

## PROJETOS DE FILTROS HARMÔNICOS SINTONIZADOS EM REDES ELÉTRICAS

Gustavo Sérgio de Freitas Martins<sup>1</sup> (IC), Arthur Costa de Souza (PQ)<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Itajubá - Campus Itabira.

**Palavras-chave:** Cargas não lineares. Filtros passivos. Harmônicos. Qualidade da energia elétrica. Ressonância.

### Introdução

A distorção harmônica vem aumentando de forma significativa nas redes de distribuição secundárias de BT (Baixa Tensão) e média tensão MT (Média Tensão) devido à conexão de várias cargas não lineares. Esse aumento é atribuído à instalação de sistemas fotovoltaicos (FV), inversores de frequência para acionamento de máquinas, computadores, entre outros dispositivos que detém fonte chaveada em sua composição. Como resultado, a presença crescente desses tipos de carga nas redes secundárias de distribuição é diversificada, contribuindo para um aumento nas fontes de distorção harmônica.

As harmônicas são componentes de frequência que são múltiplas inteiras da frequência fundamental (60 Hz no Brasil) em um sistema elétrico. Originados por cargas não lineares, essas harmônicas causam distorção na forma de onda senoidal pura da tensão e da corrente. A presença de harmônicas em redes elétricas BT e MT pode acarretar uma série de complicações. Essas complicações abrangem a distorção das formas de onda da tensão e corrente, o que, por sua vez, pode ocasionar uma diminuição na eficiência e provocar perdas de energia. Além disso, as harmônicas têm o potencial de gerar um aumento excessivo na temperatura de equipamentos e cabos, resultando em falhas prematuras e reduzindo a vida útil dos dispositivos. Adicionalmente, há o risco de interferência com sistemas de comunicação e o potencial para causar disfunções em dispositivos eletrônicos sensíveis.

A aplicação de estratégias de filtragem é crucial para atenuar os efeitos adversos das harmônicas. Diversas técnicas de filtragem estão disponíveis, cada uma apresentando suas próprias vantagens e desvantagens. Os filtros passivos, por exemplo, são simples e econômicos, embora possam não ser totalmente eficazes para lidar com harmônicas de alta frequência. Em contrapartida, os filtros ativos, mais eficientes para harmônicas de alta frequência, são mais complexos e dispendiosos. Já os filtros híbridos buscam combinar as vantagens dos filtros passivos e ativos. Este trabalho tem como objetivo discutir em detalhes as correntes e tensões harmônicas, seu impacto em redes elétricas de baixa e média tensão e a técnica de atenuação dos filtros passivos.

### Metodologia

Para o estudo de caso foi adotada uma rede proveniente do material [TAVARES, 2008], conforme ilustrado na Figura 1:

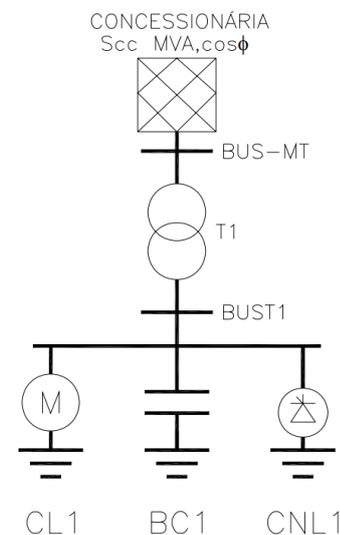


Figura 1 – “Esquemático da Rede”

A seguir, são apresentadas as especificações gerais da rede:

- Concessionária:  $S_{cc} = 100$  MVA (simétrico  $3\phi$ );
- Relação X/R: = 10;
- Transformador:  $Z\% = 5,75$  ( $\Delta/Y$  - solidamente aterrado);
- Relação X/R: = 4,70;
- Potência: = 500 kVA;
- Tensões: = 13,2 kV / 380 V;
- CL (Carga Linear) (Motor): = 90 kW;
- FP = 0,60 indutivo do tipo motor com  $IP / I_n = 8$ ;
- CNL1 = 150 kW.
- $Z_{conc}$  = Impedância da concessionária;
- $Z_T$  = Impedância do transformador;
- $Z_M$  = Impedância do motor;
- $Z_C$  = Impedância do capacitor.

A Tabela 1 evidencia as respectivas correntes harmônicas injetadas pela CNL.

Tabela 1 – Correntes Harmônicas

ORDEM HARMÔNICA (h)	CORRENTE % de In
2	0,000
3	0,000
4	0,000
5	19,200
6	0,000
7	13,200
8	0,000
9	0,000
10	0,000
11	7,300
12	0,000
13	5,700
14	0,000
15	0,000

Considera-se que a CNL1 é composta por inversores de frequência de seis pulsos, não havendo indutância de entrada, com ausência de transformador isolador e com potência controlada através de SCR (Retificador Controlado de Silício (*Silicon Controlled Rectifier*)). Além disso, presume-se que a CNL tenha um FP de 0,92.

A metodologia adotada para o projeto do filtro passivo se baseia principalmente no método da análise harmônica por meio de matrizes de admitância para diferentes ordens de harmônicas.

$$[V_h] = [\lambda]^{-1} \cdot [I_h]$$

$$\begin{bmatrix} V'_{h_{BUS-MT}} \\ V_{h_{BUST1}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_{concH}} + \frac{1}{Z_{TH}} & -\frac{1}{Z_{TH}} \\ -\frac{1}{Z_{TH}} & \frac{1}{Z_{TH}} + \frac{1}{Z_{MH}} + \frac{1}{Z_{CH}} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} I'_{h_{BUS-MT}} \\ I_{h_{BUST1}} \end{bmatrix}$$

Inicialmente, foi realizado o cálculo das impedâncias de cada componente do circuito. Além disso, efetuou-se o cálculo da potência reativa do capacitor com o objetivo de elevar o fator de potência da instalação para 0,95 (indutivo). Em seguida, foi realizado o cálculo da potência de curto-circuito ( $S_{cc}$ ) da barra 1, onde se desconsiderou a impedância da concessionária, levando em conta apenas a impedância do transformador. Também foi determinado o valor da frequência de ressonância (FR) para verificar possíveis problemas relacionados à ressonância no sistema.

Após isso, foi calculada a corrente fundamental da carga não linear de 150 kVA, juntamente com as suas respectivas correntes harmônicas de ordens específicas. Adicionalmente, realizou-se o cálculo das tensões harmônicas nas barras 1 (BUST 1 - BT) e 2 (BUS 2 - MT), mediante a multiplicação das matrizes das admitâncias pelas matrizes das correntes harmônicas.

Esse procedimento permitiu uma análise detalhada da propagação das harmônicas e dos seus efeitos em diferentes pontos do sistema elétrico.

O filtro harmônico sintonizado aproveitou o banco de capacitores que tinha como finalidade a correção do fator de potência do motor de 0,6 para 0,92, neste sentido, instalou um indutor em série ao banco, resultando na geração de um novo gráfico, mostrando a redução nas distorções harmônicas e a eliminação da ressonância paralela existente no sistema. Além disso, foi verificada a suportabilidade do banco de capacitores, garantindo que suportem as tensões e correntes no qual serão submetidos.

Por fim, foram realizados os cálculos das distorções harmônicas totais (DHTs) em cada barra do sistema, e os resultados foram apresentados em gráficos que exibiram as magnitudes harmônicas antes da implementação do filtro.

## Resultados e discussão

Aplicando a metodologia da análise harmônica por meio de matrizes de admitância para diferentes ordens de harmônicas, foi possível determinar as tensões harmônicas nas barras 1 (BUS 1 - BT) e 2 (BUS 2 - MT). Na Tabela 2 é apresentado as tensões harmônicas em cada barra:

Tabela 2 – Tensões Harmônicas sem Filtro.

Ordem Harmônica	Barra 1 – BT Tensão (V)	Barra 2 – MT Tensão (V)
5 <sup>a</sup>	3,671	9,4922
7 <sup>a</sup>	6,5287	16,3625
11 <sup>a</sup>	4,8165	11,4018
13 <sup>a</sup>	2,5785	5,946

A partir das tensões harmônicas, em cada barra é calculada a distorção harmônica total (DHT).

$$DHT_V(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=\infty} V_h^2}}{V_1} \cdot 100$$

Barra 1:

$$DHT_{V_{B1}}(\%) = 4,2257\%$$

Barra 2:

$$DHT_{V_{B2}}(\%) = 0,3001\%$$

Além disso, a partir dos valores das tensões harmônicas foram plotados os gráficos das tensões das

duas barras (Figuras 2 e 3), também foi possível comparar os limites das distorções harmônicas totais. A partir disso, podemos concluir junto a tabela do PRODIST fornecida pela ANEEL em seu módulo 8 (Tabela 3), que não há necessidade de correção das distorções harmônicas de tensão neste momento, porém, foi identificado que há um problema de ressonância próxima à 10ª ordem.

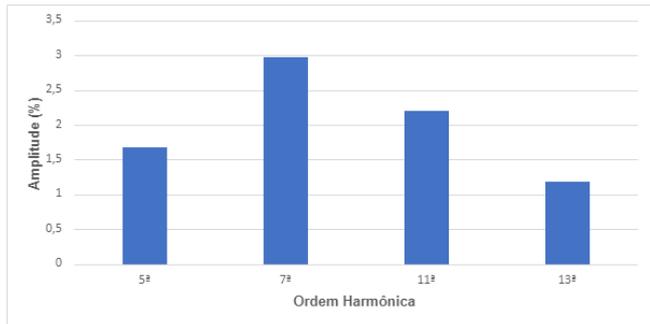


Figura 2 – “Tensões Harmônicas na Barra 1 sem Filtro”

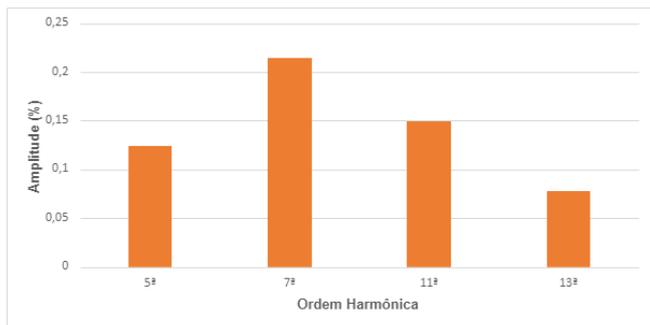


Figura 3 – “Tensões Harmônicas na Barra 2 sem Filtro”

Tabela 3 – Limites das Distorções Harmônicas Totais.

Indicador	Tensão Nominal		
	$V_n \leq 1 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
$DTT_{95\%}$	10,0%	8,0%	5,0%
$DDT_p_{95\%}$	2,5%	2,0%	1,0%
$DTT_1_{95\%}$	7,5%	6,0%	4,0%
$DTT_3_{95\%}$	6,5%	5,0%	3,0%

Com o intuito de mitigar a ressonância de 10ª ordem é projetado um filtro passivo sintonizado.

Utilizando a mesma análise harmônica por meio de matrizes de admitância para diferentes ordens de harmônicas, foi possível determinar as novas tensões harmônicas nas barras 1 (BUS 1 - BT) e 2 (BUS 2 - MT), conforme demonstra a Tabela 4.

Tabela 4 – Tensões Harmônicas com Filtro.

Ordem Harmônica	Barra 1 – BT Tensão (V)	Barra 2 – MT Tensão (V)
5ª	5,365	13,8726
7ª	3,4025	8,5273
11ª	4446,6462m	1,0573
13ª	839,0344m	1,9348

Calculando a distorção harmônica total (DHT) tem-se:

Barra 1:

$$DHT_{V_{B1}}(\%) = 2,9279\%$$

Barra 2:

$$DHT_{V_{B2}}(\%) = 0,2156\%$$

Logo, ficou evidente que o filtro conseguiu reduzir as distorções harmônicas totais. Posteriormente foram plotados os gráficos (Figura 4 e 5) apresentando a comparação gráfica das tensões harmônicas na Barra 1 - BT e Barra 2 - MT, com e sem a aplicação do filtro.

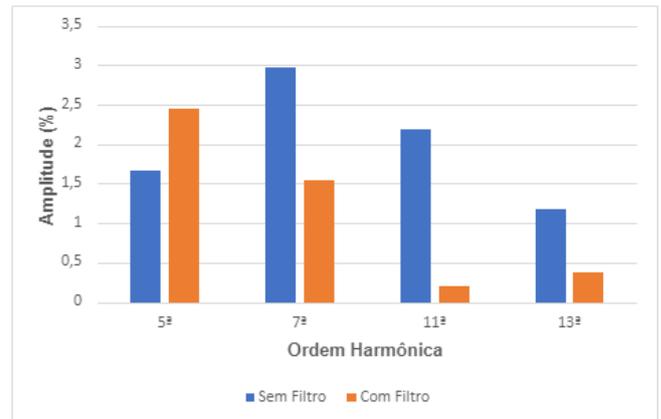


Figura 4 – Tensões Harmônicas na Barra 1 sem Filtro e com Filtro

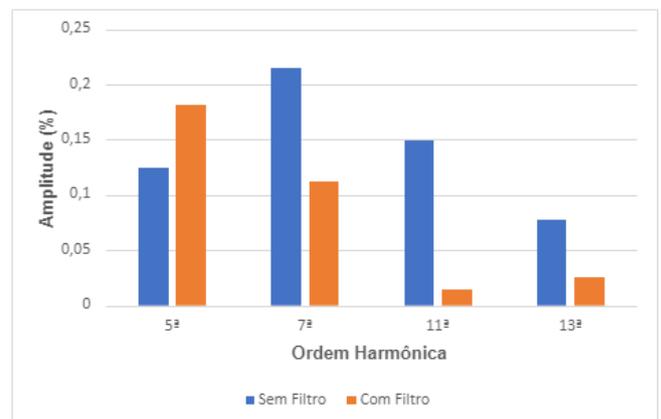


Figura 5 – Tensões Harmônicas na Barra 1 sem Filtro e com Filtro

### Conclusões

Neste trabalho, foi realizada uma análise detalhada sobre a mitigação de distorções harmônicas em redes de média e baixa tensão, com foco na utilização de filtros harmônicos sintonizados. Ao longo dos estudos, foi implementado um filtro sintonizado para atenuar uma possível ressonância paralela de 10ª ordem na barra 1 – BT, identificada durante a avaliação das condições do sistema. Antes da introdução do filtro, as medições indicaram que o sistema operava dentro dos limites estabelecidos. No entanto, a identificação de uma possível ressonância próxima à 10ª ordem justificou a sua implementação no sistema. Com a implementação do filtro, verificou-se uma melhoria significativa nas distorções harmônicas individuais a partir da 7ª ordem, além da redução da distorção harmônica total tanto na barra 1 quanto na barra 2. Além disso, foi verificada a suportabilidade dos capacitores utilizados no sistema, os quais atenderam plenamente todos os valores de referência especificados na norma IEEE Standard 18-2002. A corrente eficaz, a tensão eficaz, a tensão de pico e a potência eficaz dos capacitores mantiveram-se dentro dos limites recomendados, garantindo a integridade e a durabilidade dos mesmos durante o funcionamento do filtro. Isso reforça a confiabilidade do sistema e a adequação do projeto de mitigação das distorções harmônicas. Os resultados demonstraram que a inserção do filtro não apenas atendeu às expectativas de mitigação das harmônicas, mas também garantiu uma maior confiabilidade ao sistema elétrico, contribuindo para a longevidade dos equipamentos conectados à rede, como dispositivos eletroeletrônicos e motores elétricos. Em conclusão, a utilização de filtros sintonizados mostrou-se eficaz para o controle de distorções harmônicas, promovendo uma operação segura e eficiente da rede elétrica estudada.

### Agradecimentos

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todas as pessoas que contribuíram diretamente ou indiretamente para a realização desta iniciação científica. Primeiramente gostaria de agradecer ao Professor Arthur Costa de Souza, cuja expertise, compreensão e paciência, adicionaram consideravelmente à minha experiência educacional. Agradeço também ao PIBIC (Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica) pelo apoio financeiro durante todo o desenvolvimento da pesquisa. A Universidade Federal de Itajubá. Por fim, agradeço à minha família e amigos, cujo apoio emocional e compreensão foram essenciais para que eu pudesse

dedicar o tempo e esforço necessários para concluir este trabalho.

### Referências

- [1] ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST: Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica. [S.l.], 2023.
- [2] ARRILLAGA, J.; BRADLEY, D. A.; BODGER, P. S. Power System Harmonic. New York: John Wiley & Sons, 1985.
- [3] ARRILLAGA, J. et al. Power System Harmonic Analysis. New York: Wiley, 1997.
- [4] COSTA, A. B. da; OLIVEIRA, L. F. de. Impacto das distorções harmônicas na medição de energia elétrica. Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação, v. 2, n. 2, p. 20–30, 2023.
- [5] KIMBARK, E. W. Direct Current Transmission, Volume I. New York: Wiley-Interscience, 1971.
- [6] NASCIMENTO, R. P. d. Propostas de procedimentos para projetar filtros harmônicos a partir de um programa de penetração harmônica, incluindo cálculos de desempenho e de suportabilidade. 238 p. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007. Orientador: José Wilson Resende.
- [7] PEREIRA, M. F.; RODRIGUES, A. C. Aplicações práticas da ressonância elétrica. Revista de Engenharia Elétrica, v. 3, n. 3, p. 30–40, 2023.
- [8] SANTOS, J. R. dos; SILVA, M. A. da. Ressonância elétrica em circuitos de radiofrequência. Revista de Eletrônica e Comunicações, v. 4, n. 4, p. 50–60, 2023.
- [9] SILVA, J. E. da. Qualidade da Energia Elétrica em Instalações Industriais. Rio de Janeiro: LTC, 2005.
- [10] SILVA, J. P. da; SANTOS, M. A. dos. Distorções harmônicas em redes elétricas: um estudo de caso. Revista Brasileira de Energia Elétrica, v. 1, n. 1, p. 1–10, 2023.
- [11] TAVARES, P. H. Curso Compensação de Reativos e Filtragem de Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência. 1. ed. [S.l.]: Target Engenharia e Consultoria Ltda, 2008. Realizado por Target Engenharia e Consultoria Ltda. Disponível em: [www.target.com.br](http://www.target.com.br). Acesso em: 01 mar. 2024.
- [12] UHMANN, E. Power Transmission by Direct Current. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 1975.