

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

PROJETO E ANÁLISE DE FILTROS HARMÔNICOS SINTONIZANTES DE SEGUNDA ORDEM PARA MITIGAÇÃO DE HARMÔNICOS EM REDES ELÉTRICAS

Gustavo Sérgio de Freitas Martins¹ (IC), Arthur Costa de Souza (PQ)¹

¹ Universidade Federal de Itajubá - Campus Itabira.

Palavras-chave: Cargas não lineares. Distorção harmônica total. Fator de potência. Penetração harmônica. Qualidade de energia elétrica.

Introdução

O avanço da eletrônica de potência e o aumento do uso de cargas não lineares em redes de baixa e média tensão têm acentuado a presença de distorções harmônicas, comprometendo a qualidade da energia elétrica. Essas distorções reduzem a vida útil dos equipamentos, aumentam as perdas por efeito Joule e podem levar ao descumprimento dos limites estabelecidos por normas regulatórias, afetando a confiabilidade do sistema.

Diante desse cenário, o objetivo principal desta pesquisa é projetar e analisar a eficiência dos filtros harmônicos sintonizados na mitigação das distorções geradas por cargas não lineares, visando atender aos limites de distorção harmônica e fator de potência estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST [1].

A justificativa para a realização deste estudo está ligada à necessidade de soluções técnicas eficientes para o controle de harmônicos, especialmente em ambientes industriais e comerciais, onde a conformidade normativa é cada vez mais exigida.

Para o desenvolvimento da pesquisa, foi adotada a metodologia teórica-analítica, baseada na modelagem matemática dos elementos do sistema elétrico em regime harmônico. O procedimento metodológico compreendeu a construção do diagrama de impedâncias e admitâncias harmônicas do circuito, seguido do cálculo das distorções harmônicas totais (DHTs) nas barras do sistema. Posteriormente, foi realizado o dimensionamento dos componentes do filtro harmônico sintonizado, a partir das características do banco de capacitores já existente na instalação. Foram analisados diferentes cenários de fator de qualidade do filtro, a fim de avaliar sua influência no desempenho da mitigação harmônica. Por fim, procedeu-se à análise de suportabilidade dos capacitores, garantindo que a operação do filtro permanecesse dentro dos limites de especificação do equipamento.

Metodologia

Para o desenvolvimento do estudo de caso, foi utilizado uma rede de duas barras provenientes do material [6], conforme ilustrado na Figura 1:

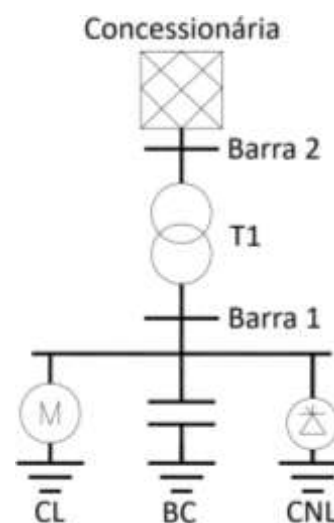


Figura 1 - Rede de 2 Barras.

A seguir são apresentados os parâmetros gerais da rede:

1. Concessionária:
 - S_{cc} : 100 MVA (Simétrico 3ϕ);
 - Tensão: 13,2 kV;
 - Relação X/R: 10;
2. Transformador (T1):
 - Potência Aparente: 500 kVA;
 - Tensões: 13,2 kV / 380 V;
 - Z%: 5,75 (Δ/Y - Solidamente aterrado);
 - Relação X/R: 4,70;
3. CL (Motor):
 - Potência Ativa: 90 kW;
 - FP: 0,60 (Indutivo);
 - $IP/I_n = 8$;
4. BC (Banco de Capacitores):
 - Potência Reativa = 90 kVAr;
5. CNL (Inversor):
 - Potência: 150 kW;
 - FP: 0,92;
6. Espectro Harmônico:

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

Tabela 1 - Correntes Harmônicas.

Corrente	Amplitude (A)	Distorção Harmônica
I_1	227,9014	-
I_5	65,6356	28,8%
I_7	45,1245	19,8%
I_{11}	19,9642	8,76%
I_{13}	15,5885	6,84%
DTI		36,67%

Obs: DTI – Distorção Harmônica Total de Corrente;

Com base nos parâmetros apresentados acima, foi realizada a análise de penetração harmônica do sistema, para a modelagem matemática dos elementos do circuito foram utilizadas as equações segundo [2], [3] e [5], no qual, a matriz de admitâncias de representação do sistema para cada ordem harmônica é apresentada na Equação (1).

$$Y_h = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_{Conc_h}} + \frac{1}{Z_{T_h}} & -\frac{1}{Z_{T_h}} \\ -\frac{1}{Z_{T_h}} & \frac{1}{Z_{T_h}} + \frac{1}{Z_{M_h}} + \frac{1}{X_{C_h}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Onde:

- Z_{Conc_h} = Impedância harmônica da concessionária;
- Z_{T_h} = Impedância harmônica do transformador;
- Z_{M_h} = Impedância harmônica do motor;
- X_{C_h} = Reatância harmônica capacitiva.

O cálculo das tensões harmônicas presentes nas barras do sistema é realizado utilizando a Equação (2).

$$[V_h] = [Y_h]^{-1} \cdot [I_h] \quad (2)$$

Por meio da Equação (3) é possível determinar os percentuais da distorção harmônica individual de tensão de ordem h (DIT_h), e posteriormente utilizando a Equação (4) 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.

$$DIT_h(\%) = \frac{V_h}{V_1} \cdot 100 \quad (3)$$

$$DTT(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=\infty} V_h^2}}{V_1} \cdot 100 \quad (4)$$

Após o cálculo das DIT_h e DTT , é realizado a análise dos limites normativos segundo [1], no qual os limites em relação as distorções harmônicas são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - 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_I 95%	7,5%	6,0%	4,0%
DTT_3 95%	6,5%	5,0%	3,0%

Afim de respeitar os limites normativos, foram projetados dois filtros passivos sintonizados. Com o objetivo de avaliar o impacto do fator de qualidade no desempenho desses filtros, os procedimentos anteriores foram repetidos para três cenários distintos:

- Fator de qualidade ideal $R = 0$; $Q \rightarrow \infty$;
- Fator de qualidade padrão $Q = 50$;
- Fator de qualidade baixo $Q = 10$.

Além disso, foi realizada a análise de suportabilidade do banco de capacitores para cada um dos filtros dimensionados, garantindo que os limites estabelecidos em [4] fossem devidamente atendidos. Os resultados dessa verificação são apresentados na Tabela 6.

Resultados e discussão

Tabela 3 - Percentuais das Distorções Harmônicas – Rede sem Filtro.

	Barra 1 (%)	Barra 2 (%)
DIT_5	3,0459	0,2468
DIT_7	4,2058	0,3411
DIT_{11}	8,5684	0,6954
DIT_{13}	2,2407	0,1819
DTT	10,2667	0,8330

Analisando os valores apresentados na Tabela 3, fica evidente que os limites normativos foram excedidos. Considerando o banco de capacitores já instalado na rede,

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

optou-se por sintonizar um filtro passivo na 11ª ordem, uma vez que esta apresentou a maior amplitude harmônica. Os valores das DIT_h e DTT calculados para cada fator de qualidade é apresentado na Tabela 4, bem como na Figura 2.

Tabela 4 - Percentuais das Distorções Harmônicas - Filtro na 11ª Ordem.

Fator de qualidade ideal $R = 0; Q \rightarrow \infty$		
	Barra 1 (%)	Barra 2 (%)
DIT_5	3,3195	0,2689
DIT_7	10,3896	0,8425
DIT_{11}	0	0
DIT_{13}	0,2786	0,0226
DTT	10,9106	0,8847
Fator de qualidade padrão $Q = 50$		
	Barra 1 (%)	Barra 2 (%)
DIT_5	3,2916	0,2667
DIT_7	7,0395	0,5708
DIT_{11}	0,2822	0,0229
DIT_{13}	0,3365	0,0273
DTT	7,7835	0,6311
Fator de qualidade baixo $Q = 10$		
	Barra 1 (%)	Barra 2 (%)
DIT_5	3,2212	0,2610
DIT_7	4,5216	0,3667
DIT_{11}	0,6005	0,0487
DIT_{13}	0,5016	0,0407
DTT	5,6065	0,4545

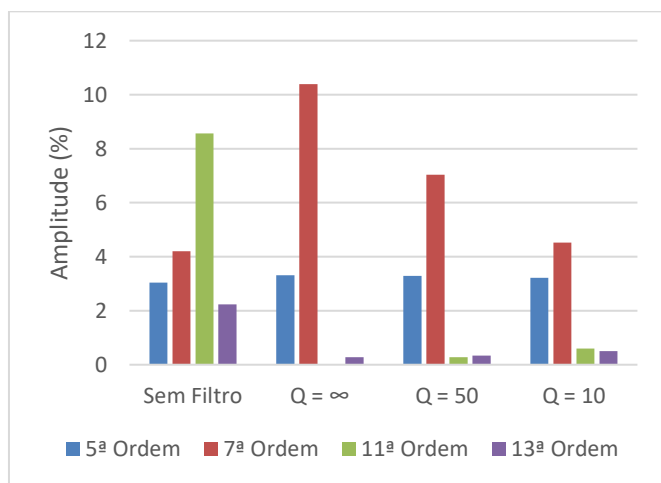


Figura 2- Percentuais de DIT_h na Barra 1 - Filtro na 11ª Ordem.

Observa-se que, embora a DIT_{11} tenha sido reduzida em todos os cenários analisados, houve um aumento significativo da DIT_7 para todos os fatores de

qualidade considerados. Além disso, a DTT ultrapassou os limites normativos (7,5%) em duas das três situações. Diante disso, foi necessário sintonizar também um filtro para a 7ª ordem. Os valores das DIT_h e DTT são apresentados na Tabela 5, bem como na Figura 3.

Tabela 5 - Percentuais das Distorções Harmônicas - Filtro na 11ª e 7ª Ordem.

Fator de qualidade ideal $R = 0; Q \rightarrow \infty$		
	Barra 1 (%)	Barra 2 (%)
DIT_5	3,8352	0,3107
DIT_7	0	0
DIT_{11}	0	0
DIT_{13}	0,4203	0,0341
DTT	3,8582	0,3126
Fator de qualidade padrão $Q = 50$		
	Barra 1 (%)	Barra 2 (%)
DIT_5	3,7638	0,3049
DIT_7	0,8793	0,0713
DIT_{11}	0,3784	0,0307
DIT_{13}	0,4590	0,0373
DTT	3,9107	0,3169
Fator de qualidade baixo $Q = 10$		
	Barra 1 (%)	Barra 2 (%)
DIT_5	3,5796	0,2900
DIT_7	1,6775	0,1360
DIT_{11}	0,6915	0,0561
DIT_{13}	0,5794	0,0470
DTT	4,0548	0,3286

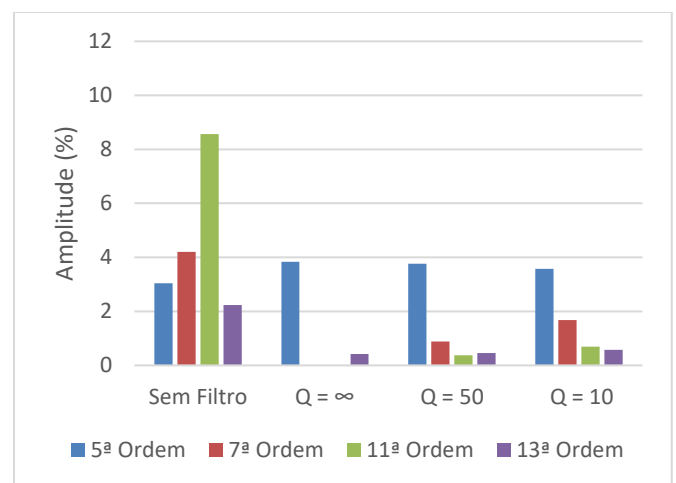


Figura 3 - Percentuais de DIT_h na Barra 1 - Filtro na 11ª e 7ª Ordem.

Em relação à suportabilidade dos bancos de capacitores, os valores apresentados na Tabela 6 demonstram que, para todos os filtros projetados, os

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

limites corrente eficaz, tensão eficaz, tensão de pico e potência reativa eficaz, permaneceram dentro dos limites independentemente do fator de qualidade adotado.

Tabela 6 - Limites de Suportabilidade do Banco de Capacitores.

Filtro na 11ª Ordem			
Limites	$Q \rightarrow \infty$	$Q = 50$	$Q = 10$
$\frac{I_{efcap}}{I_{efnom}} < 1,8$	1,0460	1,0825	1,0771
$\frac{V_{efcap}}{V_{efnom}} < 1,1$	1,0095	1,0099	1,0099
$\frac{V_{pico_{cap}}}{V_{pico_{nom}}} < 1,2$	1,0673	1,1048	1,1082
$\frac{Q_{efcap}}{Q_{efnom}} < 1,35$	1,0560	1,0932	1,0878
Filtro na 7ª Ordem			
Limites	$Q \rightarrow \infty$	$Q = 50$	$Q = 10$
$\frac{I_{efcap}}{I_{efnom}} < 1,8$	1,2757	1,2469	1,1835
$\frac{V_{efcap}}{V_{efnom}} < 1,1$	1,0281	1,0273	1,0255
$\frac{V_{pico_{cap}}}{V_{pico_{nom}}} < 1,2$	1,1947	1,1879	1,1664
$\frac{Q_{efcap}}{Q_{efnom}} < 1,35$	1,3116	1,2810	1,2136

Conclusões

Os resultados obtidos inicialmente demonstraram que a rede ultrapassava os limites de distorção harmônica estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST, tornando indispensável a implementação de medidas corretivas. A aplicação de um filtro passivo sintonizado na 11ª ordem mostrou-se eficaz na redução da DIT_{11} para todos os fatores de qualidade analisados ($Q \rightarrow \infty$, $Q = 50$ e $Q = 10$).

Entretanto, observou-se um aumento expressivo da DIT_7 , indicando a ocorrência de ressonâncias e a necessidade de um filtro adicional. Além disso, em dois dos três cenários analisados, a DTT permaneceu acima dos limites normativos, reforçando a importância de uma filtragem mais abrangente.

Dessa forma, projetou-se também um filtro passivo sintonizado na 7ª ordem, o que resultou na redução significativa das distorções e no atendimento aos limites regulatórios para todos os fatores de qualidade

avaliados. Os resultados evidenciam que a escolha do fator de qualidade influencia diretamente a seletividade e a eficiência da filtragem, sendo que valores elevados de Q proporcionam maior atenuação na frequência de sintonia, mas podem intensificar distorções em ordens próximas.

Pode-se destacar também, que em ambos os filtros, os critérios de suportabilidade (corrente eficaz, tensão eficaz, tensão de pico e potência reativa eficaz) foram atendidos, assegurando a integridade e a confiabilidade operacional do equipamento. Assim, a combinação de filtros sintonizados em múltiplas ordens, aliada à escolha criteriosa do fator de qualidade, mostrou-se essencial para garantir a conformidade normativa e melhorar a qualidade da energia elétrica do sistema analisado.

Agradecimentos

Gostaria de expressar minha sincera gratidão em especial, ao Prof. Dr. Arthur Costa de Souza. Estendo meus agradecimentos ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC), bem como à Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI).

Referências

- [1] ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST: Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_prodist_modulo_8_v13.pdf. Acesso em: 2 set. 2024.
- [2] ARRILLAGA, Jos; WATSON, Neville R. Power system harmonics. John Wiley & Sons, 2004.
- [3] ARRILLAGA, Jos et al. Power system harmonic analysis. John Wiley & Sons, 1997.
- [4] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE Std 18-2002: IEEE Standard for Shunt Power Capacitors. New York: IEEE, 2003.
- [5] NASCIMENTO, Rogério Pinto do et al. Propostas de procedimentos para projetar filtros harmônicos a partir de um programa de penetração harmônica, incluindo cálculos de desempenho e de suportabilidade. 2007.
- [6] 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. Acesso em: 01 mar. 2024.