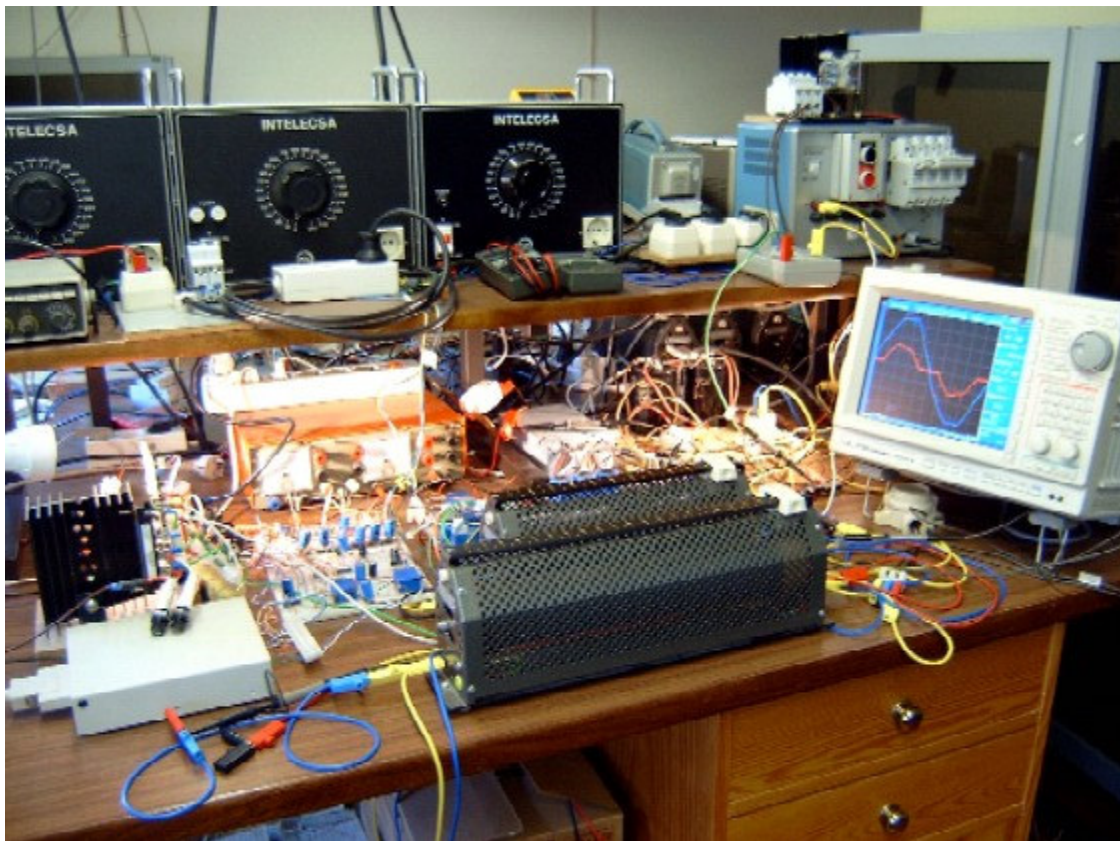


Fig.3 – Vista da bancada de trabalho e osciloscópio digital.

#### 4. O Sistema de Controlo

O *hardware* do controlador implementado com computador pessoal consiste num computador vulgar munido de um processador *PentiumIII@733MHz* onde foi colocada uma placa de aquisição de dados de uso geral com interface PCI. A placa utilizada é o modelo PCI-MIO-16E-4, fabricada pela *National Instruments* [2].

A solução proposta baseia-se no sistema operativo *Linux*, munido do módulo de tempo real *Realtime Application Interface (RTAI)*, que utiliza um controlador de dispositivo especialmente desenvolvido para aplicações de controlo em tempo real, o *Control and Measurement Device Interface (Comedi)*.

O primeiro sistema de controlo a ser ensaiado foi baseado na teoria p-q, apresentada pela primeira vez por *Akagi et. al.* para sistemas trifásicos sem neutro em 1983 [3] e mais tarde adaptada a sistemas trifásicos com neutro por *Watanabe et. al.* [4]. Embora esta teoria de controlo seja muito simples de aplicar no controlo de filtros activos paralelos, que servem para fazer a filtragem das correntes, torna-se bastante mais complicada quando se pretende fazer o controlo de filtros activos série destinados a compensar a distorção das tensões do sistema eléctrico, pois obriga a efectuar a determinação das componentes directas de frequência fundamental das tensões do sistema, sendo para isso necessário recorrer à implementação de um filtro vectorial adaptativo [5], ou de um circuito *phase locked loop* [6], para as determinar.

O algoritmo de controlo adoptado na solução final baseia-se no controlo por comparação, ou seja: mede-se a tensão existente na rede, compara-se com o valor pretendido (referência), e o sistema de controlo gera um sinal de erro, que é a diferença dos dois anteriores.

A tensão de referência é gerada no computador pessoal a partir de uma tabela de valores da função seno sincronizada com a tensão da rede. Isto exige a determinação das passagens por zero da tensão da rede, mas o processo é simples, pois as tensões costumam apresentar formas de onda sem grandes variações, principalmente nos momentos de passagem pelo zero, onde se faz a detecção.

Este tipo de sistema de controlo foi anteriormente proposto para o controlo de filtros activos paralelos [7], no entanto, adapta-se melhor ao sistema de controlo de filtros activos série: no primeiro caso pretende-se correntes sinusoidais na carga, mas os sinais de referência (correntes desejadas) dependem da própria carga, sabendo-se apenas que devem ser sinusoidais; no segundo caso, os sinais de referência (tensões desejadas) são perfeitamente conhecidos, pois são os valores nominais disponibilizados pelo fornecedor de energia eléctrica (230V, 50Hz, por exemplo).

#### 5. Resultados Experimentais

Fizeram-se alguns testes práticos ao funcionamento do filtro activo série como compensador de tensões, cujos resultados são apresentados na figuras seguintes [8]. Em todas as figuras, a forma de onda da tensão de referência está a verde, a tensão distorcida pela carga não linear a castanho, a tensão de compensação gerada pelo filtro a vermelho e a tensão aplicada à carga crítica a azul. O espectro situado à direita de cada uma das figuras é respeitante à tensão aplicada na carga crítica, em cada uma das situações. A tensão de referência é 48V, com uma frequência de 50Hz.

No primeiro teste emulou-se uma situação de elevada taxa de distorção harmónica total ( $THD = 13,2\%$ ) e grande abaixamento da tensão de alimentação (para 37,2V). As figuras 4 e 5 mostram as formas de onda e os espectros, antes e depois de se ligar o filtro. Como se pode verificar, a tensão subiu para 48,2V e a  $THD$  desceu para 1,8%.

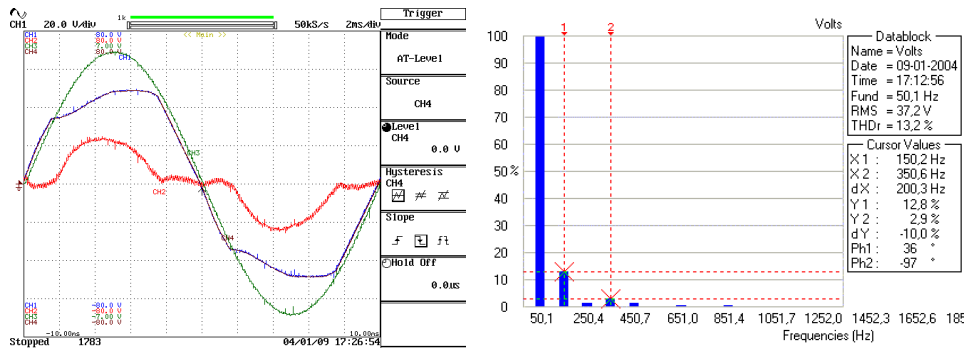


Fig.4 – Distorção inicial elevada: tensão na rede, tensão de compensação, tensão na carga e seu espectro, antes da compensação.

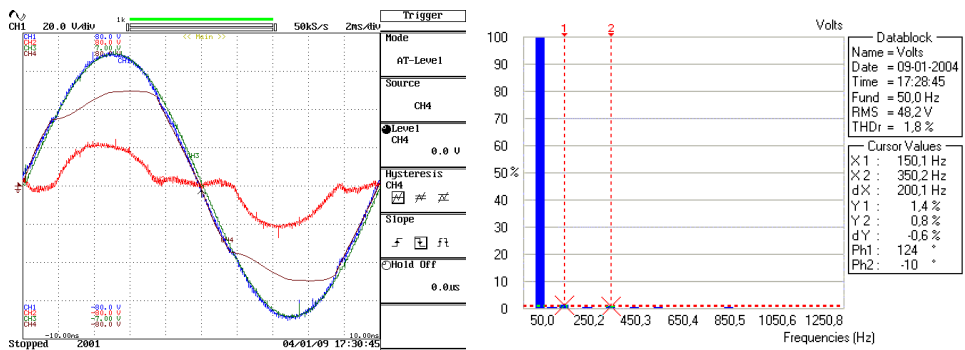


Fig.5 – Distorção inicial elevada: tensão na rede, tensão de compensação, tensão na carga e seu espectro, depois da compensação.

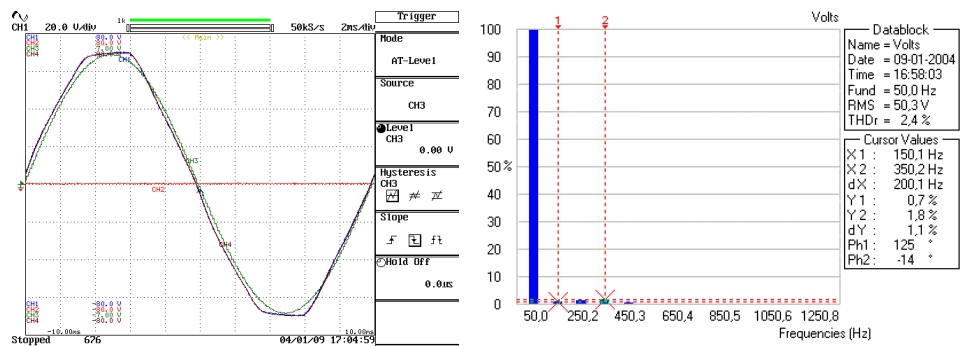


Fig.6 – Compensação da distorção habitual da rede: tensão na rede, tensão de compensação, tensão na carga e seu espectro, antes da compensação.

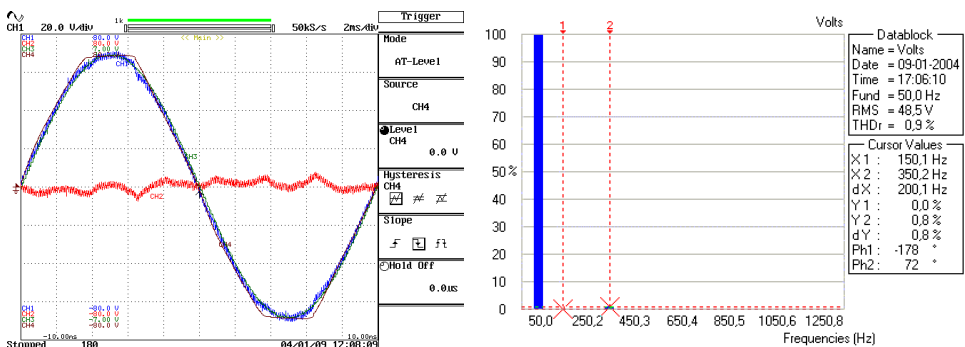


Fig.7 – Compensação da distorção habitual da rede: tensão na rede, tensão de compensação, tensão na carga e seu espectro, depois da compensação.

No segundo teste fez-se a compensação da distorção presente na rede de alimentação do circuito de teste: *THD* de 2,4% com uma tensão de 50,3V, quando o teste foi feito. As figuras 6 e 7 mostram as formas de onda e os espectros, antes e depois de se ligar o compensador série. Neste caso, a tensão desceu para 48,5V e a *THD* para 0,9%.

## 6. Conclusões

A implementação de sistemas de controlo para filtros activos de potência utilizando um computador pessoal é possível, mas apesar de um PC ter um processador extremamente rápido quando comparado com os microcontroladores disponíveis no mercado, a implementação deste tipo de controlador é complexa, pois um computador pessoal não foi concebido para desempenhar este tipo de funções. Os maiores problemas estão relacionados com os sistemas operativos multitarefas *standard*. Esses problemas podem ser torneados através de programação avançada, sendo para isso necessário conhecer em profundidade todo o *hardware* utilizado: computador e placa de aquisição de dados.

O compensador série desenvolvido é capaz de melhorar a qualidade da energia eléctrica fornecida a uma carga crítica, quando esta é sujeita a uma tensão de alimentação com problemas de harmónicos e sobretensões ou subtensões, conseguindo-se obter uma tensão de alimentação com uma taxa de distorção harmónica total inferior à disponibilizada pelo distribuidor de energia e ajustar os valores de tensão para os valores nominais da carga.

## Agradecimentos

Os autores agradecem aos Professores Adriano Tavares e Carlos Silva a sua colaboração neste trabalho.

## Referências

- [1] A. Pérez, N. Bravo, M. Llorente, “La Amenaza de los Armónicos y sus Soluciones”, Editorial Paraninfo SA, 2000, ISBN 8-4283-2737-8.
- [2] M. João Sepúlveda Freitas, João L. Afonso, Adriano Tavares, Júlio S. Martins, “A Personal Computer Based Controller for an Active Power Filter”, International Symposium on Industrial Electronics (ISIE’03), Rio de Janeiro, Brazil, 9-11 June 2003.
- [3] H. Akagi, Y. Kanazawa, 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.
- [4] Edson H. Watanabe; Richard M. Stephan; Maurício Aredes, “New Concepts of Instantaneous Active and Reactive Power in Electrical Systems With Generic Loads”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, nº. 2, April 1993
- [5] Manuel Ángel Perales Esteve, “Aplicación de Nuevas Técnicas de Control para el Desarrollo de Reguladores Activos de Potencia”, Tesis Doctoral presentada en la Escuela Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla, 2002
- [6] Diogo R. Costa, Jr., Luís G. B. Rolim, and Maurício Aredes, “Analysis and Software Implementation of a Robust Synchronizing Circuit – PLL Circuit”, International Symposium on Industrial Electronics (ISIE’03), Rio de Janeiro, Brazil, 9-11 June 2003.
- [7] Bhavaraju, Vijaya Bhanumurthi, “Analysis and Design of Some New Active Power Filters for Power Quality Enhancement”, Texas A&M University 1994, UMI Dissertation Services 1997.
- [8] Sepúlveda Freitas, M. João; Afonso, João L.; Martins, Júlio S., “A Single-Phase Power Series Compensator for Voltage Distortion” IEEE 1st International Conference on Electrical Engineering – CEE’05, Coimbra, Portugal, October 2005.