

# Implementação de Filtros Sintonizados para Mitigação de Harmônicos de 3ª e 5ª ordem

Laís Avelar G. Freire, Gilvan M. Santos, Antônio R. S. Santos, Aurélio L. M. Coelho e  
José E. L. de Almeida

Universidade Federal de Itajubá – Campus Itabira

lais.avelar.freire@gmail.com; gilvanmarquess@gmail.com; antojosersantos@gmail.com;  
aurelio.coelho@unifei.edu.br; j.eugenio@unifei.edu.br

**Resumo** — A utilização de filtros passivos sintonizados para filtragem de harmônicos é uma técnica eficaz de mitigação dos efeitos causados pela alta distorção harmônica. Para garantir bons indicadores de qualidade de energia, são necessários estudos que viabilizem e comprovem a eficiência desta técnica. Desse modo, este trabalho apresenta os resultados de implementações laboratoriais de filtros passivos sintonizados para mitigação de harmônicos de terceira e quinta ordem. Simulações computacionais também são utilizadas para auxiliar a análise do desempenho de tais filtros. As principais conclusões e discussões são apresentadas.

**Palavras-chave** — Distorção harmônica, filtros sintonizados, qualidade da energia elétrica.

## I. INTRODUÇÃO

A qualidade da energia elétrica é um termo que vêm se tornando destaque tanto quando se refere à qualidade do produto quanto na qualidade do serviço entregue pelas concessionárias, de modo que, idealmente, a energia elétrica fornecida aos consumidores possua frequência e tensão constantes, forma de onda senoidal e seja transmitida sem interrupções. Deste modo, a manutenção da energia elétrica dentro dos seus padrões e dos limites estabelecidos garante o funcionamento adequado dos equipamentos elétricos conectados à rede elétrica. Para que o sistema elétrico opere com índices adequados, diversos estudos realizados por institutos como o IEEE [1] e IEC [2], propõem índices e padrões a serem normatizados [3].

Com o advento da eletrônica de potência, cargas não lineares passaram a ser comuns tanto em indústrias, com os acionamentos de motores através de conversores de frequência, como nas residências, em fontes chaveadas por transistores ou até mesmo nas lâmpadas fluorescentes, que é o objeto de estudo deste artigo. A utilização dessas cargas não lineares provoca o surgimento de harmônicos, que são distorções das formas de onda da tensão e da corrente na rede elétrica provocadas por múltiplos da frequência fundamental. Estes harmônicos provocam efeitos como aquecimentos excessivos, disparos de dispositivos de proteção, aumento da queda de tensão, ressonância, entre outros [4].

Uma das maneiras de mitigação dos harmônicos é a utilização de sistemas ressonantes. Utilizando-se um filtro passivo sintonizado, é possível filtrar as componentes harmônicas indesejadas características de determinada carga.

É conhecido da literatura [5] que as lâmpadas fluorescentes compactas causam distorção harmônica na rede a qual estão conectadas, possuindo componentes harmônicas de 3ª e 5ª ordem. A fim de mitigar os efeitos destes harmônicos no sistema, este trabalho apresenta a implementação de filtros sintonizados através do arranjo de elementos passivos em um laboratório. Simulações computacionais são utilizadas para validar o desempenho do filtro e auxiliar nas análises do mesmo.

Este trabalho é organizado em cinco seções. A Seção II trata brevemente da teoria de filtros passivos, necessário para compreensão do trabalho. A Seção III trata da metodologia utilizada no projeto dos filtros em ambiente laboratorial e computacional. A Seção IV trata dos resultados e discussões sobre o desempenho do filtro implementado através de tabelas com os resultados das medições com carga não lineares antes e depois da implementação do filtro. Por fim, a seção V traz as principais conclusões deste estudo.

## II. FILTROS ELÉTRICOS

O filtro elétrico é um quadripolo capaz de atenuar determinadas frequências do espectro do sinal de entrada e permitir a passagem das demais. Estes componentes podem ser classificados em passivos e ativos. Os filtros passivos são construídos com apenas elementos passivos como resistores, capacitores e indutores. Estes filtros podem ser divididos em [6]:

- Filtro passa-baixas: permitem apenas a passagem de frequência abaixo de uma frequência de corte determinada, enquanto as frequências superiores são atenuadas;
- Filtro passa-altas: só permite a passagem de frequências acima de uma determinada frequência de corte pré-estabelecida;

- Filtro passa-faixa: só permite a passagem das frequências situadas numa faixa delimitada por uma frequência de corte inferior e outra superior;
- Filtro rejeita-faixa: só permite a passagem das frequências situadas abaixo de uma frequência de corte inferior ou de uma frequência de corte superior.

Os filtros passivos sintonizados considera a circulação de correntes harmônicas pelo conjunto capacitor-indutor. Com isso, o filtro injeta energia reativa e é possível filtrar os harmônicos. Para o estudo abordado neste trabalho, foram projetados filtros rejeita-faixas para as frequências de 180 Hz e 300 Hz - 3º e 5º ordem de harmônicos para frequência fundamental da rede de 60Hz. A seção seguinte apresenta a metodologia de ensaios laboratoriais utilizada para implementação dos filtros e para coleta dos dados para análise.

### III. METODOLOGIA

Este estudo consiste na avaliação do efeito da filtragem de correntes com componentes harmônicas de 3ª e 5ª ordem, devido à presença de cargas não lineares no sistema. Para a avaliação do efeito de filtragem, utilizou-se uma lâmpada fluorescente compacta como a carga poluidora do sistema. A montagem realizada na bancada é mostrada na Fig. 1. Dessa forma, foi observada a corrente que a lâmpada drena da rede, a qual apresentou o comportamento mostrado na Fig. 2.



Fig. 1. Montagem da bancada.

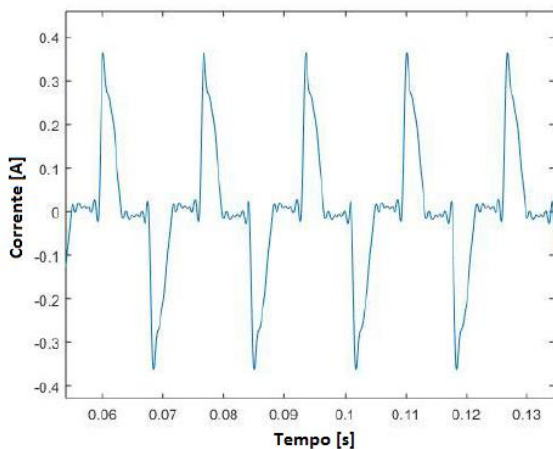


Fig. 2. Forma de onda da corrente da lâmpada compacta.

A Fig. 2 foi plotada no *software* Matlab a partir dos dados coletados por um medidor de qualidade da energia elétrica durante as medições realizadas na bancada de ensaios. Nesses mesmos dados foram observados que as componentes harmônicas que apresentaram maior amplitude foram a de 3ª e de 5ª ordem. Deste modo, optou-se por projetar dois filtros sintonizados nas frequências de ambos os harmônicos.

Para a realização da montagem da bancada exibida na Fig.1, utilizou-se:

- Medidor de qualidade da energia e osciloscópio para coleta dos dados;
- Conjunto de cargas Resistivas (220 V/ 350 W), Indutivas e Capacitivas (220 V/ 350 VAr);;
- Lâmpada compacta fluorescente como carga não linear;

A topologia de filtro utilizada foi o modelo RLC em paralelo com a carga. A Fig. 3 apresenta o modelo do filtro.



Fig. 3. Filtro sintonizado RLC [8].

A impedância ( $Z$ ) do ramo do filtro da Fig. 3 é dada por (1) e a frequência de ressonância ( $\omega_o$ ), valor no qual ocorre a ressonância, é calculada por meio de (2). Já o fator de qualidade ( $Q$ ) do filtro é dado por (3).

$$Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (1)$$

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2)$$

$$Q = \frac{\omega_o L}{R} \quad (3)$$

Onde:

$R$  é a resistência ôhmica;

$\omega$  é a frequência do sinal em rad/s;

$L$  é a indutância;

$C$  é capacitância.

Para a determinação do filtro deve-se escolher a frequência de sintonia, a quantidade de potência reativa que será entregue ao sistema na frequência fundamental (esse valor não é

necessariamente importante para o projeto se o objetivo for apenas filtrar os harmônicos) e por fim o fator de qualidade [2]. Como o trabalho foi realizado com os componentes disponibilizados em laboratório, o projeto foi elaborado em função de seus valores nominais. As cargas indutivas e capacitivas presentes no laboratório utilizado apresentam valores de indutância e capacitância de 366,8142 mH e 19,1819  $\mu$ F, respectivamente. Esses valores já apresentam ressonância na frequência de 60 Hz. Assim, para adequar o filtro nas frequências desejadas, foram feitas associações desses componentes. Vale ressaltar que, para a geração dos sinais das componentes harmônicas, a sua amplitude é gerada inversamente proporcional à sua ordem, ou seja, para a componente de 3º harmônico a amplitude será um terço da amplitude fundamental, para a de 5º harmônico será um quinto da fundamental, isso até o 7º harmônico, que é a maior componente a ser sintetizada nos testes. Assim, verifica-se que a amplitude relativa dos harmônicos utilizados é igual à amplitude da componente fundamental dividido pela ordem 'n' do harmônico.

Por meio de (2) e com o valor da frequência de ressonância de 180 Hz (3ª harmônica), fixando o valor do capacitor, encontrou-se o valor da indutância necessária para o circuito entrar em ressonância. Percebeu-se que para 1 (um) capacitor, com o valor citado acima, seriam necessárias 9 (nove) indutâncias em paralelo para a frequência desejada. Já com dois capacitores em série, a quantidade de indutância em paralelo reduziu-se. Dessa forma obteve-se uma relação para o projeto do filtro com os componentes presentes no laboratório. Para a frequência de 180 Hz, basta associar 3 (três) capacitores em série entre si com 3 (três) indutâncias em paralelo entre si. A associação em série de capacitores com valores iguais resulta em uma capacitância equivalente igual à divisão do valor de um capacitor pelo número de capacitores associados. O mesmo ocorre com a associação em paralelo de indutores iguais. Com a relação encontrada, para o filtro de 5ª harmônica, basta associar 5 (cinco) capacitores em série entre si com 5 (cinco) indutâncias em paralelo entre si.

Na prática, a montagem do filtro RLC resulta apenas na associação de um indutor e de um capacitor, sendo o valor da resistência representado pelas perdas internas do filtro [3]. Por desconhecimento das perdas presentes na associação LC, utilizou-se um resistor em série com o filtro para limitar a corrente no momento da ressonância.

As Fig.(s) 4 a 7 representam o módulo da impedância do filtro em função da variação da frequência, em função das componentes harmônicas e os diagramas de bode dos filtros de 3º e 5º harmônico. Tais gráficos foram gerados com o auxílio do *software Matlab*.

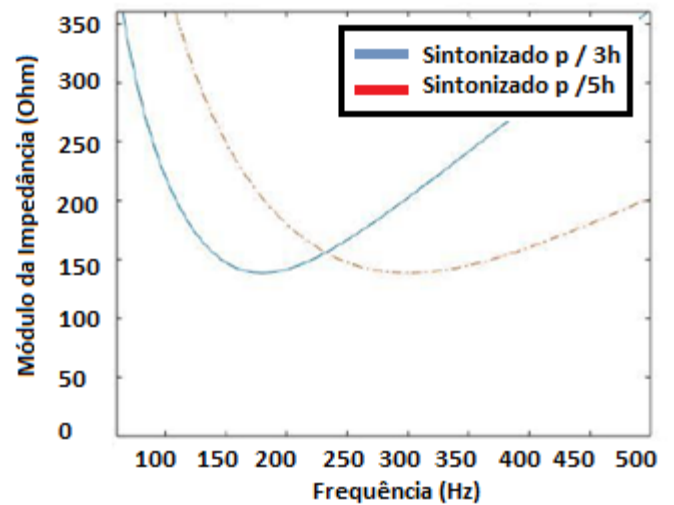


Fig. 4. Módulo da impedância em função da frequência.

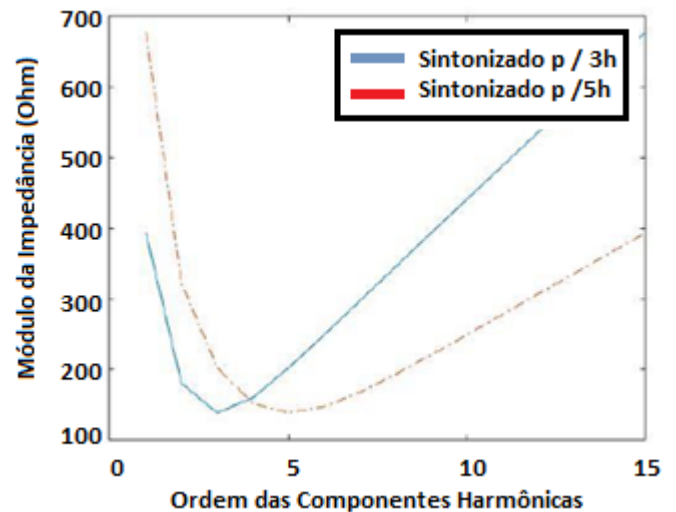


Fig. 5. Módulo da impedância em função dos harmônicos.

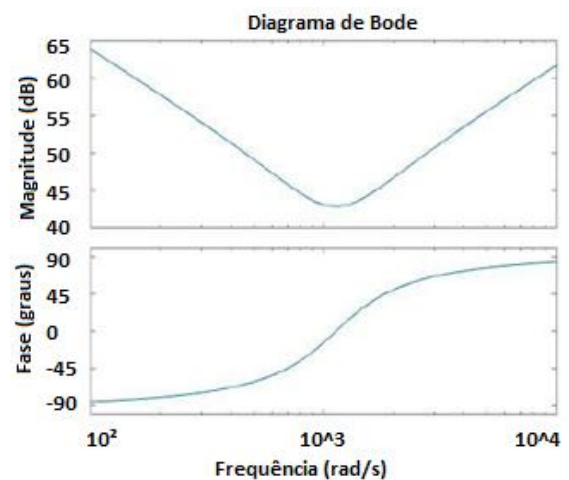


Fig. 6. Diagrama de bode do filtro de 3º harmônico.

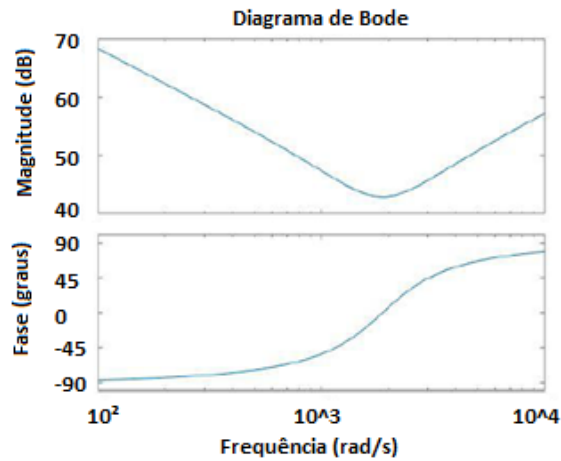


Fig. 7. Diagrama de bode do filtro de 5º harmônico.

Nas Fig.(s) 4 e 5 é possível observar que os filtros que apresentam menor impedância na frequência de ressonância são as frequências do 3º e 5º harmônico. E nos diagramas de Bode, Fig. (s) 6 e 7, é possível notar que o filtro RLC apresenta características capacitivas abaixo da frequência de ressonância e comportamento indutivo acima da frequência de ressonância.

Para validar o filtro projetado foi realizada uma simulação computacional com uma carga não linear ligada à rede, como ilustrado na Fig. 8. Em paralelo com essa carga foi colocado inicialmente o filtro de 3º harmônico, depois somente o filtro de 5º harmônico e por fim os dois filtros. A carga utilizada foi um retificador monofásico alimentando uma resistência. A escolha dessa carga é o fato dela injetar componentes de 3º e 5º harmônico, assim como a lâmpada fluorescente compacta utilizada nos experimentos práticos.

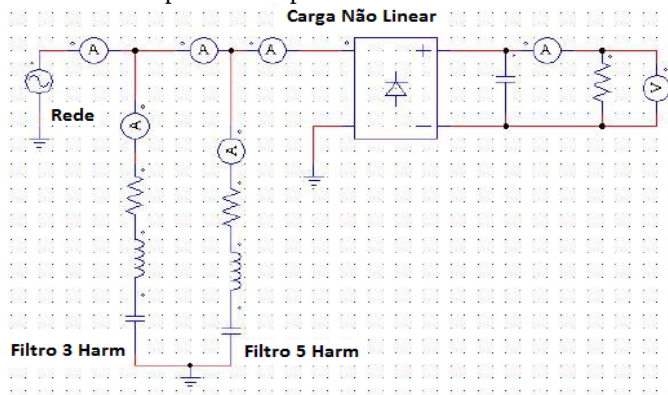


Fig. 8. Simulação dos filtros.

Logo após a simulação, foi realizada a montagem real com a lâmpada, seguindo os moldes da simulação: inicialmente a implementação somente do filtro de 3º harmônico; em seguida somente o filtro de 5º harmônico e, por fim, os dois filtros juntos. Os resultados de desempenho destes filtros são apresentados na seção seguinte.

## IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos a partir dos ensaios experimentais são apresentados aqui. Foram realizadas medições da distorção harmônica causada pela lâmpada fluorescente no caso sem filtro e das distorções harmônicas na carga e na rede com a inserção dos filtros. As medições foram realizadas utilizando um medidor de qualidade de energia comercial.

### A. Medições sem filtros

Na Fig. 9 está ilustrada a distorção harmônica causada pela lâmpada fluorescente no lado da carga. Por meio da análise dessa figura percebe-se uma elevada distorção harmônica total (DHT) causada pela carga na ordem de 85,3%.

Os detalhes da intensidade de cada componente harmônica são detalhados na Tabela I, onde se observa a presença de harmônicos ímpares característicos da carga utilizada. As componentes de maior intensidade são as harmônicas de terceira e quinta ordem, causando uma distorção na corrente de 66,4% e 29,5%, respectivamente.

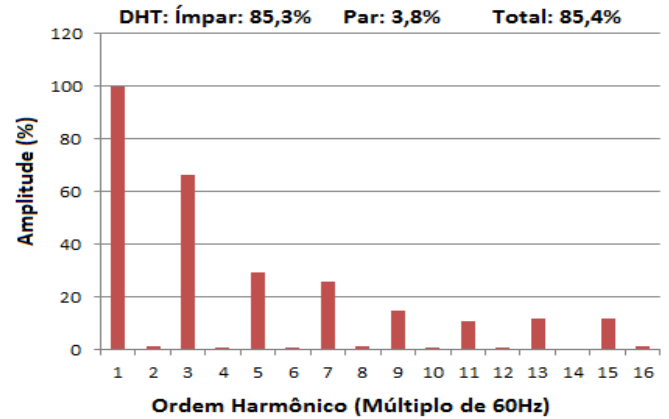


Fig. 9. Espectros de frequências da distorção harmônica causada pela lâmpada fluorescente.

TABELA I. DETALHES DA CADA COMPONENTE HARMÔNICA CAUSADA PELA LÂMPADA

| Frequência (Hz) | Ordem da Harmônica | Amplitude (%) |
|-----------------|--------------------|---------------|
| 60              | 1                  | 100           |
| 120             | 2                  | 1,3           |
| 180             | 3                  | 66,4          |
| 240             | 4                  | 0,6           |
| 300             | 5                  | 29,5          |
| 360             | 6                  | 0,7           |
| 420             | 7                  | 25,7          |
| 480             | 8                  | 1,4           |
| 540             | 9                  | 14,9          |
| 600             | 10                 | 0,8           |
| 660             | 11                 | 10,8          |
| 720             | 12                 | 0,6           |
| 780             | 13                 | 11,6          |
| 840             | 14                 | 0,4           |
| 900             | 15                 | 11,6          |
| 960             | 16                 | 1,3           |

A distorção harmônica no lado da rede com o filtro passivo desativado é a mesma causada pela carga (Fig. 9) de aproximadamente 85%, visto que não há nenhum componente no circuito capaz de filtrar as componentes harmônicas.

B. Medições com filtro de 3ª ordem

Na Tabela II e Fig. 10 são mostradas as medições de distorção harmônica do lado da rede com a adição do filtro de terceira ordem. Agora, ocorre uma redução da distorção harmônica total que cai para 3,7%.

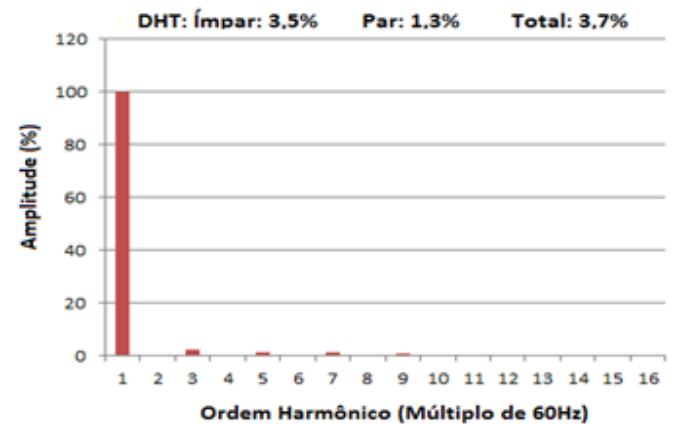


Fig. 10. Espectros de frequências da distorção harmônica total do lado da rede com o filtro de 3ª ordem.

| TABELA II. DETALHES DE CADA COMPONENTE HARMÔNICA CAUSADA NO LADO DA REDE COM O FILTRO DE 3ª ORDEM |                    |               |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------|
| Frequência (Hz)                                                                                   | Ordem da Harmônica | Amplitude (%) |
| 60                                                                                                | 1                  | 100           |
| 120                                                                                               | 2                  | 0,5           |
| 180                                                                                               | 3                  | 2,3           |
| 240                                                                                               | 4                  | 0,1           |
| 300                                                                                               | 5                  | 1,5           |
| 360                                                                                               | 6                  | 0,1           |
| 420                                                                                               | 7                  | 1,1           |
| 480                                                                                               | 8                  | 0,3           |
| 540                                                                                               | 9                  | 0,7           |
| 600                                                                                               | 10                 | 0,2           |
| 660                                                                                               | 11                 | 0,3           |
| 720                                                                                               | 12                 | 0,1           |
| 780                                                                                               | 13                 | 0,1           |
| 840                                                                                               | 14                 | 0,1           |
| 900                                                                                               | 15                 | 0,0           |
| 960                                                                                               | 16                 | 0,4           |

Na Tabela III e Fig. 11 estão ilustradas as medições da distorção harmônica no ramo do filtro passivo de terceira ordem. Percebe-se que a adição desse filtro foi eficaz na atenuação da harmônica de terceira ordem, visto que a mesma fica com intensidade de 15, 7%, muito menor que o valor apresentado na Tabela I sem o filtro.

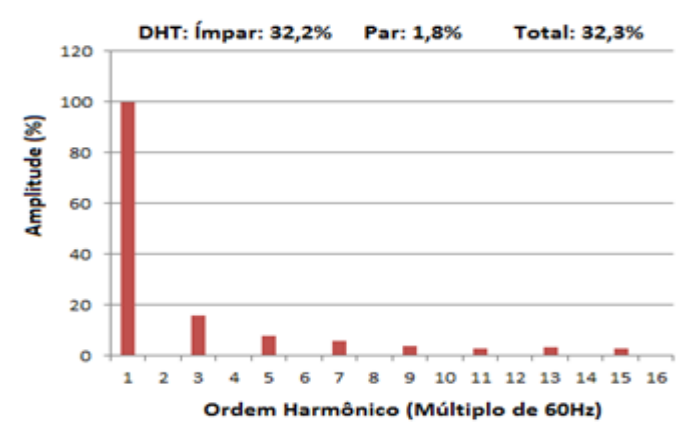


Fig. 11. Espectros de frequências da distorção no ramo do filtro de terceira ordem.

| TABELA III. DETALHES DE CADA COMPONENTE HARMÔNICA NO RAMO DO FILTRO DE 3ª ORDEM |                    |               |
|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------|
| Frequência (Hz)                                                                 | Ordem da Harmônica | Amplitude (%) |
| 60                                                                              | 1                  | 100           |
| 120                                                                             | 2                  | 0,4           |
| 180                                                                             | 3                  | 15,7          |
| 240                                                                             | 4                  | 0,2           |
| 300                                                                             | 5                  | 7,8           |
| 360                                                                             | 6                  | 0,2           |
| 420                                                                             | 7                  | 5,7           |
| 480                                                                             | 8                  | 0,1           |
| 540                                                                             | 9                  | 3,6           |
| 600                                                                             | 10                 | 0,2           |
| 660                                                                             | 11                 | 2,8           |
| 720                                                                             | 12                 | 0,1           |
| 780                                                                             | 13                 | 3,4           |
| 840                                                                             | 14                 | 0,3           |
| 900                                                                             | 15                 | 2,8           |
| 960                                                                             | 16                 | 0,1           |

C. Medições com filtro de 5ª ordem

Com a adição do filtro de quinta ordem observou-se que também houve a redução da distorção harmônica do lado rede, o que pode ser comprovado na Tabela IV e Fig. 12, nas quais se observa que a distorção harmônica total é de 7,1%, com redução da componente de quinta ordem de 29,5% para 4,3%.

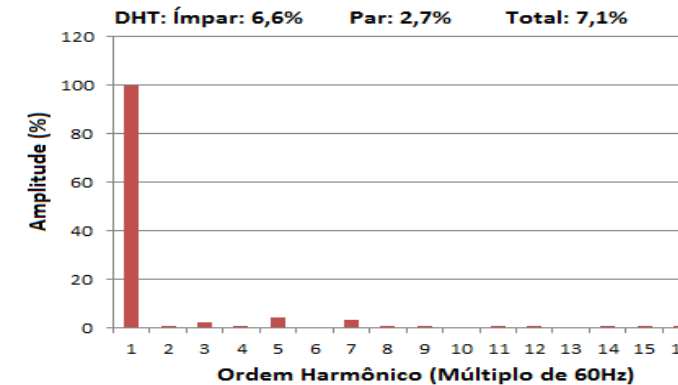


Fig. 12. Espectros de frequências da distorção harmônica total do lado da rede com o filtro de 5ª ordem.

TABELA IV. DETALHES DE CADA COMPONENTE HARMÔNICA CAUSADA NO LADO DA REDE COM O FILTRO DE 5ª ORDEM

| Frequência (Hz) | Ordem da Harmônica | Amplitude (%) |
|-----------------|--------------------|---------------|
| 60              | 1                  | 100           |
| 120             | 2                  | 0,8           |
| 180             | 3                  | 2,1           |
| 240             | 4                  | 1,0           |
| 300             | 5                  | 4,3           |
| 360             | 6                  | 0,5           |
| 420             | 7                  | 3,4           |
| 480             | 8                  | 0,7           |
| 540             | 9                  | 0,6           |
| 600             | 10                 | 0,3           |
| 660             | 11                 | 0,9           |
| 720             | 12                 | 0,6           |
| 780             | 13                 | 0,2           |
| 840             | 14                 | 0,8           |
| 900             | 15                 | 0,9           |
| 960             | 16                 | 0,8           |

Na Tabela V e Fig. 13 pode-se comprovar a eficiência do filtro em absorver a componente de quinta harmônica, visto que a distorção no ramo do filtro de quinta ordem foi de 10,6%.

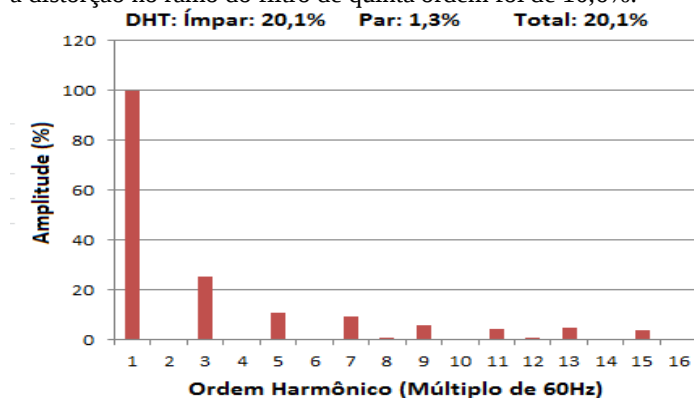


Fig. 13. Espectros de frequências da distorção no ramo do filtro de terceira ordem.

TABELA V. DETALHES DE CADA COMPONENTE HARMÔNICA NO RAMO DO FILTRO DE 5ª ORDEM

| Frequência (Hz) | Ordem da Harmônica | Amplitude (%) |
|-----------------|--------------------|---------------|
| 60              | 1                  | 100           |
| 120             | 2                  | 0,2           |
| 180             | 3                  | 25,5          |
| 240             | 4                  | 0,1           |
| 300             | 5                  | 10,6          |
| 360             | 6                  | 0,3           |
| 420             | 7                  | 9,2           |
| 480             | 8                  | 0,6           |
| 540             | 9                  | 5,6           |
| 600             | 10                 | 0,4           |
| 660             | 11                 | 4,2           |
| 720             | 12                 | 0,6           |
| 780             | 13                 | 4,8           |
| 840             | 14                 | 0,4           |
| 900             | 15                 | 3,9           |
| 960             | 16                 | 0,1           |

### C. Medições com os dois filtros

Com a adição dos dois filtros ativos, também houve a redução da distorção harmônica do lado da rede de 85% para

13,9%. Pode-se observar pela Fig. 14 a redução das componentes harmônicas de terceira e quinta ordem com a adição dos dois filtros. A distorção harmônica total apresentou redução no seu valor devido à capacidade de filtragem das componentes harmônicas de 3ª e 5ª ordem resultante da combinação dos dois filtros.

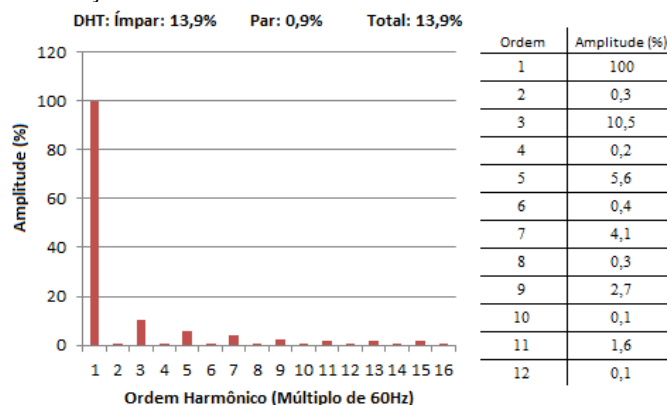


Fig. 14. Espectros de frequências do lado da rede com os dois filtros.

## V. CONCLUSÃO

A partir da análise dos filtros projetados em ambiente de simulação foi possível implementá-los em ambiente real e obter resultados satisfatórios comparados com simulações. As componentes harmônicas de 3ª e 5ª ordem foram filtradas pelos dois filtros quando implementadas de forma separada e também com a implementação conjunta dos dois filtros. A partir destes resultados, constatou-se que filtros passivos sintonizados rejeita-faixa em circuitos com elevada distorção harmônica se são eficazes para a obtenção de melhores índices de distorção harmônica total.

## VI. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) pelos recursos concedidos para elaboração desta pesquisa.

## VII. REFERÊNCIAS

- [1] IEEE Standard 1459-2010, Single Phase Power Definitions, 2010.
- [2] IEC, "Electromagnetic compatibility (ECM) – Part 2-2: Environment – Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signaling in public low-voltage power supply systems", 2002.
- [3] ARRIGALA, J., "Power Quality – The Electrical Engineering Handbook", Ed. Richard C. Dorf, 2000.
- [4] SCHNEIDER ELECTRIC/PROCOBRE, "Qualidade de Energia – Harmônicas", 2003.
- [5] GONZALES, M. L., "Distorções Harmônicas Geradas por Algumas Cargas Não Lineares com Tensões Senoidais", 2007.
- [6] POMILIO, J. A., "Eletrônica de Potência para Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica", Cap. 7.
- [7] PIRES, I. A., "Medidas de mitigação de harmônicos". Disponível em: [http://www.osetoreletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/ed59\\_fasc\\_harmonicos\\_capXII.pdf](http://www.osetoreletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/ed59_fasc_harmonicos_capXII.pdf). Acesso em: 2 de dezembro de 2016.
- [8] MORAIS, E. E. C., "Filtro híbrido de dupla sintonia a quatro fios e quatro braços", Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica, 2014.