

Análise comparativa de Desempenho e de Suportabilidade entre Filtros harmônicos sintonizados e amortecidos

R. P. Nascimento e J. W. Resende, Universidade Federal de Uberlândia, MG, Brasil

Resumo: Este artigo faz uma análise sobre a introdução de filtros harmônicos em uma instalação industrial típica de usinas siderúrgicas. Especial atenção é dada à comparação entre o uso de filtros sintonizados ou amortecidos neste tipo particular de instalação, que produz correntes harmônicas de ordens não-características, inclusive. Nesse tocante, o presente estudo de casos mostra, dentre outros aspectos, que, dependendo de certas considerações feitas no projeto dos filtros sintonizados, estes podem até dispensar somas de potência reativa maiores do que os filtros amortecidos.

Palavras-Chave: Filtros harmônicos sintonizados, fluxo harmônico, projeto de filtros, qualidade da energia elétrica.

I. INTRODUÇÃO

A eficiência dos filtros harmônicos em derivação na redução dos níveis de distorção harmônica, bem como na melhoria do fator de potência em sistemas elétricos é uma teoria consolidada. Há, porém, uma lacuna no que se refere a pesquisas publicadas que discutam e comparem o desempenho de filtros sintonizados e amortecidos. A grande maioria das publicações leva sempre em consideração apenas os filtros sintonizados, sob alegação de que os filtros amortecidos dispensam uma potência reativa fundamental bem maior do que a que seria dispensada pelos filtros sintonizados para a obtenção da mesma eficiência de filtragem. No entanto, isso nem sempre é verdade. Com o auxílio de um programa digital desenvolvido pelos autores ([1], [2]), este artigo apresenta um estudo comparativo relativo à introdução de filtros harmônicos sintonizados e/ou amortecidos, em uma instalação industrial típica de usinas siderúrgicas. Os principais aspectos analisados foram a potência reativa dispendida pelos capacitores frente a desempenhos e a suportabilidades estipuladas por normas. Neste estudo não foram analisadas as perdas joulicas nos elementos resistivos dos filtros.

A figura 1 mostra o diagrama unifilar simplificado da instalação a ser analisada. Conectados à barra de 33 kV encontram-se diversas cargas industriais não-lineares, dentre elas, a principal é um Forno a Arco de elevada potência aparente nominal.

Os dados referentes às correntes harmônicas injetadas pelo forno a arco na barra de 33 kV estão na Tabela I. A potência base adotada nos cálculos foi de 100 MVA.

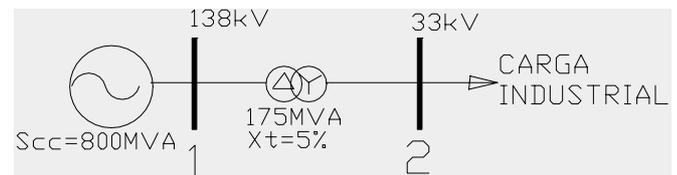


Figura 1 – Diagrama unifilar do sistema elétrico simulado.

TABELA I
CORRENTES HARMÔNICAS INJETADAS NA REDE

ORDEM HARMÔNICA	CORRENTE [A]
2	59,4
3	49,0
4	43,7
5	43,5
6	38,3
7	27,3
8	17,22
9	11,6
10	10,0
11	10,1

II. CASOS SIMULADOS

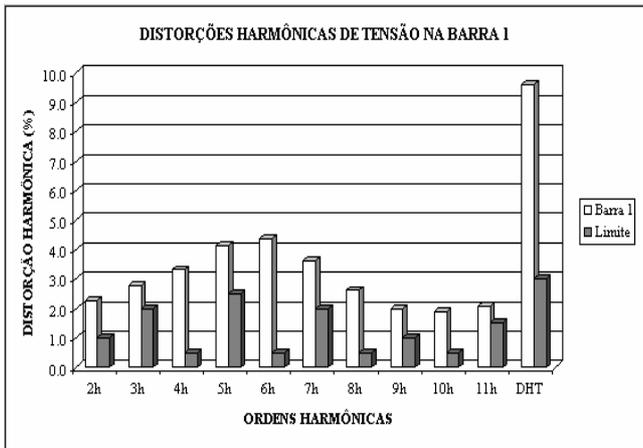
As simulações computacionais serão feitas na forma de 4 casos individuais, a saber:

- Caso 1 - Sistema elétrico original (sem filtros);
- Caso 2 - Sistema elétrico com filtros sintonizados;
- Caso 3 - Sistema elétrico com filtros amortecidos;
- Caso 4 - Sistema elétrico com filtros sintonizados e amortecidos.

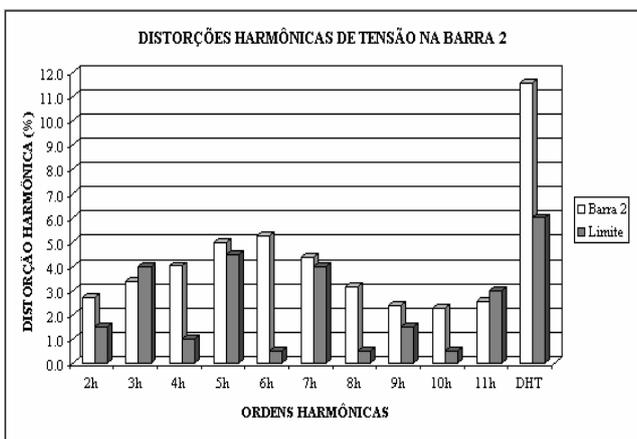
II.1. CASO 1 - SISTEMA ELÉTRICO SEM FILTROS

De posse dos dados referentes ao diagrama de impedâncias do sistema e também das correntes harmônicas injetadas no mesmo, o programa de penetração harmônica calculou as distorções harmônicas individuais e total, de tensão, para as barras 1 e 2. Tais resultados estão mostrados na figura 1. Nesta figura tem-se a comparação entre os valores das distorções harmônicas calculadas do sistema do caso 1 e os valores limites estipulados pelas normas do PRODIST (*Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST de responsabilidade da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, publicada na data de 30 de agosto de 2006.*). Nesta figura, em cor escura estão os limites permitidos para as distorções harmônicas de tensão

individuais (DHIs) e total (DHT). Em cor clara estão os valores obtidos através dos cálculos computacionais.



(a)



(b)

Figura 2 – Distorções harmônicas de tensão para o caso 1.
(a) Na barra 1. (b) Na barra 2.

Como pode ser observado, os valores de *todas* as DHI's calculadas estão acima dos valores limites permitidos. O mesmo ocorre com o valor da DHT. Os resultados observados neste primeiro caso já eram esperados, uma vez que as correntes harmônicas injetadas no sistema possuem valores consideravelmente elevados. Cabe, portanto, uma intervenção técnica para adequação destes valores à norma proposta. Esta intervenção será feita através da inserção de filtros harmônicos no sistema.

A simulação de casos, nos quais filtros harmônicos sintonizados e amortecidos serão projetados e inseridos no sistema, serão apresentados a seguir.

II.2. CASO 2 - SISTEMA ELÉTRICO COM FILTROS SINTONIZADOS

Neste caso serão inseridos filtros harmônicos sintonizados, com o objetivo prioritário de reduzir os valores das distorções harmônicas, individuais e totais de tensão, observadas no sistema elétrico original (caso 1). Os resultados

aqui apresentados são obtidos através de critérios de projeto que levaram à determinação de um arranjo composto por um número mínimo de filtros sintonizados, com potências reativas nominais mínimas, capaz de atender aos critérios de distorção estipulados por norma. A barra escolhida para a inserção do arranjo de filtros foi a barra 2, por estar mais próxima à carga e possuir um menor nível de tensão (33 kV).

Para o atendimento dos níveis de distorção estipulados por norma, foi necessário um arranjo de 6 filtros sintonizados, nas ordens harmônicas 2, 3, 4, 5, 6 e 7.

Foram simulados 4 (quatro) “sub-casos”. Em cada um, os filtros foram projetados levando-se em consideração um determinado valor de dessintonia máxima. Os sub-casos simulados foram os seguintes:

- Sub-caso 2.1 - Filtros projetados com dessintonia máxima igual a 0;
- Sub-caso 2.2 - Filtros projetados com dessintonia máxima igual a 0,1;
- Sub-caso 2.3 - Filtros projetados com dessintonia máxima igual a 0,2;
- Sub-caso 2.4 - Filtros projetados com dessintonia máxima igual a 0,3.

A figura 3 mostra os resultados para as distorções harmônicas individuais e totais de tensão na barra 2, para as 4 hipóteses (Obs.: na legenda mostrada no lado direito da figura 3, os sub-casos estão indicados como “casos”). Pode-se observar que os valores de grande parte das distorções harmônicas individuais, ficaram bem abaixo dos valores limites estipulados pela norma.

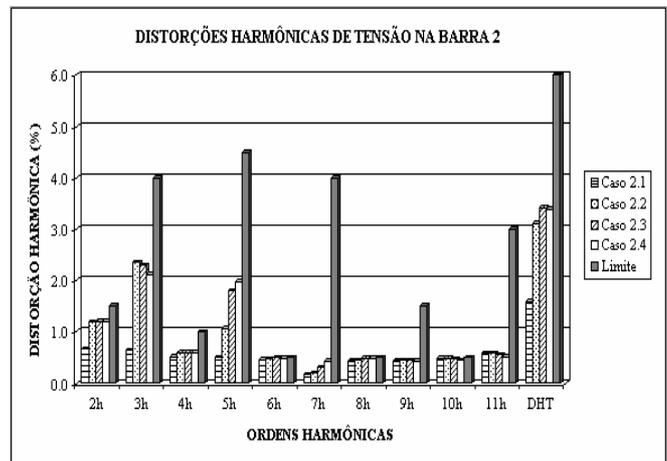


Figura 3 – Distorções harmônicas de tensão no sistema com filtros sintonizados.

É sabido que os projetos dos filtros sintonizados devem ser conduzidos de forma a prever e assimilar possíveis dessintonias. Neste sentido, é importante destacar os valores de potências reativas requeridas para o atendimento das normas, tanto de desempenho quanto de suportabilidade, nos quatro sub-casos simulados: para os filtros sintonizados, em função das dessintonias máximas admitidas em projeto:

- No sub-caso 2.1, onde os filtros foram projetados com uma dessintonia máxima igual a zero, foi

necessária uma potência reativa capacitiva total de 0,53 pu para o atendimento das normas.

- No sub-caso 2.2, no qual adotou-se uma dessintonia máxima igual a 0,1, foi necessária uma potência total de 0,62 pu.
- Já no caso 2.3, a dessintonia adotada foi de 0,2 e a potência total necessária foi 1,10 pu.
- Por fim, no caso 2.4, a soma total de potência necessária foi 1,80 pu, com os filtros projetados com uma dessintonia máxima de 0,3.

Apesar do sub-caso 2.1 ser aquele cuja soma de potência reativa foi a menor de todos, pode-se afirmar que os filtros projetados neste caso certamente terão sua eficiência de filtragem comprometida, se submetidos a dessintonias.

Por outro lado, nos outros três sub-casos (2.2, 2.3 e 2.4), constata-se que, quanto maior for o nível de segurança do projeto em relação às dessintonias, maior será o valor da potência reativa necessária para o atendimento das normas. Por exemplo, no sub-caso 2.4, para atender aos limites de distorção harmônica de tensão individual de 2ª ordem, o banco de capacitores do filtro sintonizado nesta ordem, será de 1,05 pu, que é quase o *dobro* da potência reativa capacitiva total gasta no sub-caso 2.1, que foi de 0,53 pu!

Esta análise leva à conclusão de que o desenvolvimento de projetos de filtros sintonizados, considerando-se valores muito grandes de dessintonia máxima, certamente conduzirá à utilização de valores de potências reativas demasiadamente altos. Isso onera em muito o projeto. Contudo, é muito arriscado desenvolver projetos sem qualquer preocupação quanto aos efeitos indesejáveis das dessintonias, uma vez que estes efeitos podem, também, inviabilizar o projeto, em termos de futuras deficiências de filtragem. Cabe ao projetista, portanto, ter a sensibilidade de encontrar um ponto de equilíbrio entre a segurança na eficiência de filtragem e a viabilidade econômica do projeto. Nesse tocante, para o presente estudo de casos, o referido equilíbrio é conseguido pelo arranjo de filtros projetado no sub-caso 2.3.

Outra informação importante refere-se à tensão nominal requerida pelos capacitores. Através da *análise de suportabilidade*, tem-se que a tensão nominal de todos os capacitores não pode ser de 33 kV, que é a tensão nominal da barra onde os filtros serão instalados. Devido às correntes harmônicas que adentram aos filtros e que, em decorrência, provocam significativas tensões entre os terminais dos capacitores, a tensão eficaz total deve ser de, no mínimo, 1,39 pu (46 kV).

II.3. CASO 3 - SISTEMA ELÉTRICO COM FILTROS AMORTECIDOS APENAS

Neste caso serão inseridos filtros harmônicos amortecidos no sistema elétrico original (caso 1), com o mesmo objetivo do caso anterior, ou seja, reduzir os valores

das distorções harmônicas de tensão (individuais e total), observadas neste sistema.

Durante as simulações, verificou-se que a utilização de arranjos compostos por dois ou mais filtros amortecidos, acabavam por dispensar maiores valores de potência reativa do que quando da utilização de apenas *um* filtro amortecido. Assim, os resultados que serão aqui apresentados foram conseguidos através de critérios de projeto que levaram à determinação de um filtro amortecido, com potência reativa nominal mínima, capaz de atender aos critérios de distorção estipulados por norma.

A escolha da ordem harmônica característica, bem como do fator de amortecimento foi feita levando-se em consideração os valores das distorções harmônicas individuais de tensão observados no caso 1. Também foram considerados os efeitos das ressonâncias em ordens harmônicas inferiores à ordem característica do filtro, nas diversas possibilidades de inserção do filtro amortecido no sistema.

O programa computacional adotado é capaz de projetar os três modelos de filtros amortecidos mais usuais. Dessa forma, no presente caso foram considerados os seguintes “sub-casos”, sendo que, em cada um deles, foi utilizado um modelo de filtro amortecido, a saber:

- Sub-caso 3.1 - Sistema com filtro amortecido de 2ª ordem;
- Sub-caso 3.2 - Sistema com filtro amortecido de 3ª ordem;
- Sub-caso 3.3 - Sistema com filtro amortecido tipo “C”.

A figura 4 abaixo mostra os circuitos monofásicos destes 3 tipos de filtros (da esquerda para a direita: filtros amortecidos de 2ª. ordem, de 3ª. ordem e do Tipo “C”).

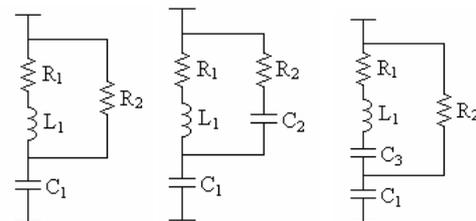


Figura 4 – Filtros harmônicos amortecidos (da esquerda para a direita: de 2ª. ordem, de 3ª. ordem e do Tipo “C”).

A figura 5 ilustra o gráfico das distorções harmônicas resultantes dos três sub-casos simulados em comparação com os valores limites estipulados por norma, para a barra 2 do sistema sob estudo. Observa-se que todos os 3 tipos de filtros amortecidos foram capazes de atender aos limites da norma.

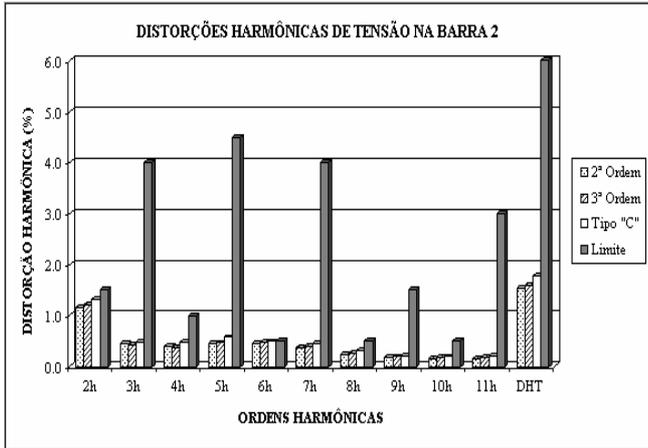


Figura 5 – Distorções harmônicas de tensão no sistema com filtros amortecidos

As potências requeridas para os três tipos de filtros amortecidos, bem como as ordens harmônicas características para os quais os filtros foram projetados foram:

- No sub-caso 3.1 (filtro amortecido de 2ª ordem): 1,5 pu e ordem harmônica característica 3,
- No sub-caso 3.2: 2,90 pu e ordem harmônica característica 3,2,
- No sub-caso 3.3 (referente à simulação de inserção de um filtro amortecido tipo “C”): 1,50 pu e ordem harmônica característica 2,75.

Nota-se que, em termos de “gasto” de potência reativa, os filtros amortecidos de 2ª ordem e tipo “C” se equivalem, já que estes dois modelos utilizaram a mesma potência reativa capacitiva total para atingir objetivos semelhantes. Já o filtro amortecido de 3ª ordem, com 2,9 pu, mostrou-se ser o menos eficiente dos três modelos estudados, pois este precisou de uma potência reativa quase duas vezes maior do que aquela dispensada pelos outros dois modelos para o pleno atendimento das normas.

No quesito suportabilidade, constata-se que os três modelos de filtro amortecido se equiparam. Nos três sub-casos simulados, o nível de tensão nominal exigido dos bancos de capacitores foi de 33 kV, que é o próprio nível de tensão da barra onde os filtros foram inseridos (*recorde-se que, nos casos referentes aos filtros sintonizados, o nível de tensão nominal exigido dos bancos de capacitores foi de, no mínimo, 46 kV*).

Assim, em conformidade com os resultados dos casos simulados até este ponto do estudo, pode-se afirmar que, para o sistema ora em análise, em termos de *suportabilidade*, os filtros sintonizados foram inferiores aos filtros amortecidos, já que estes últimos requereram um nível de tensão nominal bem menor do que o exigido pelos filtros sintonizados. Cabe ressaltar, ainda, que o filtro amortecido de 2ª ordem possui apenas um capacitor, enquanto que os filtros de 3ª ordem e o tipo “C” possuem dois. Portanto, do ponto de vista de simplicidade de conexão e facilidade na manutenção, esta é uma vantagem do filtro de 2ª ordem sobre os demais modelos.

Na figura 6 tem-se o comportamento dos módulos das impedâncias harmônicas da barra 2 do sistema, antes e

depois da inserção do filtro amortecido de 2ª. ordem. Conforme pode ser observado, a partir da segunda harmônica, o filtro amortecido não mais provoca ressonâncias paralelas com o sistema. Assim, o risco de ocorrer elevados valores indesejáveis de tensões harmônicas (especialmente nas *interharmônicas*) é quase nulo. Esta é uma das maiores vantagens dos filtros amortecidos em relação aos sintonizados.

GRÁFICO DOS MÓDULOS DAS IMPEDÂNCIAS HARMÔNICAS DA BARRA 2 DO SISTEMA COM E SEM O FILTRO

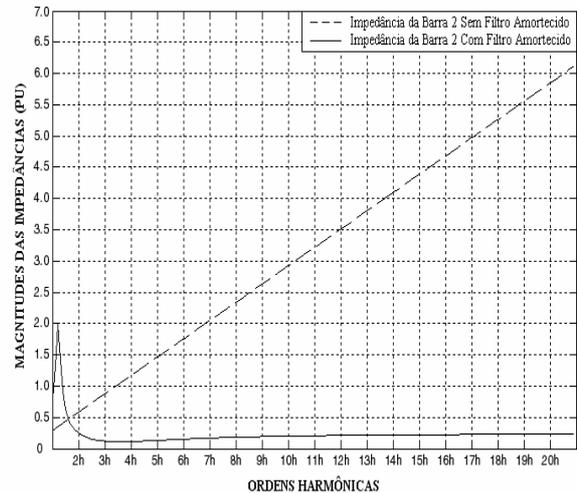


Figura 6 – Módulos das impedâncias harmônicas do sistema para o sub-caso 3.1

II.4. CASO 4 - SISTEMA ELÉTRICO COM FILTROS SINTONIZADOS E AMORTECIDOS

Neste último caso será analisada a atuação conjunta de filtros harmônicos sintonizados e amortecidos. Após a simulação de várias combinações preliminares, verificou-se que a melhor condição de projeto foi obtida com um arranjo de filtros composto por dois filtros:

- um filtro sintonizado na ordem harmônica 2 (com uma dessintonia máxima de 0,1, o que o tornou sintonizado exatamente na ordem harmônica 1,9) e,
- um filtro amortecido de 2ª ordem.

Este caso foi aquele que dispensou o menor valor de potência reativa para o pleno atendimento das normas. Mais uma vez, a barra escolhida para a inserção dos filtros foi a barra 2.

O filtro sintonizado requererá uma potência reativa de 0,30 pu e o banco de capacitores deverá suportar uma tensão de, pelo menos, 1,27 pu (42 kV). O fator de qualidade deste filtro é 27.

A Tabela II apresenta os resultados finais do filtro amortecido, onde se tem que a potência reativa do capacitor mesmo é de 0,65 pu, na tensão nominal da barra (33 kV).

Assim, o arranjo de filtros projetados necessitou, para atender as normas de forma plena, de uma potência reativa capacitiva total de 0,95 pu.

TABELA II
RESULTADOS FINAIS PARA O FILTRO AMORTECIDO PROJETADO
NO CASO 4.

Modelo	Ordem Harmônica Característica	Fator de Amortecimento
2ª Ordem	4,5	2
Componente	Potência Reativa Capacitiva Nominal (pu)	Tensão Nominal do Capacitor (kV)
Capacitor C_1	0,65	33

A figura 7 mostra as distorções harmônicas resultantes do presente caso simulado, em relação aos valores limites estipulados por norma.

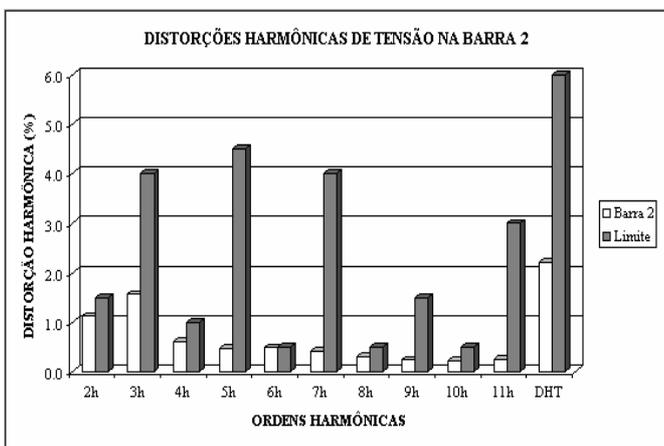


Figura 7 – Distorções harmônicas de tensão no sistema com filtros sintonizado e amortecido

Da figura 7 pode ser concluído que a atuação conjunta dos filtros foi eficiente, pois todos os limites estipulados pelas normas foram perfeitamente atendidos. Para isto, o arranjo de filtros utilizou uma potência reativa capacitiva total de 0,95 pu, conforme destacado anteriormente.

Para efeito de comparação, no sub-caso 2.3, considerado o mais viável dentre os casos onde foram usados apenas filtros sintonizados para o atendimento das normas, a potência reativa total utilizada foi de 1,1 pu. Já nos casos de uso exclusivo de filtros amortecidos para correção das distorções, o sub-caso considerado como mais viável foi o sub-caso 3.1, onde a potência reativa total dispensada foi de 1,5 pu.

Analisando-se estas somas totais de potência reativa, chega-se à conclusão de que usar exclusivamente filtros sintonizados no sistema industrial ora em discussão, pode não ser a melhor opção. Tampouco o uso exclusivo de filtros amortecidos. A melhor opção seria o desenvolvimento de projetos fazendo o uso combinado dos dois tipos de filtro, buscando-se sempre explorar e maximizar, de forma otimizada, as potencialidades de cada tipo de filtro.

O comportamento dos módulos das impedâncias harmônicas, de ambas as barras do sistema, antes e depois da inserção do arranjo de filtros do caso 4, está ilustrado na figura 8. De acordo com esta figura, imediatamente antes da frequência de sintonia do filtro sintonizado (o qual foi projetado na ordem harmônica 1,9), ocorre uma ressonância paralela.

GRÁFICO DOS MÓDULOS DAS IMPEDÂNCIAS HARMÔNICAS DA BARRA 2 DO SISTEMA COM E SEM OS FILTROS

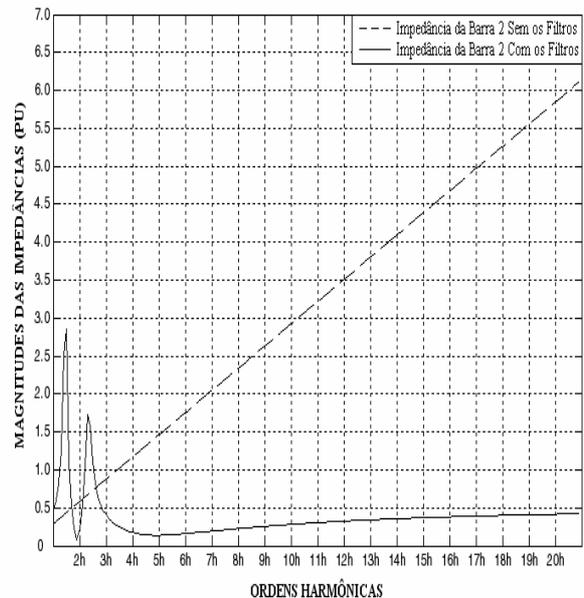


Figura 8– Módulos das impedâncias harmônicas do sistema para o caso 4.

Por outro lado, o filtro amortecido de 2ª ordem possui a frequência característica de ordem 4,5. Esta frequência característica equivale a uma frequência mínima de filtragem de aproximadamente ordem harmônica 3,2 ($n_{\min} = 4,5h / \sqrt{2} \Rightarrow n_{\min} = 3,2$).

O comportamento das impedâncias harmônicas do sistema, após a inserção do arranjo de filtros do caso 4, é bastante satisfatório. Isto porque o projeto foi desenvolvido de forma que a atuação de um filtro não prejudicasse em nada a atuação do outro. Para o presente caso, especificamente, uma vez projetado o filtro sintonizado definitivo, o projeto do filtro amortecido foi desenvolvido garantindo-se que a sua ressonância paralela indesejável não coincidissem com a frequência de sintonia do filtro sintonizado. Dessa forma, não houve nenhum tipo de depreciação na eficiência de filtragem de nenhum dos dois filtros. Esta é uma importante preocupação que o projetista deve ter em mente, quando da utilização combinada de filtros sintonizados e amortecidos nos projetos.

III. CONCLUSÕES

Este artigo fez uma análise geral sobre a introdução de filtros harmônicos em uma instalação industrial típica de usinas siderúrgicas

Como é sabido, quase que a totalidade das referências bibliográficas sobre filtros harmônicos descreve que o filtro

amortecido não é muito recomendado para redução dos níveis de distorção harmônica dos sistemas, devido ao fato deste dispensar uma potência reativa nominal maior do que a que seria dispensada, caso fossem utilizados filtros sintonizados para este fim. No entanto, em geral, essas referências não quantificam a potência reativa nominal, para que os mesmos objetivos alcançados com os filtros sintonizados sejam alcançados com os amortecidos. Nesse tocante, o presente estudo de casos mostrou, dentre outros aspectos, que, dependendo das considerações feitas no projeto dos filtros sintonizados, estes podem até dispensar somas de potência reativa maiores do que os amortecidos.

No item II.2 tratou-se de arranjos compostos somente por filtros sintonizados. Os resultados observados foram bastante satisfatórios, tanto do ponto de vista de desempenho de filtragem, quanto do ponto de vista de viabilidade dos projetos. Em alguns casos, as potências reativas nominais de alguns filtros, pareceram, a princípio, serem maiores do que o necessário. No entanto, esta “sobra” de potência é necessária, devido ao atendimento das solicitações impostas pelos testes de suportabilidade.

No item II.3, que analisou um arranjo unicamente com filtros amortecidos, verificou-se a ocorrência de uma boa eficiência de filtragem. Dos três modelos de filtros simulados, o que se apresentou como mais vantajoso foi o de 2ª ordem, considerado a melhor opção de projeto para o sistema elétrico sob estudo.

Em termos de “gasto” de potência reativa, no entanto, considerando-se projetos com o uso exclusivo de filtros amortecidos em comparação ao uso exclusivo de filtros sintonizados, dificilmente os filtros amortecidos serão superiores aos sintonizados.

Quanto aos testes de suportabilidade, constatou-se que os três modelos de filtro amortecido se equipararam. Nos três casos simulados, o nível de tensão nominal exigido dos bancos de capacitores foi o próprio nível de tensão da barra onde os filtros foram inseridos. Já os filtros sintonizados precisaram ter um nível de tensão nominal bem maior que o nível de tensão da barra, para atender aos referidos testes. Conclui-se, portanto, que os filtros sintonizados são inferiores aos filtros amortecidos, no quesito suportabilidade.

Tendo como base todas as observações destacadas, chega-se à conclusão de que uma solução *híbrida* é a melhor opção, uma vez que as potencialidades de cada tipo de filtro se somam e se completam.

IV. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R.P.Nascimento, “Propostas de procedimentos para projetar filtros harmônicos a partir de um programa de penetração harmônica, incluindo cálculos de desempenho e de suportabilidade”, Dissertação de Mestrado – UFU – Uberlândia - MG, 2007.
- [2] R.P. Nascimento, J.W. Resende, “Procedimentos para determinação de Filtros Harmônicos Sintonizados Ótimos, incluindo Análises de Desempenho e de Suportabilidade”, Artigo submetido ao VII CBQEE (tópico: fontes e mitigações de distúrbios), 2007.
- [3] *IEEE Standard for shunt power capacitors*, IEEE Standard 18, 2002.
- [4] G. Wakileh, *Power systems harmonics: fundamentals, analysis and filter design*. Editora Springer-Verlag, Alemanha, 2001.

V. BIOGRAFIAS

Rogério Pinto do Nascimento. É engenheiro eletricitista formado pela Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) em 2003. Mestrado em Engenharia Elétrica, na área Qualidade e Racionalização da Energia Elétrica, pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU), em 2007.

Dr. José Wilson Resende. Graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (1975). Mestrado em Engenharia Elétrica pela antiga EFEI (hoje, Universidade Federal de Itajubá), em 1979. *Ph.D* pela *University of Aberdeen*, Escócia (1986). É professor da Faculdade de Engenharia Elétrica da UFU desde que se graduou. Principais áreas de pesquisas: *Qualidade da Energia Elétrica* (com especial interesse em análise harmônica de sistemas elétricos e compensação reativa) e *Proteção de Sistemas Elétricos*.