

Fatores de Influência no Desempenho de Filtros Eletromagnéticos de Seqüência Positiva e Negativa

F. N. Belchior, J. C. Oliveira e L. C. O. Oliveira

Resumo--Este artigo apresenta o princípio de funcionamento, modelagem e análise computacional de desempenho de uma proposta de filtro eletromagnético para a compensação de componentes harmônicas de seqüência positiva e negativa. O artigo ressalta a importância de uma correta especificação do nível de saturação (geração de harmônicos) e a necessidade da inserção de um dispositivo defasador para a otimização do processo da redução do conteúdo harmônico de corrente proporcionado pelo conjunto formado pela carga não-linear e o filtro. As análises feitas estão voltadas para o esclarecimento do princípio da compensação harmônica e da verificação do impacto de fatores de influência neste processo. As condições operacionais investigadas compreendem o funcionamento do filtro sob distintas situações para a tensão de alimentação e da carga não-linear. Os resultados considerados neste artigo são de cunho computacional, empregando, para tanto, um simulador no domínio do tempo.

Palavras-Chaves-- Cargas não-lineares, compensação harmônica, fatores de influência, filtros de seqüência positiva e negativa.

I. INTRODUÇÃO

DENTRO do contexto dos indicadores de qualidade da energia elétrica, as questões associadas com as distorções harmônicas, há tempos, têm motivado os pesquisadores no sentido de viabilizar soluções para a minimização dos problemas. O assunto, na atualidade, cresce em importância à medida que os órgãos públicos, à exemplo da ANEEL, através do PRODIST, buscam mecanismos para o controle e manutenção dos padrões de qualidade dos fornecimentos à nível de distribuição.

Para a preservação da qualidade do suprimento de forma confiável, segura e dentro de padrões almejados, faz-se, portanto, necessário, dentre outras, a utilização de técnicas para eliminação ou redução das correntes harmônicas nos sistemas elétricos. Os procedimentos para se atingir a tais propósitos são clássicos, porém a busca de novas tecnologias, através de novas concepções de equipamentos, certamente,

continua atraindo os pesquisadores. Os recursos disponibilizados e em desenvolvimento, de um modo geral, podem ser agrupados em três grandes conjuntos, conforme seu princípio operacional. São eles:

- Filtros passivos [1];
- Filtros ativos [1], [2];
- Filtros eletromagnéticos [3], [4].

Destes, as duas primeiras estratégias, amplamente conhecidas e há tempos empregadas na engenharia elétrica, possuem princípios muito bem estabelecidos e, por tais motivos, não serão consideradas em maiores detalhes neste artigo.

No que tange aos últimos tipos de equipamentos, estes se baseiam exclusivamente no uso de arranjos eletromagnéticos, dispensando, portanto, o emprego de capacitores ou outros recursos adicionais ao processo da compensação. Esta tecnologia tem sido explorada e difundida para a atenuação de componentes harmônicas de seqüência zero. A título de exemplificação, [4] trata do conceito físico de um filtro de seqüência zero, com um núcleo trifásico, direcionando para o princípio fundamental, modelagem e simulação computacional do dispositivo.

Avançando na direção do desenvolvimento de dispositivos eletromagnéticos voltados para a compensação de outras componentes harmônicas, que não as de seqüência zero, destaca-se [5], que contempla um dispositivo eletromagnético, à base de saturação, destinado à atenuação das componentes harmônicas de seqüência positiva e negativa.

Considerando, pois a tecnologia da compensação de harmônicos de corrente via dispositivos eletromagnéticos saturados, este trabalho encontra-se direcionado para a apresentação do princípio físico que norteia a solução aqui contemplada, sua implementação na forma de modelos computacionais e a influência de parâmetros reais de um sistema elétrico na eficiência do dispositivo em questão.

II. PRINCÍPIO FÍSICO DO PROCESSO DA COMPENSAÇÃO DE HARMÔNICOS

Para fins do entendimento do princípio associado com a estratégia de compensação focada neste artigo, a Fig. 1 sintetiza, de modo bastante simplificado, um arranjo típico constituído pela fonte, carga e dispositivo para compensação das correntes harmônicas.

F. N. Belchior é docente da Universidade Federal de Itajubá, Grupo de Estudos em Qualidade da Energia Elétrica (e-mail: fnbelchior@unifei.edu.br).

J. C. Oliveira é docente da Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica (e-mail: jcoliveira@ufu.br).

L. C. O. Oliveira é docente na Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, SP (e-mail: origa@dee.feis.unesp.br).

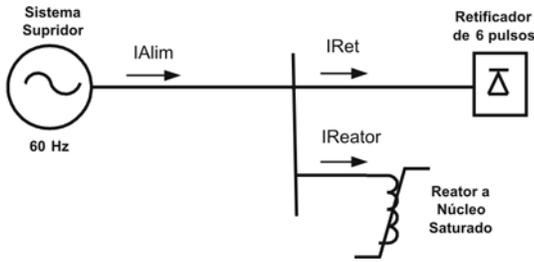


Fig. 1. Arranjo elétrico para a compensação harmônica.

A operação de um retificador de 6 pulsos é bastante difundida e dispensa maiores detalhes [6]. Não obstante este fato é importante destacar que, sob condições idealizadas do sistema alimentador, bem como a existência de uma indutância infinita nos terminais de saída, a corrente média no lado CC é constante de valor I_d . Nestas condições, as correntes de alimentação do lado CA serão formadas por blocos retangulares de amplitude $\pm I_d$. A Fig. 2 evidencia a forma de onda típica e idealizada da corrente de linha de alimentação (I_{Ret}) e a respectiva tensão de alimentação (V) (fase A).

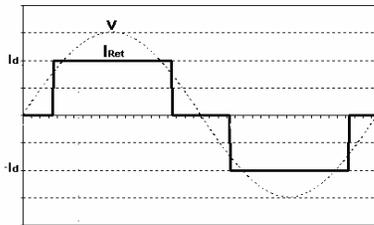


Fig. 2. Corrente de linha no retificador de 6 pulsos não-controlado (fase A).

Tomando-se a tensão fase A - neutro (V) como referência para o cálculo das componentes harmônicas da corrente de linha, é possível observar que o retificador produz apenas as chamadas ordens harmônicas características, dadas por $6k\pm 1$, sendo $k \in \mathbb{I}^+$, como mostra a Fig. 3.

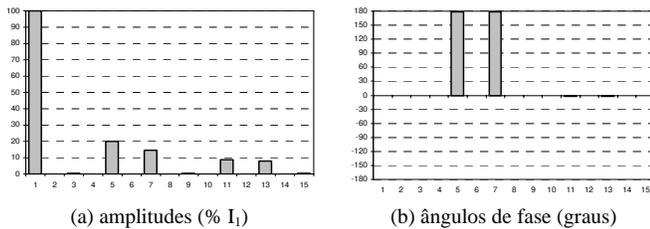


Fig. 3. Análise harmônica da corrente do retificador.

O dispositivo para a compensação consiste em um reator trifásico saturado. Este é um dispositivo inerentemente não-linear, sendo, conseqüentemente, visto pelo sistema elétrico como uma fonte geradora de correntes harmônicas [7]. O arranjo completo é apresentado na Fig. 4(a), enquanto que a Fig. 4(b) é ilustrativa da característica não-linear do núcleo magnético.

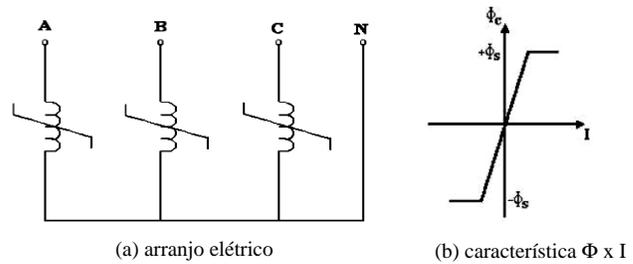


Fig. 4. Arranjo típico de um reator saturável e sua característica $\Phi \times I$.

Tomando-se por referência a tensão de fase A em relação ao neutro (V) e observando a característica não-linear do núcleo, constata-se que a correspondente corrente de linha tem a forma indicada na Fig. 5. Esta se caracteriza por correntes harmônicas de ordens $2k\pm 1$, sendo $k \in \mathbb{I}^+$. A forma de onda destacada corresponde a uma das fases do equipamento, com o neutro conectado a referência terra. Vale ressaltar que o produto final de interesse ao processo da compensação se apresenta com o neutro isolado.

A Fig. 6 mostra, tal como realizado para o caso do retificador, os espectros de magnitude e de fase da corrente atrelada à operação do reator saturado. Tomando por base as componentes harmônicas de ordem 5 produzidas pelo retificador e reator, estas se encontram, originalmente, dispostas como mostrado na Fig. 7 - (a). Também, através da Fig. 7 - (a) é possível observar que a operação conjunta destes dispositivos, tal qual foi apresentada, não conduz ao almejado cancelamento da ordem harmônica. Nestas condições, os ângulos de fase para uma mesma componente harmônica observada no retificador e no reator estão em quadratura. Ainda que seja possível a modulação da magnitude da componente harmônica da corrente absorvida pelo reator saturável, mediante um ajuste adequado do nível de saturação, os ângulos de fases permanecem os mesmos.

Avançando na direção de se atingir uma compensação harmônica mais efetiva, observa-se que a inserção de um elemento resistivo entre o barramento e o reator resulta numa mudança do ângulo de fase de suas correspondentes correntes harmônicas. A título de exemplificação, com a presença de um resistor devidamente ajustado, fica evidenciado que o espectro de frequências das correntes produzidas pelo compensador assume novas propriedades angulares. Em decorrência deste fato, a nova composição angular, dada na Fig. 7 - (b), ressalta uma situação mais favorável ao processo da atenuação das componentes harmônicas de correntes advindas da operação conjunta do retificador e do dispositivo eletromagnético.

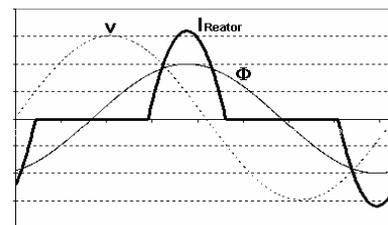


Fig. 5. Corrente de linha no reator saturado monofásico (fase A).

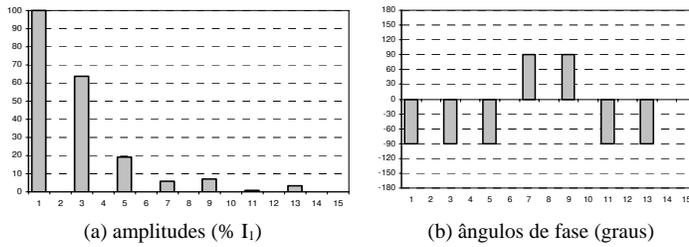


Fig. 6. Análise harmônica da corrente do reator saturado.

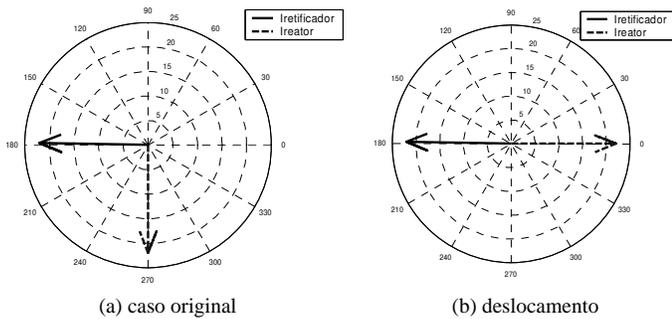


Fig. 7. Diagrama fasorial da corrente (fase A) na carga não-linear e reator saturado.

A partir das considerações anteriores, é possível constatar que o reator saturável age como um dispositivo gerador de harmônicos com possibilidade de proporcionar a compensação de algumas das componentes associadas com o funcionamento do retificador. Entretanto, para que esta propriedade seja obtida torna-se necessário:

- O ajuste do nível de saturação baseado nos parâmetros geométricos e na curva BxH, visando estabelecer a amplitude desejada para uma determinada componente harmônica. Neste contexto, é importante destacar que o ponto ótimo de operação será definido pela maior relação porcentual entre a componente harmônica que está sendo ajustada e a componente fundamental. Isto garantirá a melhor solução para o fator de deslocamento final do conjunto;
- A incorporação de um mecanismo defasador que venha a introduzir um deslocamento angular no fluxo concatenado e, por conseguinte, na corrente de alimentação do reator. Um ajuste adequado da defasagem pode, portanto, produzir o ângulo de fase oposto àquela ordem harmônica que se deseja atenuar.

A modelagem do filtro eletromagnético, bem como da carga retificadora, utilizadas para os estudos, estão detalhadas em [8], não sendo mostradas neste artigo.

III. FATORES DE INFLUÊNCIA NO PROCESSO DE FILTRAGEM

No que tange às possibilidades reais com que se pode operar o filtro eletromagnético, e que se constituem em desvios das condições operativas postuladas quando do estabelecimento dos princípios operativos do dispositivo, destacam-se:

- Tensão de alimentação senoidal com um fator de desequilíbrio de 3%;
- Tensão equilibrada senoidal com magnitude inferior ao valor nominal;
- Carga não-linear trifásica desequilibrada.

Em vista dos impactos que as mencionadas variáveis possam trazer para a operação do dispositivo, considera-se fundamental avaliar seus efeitos para um correto dimensionamento do filtro eletromagnético, o que é feito a seguir.

IV. ESTUDOS COMPUTACIONAIS

Os estudos computacionais foram realizados utilizando o arranjo físico identificado na Fig. 1.

As situações selecionadas e representativas das distintas condições operacionais estudadas estão resumidas na Tabela I.

TABELA I
PARÂMETROS PARA O SISTEMA SIMULADO

Situação	Características
01 - Alimentação senoidal equilibrada e carga equilibrada	$V_A = V_B = V_C = 117V$
02 - Tensão senoidal desequilibrada e carga equilibrada	$V_A^0 = 3,61V / 106^\circ$, $V_A^+ = 120V / 0^\circ$, $V_A^- = 3,61V / 106^\circ$ $k\% = 3\%$
03 - Tensão senoidal equilibrada com valor eficaz inferior ao nominal e carga equilibrada	$V_A = 110V / 0^\circ$, $V_B = 110V / -120^\circ$, $V_C = 110V / 120^\circ$
04 - Carga desequilibrada e tensão senoidal equilibrada	$S_A = 370VA$, $S_B = 470VA$, $S_C = 580VA$

A. Caso 01 – Situação Ideal

Como caso base para as análises da eficiência do filtro, o sistema foi alimentado através de tensões equilibradas e senoidais, de valor eficaz fase-neutro igual a 117V. A carga não-linear suprida também foi assumida como equilibrada, com potência de 1,4kVA. O sistema de suprimento foi considerado ideal.

A Fig. 8 mostra a corrente na carga (fase A) e respectivo espectro de frequências. De modo similar, a Fig. 9 evidencia a corrente no sistema supridor, enquanto que a Fig. 10 destaca a corrente no filtro.

Os resultados obtidos evidenciam a significativa redução do DHT, diminuindo de 26% para 10%, mostrando assim a eficiência do procedimento proposto. De forma complementar, constata-se que, mediante o ajuste adequado do nível de saturação do reator, foi possível manter o fator de deslocamento em níveis aceitáveis (0,95), garantindo-se, conseqüentemente, um bom fator de potência para o conjunto.

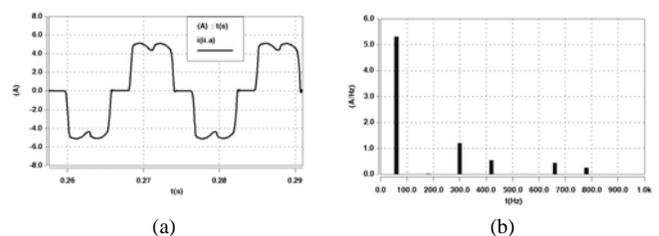


Fig. 8. Forma de onda (a) e respectivo espectro harmônico (b) da corrente (fase A) na carga não-linear - Caso 01.

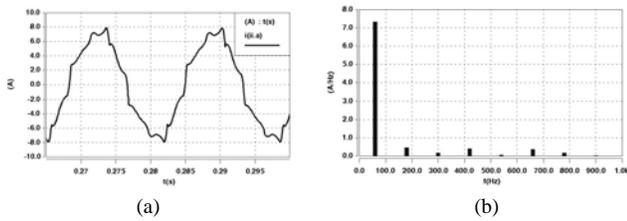


Fig. 9. Forma de onda (a) e respectivo espectro harmônico (b) da corrente (fase A) na alimentação - Caso 01.

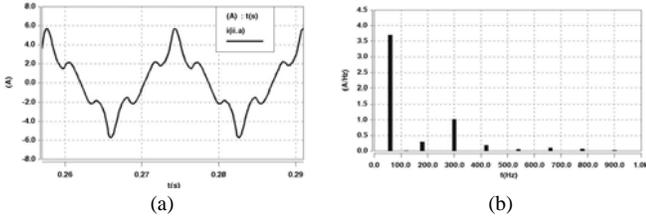


Fig. 10. Forma de onda (a) e respectivo espectro harmônico (b) da corrente (fase A) absorvida pelo filtro harmônico - Caso 01.

Objetivando fornecer maiores esclarecimentos sobre a operacionalidade do filtro, as Figs. 11 (a) e (b) apresentam, na forma de diagramas fasoriais, as correntes harmônicas, em valor de pico, para a 5ª e 7ª ordens, correspondentes ao filtro e a carga não-linear (fase A).

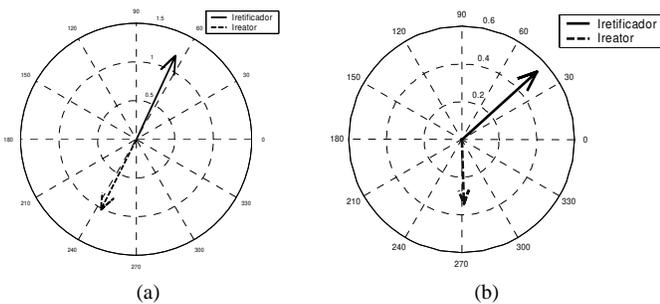


Fig. 11. Diagramas fasoriais das correntes harmônicas de pico (fase A) da carga não-linear e filtro harmônico - Caso 01 (a) 5ª ordem (b) 7ª ordem.

B. Caso 02 - Alimentação com tensão senoidal desequilibrada

Como forma de avaliar o desempenho do filtro em questão diante de tensões desequilibradas, adotou-se uma assimetria responsável por um fator de desequilíbrio de 3% (V_A/V_A^+), mantendo-se as demais características idênticas às condições ideais de funcionamento.

As Figs. 12, 13 e 14 apresentam, respectivamente, a comparação entre os espectros harmônicos, quando da situação ideal (caso 01) e esta sob enfoque, associados às correntes de linha na carga não-linear, na alimentação e, por fim, no filtro eletromagnético de seqüência positiva e negativa (fase A).

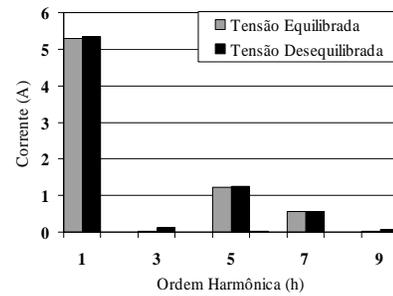


Fig. 12. Comparação entre os espectros harmônicos das correntes de linha na carga não-linear - Caso 01 e Caso 02.

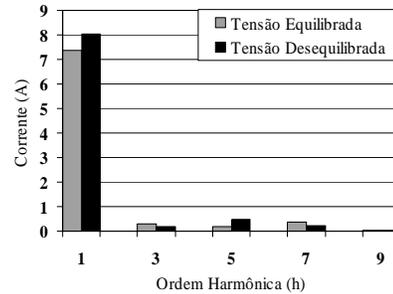


Fig. 13. Comparação entre os espectros harmônicos das correntes de linha na alimentação - Caso 01 e Caso 02.

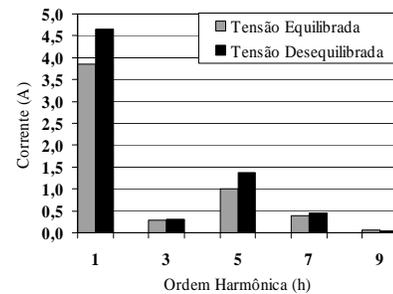


Fig. 14. Comparação entre os espectros harmônicos das correntes de linha no filtro - Caso 01 e Caso 02.

Objetivando um melhor entendimento sobre o desempenho do filtro eletromagnético, diante de condições de um suprimento desequilibrado, nos termos investigados, as Figs. 15 (a) e (b) oferecem um mecanismo simples e eficiente para uma visualização do desempenho do processo de compensação. Para simplificar a análise, apenas os fasores correspondentes às componentes harmônicas de 5ª e 7ª ordens, fase A, foram considerados. Nestes diagramas, tal como acontece para o caso ideal de suprimento, ficam evidenciadas as compensações harmônicas destas ordens.

A comparação destes diagramas com aqueles constantes nas Figs. 11 (a) e (b), relativos ao suprimento de tensão ideal, evidenciam a vulnerabilidade desta metodologia com relação ao desvio do padrão ideal da tensão de suprimento (3% de desequilíbrio). Nesta situação verifica-se um valor de 14% para o DHT total na alimentação, contra os 10% obtidos quando em situação ideal de funcionamento. Deste modo, verifica-se que, quando o filtro eletromagnético é alimentado com uma tensão diferente daquela especificada para o seu funcionamento, os fasores das componentes harmônicas de 5ª

e 7ª ordens são modificados, afetando, por conseguinte, o processo como um todo. Isto é uma decorrência normal relacionada com o ponto de saturação atingido e definido pela característica da curva BxH do material magnético. Este desvio promove uma menor compensação harmônica das correntes oriundas da carga não-linear.

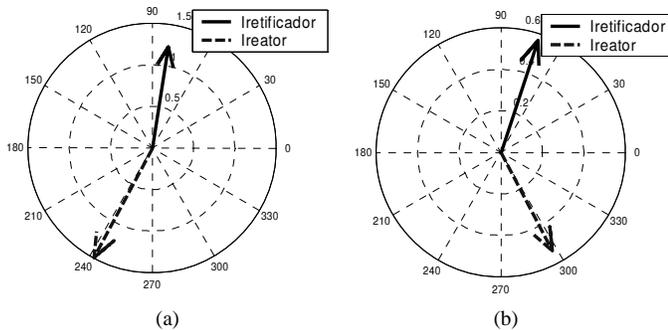


Fig. 15. Diagramas fasoriais das correntes harmônicas de pico (fase A) da carga não-linear e filtro harmônico - Caso 02 (a) 5ª ordem (b) 7ª ordem.

C. Caso 03 - Tensão de alimentação equilibrada com valor eficaz inferior ao nominal

Uma outra condição operacional não-ideal capaz de modificar a eficácia da metodologia proposta se encontra atrelada ao valor eficaz da tensão de alimentação equilibrada. Neste sentido, uma tensão senoidal equilibrada com valor eficaz de 110V fase-neutro foi aplicada ao conjunto formado pelo filtro e carga não-linear, mantendo-se as demais características idênticas às condições ideais de funcionamento. Os resultados para as correntes registradas na carga não-linear, no alimentador e no filtro sob enfoque são mostrados nas Figs. 16-18.

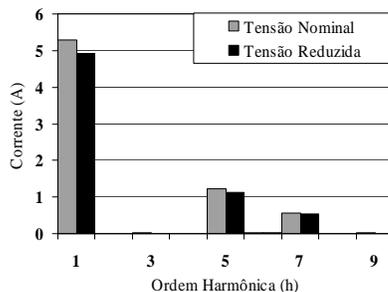


Fig. 16. Comparação entre os espectros harmônicos das correntes de linha na carga não-linear - Caso 01 e Caso 03.

Novamente, com o objetivo de prover meios para um maior entendimento do processo de filtragem e dos impactos associados com o funcionamento sob condições reduzidas das tensões de suprimento, as Figs. 19 (a) e (b) apresentam os diagramas fasoriais para as correntes de 5ª e 7ª ordens para as correntes do filtro e da carga não-linear. Tal como aconteceu para o caso anterior, observa-se uma forte influência do valor da tensão de suprimento senoidal no desempenho do filtro ora sob enfoque. Neste particular, é possível constatar as baixas correntes harmônicas oriundas do mesmo, justificadas através da baixa saturação, em decorrência da baixa tensão de suprimento. Como consequência, verifica-se um valor de 18%

para o DHT total no sistema de suprimento. Novamente, a comparação destes diagramas com aqueles oriundos das Figs. 11 (a) e (b) permitem ratificar as afirmativas anteriores.

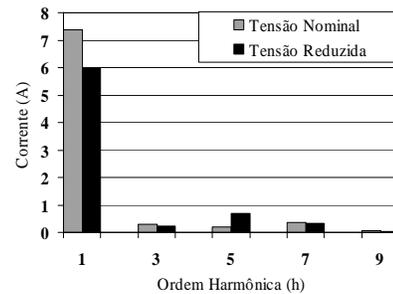


Fig. 17. Comparação entre os espectros harmônicos das correntes de linha na alimentação - Caso 01 e Caso 03.

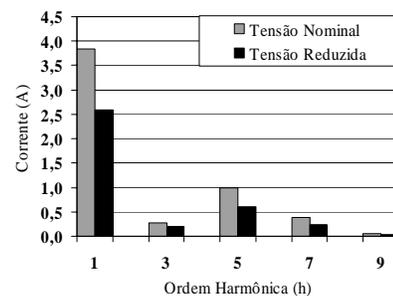


Fig. 18. Comparação entre os espectros harmônicos das correntes de linha no filtro - Caso 01 e Caso 03.

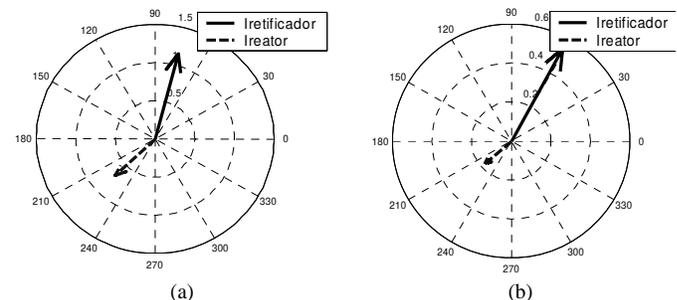


Fig. 19. Diagramas fasoriais das correntes harmônicas de pico (fase A) da carga não-linear e filtro harmônico - Caso 03 (a) 5ª ordem (b) 7ª ordem.

D. Caso 04 - Carga não-linear desequilibrada

De modo a contemplar, esta situação não-ideal adotou uma nova composição para a carga, a qual passou a ser constituída por 3 unidades retificadoras distintas, cujas potências são: $S_A=370VA$, $S_B=470VA$ e $S_C=580VA$. Quanto às demais grandezas, estas foram restauradas aos valores empregados quando das investigações sob condições ideais de funcionamento do filtro. As Figs. 20-22 apresentam os resultados para as correntes de linha registradas na carga não-linear, na alimentação e, por fim, no filtro de seqüência positiva e negativa.

As Figs. 23 (a) e (b) apresentam os diagramas fasoriais das componentes de 5ª e 7ª ordens para a carga e filtro eletromagnético, relativos á situação sob análise.

Os diagramas evidenciam que a operação da carga não-linear, de forma desequilibrada, tal como especificada,

apresenta-se com um conteúdo harmônico de 5ª e 7ª ordens com valores bastante distintos daqueles observados quando da carga equilibrada (Figs. 11 (a) e (b)). Esta situação, como se constata, prejudica o processo de filtragem destas componentes harmônicas. De fato, verifica-se um DHT de aproximadamente 50%, valor este bem acima do observado quando no caso 01. Assim, fica constatado que o conhecimento das condições operativas do filtro sob a ação de uma carga desequilibrada também se constitui em fator relevante ao processo da compensação visto afetar substancialmente a eficácia desta metodologia de filtragem.

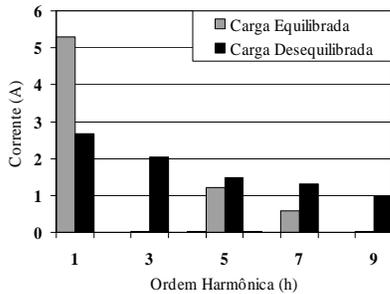


Fig. 20. Comparação entre os espectros harmônicos das correntes de linha na carga não-linear - Caso 01 e Caso 04.

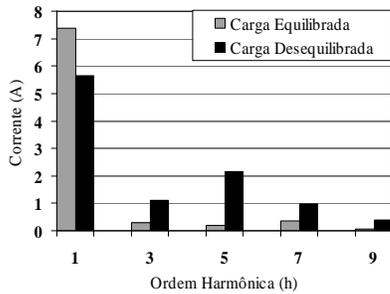


Fig. 21. Comparação entre os espectros harmônicos das correntes de linha na alimentação - Caso 01 e Caso 04.

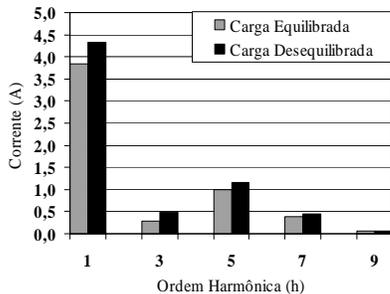


Fig. 22. Comparação entre os espectros harmônicos das correntes de linha no filtro - Caso 01 e Caso 04.

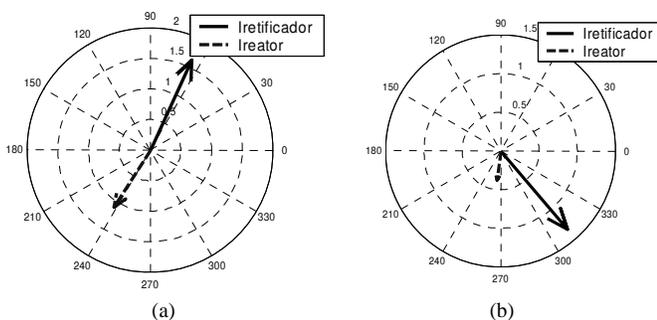


Fig. 23 Diagramas fasoriais das correntes harmônicas de pico (fase A) da carga não-linear e filtro harmônico - Caso 04 (a) 5ª ordem (b) 7ª ordem.

V. CONCLUSÕES

Este artigo, voltado para o desempenho operacional dos filtros eletromagnéticos de seqüência positiva e negativa, abordou aspectos relacionados o funcionamento do dispositivo sob situações não-ideais de operação. O processo de filtragem consiste da utilização de um dispositivo eletromagnético saturado devidamente ajustado para a redução e/ou cancelamento do conteúdo harmônico gerado por uma carga não-linear, geradora de harmônicos de seqüência positiva e negativa. A incorporação de um mecanismo defasador para o fluxo concatenado e um ajuste adequado do nível de saturação quando do projeto do dispositivo garante a eficiência desta metodologia. Através de uma exemplificação associada com a operação sob condições ideais constatou-se a eficiência do dispositivo no processo da compensação. De fato, distorções da ordem de 26% foram reduzidas à 10% quando da presença do filtro. Todavia, o artigo evidenciou que situações não-ideais de operação, podem afetar de forma significativa a eficácia do processo. Os estudos realizados foram de cunho computacional e almejam esclarecer sobre a relevância da avaliação do desempenho do filtro eletromagnético quando de sua operação sob condições frequentemente encontradas nas redes elétricas reais.

VI. AGRADECIMENTOS

Nosso reconhecimento e gratidão à FAPEMIG pelos recursos concedidos para o projeto de pesquisa e à CAPES pela bolsa de pós-graduação.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Häfner, M. Aredes, e K. Heumann, "A Combined System of a Passive Filter and a Shunt Active Power Filter to Reduce Line Current Harmonics", em *Proceedings IPEC'95*, Yokohama, pp. 388-393, 1995.
- [2] J. Dixon, G. Venegas e L. Morán, "A Series Active Power Filter Based on a Sinusoidal Current Controlled Voltage Source Inverter", em *Proceedings IECON'95*, Orlando, pp. 639-644, 1995.
- [3] E. Friedlander e K. M. Jones, "Saturated Reactors for Long Distance Bulk Power Lines", *Electrical Review*, 27th, June, pp. 940-943, 1969.
- [4] R. Apolônio, J. C. Oliveira, A. B. Vasconcelos e A. Oliveira, "Three-Phase Electromagnetic Filter for Zero Sequence Harmonics", em *VI Conferência de Aplicações Industriais - INDUSCON*, Joinville-SC, Brasil, 2004.
- [5] F. N. Belchior, J. C. Oliveira e L. C. O. Oliveira, "Uma Estratégia Eletromagnética para Redução da Injeção de Correntes Harmônicas Através da Auto-Compensação", em *16º CBA - Congresso Brasileiro de Automática*, Salvador - BA - Brasil, 2006.
- [6] L. C. O. Oliveira, "Cálculo Trifásico de Harmônicas Geradas por Conversores e Compensadores Estáticos Sob Condições Não-Ideais de Operação", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, 1983.
- [7] A. B. Vasconcelos, "Modelagem, Projeto e Construção de Compensadores Estáticos Tipo Reator à Núcleo Saturado Para Melhoria da Qualidade da Energia: Análise Computacional e Validação experimental", Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, 2004.
- [8] F. N. Belchior, "Uma Nova Abordagem à Filtragem de Harmônicos Através de Dispositivos Eletromagnéticos", Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, 2006.