

Análise e Aplicação de Filtros Harmônicos Amortecidos de Segunda Ordem em Sistemas de PotênciaEduardo Ruiz Rubio¹ (IC), Arthur Costa de Souza (PQ)¹¹Universidade Federal de Itajubá - Campus Itabira.**Palavras-chave: Filtros harmônicos amortecidos, Ressonância, Distorção harmônica total.****Introdução**

A presença de harmônicas em sistemas elétricos de potência tem se tornado um tema de crescente relevância devido ao aumento da utilização de cargas não lineares, como inversores, retificadores e equipamentos eletrônicos em geral. Essas componentes de frequência múltipla inteira da fundamental distorcem a forma de onda da tensão e da corrente, podendo acarretar perdas adicionais, sobreaquecimento de transformadores e motores, mau funcionamento de equipamentos de proteção e até mesmo a redução da vida útil. A qualidade da energia elétrica, nesse contexto, passa a ser fortemente impactada, exigindo monitoramento e mitigação adequados por parte das concessionárias e consumidores (IEEE, 2014) (ARRILLAGA, J. et al., 2003).

A utilização de filtros harmônicos é uma das estratégias mais empregadas para mitigar a distorção harmônica em sistemas elétricos, sendo classificados em ativos e passivos. Entre os passivos, destacam-se os filtros sintonizados e os amortecidos, estes últimos desenvolvidos para oferecer maior robustez frente à variação de frequências e instabilidades do sistema. O filtro amortecido de primeira ordem apresenta simplicidade construtiva e baixo custo, porém sua atenuação é limitada, especialmente em frequências mais elevadas. Já o filtro amortecido de segunda ordem surge como alternativa mais eficiente, proporcionando uma resposta mais seletiva, melhor desempenho em altas frequências e maior flexibilidade no controle da impedância, ainda que com maior complexidade de projeto e custo associado (PEREIRA, R. A et. al, 2015) (AKAGI, H.; WATANABE, E. H. et al., 2007).

No contexto brasileiro, a preocupação com a distorção harmônica em sistemas de distribuição está alinhada às diretrizes do Módulo 8 do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional), estabelecido pela ANEEL, que define limites de qualidade da energia elétrica a serem observados pelas concessionárias e consumidores. Diante desse cenário regulatório, a utilização de filtros harmônicos, em especial os amortecidos de segunda ordem, mostra-se uma alternativa eficaz para atender às

exigências normativas, reduzindo a Distorção Harmônica Total (DHT) conhecida em inglês como *total Harmonic Distortion (THD)*. Apesar de apresentarem maior custo e complexidade de implementação em comparação aos filtros de primeira ordem, esses dispositivos podem representar um investimento viável em instalações industriais e comerciais de grande porte, onde os impactos da distorção harmônica são mais críticos (ANEEL, 2021) (OLIVEIRA, F. S. et al., 2019).

Este trabalho analisa os fundamentos e aplicabilidade dos filtros harmônicos, com destaque para os filtros amortecidos de primeira e segunda ordem em uma rede elétrica fictícia.

Metodologia

Nesta seção, detalha-se a metodologia aplicada para a análise do sistema e o dimensionamento dos filtros harmônicos amortecidos, com o objetivo de mitigar a distorção harmônica e prevenir ressonâncias no sistema.

1. Sistema Elétrico Analisado

O primeiro passo é a definição da configuração e parametrização do sistema elétrico sob estudo, que inclui a concessionária, o transformador, o banco de capacitor, as cargas lineares e não lineares, conforme ilustra a Figura 1.

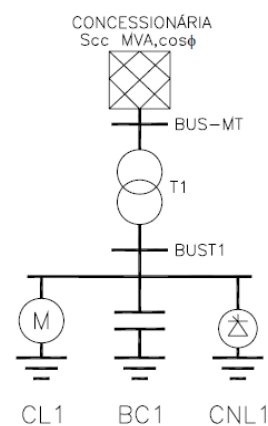


Figura 1 – Sistema elétrico fictício.

A Tabela 1 apresenta as informações referentes ao sistema elétrico fictício sob estudo.

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

Tabela 1 – Parâmetros da rede elétrica fictícia

Concessionária:	
•	S_{cc} : 100 MVA (Simétrico 3 ϕ);
•	Tensão: 13,2 kV;
•	Relação X/R: 10;
Transformador (T1):	
•	Potência: 500 kVA;
•	Tensões: 13,2 kV / 380 V;
•	Z%: 5,75 (Δ/Y - Solidamente aterrado);
•	Relação X/R: 4,70;
CL1 (Motor):	
•	Potência: 90 kW;
•	FP: 0,60 (Indutivo);
•	$IP / I_n = 8$;
CNL1 (Inversor):	
•	Potência: 150 kW;
•	FP: 0,92;
Banco de Capacitor (BC1)	
•	Potência: 90,43 kVAr

No que diz respeito à carga não linear (CNL1), a corrente foi calculada em 227,9 A e a corrente em pu (por unidade) foi de aproximadamente $1,5 \times 10^{-3}$ pu. Com base na corrente fundamental da CNL1, calcularam-se as correntes harmônicas nas ordens de 5^a, 7^a, 11^a e 13^a, cujos valores em pu estão mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores da corrente em relação a corrente base

Ordem Harmônica (h)	Corrente % de I_n	Amplitude (pu)
5	48	$7,20 \times 10^{-4}$
7	33	$4,95 \times 10^{-4}$
11	18,25	$2,74 \times 10^{-4}$
13	14,25	$2,14 \times 10^{-4}$

2. Sistema PU

O método de normalização por unidade (pu) é aplicado para simplificar os cálculos do sistema. Inicialmente, admitta-se uma potência base (100 MVA) e, com as tensões base em consonância com as tensões de enrolamento do transformador (13,2 kV e 380 V), calcula-se a impedância base tanto para o lado de alta quanto para o lado de baixa tensão do transformador. Com isso, transforma-se as impedâncias dos elementos do sistema para seus respectivos valores em pu.

3. Análise Harmônica

Com os valores das correntes harmônicas, o próximo passo é calcular as impedâncias harmônicas dos componentes do sistema para as diferentes ordens (5^a, 7^a, 11^a e 13^a). Utilizam-se as equações de (1) a (5) para os componentes do sistema, como concessionária,

transformador, cargas lineares (motores de indução) e capacitor para cada ordem harmônica sob análise (ARRILLAGA, J. et al., 2003).

$$\text{Transformador: } Z_h = R_T * h^{1,5} + jX_T * h \quad (1)$$

$$\text{Concessionária: } Z_{conc} = R_{conc} * \sqrt{h} + jX_{conc} * h \quad (2)$$

$$\text{Cargas lineares: } Z_L = R_L * (0,1 * h + 0,9) + jX_L * h \quad (3)$$

$$\text{Motores de indução: } Z_{Mh} = Z_M \cos \left(\arctan \left(\frac{IP}{IN} \right) \right) + jZ_M \sin \left(\arctan \left(\frac{IP}{IN} \right) \right) * h \quad (4)$$

$$\text{Capacitor: } Z_C = -jX_C/h \quad (5)$$

A partir das impedâncias harmônicas, são aplicadas as leis de Kirchhoff para determinar as tensões harmônicas nas barras de interesse. Isso é feito para cada ordem harmônica separadamente, permitindo calcular as tensões harmônicas em pu.

4. Cálculo das Distorções Harmônicas

Com as tensões harmônicas em pu nas barras, calcula-se o valor eficaz (RMS) das tensões e as distorções harmônicas totais de tensão (DTT) em cada barra do sistema. Este processo envolve a soma das contribuições das tensões harmônicas para diferentes ordens e a comparação com a tensão fundamental.

5. Dimensionamento do Filtro Harmônico

Finalmente, com base nas análises das distorções e nas condições de ressonância do sistema, um filtro harmônico amortecido de primeira e segunda ordem são apresentados na Figura 2 (a) e (b), os quais são projetados para atenuar as distorções e evitar ressonâncias paralelas em ordens harmônicas específicas. Estes filtros serão incorporados ao sistema de forma isolada para garantir que as distorções harmônicas permaneçam dentro dos limites aceitáveis, conforme estabelecido pelas normas regulatórias.

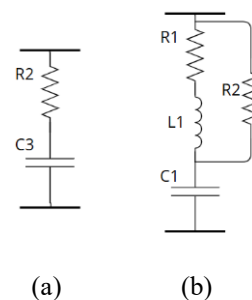


Figura 2 – Filtro amortecido de primeira ordem (a) e de segunda ordem (b).

A seguir, serão apresentadas as equações (6) a (8)

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

que garantem a parametrização do filtro amortecido de segunda ordem (NASCIMENTO, R. P., 2007)

$$C_1 = 1/(Q_{C1} * \{[(n_{min}\sqrt{2})^2 - 1]/(n_{min}\sqrt{2})^2\}) \quad (6)$$

$$L_1 = 1/((n_{min}\sqrt{2})^2 * C_1) \quad (7)$$

$$R_2 = D * \sqrt{(L_1/C_1)} \quad (8)$$

Onde:

- C_1 é a capacitância do filtro de segunda ordem;
- L_1 é a indutância do filtro de segunda ordem;
- R_2 é a resistência do filtro de primeira e segunda ordem;
- C_3 é a capacitância do filtro de primeira ordem;
- R_1 é a resistência do filtro de segunda ordem que está em série com o indutor;
- n_{min} é a ordem harmônica mínima filtrada (neste trabalho assumiu-se igual a 3);

6. Regulamentação/ Indicadores de qualidade

Por meio da Equação (9) é possível determinar os percentuais da distorção harmônica individual de tensão de ordem h (DIT_h), e posteriormente utilizando a Equação (10) é calculada a distorção harmônica total de tensão (DTT) presente em cada uma das barras. Os valores das distorções harmônicas individuais e totais são apresentados na Tabela 3

$$DIT_h(\%) = \frac{V_h}{V_1} \cdot 100 \quad (9)$$

$$DTT(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=\infty} V_h^2}}{V_1} \cdot 100 \quad (10)$$

Após o cálculo das DIT_h e DTT , é realizada a análise dos limites normativos (ANEEL, 2021), no qual os limites em relação às distorções harmônicas são apresentados na Tabela 3.

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%
$DDT_l_{95\%}$	7,5%	6,0%	4,0%
$DDT_3_{95\%}$	6,5%	5,0%	3,0%

Resultados e discussão

O sistema elétrico fictício analisado presente na

Figura (1) foi parametrizado para investigar a distorção harmônica e o risco de ressonância no sistema. A ordem harmônica de ressonância paralela foi identificada em aproximadamente 10ª ordem, correspondente a uma frequência de ressonância de 600 Hz. A impedância harmônica dos componentes foi determinada para cada ordem harmônica, conforme apresenta as Tabelas 4 a 5.

Tabela 4 – Valores das impedâncias da concessionária e transformador em cada uma das ordens harmônicas.

h	Concessionária (Ω)	Transformador (Ω)
1	$0,0995 + j0,9995$	$2,390 + j11,25$
5	$0,222 + j4,988$	$26,271 + j56,25$
7	$0,263 + j6,997$	$44,263 + j78,75$
11	$0,330 + j10,995$	$87,194 + j123,75$
13	$0,359 + j12,994$	$112,024 + j146,25$

Tabela 5 – Valores das impedâncias da carga motora e do banco de capacitor em cada uma das ordens harmônicas.

h	Carga CL1 (Motor) (Ω)	Banco de capacitor (Ω)
1	$10,336 + j83,699$	$-j1111,111$
5	$14,47 + j413,495$	$-j222,222$
7	$16,538 + j578,893$	$-j158,730$
11	$20,672 + j909,689$	$-j101,010$
13	$22,739 + j1075,087$	$-j85,470$

As distorções harmônicas totais de tensão ($DTTs$) das barras foram determinadas, com valores de 0,80% para a BUSMT e 11,16% para a BUST1. A análise desses valores demonstrou que, a DHT da barra BUST1 estava fora dos limites permitidos, a ressonância de 10ª ordem ainda apresentava um risco que deveria ser tratado. A Tabela 6 apresenta a parametrização dos filtros amortecidos utilizados no estudo, onde os parâmetros do filtro de segunda ordem referem-se aos valores da primeira iteração, isto é, com potência reativa adotada em 300 kVAr.

Tabela 6 – Parametrização dos filtros amortecidos.

Parâmetro	Filtro de 1ª ordem	Filtro de 2ª ordem
$R_2(\Omega)$	0,18	0,18
$C_3(mF)$	26,5	--
$R_1(\Omega)$	--	1,444
$L_1(mH)$	--	0,075
$C_1(mF)$	--	5,205

Os cálculos realizados para determinar o valor inicial da iteração no ajuste do filtro de segunda ordem mostraram que, partindo de 300 kVAr, foram analisados

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

incrementos sucessivos desse mesmo valor. Assim, obtiveram-se os parâmetros dos demais componentes (C_1 , L_1 , R_2) resultando nos valores de DTT apresentados nas primeiras cinco iterações presentes na Figura (3). Vale ressaltar que o valor de R_1 foi adotado em $1,444 \Omega$, pois garante uma boa eficiência na filtragem das harmônicas.

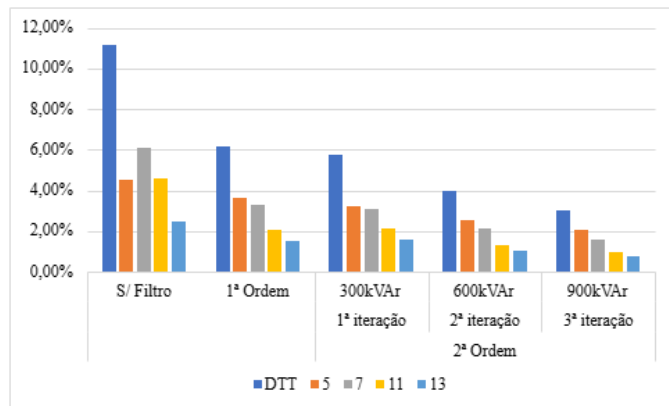


Figura 3 – Distorções harmônicas para iterações com potências capacitivas do filtro de segunda ordem.

Desse modo, nota-se que, à medida que as iterações avançam, a diferença entre os valores de distorção harmônica em relação à iteração anterior reduz-se gradualmente, tornando-se cada vez menos significativa. Até certo nível de potência, o projeto do filtro mantém-se viável, mas, a partir desse ponto (1200 kVAr), sua aplicação torna-se inviável, salvo em caso de expansão do sistema elétrico, o que permitiria absorver a potência adicional e possibilitar futuras cargas não lineares. Para efeito comparativo, a Figura 4 apresenta as distorções harmônicas do sistema sem filtro, com filtro de primeira ordem e com três iterações do filtro de segunda ordem.

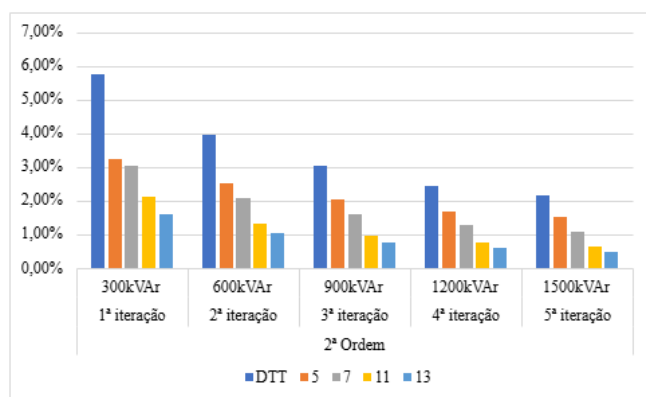


Figura 4 – Comparação das distorções harmônicas para o sistema s/ filtro, c/ filtro de 1ª ordem e com 3 iterações para o filtro de 2ª ordem.

Em vista disso, observa-se que, tanto no filtro de primeira ordem quanto na primeira iteração do filtro de

segunda ordem, a distorção harmônica já atende aos limites normativos estabelecidos (7,5%). No entanto, o filtro de primeira ordem existe um limite de potência dissipativa em sua resistência, que pode tornar inviável para cenários com múltiplas ordens harmônicas.

Conclusões

Portanto, esta pesquisa teve como objetivo estudar e analisar as funcionalidades dos filtros harmônicos amortecidos de 2ª ordem. Os resultados mostraram que, em comparação ao sistema sem filtro, o filtro de 1ª ordem foi eficiente. No entanto, no que diz respeito à capacidade de lidar com futuras cargas não lineares, o filtro de 1ª ordem torna-se inviável, pois exigiria um aumento significativo de suportabilidade na potência dissipativa. Já o filtro de 2ª ordem apresenta uma melhor relação custo-benefício, pois ainda dispõe de potência adicional, garantindo a filtragem eficaz das harmônicas geradas por cargas instaladas posteriormente.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a UNIFEI e ao CNPQ pela oportunidade apresentada e ao professor orientador Arthur Costa de Souza pelos ensinamentos agregados.

Referências

- AKAGI, H.; WATANABE, E. H.; AREDES, M. *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. 2. ed. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2007.
- ANEEL. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8: Qualidade da Energia Elétrica*. Brasília: ANEEL, 2021.
- ARRILLAGA, J.; WATSON, N. R. *Power System Harmonics*. 2. ed. John Wiley & Sons, 2003.
- IEEE. *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. IEEE Std 519-2014, 2014.
- NASCIMENTO, Rogério Pinto. *Regras e Procedimentos de Distribuição*. Uberlândia: Regras e Procedimentos de Distribuição, 2007.
- OLIVEIRA, F. S.; PEREIRA, R. A.; RODRIGUES, P. R. *Aplicação de filtros harmônicos em sistemas de distribuição: análise de desempenho frente às exigências do PRODIST*. Revista IEEE América Latina, v. 17, n. 5, p. 789–796, 2019.
- PEREIRA, R. A.; SILVA, L. C. P. *Filtros harmônicos para melhoria da qualidade da energia elétrica*. Revista IEEE América Latina, v. 13, n. 1, p. 45–53, 2015.