

Projeto de Filtros Ativos e Passivos para a melhoria da Qualidade de Energia

Hugo Menezes Barra, Erick Melo Rocha, Cássio A. da Costa, Marcus V. Alves Nunes e Walter Barra Junior

Abstract — This article discusses the problems caused by harmonics in electrical systems and demonstrates the harmonics filter design for both the liability and the asset in order to compare results between the designed filters and presented in [3]. Emphasizing the importance and wide application of the same in industry and in the electricity sector in general.

Keywords — harmonics, passive harmonic filter, active harmonic filter.

I. INTRODUÇÃO

As preocupações com os diversos temas relacionados à qualidade da energia elétrica têm sido cada vez mais comuns às empresas de energia elétrica e aos consumidores em geral e vêm assumindo importância destacada nos cenários nacional e internacional, sendo o tema sobre “Harmônicos”, um dos mais importantes.

Cargas e equipamentos de características não-lineares dos sistemas elétricos de potência, geram correntes distorcidas que possuem elevado conteúdo harmônico. Essas correntes, sendo injetadas nas redes elétricas e nas instalações industriais adjacentes poderão causar diversos problemas. Os problemas relativos ao desempenho e à vida útil dos equipamentos, dependem, dentre outros fatores, da severidade das distorções e do nível de suportabilidade dos equipamentos. Alguns problemas típicos são perdas por aquecimento e prejuízos advindos das queimas e desgastes prematuros dos equipamentos elétricos e eletrônicos, como transformadores, painéis e placas eletrônicas. Além disso, a presença de distorção acarreta no baixo fator de potência, exigindo que a instalação seja superprojetada e sujeita a pagamentos de multas mensais constantes à concessionária de energia (consumo de energia reativa excedente, FER, etc) [4].

Para a mitigação dos problemas relacionados às harmônicas, existem atualmente vários tipos de solução, procedimentos para a redução de harmônicas da rede com os filtros podem ser vistos na literatura em [7] e [8]. Neste trabalho, é apresentado como destaque os filtros harmônicos passivos sintonizados e o filtro harmônico ativo. Os filtros harmônicos passivos sintonizados é uma solução antiga e têm sido utilizados, há tempos, em grandes instalações industriais, sistemas de transmissão e distribuição, ou ainda, em subestações conversoras para transmissão de corrente contínua (CC). Já o filtro harmônico ativo, apesar de ser uma tecnologia mais recente, vem ganhando cada vez mais destaque, seja no seu uso isoladamente no sistema ou em conjunto com filtros passivos.

A diferença funcional básica entre os dois tipos de filtro é que o passivo é sintonizado para uma determinada condição de operação do sistema em que é aplicado, mudanças nessas condições degradam o desempenho do filtro. Por outro lado, o filtro ativo se adequa a variabilidade de condições do sistema. Obviamente, a simplicidade e o custo do filtro passivo o tornam uma ótima escolha para sistemas com dinâmicas bem conhecidas e estáveis, do contrário, o filtro ativo é o mais indicado.

No que se refere à questão comercial, existem tanto no Brasil como no exterior diversos fabricantes e representantes desse tipo de equipamento, no qual damos destaque para a **Schneider Electric**, que dispõe até de aplicativos para Android com temáticas sobre a qualidade de energia.

II. PROJETO DO FILTRO PASSIVO

Na Fig. 1, é apresentado o sistema de potência utilizado neste estudo. As ferramentas utilizadas para simulações apresentadas neste artigo são a toolbox PowerLib e Ident, ambas incorporadas no ambiente de simulação Simulink do Matlab. Trata-se de um sistema que permite investigar os efeitos de cargas não lineares na qualidade de energia da rede e foi proposto em [1]. O referido sistema de potência consiste em uma rede CA monofásica (v_s), alimentando uma carga não-linear composta de um retificador monofásico em ponte de diodos, essa estrutura alimenta uma carga RC (R_o, C_o). Os dados do referido sistema de estudo são fornecidos na Tabela 1.

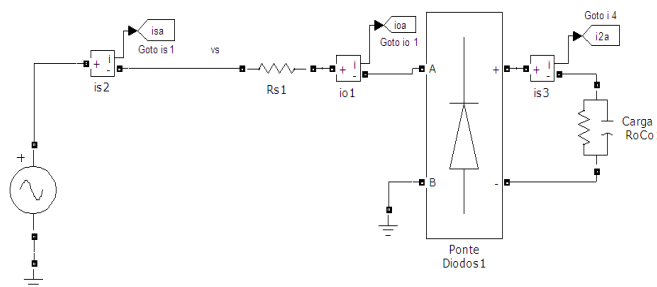


Fig. 1. Sistema de Potência.

TABELA I. DADOS DO SISTEMA DE POTÊNCIA DE ESTUDO.

Variável	Significado	Valor Nominal
V_s	Tensão da rede CA	110 V (rms)
f_1	Frequência da rede	60 Hz
S_n	Potência nominal	500 VA
R_s	Resistência série da carga Não-linear	4 ohms
R_o	Resistência da carga Não-linear	90 ohms
C_o	Capacitância da carga Não-linear	500 μF

Na Fig. 2, é mostrada a forma de onda da corrente na rede, i_s , obtida quando o sistema está operando sem usar nenhum tipo de filtro de compensação (seja passivo ou ativo). Pode-se observar que a forma de onda da corrente i_s se afasta bastante de uma forma de onda senoidal pura, mostrando assim que a carga não-linear produz acentuada contaminação de harmônicos, prejudicando a qualidade de energia da rede.

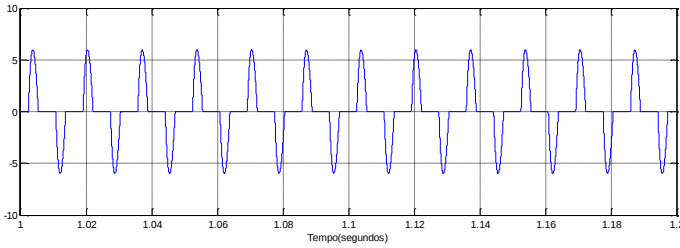


Fig. 2. Forma de onda da corrente da rede, quando nenhum tipo de filtro de compensação é utilizado.

Na Fig. 3, é mostrado o correspondente espectro do mostrado na Fig. 1. Pode-se observar que o espectro mostra o sinal de corrente da rede apresentando sua energia distribuída entre muitos harmônicos, sendo que os harmônicos nas frequências 180 Hz e 300 Hz foram os que apresentaram maior energia concentrada. Dessa forma, deve-se projetar filtros passivos ou ativos para mitigar a ação desses harmônicos e restabelecer a qualidade de energia da rede.

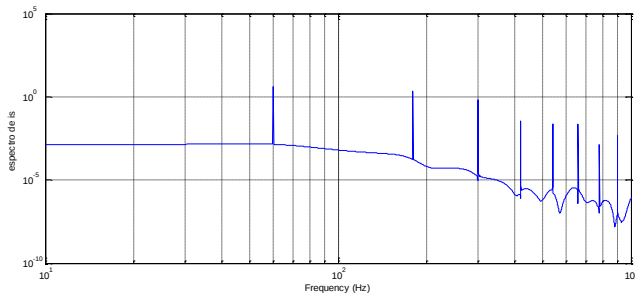


Fig. 3. Espectro do sinal de corrente da rede, quando nenhum filtro de compensação é utilizado.

Para tentar mitigar o efeito de um determinado harmônico alvo, um filtro passivo RLC será projetado para operar em paralelo com a carga não-linear, conforme mostrado na Fig. 4. As metodologias de projeto consistem em:

- A frequência angular do harmônico que se deseja mitigar, $\omega_n = 2\pi f_n$, que deve coincidir com a frequência angular de ressonância do filtro RLC;
- O valor do fator de qualidade Q desejado para o filtro passivo RLC, que impõe a qualidade da sintonia e amarra o valor da resistência R do filtro.

Os valores de ω_n e de Q permitem calcular os valores R , L , C do filtro utilizando (1) e (2).

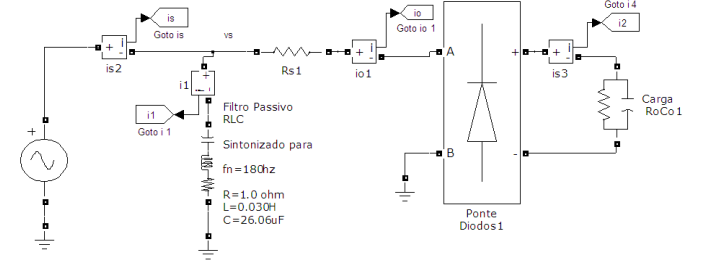


Fig. 4. Configuração do filtro passivo RLC estudado.

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1)$$

$$Q = \frac{\omega_n L}{R} \quad (2)$$

Na Fig. 3, observou-se que para teste feito com o sistema sem nenhum filtro de compensação de harmônicos, o harmônico presente na frequência de 180 Hz tem uma grande energia e, portanto, um impacto adverso na qualidade de energia da rede. Dessa forma, esse harmônico de 180 Hz ($\omega_n = 2\pi 180$) foi selecionado como alvo para o projeto do filtro passivo RLC. Um valor de indutância de $L = 30\text{mH}$ foi utilizado no projeto do filtro passivo por ser um valor comercial típico e devido a esse elemento ser caro quando feito de cobre. Dois casos foram estudados variando-se o fator de qualidade do filtro através da alteração do valor de R .

Caso 1: Utilizando-se $f_n = 180\text{ Hz}$ e $L = 0,03\text{H}$, $Q = 33,92$, e utilizando-se (1) e (2), os seguintes valores de R e C obtidos para o filtro passivo: $C = 26,06\text{ }\mu\text{F}$ e $R = 1\text{ ohm}$.

Dessa forma, o filtro passivo com a configuração mostrada na Fig. 4, com $L = 0,03\text{ H}$, $C = 26,06\text{ }\mu\text{F}$ e $R = 1\text{ ohm}$ foi implementado e investigado no ambiente PowerLib do Matlab/Simulink. Na Fig. 5, são exibidas as formas de onda das correntes da rede, i_s , da carga não linear, i_o e do filtro passivo RLC para este caso projetado. Pode-se observar, que ao contrário do resultado apresentado na Fig. 2, para o sistema não compensado, agora a forma de onda da corrente na rede apresenta uma forma mais "arredondada" pelo efeito da captura de parte da energia do harmônico de 180 Hz pela armadilha de baixa impedância nesta frequência que é feita pelo filtro passivo. Pode-se observar que, como era de se esperar,

a forma de onda da corrente do filtro passivo, i_1 , é puramente senoidal devido ao fato de que o filtro passivo RLC é linear.

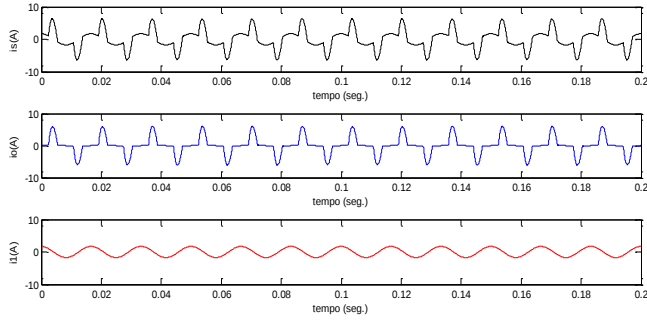


Fig. 5. Formas de onda da corrente da rede, i_s , corrente na carga não-linear, i_o , e corrente do filtro passivo RLC ($Q = 33,92$).

O espectro de i_s correspondente a esse teste está fornecido na Fig. 6. Devido à grande energia presente no harmônico de 180 Hz, apenas uma melhoria marginal na redução da amplitude do espectro foi observada, demonstrando um certo limite no desempenho que pode ser obtido com o uso de filtro passivo. Um teste adicional, similar ao apresentado, foi realizado com um filtro passivo projetado para $Q = 339,2$, variando-se R ($R = 0,1$ ohm) e mantendo-se fixado os valores de L e C em $L = 0,03$ e $C = 26,06 \mu F$. Apenas uma melhoria incremental foi obtida, conforme mostrado nas Figs. 7 e 8.

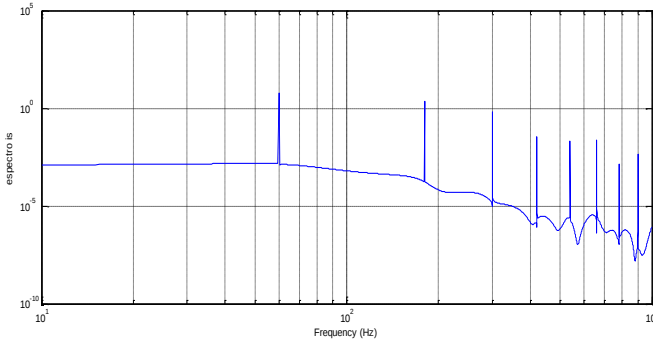


Fig. 6. Espectro do sinal de corrente da rede, i_s , o filtro passivo com RLC ($Q = 33,92$) é utilizado.

Caso 2: $R = 0,1$, $L = 0,03$ H, $C = 26,06 \mu F$, $f_n = 180$ Hz, (fator de qualidade $Q = 339,2$)

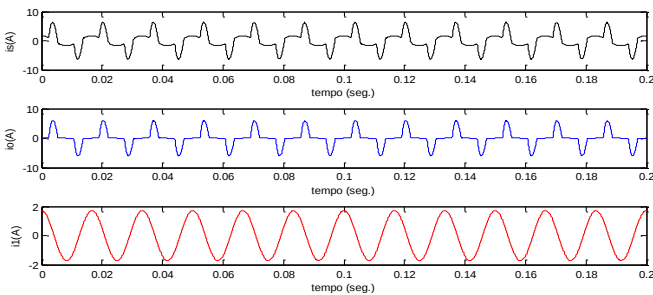


Fig. 7. Formas de onda da corrente da rede, i_s , corrente na carga não-linear, i_o , e corrente do filtro passivo RLC ($Q = 339,2$).

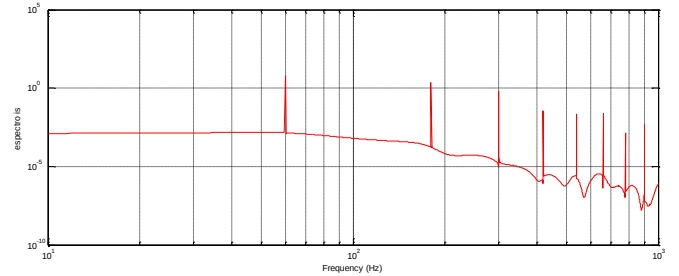


Fig. 8. Espectro do sinal de corrente da rede, i_s , o filtro passivo com RLC ($Q = 339,2$) é utilizado.

III. PROJETO DO FILTRO ATIVO

Nos testes realizados com o filtro passivo, conforme mostrado nos resultados acima, mostraram a limitação de desempenho no uso de filtros passivos para cargas não lineares contendo energia substancial nos harmônicos superiores a fundamental. Uma série de pesquisas têm sido realizadas para projetar filtros ativos capazes de lidar com estas não linearidades [2]. Para o projeto do filtro ativo foi considerado o mesmo sistema de estudo utilizado nos exemplos anteriores. Na Fig. 9, é mostrada a configuração do sistema com filtro ativo a ser projetado.

O objetivo do controle é prover uma corrente i_1 de compensação dos efeitos não lineares da carga de modo a prover uma corrente de rede devidamente mitigada e praticamente ausentes de harmônicos (perfeitamente senoidal). A estrutura do filtro ativo é composta de um indutor L , um conversor do tipo fonte de tensão, baseado em IGBTs e o respectivo controle automático associado.

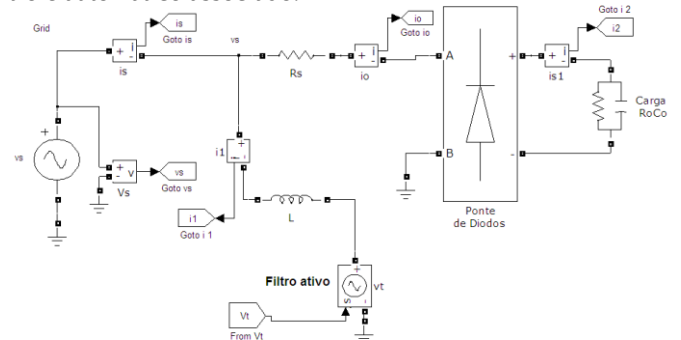


Fig. 9. Configuração do filtro ativo estudado.

Para o projeto do filtro ativo é necessário sintetizar duas malhas de controle, a malha de regulação de tensão do capacitor e malha de regulação da corrente i_s da rede externa. A malha de regulação de corrente é mostrada na Fig. 10. A referência para a malha de controle da corrente i_s é suprida por um circuito de geração de referência, conforme ilustrado na Fig. 11. A corrente de referência, é calculada como o produto do sinal de controle gerado pela malha de controle de tensão multiplicado pelo valor instantâneo da tensão da rede no ponto de conexão (v_s). A malha de controle de tensão consiste de uma lei de controle PI que tem por objetivo regular o valor do quadrado da tensão do capacitor do filtro ativo C .

A lógica para a malha de controle de tensão do capacitor é resultante da lei de conservação de energia em um capacitor. A malha de corrente é uma lei de controle do tipo PI com uma dinâmica de atuação muito mais rápida, para poder compensar adequadamente as não linearidades. O projeto da malha de tensão é feito utilizando técnicas clássicas de modo a fornecer uma frequência de crossover ($f_{cv} < 0,1f_1$, onde f_1 é a frequência nominal da rede. Adicionalmente, a margem de fase desejada é especificada na faixa $30^\circ < \text{pm} < 60^\circ$. Dessa forma, os valores obtidos para os ganhos K_{pv} e K_{ti} foram os seguintes: $K_{pv} = 10^{-6}$ e $K_{ti} = 5 \times 10^{-6}$. Com esses valores, as margens de fase e crossover obtidos foram os seguintes $f_{cv} = 2,5 \text{ Hz}$ e $\text{pm} = 56^\circ$. Seguindo a mesma estratégia clássica de projeto, os ganhos K_{pi} e K_{ii} do regulador de corrente foram calculados de forma similar. Os valores obtidos foram $K_{pi} = 2$ e $K_{ii} = 2 \times 10^4$.

Os resultados obtidos nos testes com o filtro ativo são ilustrados nas Figs. 11 e 12. Na Fig. 10, são mostradas as formas de onda da corrente da rede i_s , da corrente na carga não linear i_o e da corrente de compensação produzida pelo filtro ativo i_i . Pode-se observar que o filtro ativo foi bastante efetivo em compensar a não linearidade da carga, mitigando a corrente da rede. A análise conjunta das três formas de onda mostra que a estratégia de controle investigada é potente o suficiente para produzir uma corrente de compensação i_i que contraria o efeito não linear da carga. Nas Fig. 13, 14 e 15 são mostrados os espectros dos sinais de corrente da rede, corrente na carga não linear e corrente do filtro ativo. Pode-se observar, que o espectro da corrente da rede torna-se muito próximo de uma senóide perfeita, enquanto que o espectro da corrente do controlador mostra como os harmônicos importantes são contra atuados pelo filtro ativo. Grande parte dos equipamentos apresentam os espectros de harmônico na forma de gráficos de barra. No presente artigo, optou-se por estimar o espectro de i_s diretamente dos dados, através da técnica de periodogramas, uma metodologia bastante adotada na área de processamento de sinais para fins de identificação de modelos [5], os gráficos de barras foram utilizados para mostrar os comportamentos dos espectros i_o e i_i .

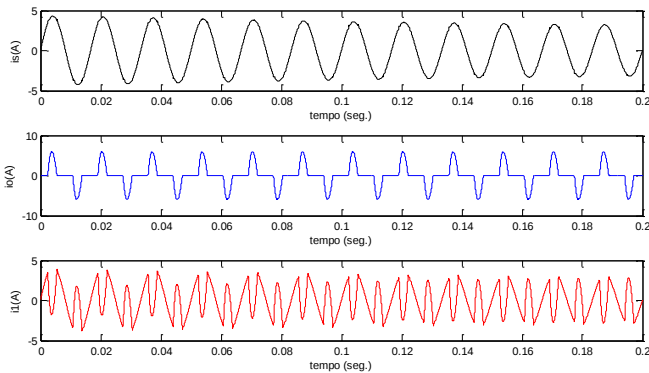


Fig. 10. Resultado da corrente i_s ; Fig. 11. Resultado da corrente i_o ; Fig. 12. Resultado da corrente $i_i(i)$.

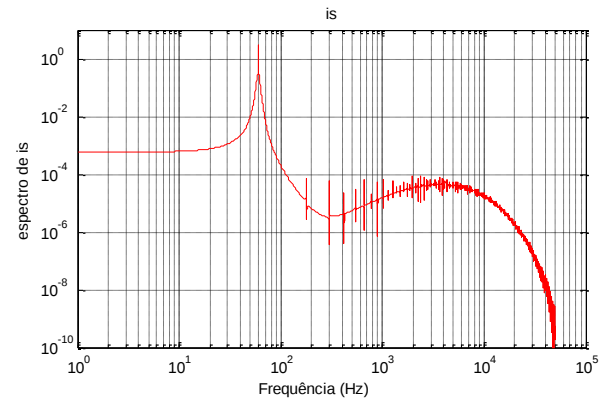


Fig. 13. Espectro de i_s .

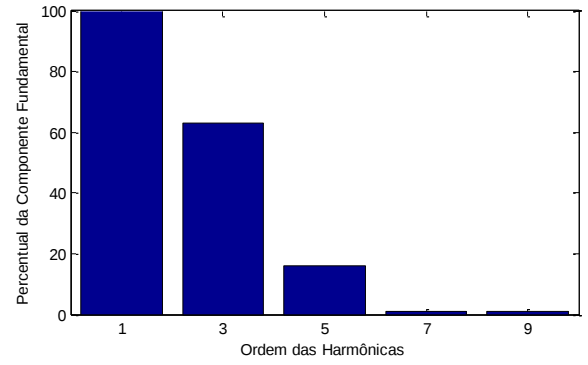


Fig. 14. Espectro de i_o .

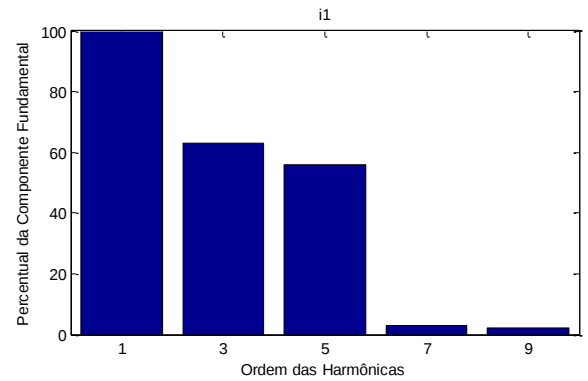


Fig. 15. Espectro de $i_i(i)$.

IV. COMPARAÇÃO ENTRE AS RESPOSTAS DOS FILTROS PROJETADOS NO TRABALHO E O FILTRO ATIVO DA REFERÊNCIA

A partir da análise dos filtros projetados, foi feita a comparação com outro filtro ativo capacitivo desenvolvido em uma tese de mestrado pelo grupo de controle da UFSC, onde apesar de serem plantas diferentes, apresentou-se uma forma de onda compatível com a dos filtros projetados, a Fig. 16, mostra os resultados obtidos pelo filtro ativo projetado na dissertação.

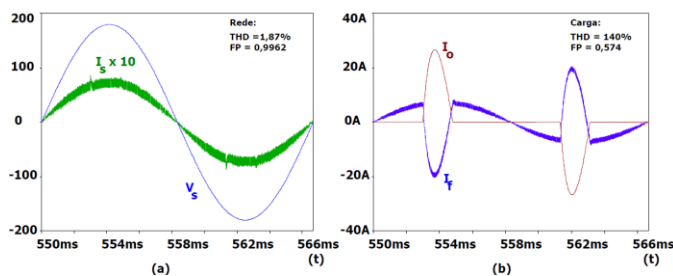


Fig. 16. Formas de onda de i_s em (a) e formas de onda de i_o e i_i em (b) da dissertação [3].

A partir desta análise pode-se perceber que o valor de i_i que foi considerado como i_i neste trabalho compensa a não linearidade da corrente da carga i_o , o que faz com a corrente da rede i_s fique quase isenta de harmônicos, tal como mostra o projeto de filtro ativo deste trabalho. Já no caso do filtro passivo, observou-se pouca melhora devido as limitações deste em poder atuar apenas em cima de uma componente harmônica específica. Devido às plantas serem diferentes, apenas pode-se afirmar que as respostas dadas pelo filtro ativo são compatíveis às respostas dadas na dissertação.

V. CONCLUSÃO

Neste trabalho, pode-se concluir que os filtros passivo e ativo projetados possuíam grandes diferenças no seu resultado, sendo que o filtro ativo apresentou o melhor resultado. Para confirmar essa análise, os filtros foram submetidos a uma comparação em relação aos filtros projetados em uma tese de mestrado da UFSC da referência [3], onde o filtro passivo não apresenta um resultado tão satisfatório, devido as suas limitações de trabalhar apenas com uma componente harmônica e o filtro ativo apresentou bons resultados, compatíveis com o filtro projetado na tese, o que pode levar futuramente a ser uma alternativa de comercialização do filtro ativo projetado. Estruturas mais sofisticadas de filtros passivos poderiam ter sido utilizados, o que permitiria uma comparação mais detalhada entre as metodologias ativa e passiva. Os autores estão estudando este ponto e objetivam publicar em futuros artigos. Atualmente, os custos de filtros ativos ainda se apresentam consideráveis, o que tem limitado a sua disseminação mais ampla na compensação de harmônicos. No entanto, a tendência atual é de acentuada queda nos preços dos componentes de eletrônica de potência. Isso pode fazer com que a estrutura de filtros ativos se tornem bastante competitivas no futuro próximo [6].

VI. REFERÊNCIAS

- [1] Single-tuned Passive Harmonic Design Considering Variances of Tuning and Quality Factor, Young-Sik Cho & Hanju Cha, Journal of International Engineering vol. 1, no. 1, pp. 7-13, 2011.
- [2] Selective Harmonic-Compensation Control for Single-Phase Active Power Filter With High Harmonic Rejection, Jaume Miret, Member, IEEE, Miguel Castilla, José Matas, Josep M. Guerrero, Senior Member, IEEE, and Juan C. Vasquez, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 8, Agosto 2009.

- [3] Projeto de um filtro ativo paralelo de 1 kVA usando técnicas de controle analógico e digital, Dirk Lendeke, Tese de Mestrado da UFSC, 2003.
- [4] LEMES, Marcelo I. Comparação técnico-econômica entre equipamentos mitigadores de harmônicos e compensadores de energia reativa: Estudo de caso. São Paulo, 2010.
- [5] Ljung, L. System Identification Theory for the User, 2nd ed., Prentice Hall, 1999.
- [6] Luo, F. L.; Ye, H.; Rashid, M. Digital Power Electronics and Applications, 1st ed., Academic Press, 2005.
- [7] Encarnação, L. F.; Neto, J.A.M.; Reis, M.S.; Aredes, M. Redução de Perdas e Melhoria da Qualidade de Energia na Rede de Distribuição BT Utilizando Filtros Ativos de Potência. Conferência Brasileira de Qualidade de Energia Elétrica, Cuiabá, 2011.
- [8] Nascimento, R. P.; Resende, J. W. Procedimentos para determinação de filtros harmônicos sintonizados, incluindo análises de desempenho e de suportabilidade. Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica, Santos, 2007.