

# FILTRO ATIVO DE POTÊNCIA TIPO "SHUNT" COM SELEÇÃO DA POTÊNCIA A SER COMPENSADA\*

LUIZ FERNANDO PENELLO<sup>a</sup>  
COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL  
Volta Redonda, RJ  
) 27269-900

EDSON HIROKAZU WATANABE<sup>b</sup>  
COPPE/UFRJ Caixa Postal 68504  
Rio de Janeiro, RJ  
21945-970

**RESUMO** - Este trabalho mostra os resultados da aplicação de um filtro ativo de potência *shunt* para compensar as correntes harmônicas geradas por um retificador trifásico controlado de onda completa, tendo como carga circuitos lineares (RL).

O filtro ativo de potência está baseado em um inversor trifásico de tensão com controle PWM de corrente que utiliza IGBT's. O algoritmo de eliminação dos harmônicos está baseado na teoria da potência real ( $p = \bar{p} + \tilde{p}$ ) e imaginária ( $q = \bar{q} + \tilde{q}$ ) instantânea.

As potências  $\tilde{p}$ ,  $\bar{q}$  e  $\tilde{q}$  a serem compensadas são escolhidas através de chaves seletoras, podendo desse modo ser percebida a influência de cada uma delas individualmente ou em conjunto na geração das correntes de compensação do filtro. São mostrados resultados simulados e experimentais para validar a praticidade do filtro ativo.

## SHUNT ACTIVE POWER FILTER WITH COMPENSATED POWER SELECTION

**ABSTRACT** - This paper presents the results of a shunt active power filter to compensate the harmonic currents generated by a three-phase thyristor bridge rectifier supplying DC power to an RL circuit.

The active power filter is based on a three-phase voltage-source inverter with PWM current control utilizing IGBT's. The

control algorithm for compensating the harmonics is based on the instantaneous real ( $p = \bar{p} + \tilde{p}$ ) and imaginary ( $q = \bar{q} + \tilde{q}$ ) power theory.

The powers ( $\tilde{p}$ ,  $\bar{q}$  e  $\tilde{q}$ ) to be compensated are select by toggle switch. Thus, it is easy to understand the influence of each one of them individually or in a group in the generation of the active power filter compensation currents.

Simulated and experimental results are presented to validate the feasibility of the active power filter.

## 1 - INTRODUÇÃO

Conversores estáticos de potência têm sido largamente utilizados nas indústrias em uma grande variedade de aplicações. Entretanto, estes conversores geram um grande conteúdo harmônico que modifica a natureza senoidal das tensões e correntes da fonte CA de alimentação. Os problemas causados por essa "poluição harmônica" introduzida por estes equipamentos tornam cada vez mais imperativo o uso de filtros para sua compensação.

Uma solução alternativa para estes problemas é o emprego de filtros ativos de potência que utilizam dispositivos de chaveamento rápidos bem como tecnologias avançadas de controle. O filtro ativo *shunt* compensa as correntes harmônicas da carga, não permitindo sua circulação na fonte. O filtro

\* Artigo submetido em 25/01/93  
1ª revisão em 24/04/93 2ª revisão em 10/05/93  
Artigo aceito por recomendação do editor Prof.Dr.Rafael Santos Mendes.

<sup>a</sup> M. Sc., Eng. Eletrônico, Assessor Técnico da Superintendência de Engenharia de Equipamentos (SEQ), CSN.

<sup>b</sup> D. Eng., Eng. Eletrônico, Professor Adjunto, Programa de Engenharia Elétrica - COPPE/UFRJ.

ativo também é capaz de compensar a potência reativa da carga, tornando o fator de potência unitário.

Este trabalho mostra, baseado na teoria da potência real ( $p$ ) e imaginária ( $q$ ) instantânea, introduzida por Akagi *et al.* (1983, 1984) e discutida em detalhes em Watanabe, Stephan e Aredes (1992) e em Penello e Watanabe (1992), o desempenho de um filtro ativo *shunt* aplicado em um sistema trifásico a três condutores.

O filtro ativo foi projetado de forma a ser possível a escolha de diferentes tipos de compensação e é amplamente discutido em Penello (1992).

São mostrados resultados simulados e experimentais para validar a praticidade deste filtro ativo de potência.

## 2 - TEORIA DA POTÊNCIA REAL E IMAGINÁRIA INSTANTÂNEA (RESUMO)

Nesta teoria, as tensões e correntes trifásicas das fases  $a$ ,  $b$  e  $c$  são transformadas para um sistema de coordenadas  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $0$  por:

$$\begin{bmatrix} e_0 \\ e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = [M] \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = [M] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

onde:

$$[M] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Neste sistema de coordenadas, a potência real instantânea ( $p$ ) é definida por:

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

e a potência imaginária instantânea ( $q$ ) por:

$$q = e_\alpha \cdot i_\beta - e_\beta \cdot i_\alpha \quad (5)$$

As potências  $p$  e  $q$  podem ser decompostas em seus valores médios e oscilantes, ou seja:

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \quad (6)$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q} \quad (7)$$

onde:

$\bar{p}$  - é o valor médio de  $p$ , ou seja, é a potência ativa convencional ( $P$ ).

$\tilde{p}$  - é a componente alternada (oscilante) de  $p$ .

$\bar{q}$  - é o valor médio de  $q$ , ou seja, é a potência reativa convencional ( $Q$ ), quando não existem harmônicos ou na tensão ou na corrente (Aredes, 1991).

$\tilde{q}$  - é a componente alternada (oscilante) de  $q$ .

## 3 - CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA

A figura 1 mostra a configuração do sistema de filtragem proposto para compensação por filtro ativo, onde a fonte geradora de harmônicos é um retificador trifásico de onda completa de 1 kVA, composto por seis SCR's e alimentando uma carga linear do tipo RL.

A ponte inversora é mostrada em detalhes na figura 2, e é composta por seis IGBT's, três indutores de 5 mH e um capacitor de 100  $\mu$ F. Esta ponte é controlada por um circuito do tipo PWM com controle de corrente. Assim, o inversor de tensão (ponte + controle PWM) atua como uma fonte de corrente controlada. Este inversor fornece correntes que seguem as referências instantâneas ( $i_{ca}^*$ ,  $i_{cb}^*$  e  $i_{cc}^*$ ) dadas pelo circuito de controle do filtro ativo. Considerando que a carga do retificador, que aqui funciona como fonte de harmônicos, é bastante indutiva, ou seja, a corrente CC pode ser considerada constante (*ripple* de corrente na carga é desprezível) e que a amplitude da corrente na carga ( $I_d$ ) depende do ângulo de disparo ( $\alpha$ ) do retificador, a corrente da fase  $a$ , desprezando o ângulo de comutação, é dada por:

$$i_{ia} = \frac{2\sqrt{3}I_d}{\pi} \left[ \text{sen}(\omega t)\cos(\alpha) - \cos(\omega t) \cdot \text{sen}(\alpha) + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \left( \frac{1}{A} \text{sen}(A(\omega t - \alpha)) + \frac{1}{B} \text{sen}(B(\omega t - \alpha)) \right) \right] \quad (8)$$

onde:

$$A = 6n - 1$$

$$B = 6n + 1$$

## 4 - ESTRATÉGIA DE CONTROLE

O diagrama de blocos da figura 3 mostra o esquema básico de controle do inversor que sintetiza o filtro ativo *shunt* que é discutido em Penello, Watanabe e Aredes (1992). As tensões e as correntes trifásicas da carga são medidas (bloco 1) e transformadas em um sistema bifásico de coordenadas  $\alpha$  e  $\beta$  (bloco 2). A partir destas novas tensões e correntes instantâneas ( $e_\alpha$ ,  $e_\beta$ ,  $i_\alpha$ , e  $i_\beta$ ), são calculadas as potências  $p$  e  $q$  (bloco 3). As componentes médias ( $\bar{p}$  e  $\bar{q}$ ) e oscilantes ( $\tilde{p}$  e  $\tilde{q}$ ) de  $p$  e  $q$  são separadas através de um filtro passa-baixas tipo Butterworth de segunda ordem, com frequência de corte

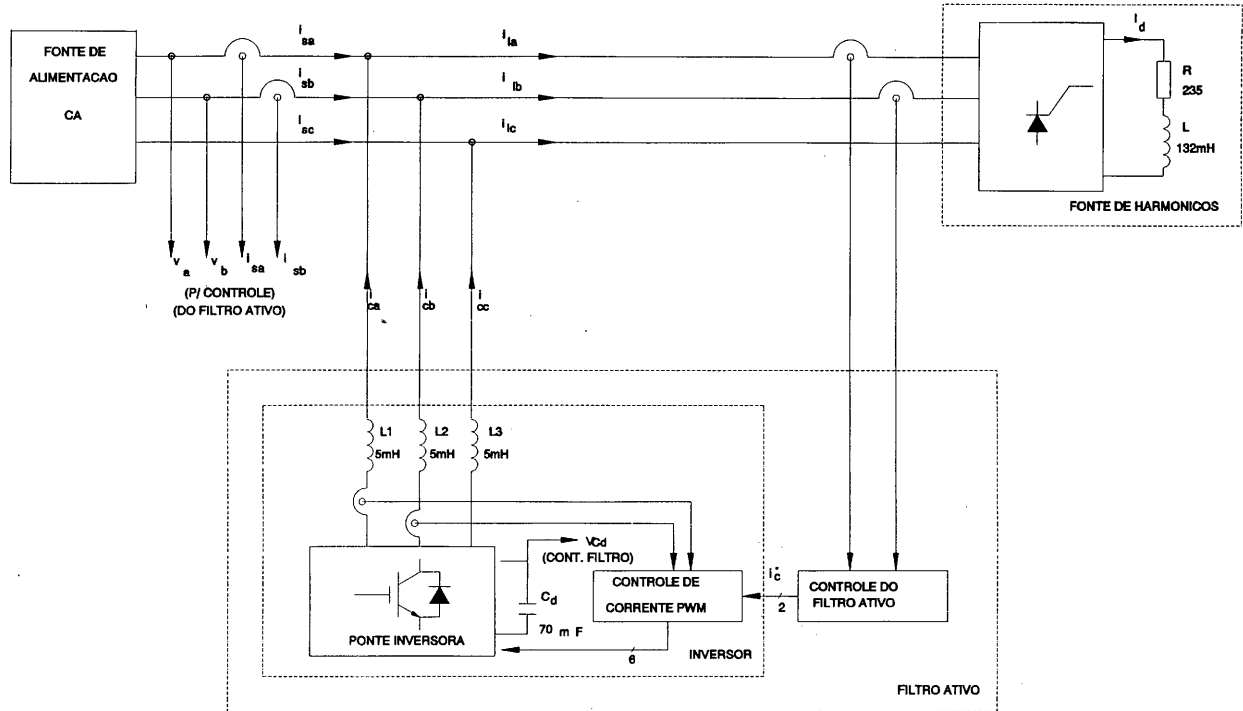


Figura 1 - Configuração do Sistema.

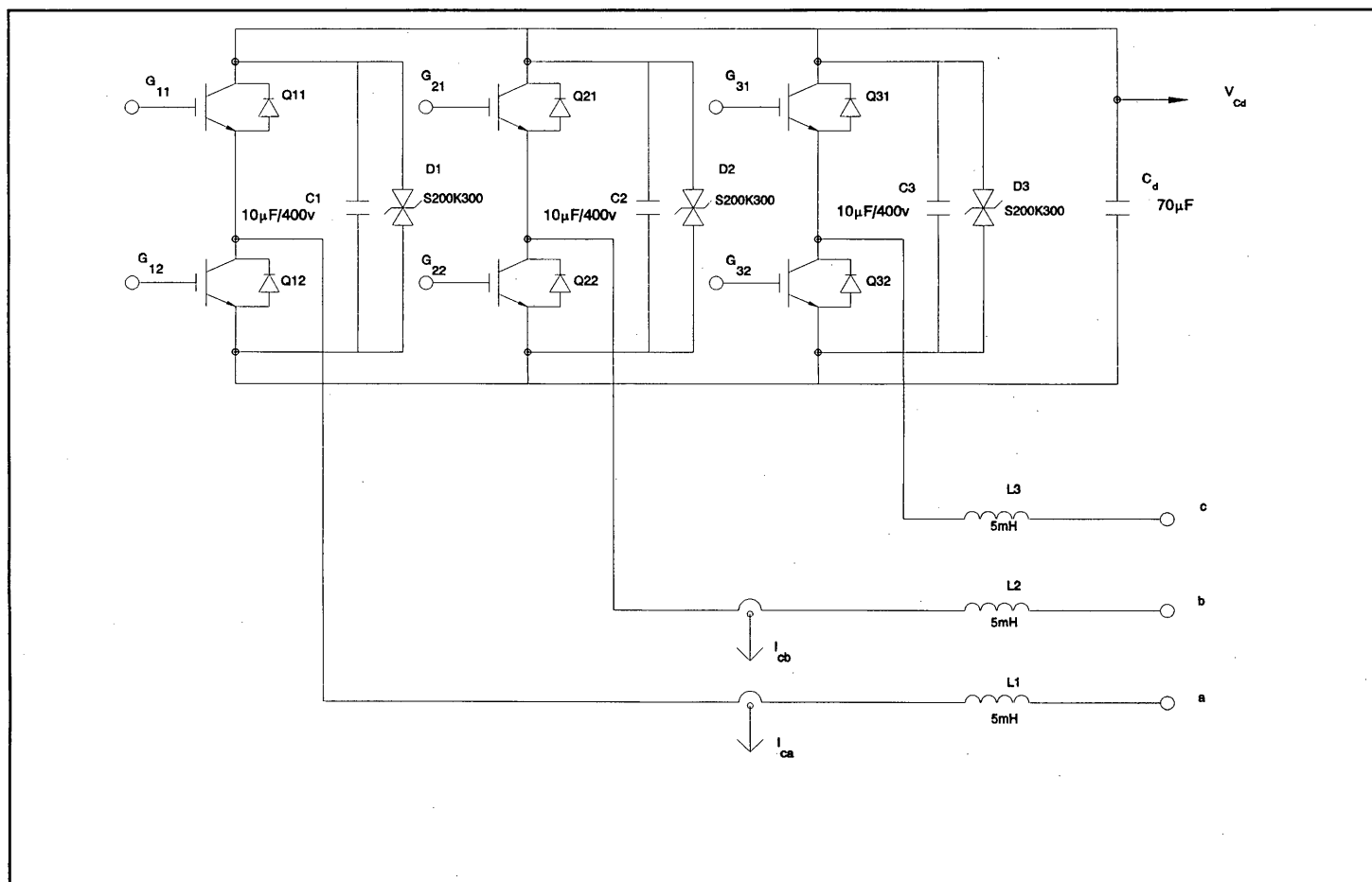


Figura 2 - Inversor de Tensão com Realimentação de Corrente

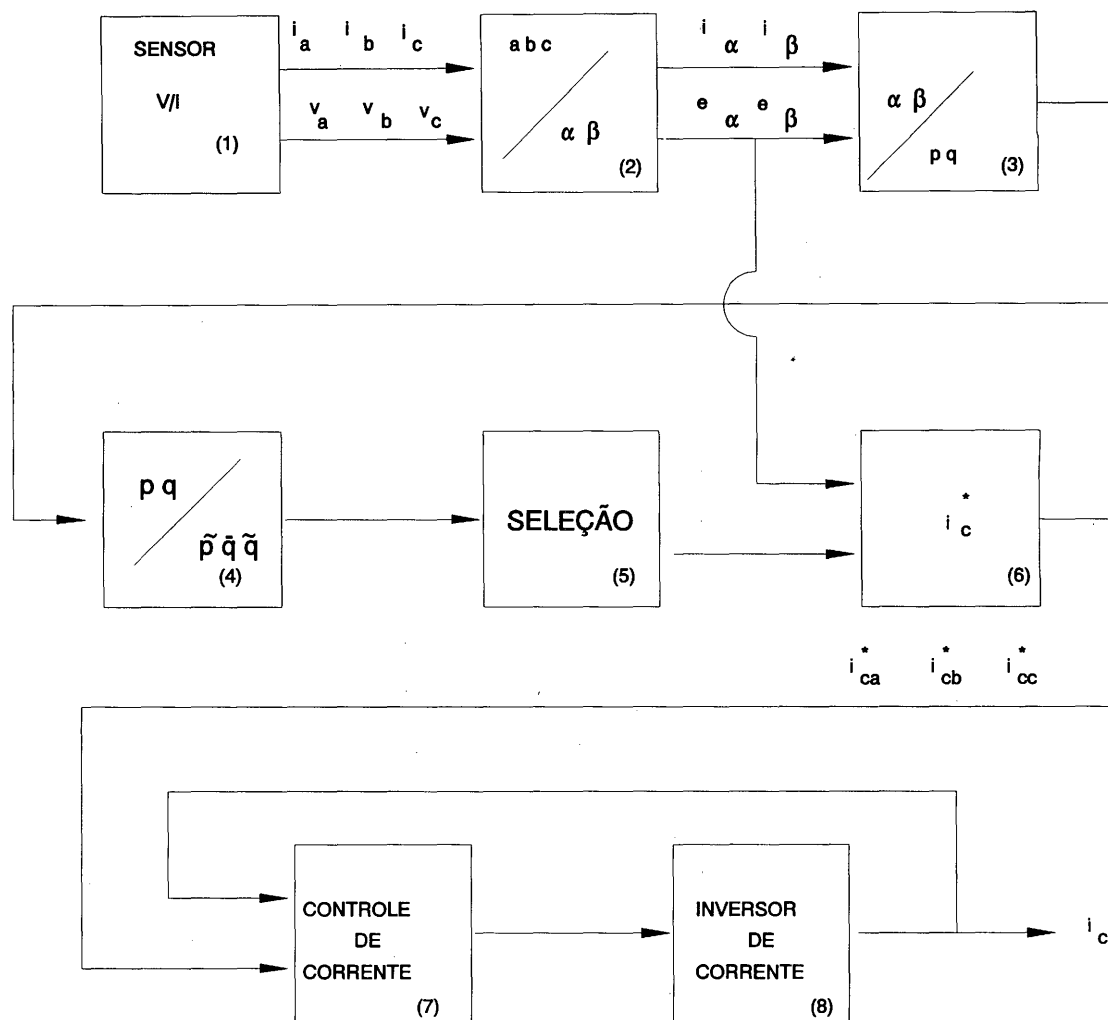


Figura 3 - Diagrama de Blocos do Filtro Ativo.

em 100 Hz (bloco 4). As potências a serem compensadas são escolhidas através de chaves seletoras (bloco 5), e a partir delas são calculadas as correntes de referência de compensação ( $i_{ca}^*$ ,  $i_{cb}^*$ ,  $i_{cc}^*$ ) do filtro ativo (bloco 6), através da transformação inversa de  $\alpha, \beta$  para  $a, b, c$ .

Os blocos (7) e (8) sintetizam as correntes de compensação ( $i_{ca}$ ,  $i_{cb}$ ,  $i_{cc}$ ) para cancelar os harmônicos contidos na corrente de carga  $i_l$ .

As correntes trifásicas instantâneas de referência ( $i_{ca}^*$ ,  $i_{cb}^*$ ,  $i_{cc}^*$ ) podem ser decompostas em quatro parcelas, segundo suas relações com as potências  $p = \bar{p} + \tilde{p}$  e  $q = \bar{q} + \tilde{q}$ , ou seja, para o caso de  $i_{ca}^*$ , tem-se:

$$i_{ca}^* = i_{ca\bar{p}}^* + i_{ca\tilde{p}}^* + i_{ca\bar{q}}^* + i_{ca\tilde{q}}^* \quad (9)$$

onde:

$i_{ca\bar{p}}^*$  : é o valor instantâneo da corrente de referência que produziria a potência real média  $\bar{p}$ . Esta é na realidade a potência ativa ( $P = 3VI\cos\phi$ ) que é transformada em trabalho útil e portanto não tem sentido falar em sua compensação.

$i_{ca\tilde{p}}^*$  : é o valor instantâneo da corrente de referência devido à componente oscilante da potência real instantânea ( $\tilde{p}$ ) a ser compensada. Esta componente oscilante representa uma pulsação de energia no sistema fonte/carga.

$i_{ca\bar{q}}^*$  : é o valor instantâneo da corrente de referência devido à componente média da potência imaginária ( $\bar{q}$ ). O valor  $\bar{q}$  corresponde, em um sistema equilibrado (Elgerd, 1971), à potência reativa ( $Q = 3VI\sin\phi$ ). Esta potência pode ser compensada pelo filtro ativo.

$i_{ca\tilde{q}}^*$  : é o valor instantâneo da corrente de referência devido à componente oscilante ( $\tilde{q}$ ) da potência imaginária instantânea ( $q$ ), que também pode ser compensada.

A soma de  $i_{ca\bar{p}}^*$  com  $i_{ca\tilde{q}}^*$  dá o valor instantâneo da corrente de referência que produzirá a potência harmônica (H) (Watanabe e Stephan, 1991).

A Tabela I relaciona a potência a ser eliminada com a corrente que deve ser injetada pelo filtro ativo e o tipo da carga visto pela fonte de alimentação.

Partindo das expressões das tensões equilibradas e correntes trifásicas (similar a (8)) e seguindo os cálculos conforme o diagrama de blocos da figura 3, para o caso da compensação de  $\tilde{p}$ ,  $\tilde{q}$  e  $\tilde{q}$  obtém-se a corrente de compensação da fase a:

$$i_{ca} = \frac{2 \cdot \sqrt{3} \cdot I_d}{\pi} \left[ -\cos(\omega t) \cdot \text{sen}(\alpha) + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \left( \frac{1}{A} \text{sen}(A(\omega t - \alpha)) + \frac{1}{B} \text{sen}(B(\omega t - \alpha)) \right) \right] \quad (10)$$

onde:

$$A = 6n - 1$$

$$B = 6n + 1$$

Como  $i_{ia}$  é igual à soma da corrente da fonte de alimentação ( $i_{sa}$ ) com a corrente injetada pelo filtro ativo ( $i_{ca}$ ), subtraindo (10) de (8) obtém-se:

$$i_{ca} = \frac{2 \cdot \sqrt{3} \cdot I_d}{\pi} \text{sen}(\omega t) \cdot \cos(\alpha) \quad (11)$$

A equação (11) mostra que a corrente da fonte de alimentação fica senoidal e em fase com a tensão. Vê-se também que a sua amplitude depende apenas do ângulo de disparo ( $\alpha$ ) do retificador. Portanto, a corrente que será injetada pelo filtro ativo será igual à soma das correntes reativa e harmônica geradas pelo retificador trifásico controlado.

## 5 - RESULTADOS SIMULADOS E EXPERIMENTAIS

A figura 4 mostra os resultados simulados em computador das correntes injetadas pela fonte de alimentação, para vários

**Tabela I** - Relação entre potência a ser eliminada, corrente injetada pelo filtro ativo e carga vista pela fonte de alimentação

Potência a ser Eliminada	Corrente Injetada	Carga Vista pela Fonte CA
Reativa (Q)	$i_{c\tilde{q}}$	Com fator de deslocamento unitário
Imaginária Instantânea (q)	$i_{c\tilde{q}} + i_{c\tilde{q}}$	com fator de deslocamento unitário
Harmônica (H)	$i_{c\tilde{p}} + i_{c\tilde{q}}$	linear (RL ou RC)
Reativa (Q) + Harmônica (H)	$i_{c\tilde{p}} + i_{c\tilde{q}} + i_{c\tilde{q}}$	resistiva pura

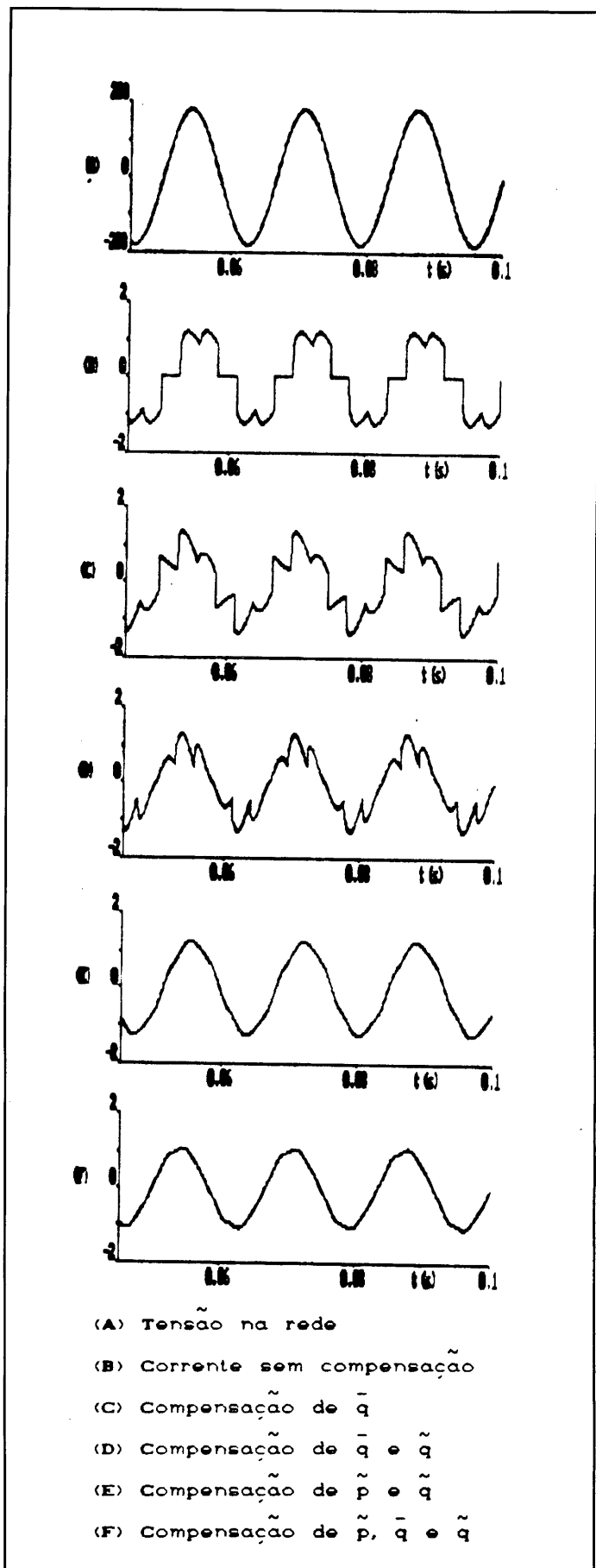


Figura 4 - Formas de Ondas Simuladas

tipos de compensação. Considera-se que o ângulo de disparo do retificador é igual a  $30^\circ$  e que a carga do mesmo é do tipo

RL ( $R = 235 \Omega$  e  $L = 132 \text{ mH}$ ). O filtro ativo é ideal, isto é, não existe erro entre a corrente de referência e a corrente de compensação. A figura 5 mostra os resultados experimentais correspondentes às situações simuladas da figura 4. As correntes foram obtidas através de sensores por efeito Hall, enquanto para as tensões foram utilizados amplificadores de isolamento.

As figuras 4.A e 5.A mostram a tensão da rede de alimentação, enquanto as figuras 4.B e 5.B mostram a corrente na entrada do retificador quando  $\alpha = 30^\circ$ , ou seja, a corrente fornecida pela fonte de alimentação sem a utilização do filtro ativo.

As figuras 4.C e 5.C mostram a corrente da fonte de alimentação com o filtro ativo compensando apenas a potência imaginária média ( $\bar{q}$ ) (potência reativa). Neste caso, a carga vista pela rede possui fator de deslocamento (fator de potência fundamental) unitário. Deve-se notar que esta corrente ainda produz  $\tilde{p}$  e  $\tilde{q}$  na fonte, que nos conceitos convencionais corresponde à potência harmônica (H) (Watanabe e Stephan, 1991).

As figuras 4.D e 5.D mostram  $i_{sa}$  quando é compensada a potência imaginária instantânea ( $q$ ). A componente fundamental desta corrente está em fase com a tensão (fator de potência fundamental unitário), como no caso anterior. Porém, esta corrente produz apenas  $\tilde{p}$  na fonte.

Nas figuras 4.E e 5.E, está sendo compensada a potência harmônica ( $\tilde{p} + \tilde{q}$ ). Na figura 4.E a corrente está defasada de  $30^\circ$  (ângulo de disparo do retificador), em relação à tensão da rede, ou seja, a carga vista pela rede é linear. Contudo, na figura 5.E, a defasagem medida foi de  $31,3^\circ$  (1,45 ms). Este erro, relativamente pequeno, deve-se a uma compensação indevida de  $\tilde{q}$ , introduzida por problemas de *off-set* no *hardware* de controle. As correntes nestas figuras não estão uma senóide perfeita porque ainda existe um pouco de  $\tilde{p}$  e  $\tilde{q}$  não compensados devido à frequência de corte do filtro passa-baixa ser de 100 Hz.

As figuras 4.F e 5.F mostram a compensação de todas as potências indesejadas (reativa+harmônica). Neste caso, a corrente é senoidal e está em fase com a tensão. Portanto, a carga vista pela rede é resistiva pura.

Os *spikes* de corrente na figura 5 são devidos ao fato do filtro não ser capaz de sintetizar as componentes de altas frequências da corrente da carga ( $i_l$ ), presentes nas comutações, já que o ângulo de comutação do retificador é muito pequeno. A existência da indutância de comutação na entrada do retificador, conforme detalhado por Akagi *et al.* (1988) e Lê (1991), minimiza estes problemas.

## 6 - CONCLUSÕES

Foi implementado um filtro ativo de potência *shunt* baseado na teoria da potência real ( $p$ ) e imaginária ( $q$ ).

Os resultados obtidos mostraram que o filtro ativo pode suprimir individualmente ou em conjunto, as potências real

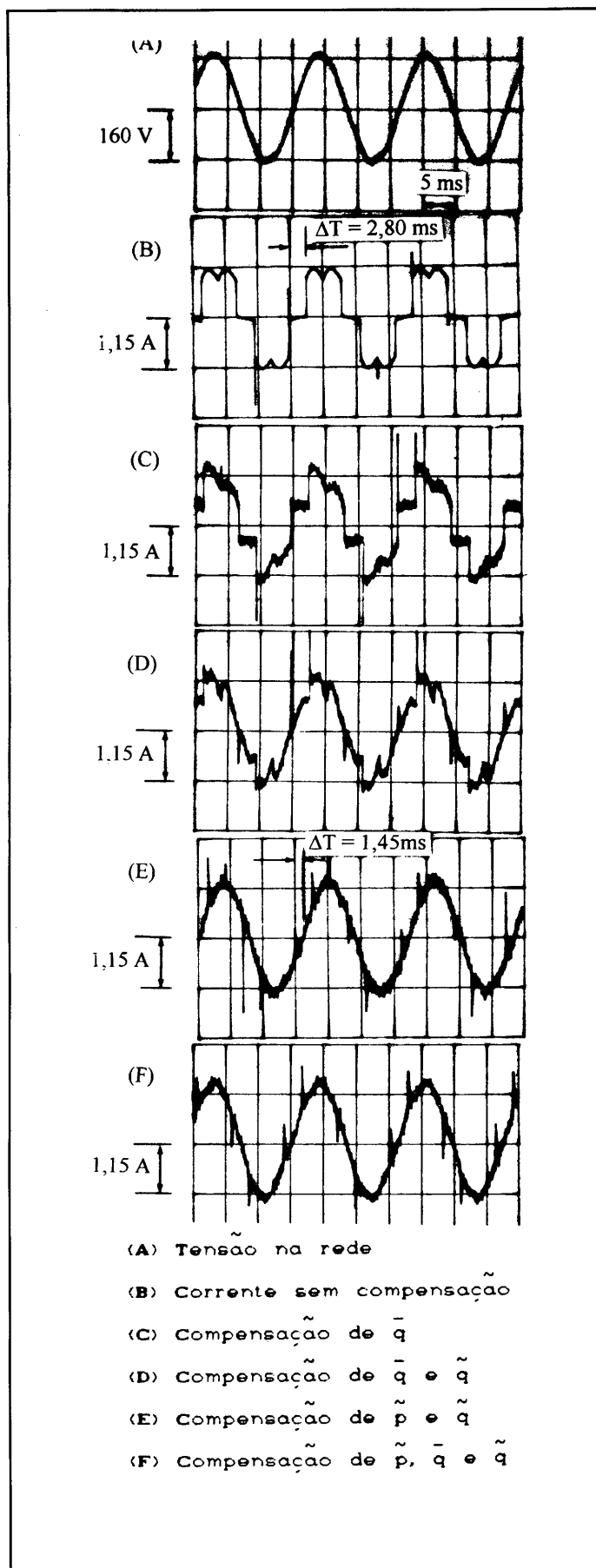


Figura 5 - Resultados Experimentais

oscilante ( $\tilde{p}$ ), imaginária média ( $\bar{q}$ ) e imaginária oscilante ( $\tilde{q}$ ). Quando foram compensadas as potências  $\tilde{p}$  e  $\tilde{q}$ , as correntes

da fonte de alimentação tornaram-se senoidais, porém defasadas das tensões com um ângulo igual ao ângulo de disparo do retificador. Quando foram compensadas  $\tilde{p}$ ,  $\tilde{q}$  e  $\tilde{q}$ , as correntes da fonte ficaram senoidais e em fase com as tensões.

As pequenas divergências encontradas nos ângulos de fase das correntes compensadas, com relação aos valores esperados, conforme simulação digital (fig. 4), podem ser facilmente resolvidas com o aprimoramento do *hardware* utilizado nos experimentos.

Os resultados experimentais obtidos com esta montagem demonstraram plenamente a eficácia do filtro ativo de potência na eliminação das correntes reativas e/ou harmônicas.

O uso de filtros ativos utilizando semicondutores de potência pode reduzir as perturbações nos sistemas industriais causadas por cargas não lineares.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) pelo apoio financeiro para a execução deste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akagi, H.; Tsukamoto, Y., Nabae, A. - 1988 - "Analysis and Design of an Active Power Filter Using Quad-Series Voltage Sources PWM Converters." IEEE - IAS 88 - Vol. 1, pp. 867.
- Akagi, H.; Kanazawa, Y. & Nabae, A. - 1984 - "Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components." IEEE Trans. Ind. Appl. Vol. IA-20 No 3, pp. 625.
- Akagi, H.; Kanazawa, Y. & Nabae, A. - 1983 - "Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits." IEEE - IPEC 83 - pp. 1375.
- Aredes, M. - 1991 - "Novos Conceitos de Potência e Aplicações em Filtros Ativos" - COPPE/UFRJ, Tese de Mestrado.
- Elgerd, O. I. - 1971 - "Electric Energy System Theory: an Introduction" - McGraw-Hill.
- Lê, Thanh-Nam - 1991 - "Performance of Voltage-Source Active Filters" - EPE/91, Firenze, Italy, pp. 3-001.
- Penello, L. F.; Watanabe, E. H. & Aredes, M. - 1992 - "Filtro Ativo de Potência tipo "Shunt" com Seleção da Potência a ser Compensada" - 9º Congresso Brasileiro de Automática - pp. 786.
- Penello, L. F. - 1992 - "Filtro Ativo de Potência "Shunt" - COPPE/UFRJ, Tese de Mestrado.
- Penello, L. F. & Watanabe, E. H. - 1992 - "Filtro Ativo de Potência para Compensação das Potências Reativa e Harmônica" - ABM Seminário sobre Engenharia, Construção e Montagem de Equipamentos - pp. 429.
- Watanabe, E. H.; Stephan, R. M. & Aredes, M. - 1992 - "New Concepts of Instantaneous Active and Reactive Powers in Electrical Systems with Generic Loads" - IEEE/PES Winter Meeting - no 92WM279-0 - PWRD.
- Watanabe, E. H. & Stephan, R. M. - 1991 - "Potência Ativa e Reativa Instantânea em Sistemas Elétricos com Fontes e Cargas Genéricas" - SBA, Rev. Controle & Automação, Vol. 3, n 1, Mar/Abr.