

# COMPENSAÇÃO REATIVA E FILTRAGEM HARMÔNICA A PARTIR DA IMPLEMENTAÇÃO DE UM FILTRO ATIVO SHUNT EM UM SISTEMA TRIFÁSICO A TRÊS FIOS.

Vinicius Maciel Pinto  
profviniciusmaciel@gmail.com  
COPPE, FER

Gleydson dos Santos Neves  
gleydson\_neves94@hotmail.com  
FER

Julio Cesar de Souza  
julio-souza1@outlook.com  
FER

Marcos Otoni  
engmarcosotoni@gmail.com  
FER

**Resumo:** Este artigo apresenta o desenvolvimento de um filtro ativo paralelo (shunt), a fim de mitigar problemas gerados devido à influência de harmônicos em sistemas trifásicos a três fios. A estratégia utilizada, para que o filtro seja dinâmico com o sistema, foi baseada na teoria de potência instantânea, também conhecida como teoria  $pq$ , que apresenta uma nova concepção de teoria de potência. Para averiguar a eficácia do filtro, será apresentada a simulação de um sistema trifásico a três fios com uma carga não linear para a compensação dos efeitos harmônicos de corrente por ela gerada. Toda a simulação foi feita utilizando o software PSCAD/EMTDC.

**Palavras Chave:** Filtro Ativo. Teoria  $pq$ . Qualidade de Energia. Filtragem Harmônica. Fator de Potência

## 1. INTRODUÇÃO

O crescente desenvolvimento da eletrônica de potência, acompanhada com os inúmeros benefícios proporcionados por ela, aumentaram em escala global a utilização de cargas elétricas que contém dispositivos eletrônicos. Inversores de frequência, conversores CA/CC (chopper), reatores eletrônicos e fontes retificadoras são exemplos de cargas não lineares largamente utilizadas em processos industriais. Estes equipamentos têm como característica alterar a forma de onda da corrente, que através das quedas de tensão geradas pelas impedâncias do sistema distorcem a forma de onda da tensão. Este sinal distorcido pode ser decomposto por uma componente da frequência fundamental somada os seus múltiplos inteiros, sendo estes múltiplos denominados harmônicos. Harmônicos em sistemas elétricos são indesejáveis, pois podem causar inúmeros problemas, dentre eles sobreaquecimentos de condutores e transformadores, disparos inoportunos de dispositivos de proteção e sobrecarga de capacitores para correção do fator de potência. Problemas deste porte podem causar grandes prejuízos ao setor industrial podendo gerar paradas ou danificar equipamentos sensíveis. Filtros ativos vêm como uma solução para atenuação instantânea de distorções harmônicas. A proposta deste trabalho é um estudo detalhado do controle de um filtro ativo, baseado na teoria de potência ativa e reativa instantânea, também conhecida como teoria  $pq$  demonstrando a eficácia do mesmo na filtragem harmônica e compensação reativa a partir de simulações realizadas no software PSCAD/EMTDC.

## 2. FILTRO ATIVO SHUNT

O filtro ativo paralelo é dedicado à realização de filtragem harmônica de corrente e correção do fator de potência, seja o sistema equilibrado ou não. A Figura 1 apresenta o esquema básico do filtro ativo paralelo.

O controlador mede as grandezas necessárias para aplicar a teoria  $pq$ , que são as tensões de linha ( $v_a$ ,  $v_b$  e  $v_c$ ) e as correntes da carga de fase ( $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$ ). A partir de um algoritmo baseado na teoria  $pq$ , calculam-se as correntes ( $i^*_{ca}$ ,  $i^*_{cb}$  e  $i^*_{cc}$ ) apenas com a presença dos componentes harmônicos, que servirão de referência para o inversor. O princípio de controle inversor é a partir da modulação de largura de pulso (PWM) e “sua frequência de chaveamento deve ser, pelo menos, dez vezes maior que a frequência do maior harmônico de corrente a compensar” (AREDES, 1996).

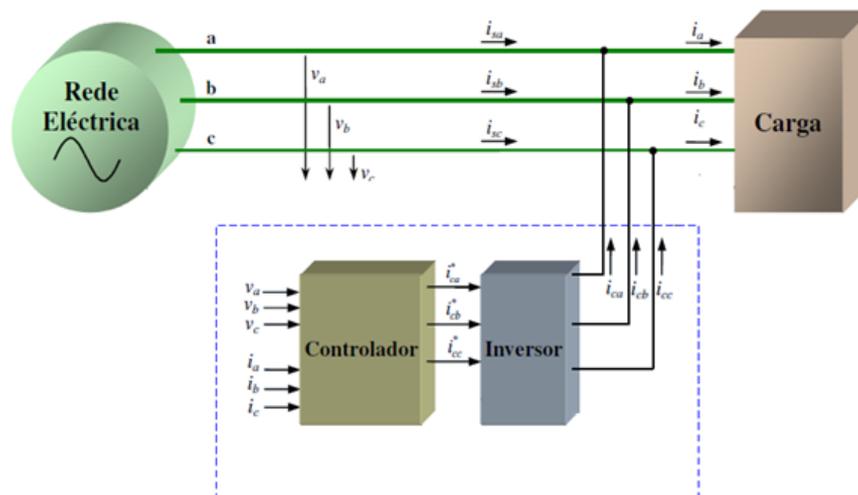


Figura 1 - Esquema básico do filtro ativo paralelo. Fonte: FREITAS (2004).

As correntes geradas pelo filtro ( $i_{ca}$ ,  $i_{cb}$ ,  $i_{cc}$ ) são introduzidas nas linhas do sistema elétrico (paralelamente). O filtro ativo shunt comporta-se assim como uma fonte controlada de corrente não senoidal. No caso de se usar um algoritmo de controle para tornar as correntes das linhas senoidais, mesmo que aplicado a uma carga não linear, as correntes na fonte ( $i_{sa}$ ,  $i_{sb}$  e  $i_{sc}$ ) irão se tornar senoidais, pois a resultante da soma das correntes de compensação geradas pelo filtro com as correntes na carga será senoidal. Para o sistema elétrico, o conjunto formado pela carga não linear e pelo filtro ativo se comportará como uma carga linear, e por isso será possível também realizar o controle do fator de potência, fazendo com que o mesmo seja unitário, caso seja projetado (FREITAS, 2004).

## 2.1. TEORIA $pq$ E ESTRATÉGIA DE CONTROLE

A teoria de potência ativa e reativa instantânea ou simplesmente Teoria  $pq$  foi proposta por Akagi, Kanazawa, e Nabae em 1983. Esta teoria surgiu a partir da necessidade de um conjunto consistente de definições de potência ativa e reativa sob condições não senoidais. A teoria de potência convencional, comumente aplicada, tem sua validade comprovada fisicamente apenas para sistemas sem distorção, balanceados e trabalhando apenas em uma frequência fixa. O motivo desta limitação é que a teoria de potência convencional foi criada há mais de um século e desenvolvida para trabalhar em sistemas monofásicos. Quando expandida para o uso em sistemas trifásicos foi tratada como três sistemas monofásicos independentes, e assim ignorando o acoplamento entre fases. (WATANABE, 1998). Problemas com harmônicos no sistema elétrico são cada vez mais comuns, e buscas por teorias que explicam estes fenômenos estão cada vez mais difundidas. A

teoria pq vem definir um conjunto de potências instantâneas no domínio do tempo. Uma vez que nenhuma restrição está imposta sobre os comportamentos de tensão ou corrente, isto é aplicado em sistemas de três fios com ou sem condutor de neutro, bem como formas de onda de tensão e corrente genéricas. Contrariamente a outras teorias de potência tradicionais que tratam um sistema trifásico como três circuitos monofásicos, a teoria pq lida com todas as três fases ao mesmo tempo como um único sistema. Portanto esta teoria sempre considera o sistema trifásico junto, não como superposição ou soma de três circuitos monofásicos. A teoria pq proporciona uma base bastante eficiente para concepção de estratégias de controle onde é possível implementá-las na forma de controladores para filtros ativos com base em dispositivos eletrônicos de potência. (AKAGI; et al. 1984).

A teoria pq utiliza a transformação  $\alpha\beta 0$ , também conhecida como transformada de Clark, que consiste de uma matriz real que transforma tensões e correntes trifásicas em sistema de referência estacionária  $\alpha\beta 0$  (AKAGI; et al. 2007). É uma transformação algébrica de um sistema de tensões e correntes trifásicas defasadas de  $120^\circ$ , como o sistema abc, para coordenadas ortogonais, defasadas de  $90^\circ$  entre si. A transformada de Clark mapeia as tensões trifásicas instantâneas nas fases abc,  $v_a, v_b$  e  $v_c$  para tensão instantânea sobre os eixos  $\alpha\beta 0$   $v_\alpha, v_\beta$  e  $v_0$ . A equação 2.1 apresentam as matrizes de transformação de tensão e corrente.

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

A transformada inversa é dada pelas matrizes da equação 2.2

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1 & 0 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1 & 0 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

A transformada de Clark permite que os componentes de sequencia zero, dados por  $v_0$  e  $i_0$  sejam independentes dos componentes  $\alpha\beta$ , pois num sistema trifásico a três fios não há componente de sequencia zero, sendo assim é possível eliminá-lo da equação resultando em uma simplificação dada pela equação 3.3.

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

A Figura 2 demonstra a transformação realizada.

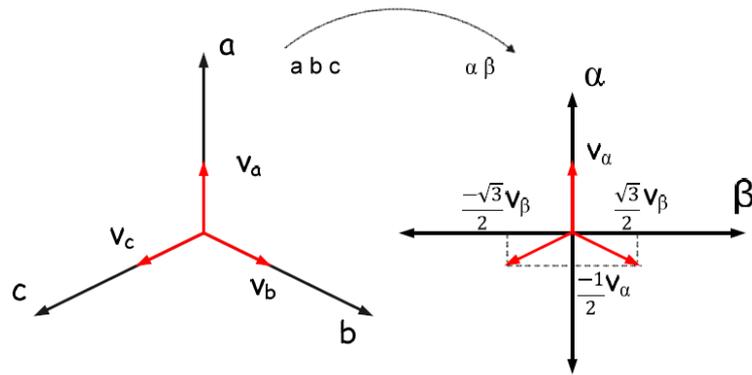


Figura 2. Representação dos eixos na Transformada de Clark. Fonte: MOUCO (2011)

Analisando o gráfico no plano complexo e eliminado  $v_0$ , pode-se construir um vetor de tensão e correntes instantâneos definidos em componentes  $\alpha$  e  $\beta$ . Estes vetores, de acordo com Akagi, et al. (2007) são denominados  $\mathbf{e}$  e  $\mathbf{i}$ .

$$e = v_\alpha - jv_\beta \quad i = i_\alpha - ji_\beta \quad (2.4)$$

A partir dos vetores de tensão  $\mathbf{e}$  e corrente  $\mathbf{i}$  instantâneas, foi possível calcular a potência aparente complexa  $\mathbf{s}$ , dada por:

$$s_{\alpha\phi} = e \cdot i = \left( v_\alpha + jv_\beta \right) \left( i_\alpha - ji_\beta \right) = \underbrace{\left( v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta \right)}_p + j \underbrace{\left( v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta \right)}_q \quad (2.5)$$

Através da análise da equação 2.5 e lembrando que está sendo realizada para um sistema trifásico com três fios, a teoria  $pq$  define duas potências instantâneas, potência instantânea real  $p$ , e a potência imaginária  $q$ . Estas são definidas pelas tensões de fase e correntes de linha nos eixos  $\alpha\beta$ , como segue.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

As potências calculadas no sistema  $\alpha\beta$ , agora são denominadas potência real e potência imaginária. A figura x apresenta o fluxo das potências instantâneas.

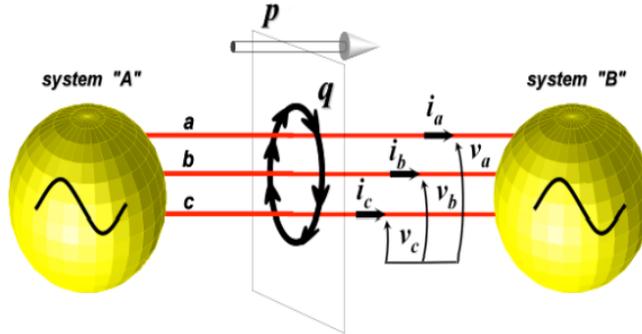


Figura 3. Fluxo das potências instantâneas nas coordenadas  $\alpha\beta$ . Fonte: WATANABE (1998)

A Figura 3 mostra que a potência real  $p$ , análoga à potência ativa convencional, é aquela que contribui para transferência de energia entre a fonte e a carga, sendo a mesma unidirecional. Já a potência imaginária  $q$ , análoga à potência reativa convencional, circula através do circuito, porém não contribui para energia que realmente realiza trabalho no circuito.

A aplicação da teoria na estratégia de controle dos filtros ativos é muito interessante no aspecto de seleção de potências a serem compensadas. A partir deste controle é possível adequar o filtro ativo de acordo com as necessidades do circuito a ser compensado. Sendo assim, a potência real e a potência imaginária abordadas na equação 2.6 podem ser subdivididas em parte média e parte oscilante, como definido por Akagi, et al. (2007). A seguir segue sua decomposição.

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \quad q = \bar{q} + \tilde{q} \quad (2.7)$$

Na equação 2.7,  $\bar{p}$  e  $\tilde{p}$  representam a potência real instantânea média e oscilante, respectivamente, da mesma forma,  $\bar{q}$  e  $\tilde{q}$  representam a potência imaginária instantânea média e oscilante. A potência  $\bar{p}$  pode ser definida como a potência ativa da teoria convencional, quando se considera apenas a componente de sequência positiva, a parte oscilante  $\tilde{p}$ , de acordo com Akagi, et al. (2007), representa a oscilação do fluxo de energia por unidade de tempo, que produz naturalmente um valor médio zero. A potência imaginária média  $\bar{q}$  corresponde a potência reativa trifásica convencional e não contribui para transferência de

energia. A componente oscilante da potência imaginária  $\tilde{q}$  também corresponde a uma potência que começa comutar entre as três fases, sem transferência de energia entre qualquer fonte e carga.

As separações das componentes médias e oscilantes são feitas através de um filtro de sinal passa-baixa e passa-alta devidamente dimensionados a esta aplicação. É importante notar que a resposta do filtro pode alterar a dinâmica do filtro ativo como um todo. (MONTEIRO, 1997 *apud* WATANABE, 1998.7p).

A seleção das potências para compensação do filtro ativo, está relacionada a compensação de correntes indesejáveis, o filtro ativo shunt se comporta como uma fonte de corrente controlada, que sintetiza as correntes de referência definidas pelas potências determinadas. Assim, selecionadas as potências, serão calculadas as correntes de referência nas coordenadas  $\alpha\beta$ , e para o controle do filtro ativo, estas correntes deverão voltar para as coordenadas abc, como apresenta a equação 2.8.

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha\text{ref}} \\ i_{\beta\text{ref}} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ v_{\beta} & -v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} i_{\text{aref}} \\ i_{\text{bref}} \\ i_{\text{cref}} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha\text{ref}} \\ i_{\beta\text{ref}} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

É importante ressaltar que uma compensação paralela atua de forma que as correntes de referências calculadas na teoria  $pq$  sejam sintetizadas ao invés de serem eliminadas. Isto é possível invertendo o sinal das potências, já no cálculo das correntes de referência, como na Figura 3. A Figura 4 ilustra a ideia básica de compensação de corrente paralela.

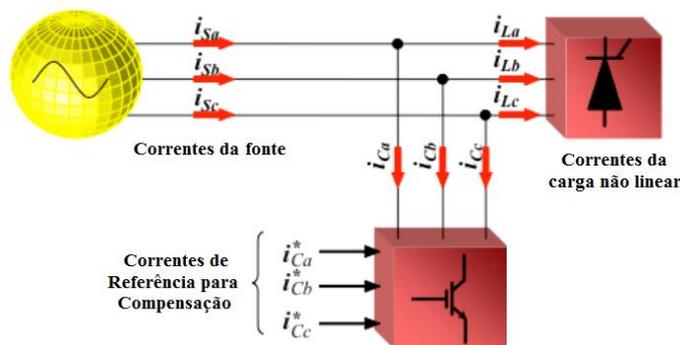


Figura 4. Princípio básico de compensação de corrente shunt. Fonte: AKAGI et al. (2007)

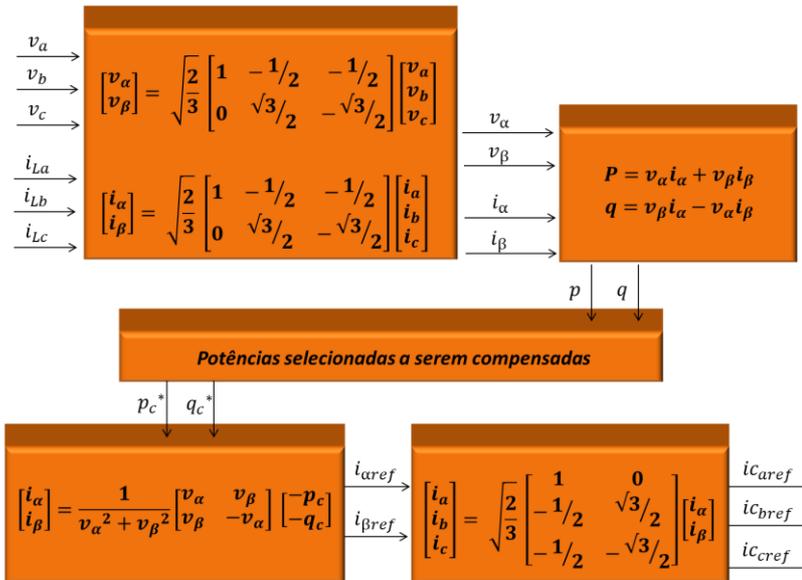


Figura 5. Método de controle para compensação de corrente baseada na Teoria pq. Fonte: AKAGI et al., (2007)

A Figura 5 retrata todo o cálculo realizado para geração das correntes que servirão de referência para o circuito inversor sintetiza-lás.

A Figura 6 apresenta quatro tipos de compensação, dependendo da potência a ser escolhida. A Figura 6(a) apresenta a compensação apenas da potência imaginária q. Neste caso, serão eliminadas todas as correntes de componentes que não transferem energia, embora estas possam produzir perdas na rede. Este compensador estabelece correntes que correspondem a potência imaginária da carga q, incluindo todas as harmônicas relacionadas com  $q = \bar{q} + \tilde{q}$ .

Na Figura 6(b) é apenas compensada a parte média da potência imaginária,  $\bar{p}$ . Neste caso, a corrente de compensação  $i_{\alpha\bar{q}}$  não tem componentes harmônicos, e por isso, o compensador estabelece corrente senoidal na frequência da linha. A corrente compensada está em fase com a tensão, contudo o conteúdo harmônico é maior do que o exemplo anterior, pois a componente oscilante  $\tilde{q}$  não está sendo compensada. Nota-se também que a potência imaginaria na fonte apresenta oscilações devido aos harmônicos provenientes à  $\tilde{q}$ .

Outro exemplo de compensação é apresentada pela Figura 6(c), onde as potências a serem compensadas serão  $\tilde{p}$  e  $\tilde{q}$ . Nesta configuração todas as componentes oscilantes são compensadas e os harmônicos eliminados. O resultado é uma corrente compensada puramente senoidal. Contudo há uma defasagem entre a tensão e a corrente compensada, resultando um fator de potência inferior a um. Pela forma de onda da potência imaginária da fonte, é possível perceber que há um nível de potência imaginária fluindo.

Enfim, a Figura 6(d), apresenta o melhor caso de compensação, do ponto de vista do fluxo de energia, através da teoria pq, onde todas as componentes de corrente indesejadas da

carga poderão ser eliminadas. Compensando  $\tilde{p}$  e  $\tilde{q}$  a corrente compensada será senoidal, produzindo uma potência real constante, e nenhuma geração de potência imaginária. A carga não linear e o compensador formam uma carga linear ideal puramente resistiva. A fonte de corrente tem um valor mínimo rms que transfere a mesma energia que a corrente inicial da carga que produzem a potência real média  $\bar{p}$ . No entanto, é importante ressaltar que esta é uma situação particular em que não há distorção ou desequilíbrios presentes na tensão de rede. Caso haja tensão desbalanceada e distorcida outros tipos de topologia de filtros deverão ser empregados. (AKAGI, et al. 2007).

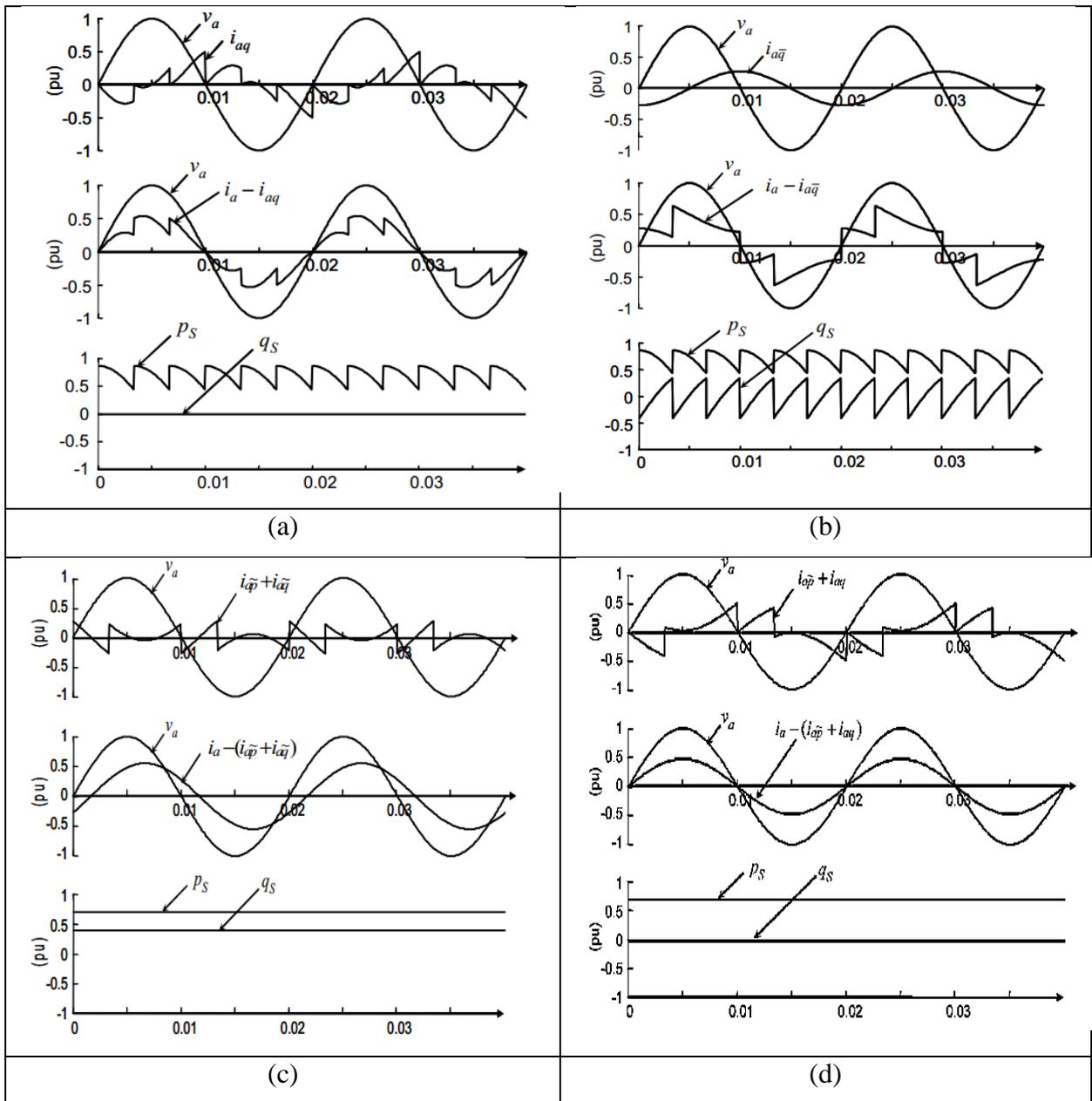


Figura 6. Compensação a partir das correntes de referências desejadas. (a) Compensação  $q = \tilde{q} + \hat{q}$   
 (b) Compensação  $\tilde{q}$  (c) Compensação  $\tilde{p}$  e  $\hat{q}$  (d) Compensação  $\tilde{p}$  e  $\tilde{q}$

## 2.2.SIMULAÇÃO DO FILTRO ATIVO SHUNT COM CARGA RETIFICADORA NÃO CONTROLADA

Uma das aplicações do filtro ativo paralelo é a realização de filtragem harmônica das correntes de um sistema elétrico. A Figura 7 apresenta o estudo de caso analisado, onde a fonte de alimentação é trifásica com três fios, a carga não linear é uma ponte retificadora não controlada de seis pulsos alimentando uma carga RL e em paralelo entre a fonte e a carga, o filtro ativo shunt.

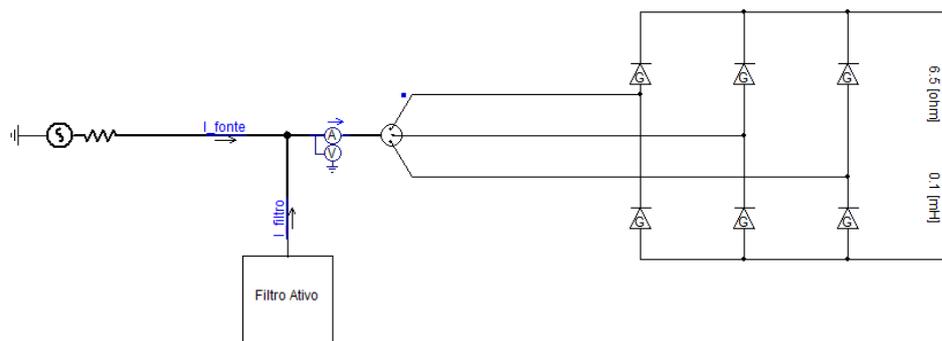


Figura 7. Circuito com uma carga retificadora não controlada e Filtro Ativo Shunt. Fonte: Própria PSCAD/EMTDC

O bloco “filtro ativo” pode ser visto em detalhe na Figura 8 e conforme citado no capítulo 2, foi utilizado o filtro ativo shunt VSI com seis IGBT’s

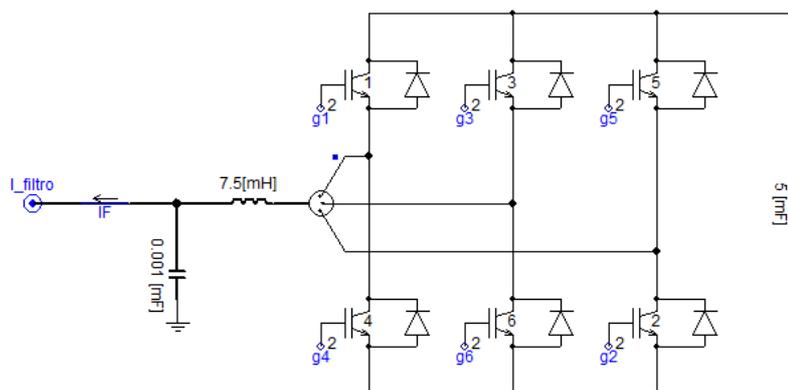


Figura 8. Filtro Ativo Shunt VSI simulado. Fonte: Própria PSCAD/EMTDC

### 5.1.1 Funcionamento do Filtro Ativo Shunt com carga retificadora não controlada

Com a inserção da carga retificadora não controlada na rede trifásica, a forma de onda de corrente que passa pela fonte será distorcida, conforme a Figura 9.

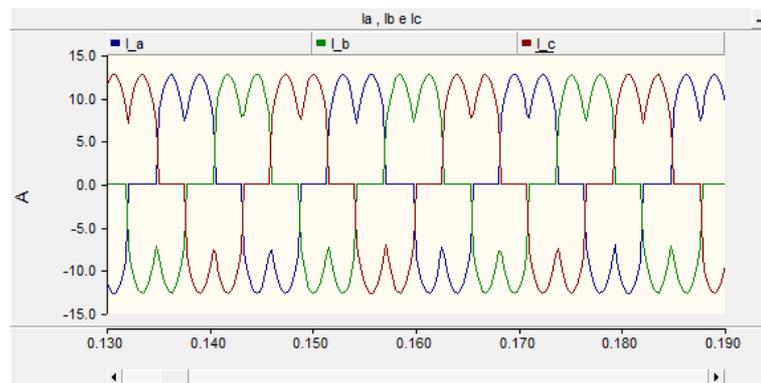


Figura 9. Forma de Onda de Corrente na Fonte Fonte: Própria PSCAD/EMTDC

A partir da inserção do filtro ativo shunt no circuito é possível visualizar, através da Figura 10, a forma de onda da corrente da carga, a corrente sintetizada pelo filtro e a resultante da subtração entre elas, gerando uma senóide apenas com a frequência fundamental sem a presença dos harmônicos gerados pela carga retificadora.

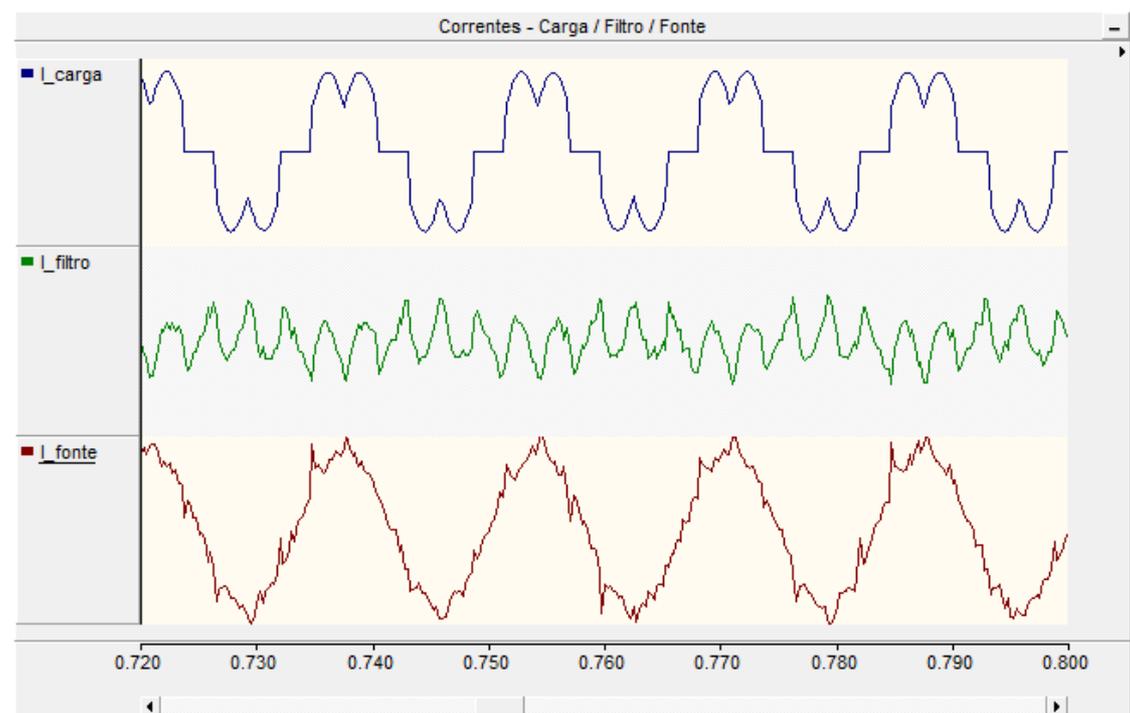


Figura 10. Forma de onda da corrente da carga, a corrente sintetizada pelo filtro e a corrente senoidal da fase "a". Fonte: Própria PSCAD/EMTDC

Para comprovar a eficácia do filtro foi realizada a FFT dos sinais para proporcionar uma melhor compreensão da atenuação da corrente em termos quantitativos. A Figura 11

apresenta a FFT da corrente gerada pela carga não linear, esta possibilita visualizar a magnitude das ordens dos harmônicos.

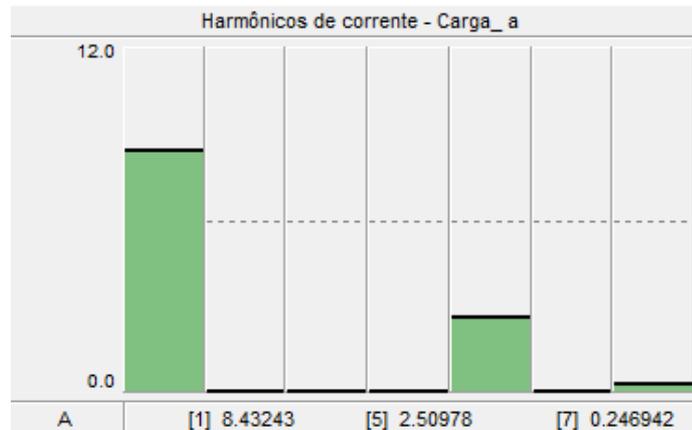


Figura 11. FFT da carga retificadora não controlada de seis pulsos. Fonte: Própria PSCAD/EMTDC

A Figura 12 apresenta a FFT da corrente sintetizada pelo filtro.

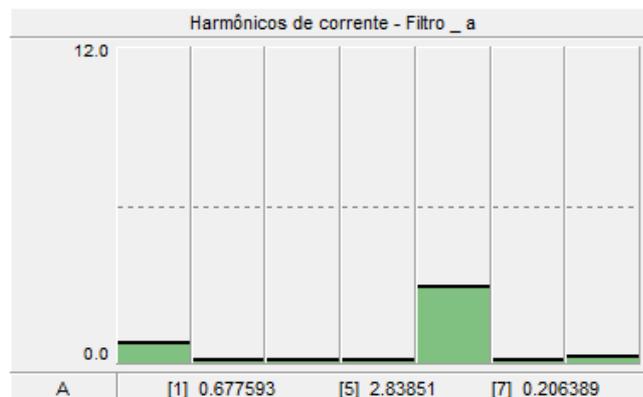


Figura 12. FFT da corrente sintetizada pelo filtro. Fonte: Própria PSCAD/EMTDC

É possível perceber a partir da Figura 12, que o filtro sintetiza somente as correntes harmônicas, sendo a fundamental um valor insignificante. É evidente esta análise sabendo que serão compensadas apenas as correntes indesejáveis, alterando o mínimo possível a fundamental. A seguir será apresentada a Figura 13 onde a FFT é realizada na corrente da fonte.

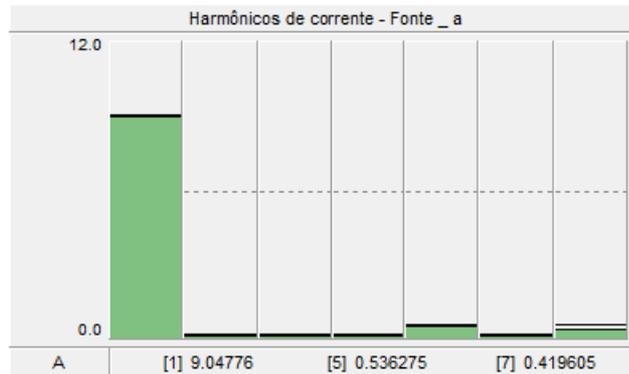


Figura 13. FFT da corrente sintetizada pelo filtro. Fonte: Própria PSCAD/EMTDC

A Figura 13 representa a eficácia do filtro ativo proposto, nota-se que são subtraídas as correntes da carga pelas correntes do filtro. Desta maneira é mitigada a influência dos harmônicos no sistema proposto na figura 39.

### 2.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A busca por uma teoria de potência mais consistente e que trate de sistema com distorções harmônicas levou ao estudo da teoria de potência ativa e reativa instantânea, ou simplesmente teoria pq. Esta teoria permitiu além de um entendimento físico mais consistente, desenvolver algoritmos de controle a serem aplicados em filtros ativos. Uma das vantagens apresentadas pela teoria pq foi sua versatilidade de compensação, podendo ser compensadas apenas os harmônicos, apenas a parcela reativa, ou os dois ao mesmo tempo, de acordo com a necessidade do sistema. A escolha da topologia de filtro ativo shunt se mostrou eficaz na atenuação dos harmônicos de corrente. Com as simulações realizadas no PSCAD/EMTDC foi possível demonstrar a eficiência do filtro ativo shunt juntamente com sua estratégia de controle baseadas na teoria pq.

A partir dos resultados obtidos, o filtro atuou de forma satisfatória mitigando os efeitos causados pelas harmônicas de corrente. Contudo apresentou pequenas oscilações na forma de onda da fonte, podendo este, ser atenuado realizando o dimensionamento adequado dos filtros passivos na saída do conversor e do indutor de acoplamento. Para este dimensionamento seria necessário um estudo mais aprofundado, o que poderia fugir do foco do trabalho apresentado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKAGI, H.; KANAZAWA, Y.; NABAE, A. Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components. IEEE Transactions on Industry Applications v. IA-20, n. 3, mai/jun 1984.

AKAGI, Hirofumi; WATANABE, Edson Hirokazu; AREDES, Mauricio. **Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning**. New Jersey: IEEE Press / Wiley-Interscience, 2007. 400 p.

AREDES, Mauricio. **Novos Conceitos de Potência e Aplicações em Filtros Ativos**. Tese de mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1991.

FREITAS, Manuel João Sepúlveda Mesquita de **implementação de um Filtro Ativo de Potência para Otimização da Interface entre a Rede e outros Sistemas Eléctricos**: Estudo e Desenvolvimento de Filtros Ativos de Potência do Tipo Série com Sistema de Controlo Implementado em Computador Pessoal. 2004. 212 f. Dissertação (Mestrado) - UFNG, Guimarães.

Hirofumi Akagi e João Luiz Afonso, **Instantaneous pq Power Theory for Control of Compensators in MicroGrids**, PRZEGLAD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review), R 86, pp. 110, June

Hirofumi Akagi, Yoshihira Kanazawa, Akira Nabae. “**Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components**”. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-20, No. 3, May/June 1984, pp.625-630.[2] S.

PINTO, Vinicius Maciel. **Um Estudo Comparativo De Técnicas De Chaveamento De Conversores Três Níveis**. 2005. 116 f. Dissertação (Mestrado) - UFRJ, Rio de Janeiro.

TEIXEIRA, Douglas Ângelo. **Análise das Distorções Harmônicas - Estudo de Caso de Um Sistema Industrial**. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

WATANABE, Edson; AREDES, Maurício. **Teoria de potência ativa e reativa instantânea e aplicações – filtros ativos e FACTS**. Congresso Brasileiro de Automática CBA’98. Uberlândia, 1998.