
Mitigação de distorções harmônicas na rede elétrica, utilizando filtros harmônicos passivos ¹

Cardoso, João Vitor Neto ²

Centro Universitário Academia - UniAcademia

Magri, Luiz Paulo ³

Centro Universitário Academia - UniAcademia

RESUMO

O avanço tecnológico do setor elétrico tem contribuído com desenvolvimento econômico de diversos países. É inegável que as facilidades que os equipamentos modernos proporcionam simplificam as atividades realizadas do cotidiano. Somado a isso, temos a grande demanda por energia, onde as matrizes energéticas começam a ficar sobrecarregadas surgindo novas formas de geração de energia. Contudo, surgem distúrbios na rede elétrica que podem prejudicar o fornecimento adequado da energia elétrica. Diante deste cenário, faz-se necessário um estudo voltado para distorções harmônicas que são distúrbios causados por equipamentos conectados à rede elétrica, os quais drenam uma corrente não senoidal para seu funcionamento. Esse distúrbio pode implicar em um baixo fator de potência ocasionando multas em consumidores industriais, por exemplo. Os indicadores de qualidade de energia elétrica ficarão fora do esperado se esse distúrbio não for corretamente atenuado. Uma proposta simples de mitigar as distorções harmônicas é a inserção de filtros harmônicos passivos na rede, para recuperar a forma de onda senoidal pura gerada pelas grandes usinas de energia.

Palavras chaves: Qualidade De Energia Elétrica, Distorções Harmônicas, Filtros Harmônicos Passivos.

¹ Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Universitário Academia - UniAcademia, como requisito parcial para a conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica.

² Graduando em Engenharia Elétrica pelo Centro Universitário Academia - UniAcademia.

³ Professor do curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário Academia - UniAcademia.

1. INTRODUÇÃO

A busca por eficiência energética e a qualidade de energia tornaram-se um assunto relevante ao longo dos anos. Nesse sentido, Teixeira (2009), aponta que,

A crescente utilização de equipamentos baseada na eletrônica de potência (EP) desperta a importância da relação entre esta área da engenharia elétrica e a qualidade de energia elétrica (QEE). Apesar de proporcionar um controle eficiente do fluxo de energia, estas cargas produzem tensão e/ou correntes harmônicas que acarretam aumento das perturbações originadas pela distorção harmônica em sistemas elétricos, resultando na piora da qualidade da energia elétrica (TEIXEIRA, 2009, p.12).

As distorções harmônicas estão cada vez mais presentes nas instalações elétricas devido a inserção de cargas não lineares na rede. Cargas que utilizam a eletrônica de potência para o seu funcionamento ganharam um grande destaque no setor industrial devido a sua grande eficiência nas atividades realizadas e aos poucos esses tipos de cargas foram inseridos nos ambientes comerciais e residenciais, ocasionando ainda mais distorções harmônicas na rede elétrica.

Com a alta demanda por energia elétrica, é necessário evitar as perdas energéticas que as distorções harmônicas podem causar nas instalações. Sendo assim, a identificação e redução do conteúdo harmônico evitam perdas desnecessárias na rede, melhoram o rendimento das instalações elétricas e contribuem para a qualidade da energia elétrica.

O trabalho possui 5 seções, sendo a primeira a introdução. A segunda seção traz um referencial teórico sobre qualidade de energia elétrica, distorções harmônicas finalizando com filtros harmônicos passivos. A terceira seção apresenta um estudo de mitigação de distorções harmônicas realizada pelo software MATLAB/SIMULINK. A quarta seção relata os resultados obtidos na simulação. Por fim, a quinta seção apresenta a conclusão em que se chegou do trabalho.

2. DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

As distorções harmônicas interferem diretamente na qualidade de energia elétrica, causadas por cargas compostas por elementos não lineares e que podem deixar a frequência do sinal transmitido instável e aumentar a amplitude da tensão ou corrente eficaz do sistema.

2.1 QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

A qualidade da energia elétrica pode ser vista como a continuidade do fornecimento de energia, sem interrupções, e que se mantém em condições adequadas de geração, transmissão e distribuição sem variações significativas dos níveis de tensão, corrente e frequência. É imprescindível que essas grandezas sejam monitoradas e estejam devidamente dentro dos limites estipulados pelas normas.

Segundo Pires (2006), a má qualidade de energia elétrica se manifesta na variação ou ausência das grandezas de tensão, corrente ou frequência ocasionando falha ou operação inadequada em equipamento de consumidores.

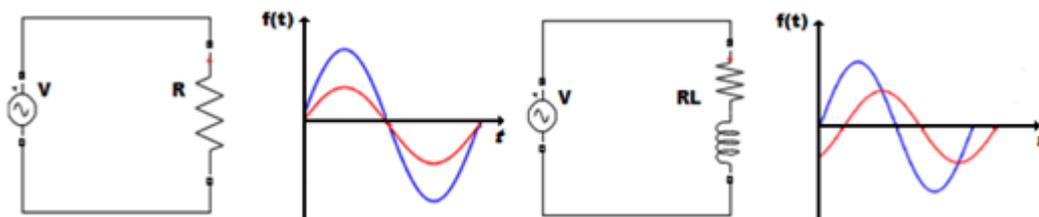
Hoje em dia, existem instituições voltadas para o tratamento da qualidade da energia elétrica as quais estabelecem limites e procedimentos que devem ser consultados pelos profissionais do setor elétrico. Em relação a distorções harmônicas, temos as seguintes guias e normas internacionais e referências nacionais:

- Guia IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) Std 519-1992;
- Norma IEC (International Electrotechnical Commission) da Série 61000;
- Modulo 8 PRODIST(Procedimentos de Distribuição).

2.2 CARGAS LINEARES E NÃO LINEARES

Segundo Atkinson (2012), cargas lineares não modificam a forma de onda da tensão e corrente e são compostas por apenas elementos passivos como resistores, capacitores e indutores. São exemplos de cargas lineares: aquecedores, iluminação, motores acionados por partida direta, ar condicionado. Durante muito tempo, essas cargas foram utilizadas, em sua grande maioria, na indústria, e não causavam distorções na forma de onda.

Na Figura 1, estão representados alguns exemplos de cargas lineares e suas respectivas formas de onda de correntes drenadas do sistema de alimentação.

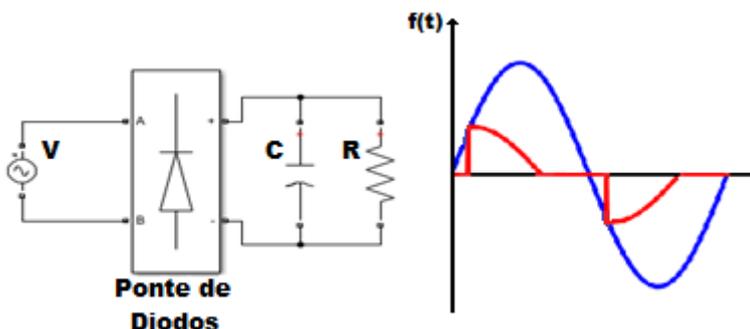
Figura 1: Forma de onda de uma carga linear


Fonte: Autor

Com o decorrer do tempo, as cargas lineares foram substituídas por cargas não lineares, as quais drenam uma corrente não senoidal da rede elétrica. A forma de onda da corrente que uma carga não linear absorve para o seu funcionamento não tem a mesma forma de onda da tensão de alimentação (SCHNEIDER, 2003).

As cargas não lineares são compostas principalmente por dispositivos de eletrônica de potência como: diodos, transistores, SCR(Silicon Controlled Rectifier), MOSFETs(Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor), IGBTs(Insulated Gate Bipolar Transistor). São exemplos de cargas não lineares: reatores de lâmpadas fluorescentes, conversores estáticos, retificadores trifásicos, inversores de frequência e transformadores de núcleo saturado. Estas cargas foram ganhando espaço também nas residências contribuindo com as distorções harmônicas.

A Figura 2 representa um retificador monofásico com um filtro capacitivo e sua forma de onda da corrente drenada da rede.

Figura 2: forma de onda de uma carga não linear


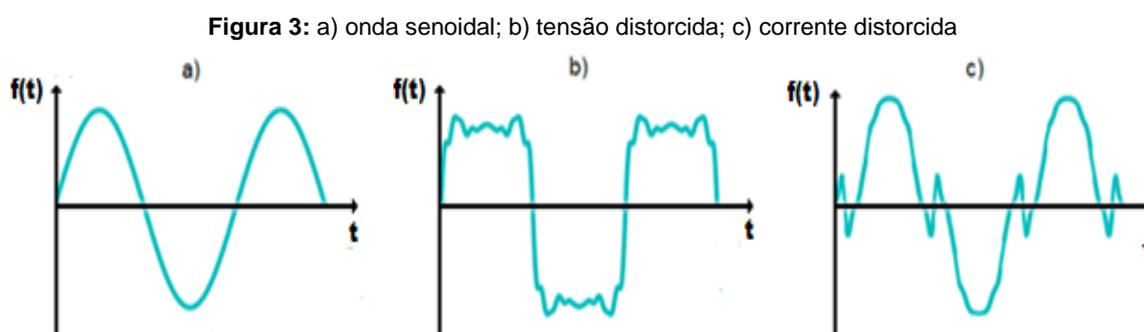
Fonte: Autor

2.3 DISTORÇÕES HARMÔNICAS

A circulação de harmônicas de uma onda de tensão ou de corrente indica uma onda deformada na frequência fundamental. A deformação da onda de tensão ou de corrente significa que a distribuição de energia elétrica é perturbada e que a qualidade de energia não é ótima (SCHNEIDER, 2003).

2.3.1 Definição

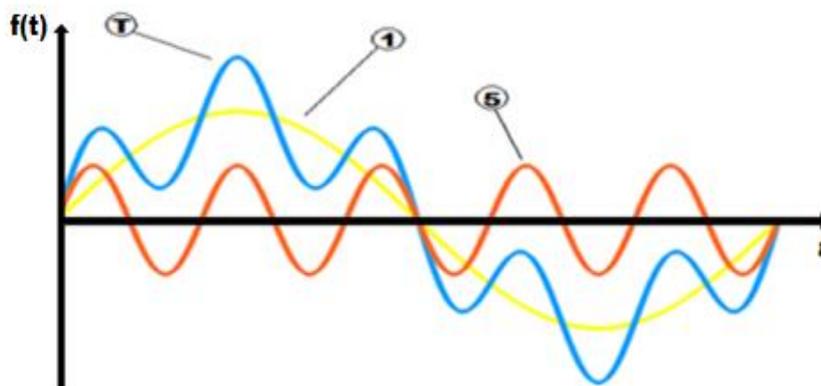
Harmônicos são criados por cargas não lineares que extraem pulsos abruptamente ao invés da maneira senoidal estável. Estes pulsos causam aspectos de onda distorcidas (Figura 3) que por sua vez, geram correntes de harmônicas para fluir de volta em outras partes do sistema de energia (FLUKE, 2010).



Fonte: Autor

Uma onda senoidal livre de perturbações apresenta uma frequência fundamental que, no Brasil, é de 60 Hz. No entanto, na presença de cargas não lineares, podem aparecer harmônicos que são frequências múltiplas da fundamental, modificando a forma de onda original, conforme a Figura 4 (PORTO, 2012).

Figura 4: Forma de onda: da resultante (T) da corrente fundamental (1) e sua quinta harmônica (5)



Fonte: Autor

As componentes harmônicas podem ser classificadas em pares e ímpares, sendo que as harmônicas ímpares a partir da 3ª ordem e todos os seus múltiplos (9ª, 15ª, 21ª, etc.). são chamados de harmônicas triplens. De acordo com Fluke (2010),

Cada harmônico possui um nome, frequência e sequência. A sequência refere-se à rotação física com respeito ao fundamental (F). Por exemplo, num motor de indução, um harmônico de sequência positiva gera um campo magnético que gira na mesma direção da fundamental. Um harmônico de sequência negativa gira na direção oposta. As primeiras nove ordens harmônicas junto com as respectivas sequências estão listadas no Quadro 1 (FLUKE, 2010, p.4).

Quadro 1: Classificação dos harmônicos

Nome	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°
Frequência	60	120	180	240	300	360	420	480	540
Sequência	+	-	0	+	-	0	+	-	0

Fonte: Fluke (2010)

2.3.2 Impacto das distorções harmônicas

A presença de distorções harmônicas na rede elétrica pode causar diversas perdas de energia e prejudicar o funcionamento de certos equipamentos. De acordo com Schneider (2003), as distorções harmônicas podem ocasionar:

- Sobrecarga das redes de distribuição por aumento da corrente eficaz;

- Sobrecarga dos condutores de neutro em razão da soma das harmônicas de 3º ordem geradas pelas cargas monofásicas;
- Sobrecarga, vibrações e envelhecimento dos alternadores, transformadores, motores, ruídos dos transformadores;
- Sobrecarga e envelhecimento dos capacitores de compensação de energia reativa;
- Deformação da tensão de alimentação pode perturbar receptores sensíveis;
- Perturbação das redes de comunicação ou das linhas telefônicas.

O impacto das distorções harmônicas pode gerar perdas econômicas consideráveis como:

- Perdas energéticas;
- Custo adicional da contratação de serviço;
- Sobredimensionamento dos materiais;
- Redução da vida dos materiais;
- Disparos intempestivos e parada da instalação.

2.3.3 Indicadores de distorções harmônicas

As distorções harmônicas podem ser mensuradas através de indicadores considerados essenciais para quantificar e analisar seus possíveis efeitos nas instalações elétricas. De acordo com Pires (2006),

O índice utilizado para contabilizar a quantidade de harmônicos presentes numa onda, ou em outras palavras, quão distorcido uma onda está em relação a uma onda senoidal é o THD (Total Harmonic Distortion). Para uma onda puramente senoidal, livre de distorções, o THD é de 0%. Já para algumas ondas muito distorcidas, como exemplo correntes de alguns aparelhos eletrônicos, o THD pode chegar a 100%. O THD pode ser calculado para tensão (THD_v) e para corrente (THD_i) e são dadas pelas equações (1) e (2)

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=\max} V_h^2}}{V_1} \times 100\% \quad (1)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=\max} I_h^2}}{I_1} \times 100\% \quad (2)$$

Onde:

- h – número inteiro (ordem harmônica)
- V_h – valor rms da componente de tensão harmônica h
- V_1 – valor rms de tensão fundamental
- I_h – valor rms da componente de corrente harmônica h
- I_1 – valor rms de corrente fundamental (PIRES, 2006, p.4).

Um indicador semelhante a THD é o DTD (Distorção de Demanda Total) que calcula a distorção harmônica com base na corrente máxima da carga. O valor da DTD pode ser encontrado pela equação (3):

$$DTD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=\max} I_h^2}}{I_L} \times 100\% \quad (3)$$

I_h – valor rms da componente de corrente harmônica h

I_L – Corrente de demanda máxima da carga na frequência fundamental, medida no ponto de acoplamento comum entre a carga e o sistema

Outro indicador importante é o fator de crista da corrente ou da tensão que, segundo SCHNEIDER (2003) “é a relação entre o valor de pico (I_p ou V_p) com o valor eficaz (I_{ef} ou V_{ef})”. A fórmula do fator de crista é representada pela equação (4):

$$F_c = \frac{I_p}{I_{ef}} \text{ ou } \frac{V_p}{V_{ef}} \quad (4)$$

Para uma onda senoidal o fator de crista é $\sqrt{2}$. Para uma onda não senoidal o fator de crista pode ser maior ou menor que $\sqrt{2}$. Este fator é mais particularmente útil para atrair a atenção sobre a presença de valores de crista excepcionais em relação ao valor eficaz. O valor de crista nos equipamentos eletrônicos tem relação direta com o disparo de diodos e outros componentes (SCHNEIDER, 2003, p.6).

O fator de potência da instalação pode também contribuir como um indicativo de distorções harmônicas, devido a sua redução na presença de componentes harmônicas. De acordo com Filho (2017), a determinação do fator de potência na

presença de componentes harmônicos pode ser feita pela equação (5), com base na medição de corrente fundamental (em 60 Hz) e das correntes harmônicas de diferentes ordens:

$$F_P = \frac{I_f \cdot \cos \theta}{\sqrt{I_f^2 + \sum I_h^2}} \quad (5)$$

Onde: I_f = corrente fundamental, valor eficaz em A;
 I_h = correntes harmônicas, em valor eficaz, de diferentes harmônicas;
 $\cos \theta$ = fator de potência atual da instalação.

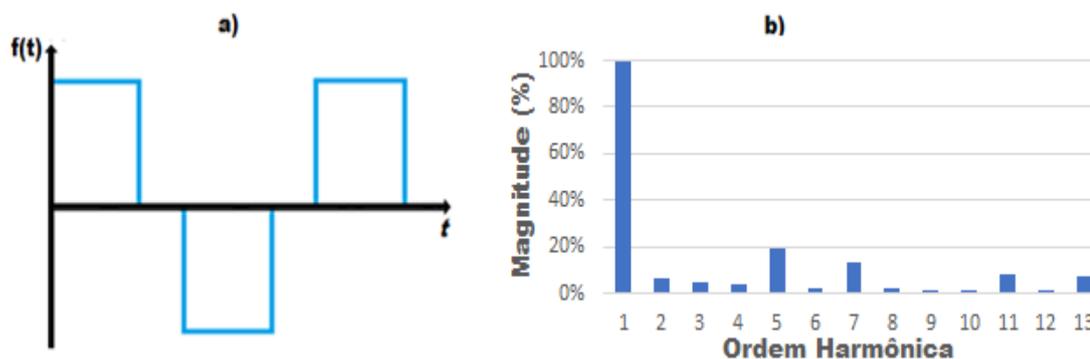
Conhecendo o THD da instalação, pode-se calcular o fator de potência pela equação (5):

$$F_P = \frac{\cos \theta}{\sqrt{1 + \left(\frac{THD}{100}\right)^2}} \quad (6)$$

O espectro de frequência de um sinal elétrico baseia-se na transformação do domínio do tempo para o domínio da frequência, o qual representa as amplitudes de cada ordem harmônica e é operada pelos analisadores de energia pela função FFT (*Fast Fourier Transform* ou Transformada Rápida Fourier).

Para Schneider (2003) “Representando a amplitude de cada ordem de harmônica, na presença de sua frequência, obtemos uma representação sob forma de histograma, chamada análise espectral”. A Figura 5 apresenta uma forma de onda quadrada e sua representação espectral.

Figura 5: a) onda quadrada; b) espectro de amplitude



Fonte: Autor

2.3.4 Limites de distorções harmônicas

Os limites de distorções harmônicas para tensão e corrente são descritos nos Quadros 2 e 3 que está conforme o guia da IEEE Std. 519. No entanto, existem outras normas vigentes que regulamentam as distorções harmônicas para cada tipo de sistema e equipamento, normas estas que foram citadas no subitem 2.1.

Quadro 2 – Limites de distorção de tensão

Faixa de tensão	Distorção por harmônica de tensão (%)	Distorção total de tensão THDv (%)
$v \leq 69 \text{ KV}$	3,0	5,0
$69 \text{ KV} < V < 161 \text{ KV}$	1,5	2,0
$v \geq 161 \text{ KV}$	1,0	1,5

Fonte: IEEE Std. 519

Quadro 3 – Limites de distorção de corrente para sistemas até 69 Kv

Icc/Icarga	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$	TDD
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20<50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50<100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100<1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	12,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Fonte: IEEE Std. 519

h = ordem da harmônica.

Icc = corrente de curto-circuito do alimentador.

Icarga = demanda máxima de corrente de carga (somente fundamental)

TDD = distorção de demanda total.

2.4 FILTROS HARMÔNICOS PASSIVOS

Sendo identificada a presença de distorções harmônicas em uma instalação elétrica através dos indicadores corretos, torna-se necessária a eliminação ou atenuação das mesmas. O método mais simples para se obter controle sobre o nível de distorções harmônicas é acrescentar a implementação de filtros harmônicos

passivos, que atuam na atenuação de determinadas ordens harmônicas características de cargas não lineares.

Os filtros harmônicos passivos são compostos por apenas elementos passivos como resistores, capacitores e indutores que, associados de tal forma, são capazes de absorver correntes de frequências diferentes da frequência fundamental da rede (ATIKINSON, 2012).

Esses filtros são utilizados para reduzir as amplitudes harmônicas e, conseqüentemente, o índice de THD podendo atuar também como compensadores reativos.

2.4.1 Características

Os filtros harmônicos passivos trabalham na combinação dos elementos passivos como resistor (R), indutor (L) e capacitor (C) para obterem uma ressonância série ou paralela, surgindo assim algumas características relevantes como:

- Frequência de ressonância (ω_0): frequência em rad/s, na qual o filtro se torna puramente resistivo quando as reatâncias capacitivas e indutivas se anulam. Em função dos elementos passivos a frequência de ressonância pode ser calculada pelas equações (7) e (8):

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (7)$$

$$\omega_0 = 2\pi f_0 \quad (8)$$

Em que f_0 é a frequência de ressonância dada em Hz, a qual podemos deduzir que f_0 pode ser encontrada pela equação (9):

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (9)$$

- Fator de qualidade (Q): valor adimensional que mede a seletividade do filtro ou o nível de estreitamento da curva de ressonância. A equação (10) determina o fator de qualidade.

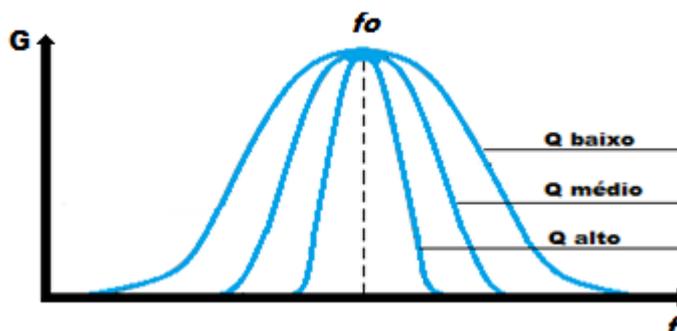
$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} \text{ ou } \frac{1}{\omega_0 RC} \quad (10)$$

- Largura de banda (B): faixas de valores dentro do espectro de frequência em que o filtro opera. A equação (11) nos possibilita o cálculo de B.

$$B = \frac{R}{L} \text{ ou } \frac{\omega_0}{Q} \quad (11)$$

Como podemos observar na equação (11), existe uma relação entre fator de qualidade e largura de banda que auxilia na construção dos filtros. Se a faixa de frequência selecionada ou rejeitada for larga, o fator de qualidade será baixo e, se as faixas de frequência forem estreitas, o fator de qualidade será alto. Na Figura 6 podem ser vistas três faixas de frequência com diferentes fatores de qualidade.

Figura 6: Largura de banda em relação ao fator de qualidade



Fonte: Autor

2.4.2 Localização e modo de conexão dos filtros na rede elétrica

De acordo com Teixeira (2009),

Os filtros podem ser instalados tanto do lado c.a. como do lado c.c. (no caso de conversores). Os filtros no lado c.a. podem ser conectados no lado primário (da rede) dos transformadores-retificadores, ou no enrolamento terciário, se houver (TEIXEIRA, 2009, p.47).

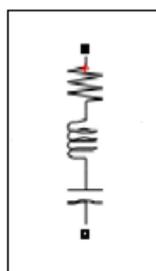
Existem dois modos de conexão: em série ou em paralelo com a rede. Na conexão em série, o harmônico desejado é totalmente eliminado devido à alta impedância que o filtro atinge. Porém há um inconveniente de ser projetado para suportar toda corrente da carga, aumentando seu custo.

A conexão paralela ou shunt dos filtros é a mais difundida por ter baixo custo e apresentar boa eficiência. É projetada para absorver apenas a corrente harmônica que se deseja retirar da rede. Os filtros shunt podem ser: sintonizados ou amortecidos.

2.4.3 Filtros sintonizados

São filtros (Figura 7) que atuam exclusivamente na frequência de sintonia ou de ressonância, retirando o sinal desejado da rede. Possuem um fator de qualidade alto, geralmente na faixa de 20 a 80, operando em uma estreita largura de banda.

Figura 7: Filtro sintonizado RLC

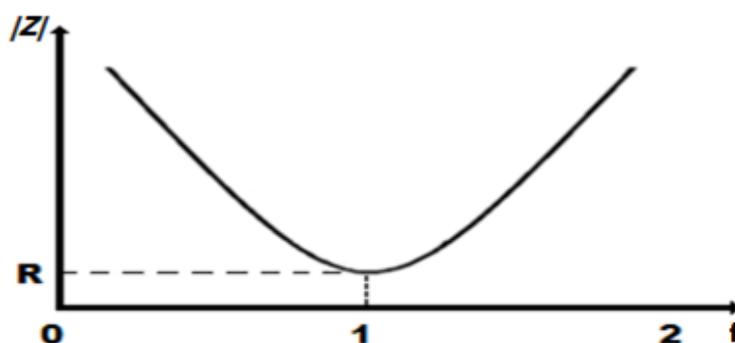


Fonte: Autor

De acordo com Teixeira (2009), os filtros sintonizados possuem uma impedância baixa na frequência de ressonância descrita pela equação (12). A Figura 8 mostra o comportamento da impedância em função da frequência de corte.

$$Z = R + j \left(\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} \right) \quad (12)$$

Figura 8: Gráfico da impedância x frequência do filtro sintonizado

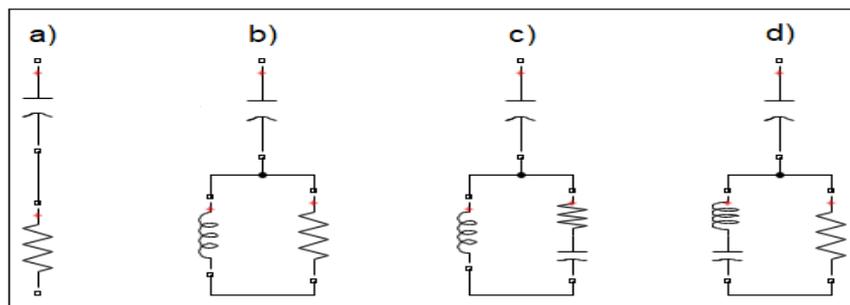


Fonte: Teixeira(2009)

2.4.4 Filtros Amortecidos

São filtros projetados para atuar em uma ampla largura de banda de frequência e com um fator de qualidade baixo, oferecendo um caminho de baixa impedância para as correntes de altas frequência (TEIXEIRA, 2009). Desse modo, são chamados de filtros passa alta. Existem várias configurações de filtros amortecidos (Figura 9) com diferentes desempenhos:

Figura 9: Filtro amortecido passa alta: a) 1º ordem, b) 2º ordem, c) 3º ordem, d) tipo C

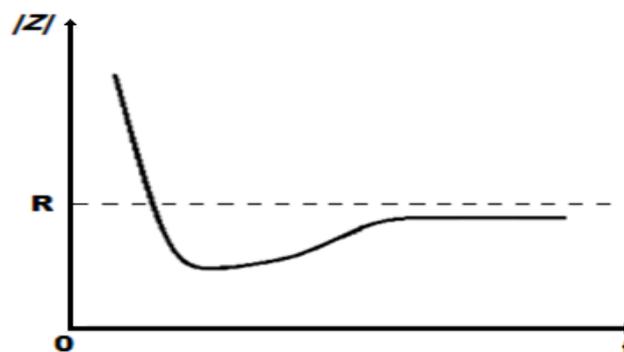


Fonte: Autor

A impedância em função da frequência para um filtro de 2º ordem é descrita pela equação (13). A Figura 10 representa o comportamento do módulo da impedância em função da frequência. Note que, depois de atingir a menor impedância na frequência de ressonância, a impedância volta crescer, tendendo a R.

$$Z = \frac{1}{j\omega_0 C} + \left(\frac{R + j\omega_0 L}{R + j\omega_0 L} \right) \quad (13)$$

Figura 10: Gráfico da impedância x frequência do filtro amortecido



Fonte: Teixeira(2009)

Os filtros sintonizados possuem menor complexidade de projeto do que os filtros amortecidos, e são mais utilizados em sistemas elétricos. Já os filtros

amortecidos, requisitam uma potência aparente (VA) maior na frequência fundamental, ocasionando maiores perdas, mas são viáveis para atenuar as harmônicas acima da 17^o ordem (TEIXEIRA, 2009). Tanto o filtro sintonizado como o amortecido podem ter seus parâmetros calculados pelas equações de (6) a (10).

3. ESTUDO DE CASO

Devido à impossibilidade de utilização do laboratório em decorrência da pandemia da COVID 19, esta seção propõe uma simulação da distorção harmônica de corrente para a mitigação através de filtros passivos sintonizados e análise do THDi.

A simulação será conduzida no software MATLAB que possui uma ferramenta chamada SIMULINK que possibilita a construção de circuitos bem como a simulação no domínio do tempo e da frequência, facilitando as análises das distorções harmônicas.

Buscaram-se, então, casos de distorções harmônicas que viabilizam o estudo. O Quadro 4 apresenta um cenário de distorção harmônica de alguns equipamentos com as magnitudes harmônicas.

Quadro 4: Distorção harmônica

Ordem harmônica	Frequência	Irms	2,993A
		THDi	33,07%
		F. Crista	1,82
		Mod.(%)	Ang.(graus)
1 ^o	60 Hz	100%	-25,84°
3 ^o	180 Hz	27,62%	-165,27°
5 ^o	300 Hz	15,27%	30,51°
7 ^o	420 Hz	5,11%	176,24°
9 ^o	540 Hz	2,68%	11,68°
11 ^o	660 Hz	3,38%	-66,10°
13 ^o	780 Hz	5,00%	155,92°
15 ^o	900 Hz	3,09%	21,29°
17 ^o	1.020 Hz	2,40%	-58,57°
19 ^o	1.140 Hz	2,78%	-177,96°
21 ^o	1.260 Hz	1,20%	56,60°

Fonte: Pires(2006)

3.1 SIMULAÇÃO DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS

O circuito proposto da Figura. 11 possui uma tensão de entrada de 127 Vrms e uma frequência fundamental de 60 Hz, com uma impedância da rede representada por R de 1Ω. Como podemos observar na Tabela 4, a corrente Irms da componente fundamental possui uma defasagem de $-25,84^\circ$, indicando um circuito indutivo. Com estes valores, a carga foi representada por um circuito RL com os valores de potência representados no Quadro 5.

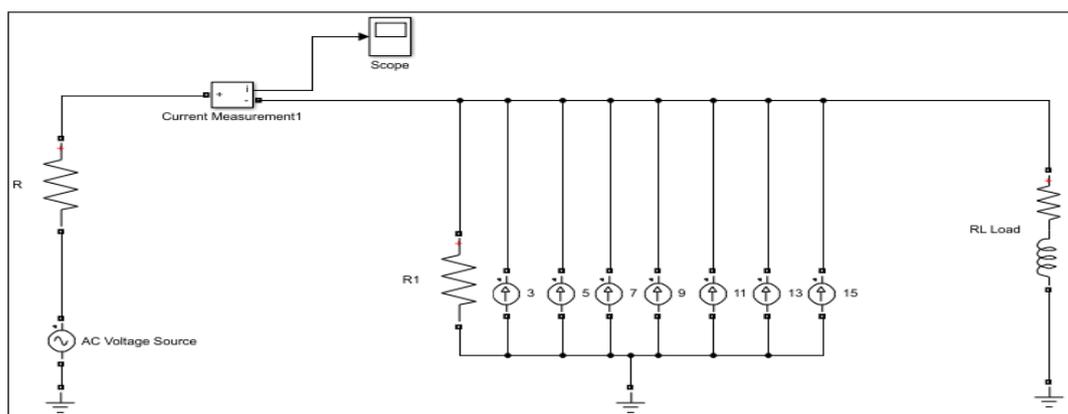
Quadro 5: parâmetros de simulação da carga

P	Q	S	F.P.
335,00 W	162,25 VAR	372,22 VA	0,90

Fonte: Autor

As amplitudes harmônicas foram representadas por fontes de corrente em paralelo até a 15^o ordem, com suas amplitudes calculadas a partir da corrente fundamental e simuladas com seus respectivos ângulos de fase. Não houve distorção de tensão na simulação por se tratar de circuito de baixa corrente, visto que a distorção de tensão é ocasionada pela corrente. Um resistor R1 de 1MΩ foi inserido em paralelo com as fontes de correntes para que fosse realizada a simulação, o que não alterou os resultados finais.

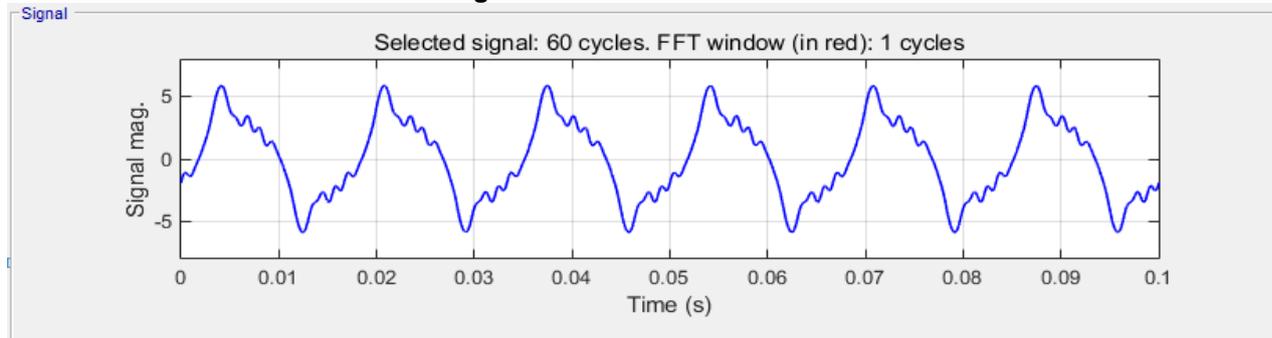
Figura 11: Circuito proposto



Fonte: Autor

Como podemos observar na Figura 12, a forma de onda da corrente de entrada se encontra distorcida com as amplitudes harmônicas elevadas, contribuindo para um THDi de 32,61%.

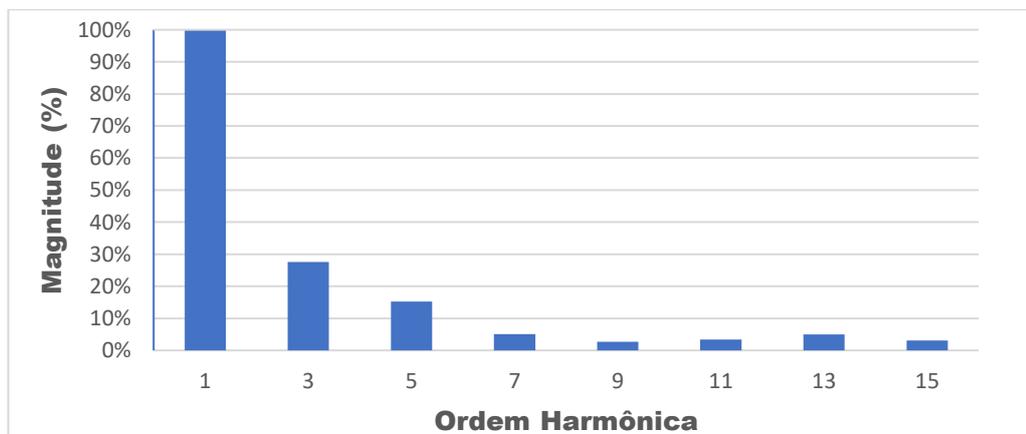
Figura 12: Forma de onda



Fonte: Autor

A Figura 13 representa as amplitudes das componentes harmônicas que circulam na rede, gerada pela ferramenta FFT Analysis do SIMULINK.

Figura 13: Espectro frequência



Fonte: Autor

3.2 PROJETO DE FILTROS PASSIVOS HARMÔNICOS SINTONIZADOS

Como proposta de mitigação das correntes harmônicas, foram calculados filtros passivos sintonizados para cada frequência harmônica. Com um fator de qualidade igual para todos os filtros de 80 e uma capacitância de 5 μ F, o Quadro 6 apresenta os parâmetros dos filtros:

Quadro 6: Parâmetros para os filtros sintonizados

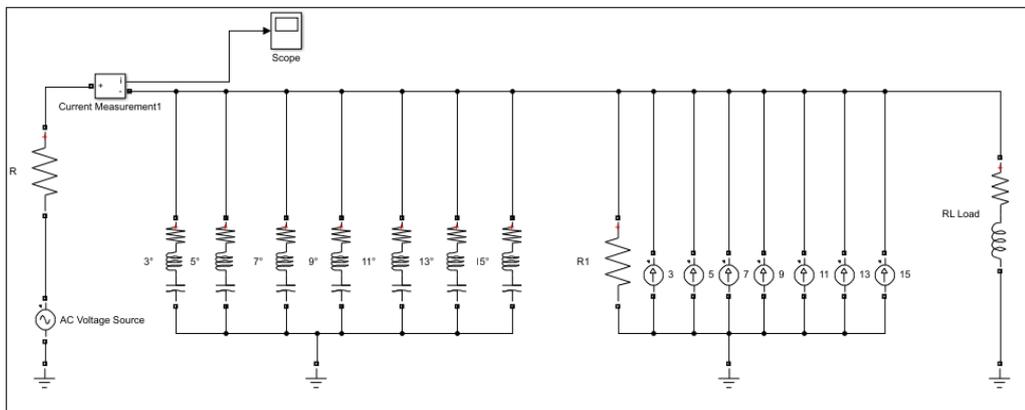
Ordem	frequência de corte		C	L	Q	B	R
	f_0	ω_0					
3°	180 Hz	1.131 rad/s	5 μ F	156mH	80	14 rad/s	2,2 Ω
5°	300 Hz	1.885 rad/s		56,3mH		24 rad/s	1,3 Ω
7°	420 Hz	2.639 rad/s		28,7mH		33 rad/s	947 m Ω
9°	540 Hz	3.393 rad/s		17,4mH		42 rad/s	737 m Ω
11°	660 Hz	4.147 rad/s		11,6mH		52 rad/s	603 m Ω
13°	780 Hz	4.901 rad/s		8,3mH		61 rad/s	510 m Ω
15°	900 Hz	5.655 rad/s		6,3mH		71 rad/s	442 m Ω

Fonte: Autor

4. RESULTADOS

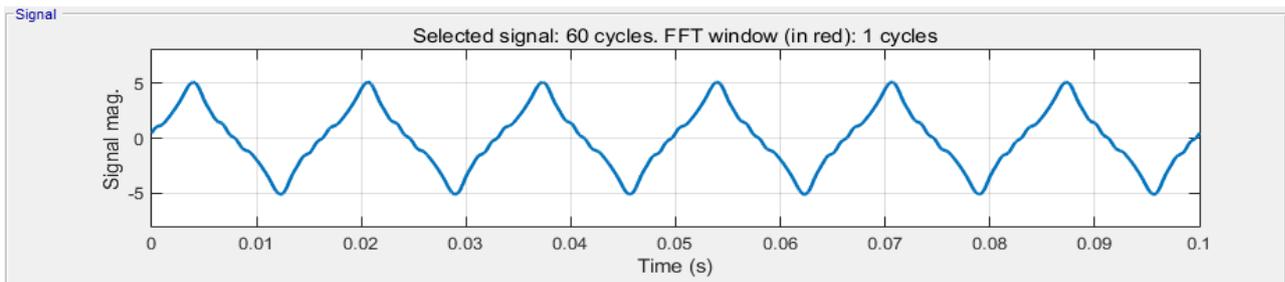
Com a inserção dos filtros passivos sintonizados em paralelo com a rede (Figura 14), o THDi reduziu para 22,58%, destacando uma melhora da forma de onda (Figura 15), ainda não ideal, da corrente de entrada do circuito.

Figura 14: Circuito com os filtros passivos sintonizados



Fonte: Autor

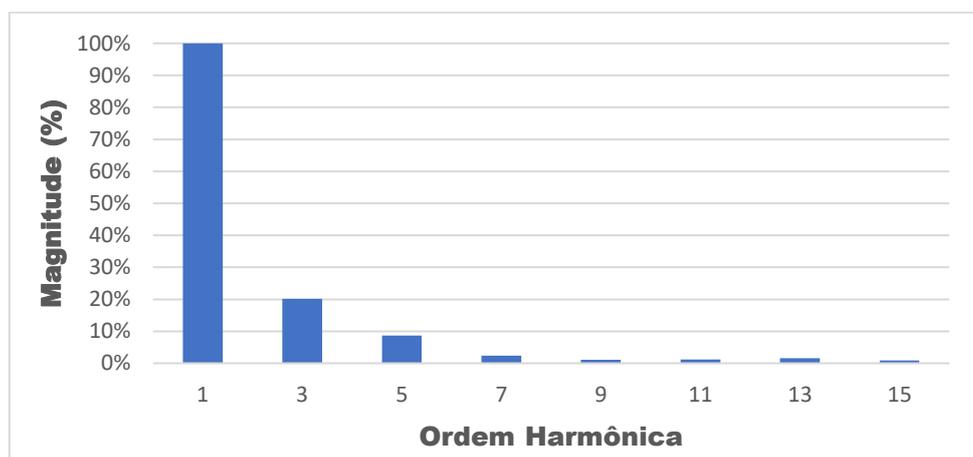
Figura 15: Forma de onda após a filtragem



Fonte: Autor

A Figura 16 apresenta o espectro de frequência após a filtragem, indicando uma redução em todas as componentes harmônicas. Entretanto não foi suficiente para se obter uma THDi próxima de zero, que é o esperado para uma onda senoidal livre de distorções. Isso se deve ao fato de que a impedância do filtro ainda está alta para poder absorver a maior parte dessas correntes e que a rede se apresenta como um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas. No entanto, uma mudança na impedância dos filtros implica em uma redução no valor de sua resistência, alterando o valor do fator de qualidade proposto inicialmente para os filtros sintonizados.

Figura 16: Espectro de frequência após a filtragem



Fonte: Autor

Para este circuito, a potência calculada dos filtros sintonizados e a potência vista pelos terminais da rede na frequência fundamental se encontram no Quadro 7 e 8:

Quadro 7: Potência calculada fornecida pelos filtros

3°	5°	7°	9°	11°	13°	15°	TOTAL
-32,00 VAR	-29,69 VAR	-29,12 VAR	-28,90 VAR	-28,78 VAR	-28,72 VAR	-28,68 VAR	-205,90 VAR

Fonte: Autor

Quadro 8: Parâmetros calculados de potência da rede

P	Q	S	F.P.
335,00 W	$162,25 + (-205,90) = -43,65 \text{ VAR}$	337,83 VA	0,99

Fonte: Autor

Já a potência simulada dos filtros bem como a potência vista pelos terminais da rede se encontra na Quadro 10 e 11:

Quadro 10: Potência simulada fornecida pelos filtros

3°	5°	7°	9°	11°	13°	15°	TOTAL
-32,76 VAR	-30,37 VAR	-29,73 VAR	-29,49 VAR	-29,37 VAR	-29,30 VAR	-29,25 VAR	-210,27 VAR

Fonte: Autor

Quadro 11: Parâmetros simulados de potência da rede

P	Q	S	F.P.
335,50 W	-48,06 VAR	338,92 VA	0,99

Fonte: Autor

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho realizou um estudo de distorções harmônicas causadas por cargas não lineares, fornecendo uma proposta de mitigação das componentes harmônicas através de filtros passivos. Apresentam-se, inicialmente, um referencial teórico abordando a importância do assunto para a qualidade de energia elétrica e os conceitos de distorções harmônicas e seus principais indicadores.

A utilização do programa MATLAB/SIMUNLINK foi extremamente importante para o trabalho na análise das distorções harmônicas e do desempenho dos filtros. Com dados de medição utilizados de outro trabalho, o programa é uma ferramenta útil para prever o comportamento de uma senoide em uma instalação que possui várias cargas não lineares.

Os filtros passivos sintonizados se mostraram-se eficazes na mitigação de todas as componentes harmônicas, contribuindo para elevar o fator de potência. Uma solução simples e de baixo custo se comparado com outros tipos de solução como os filtros ativos, por exemplo. Todavia, é importante ter o conhecimento da impedância da instalação elétrica no controle das distorções harmônicas.

ABSTRACT

Technological advances in the electric sector have contributed to the economic development of several countries. It is undeniable that the facilities that modern equipment provides simplify everyday activities. In addition, we have a great demand for energy, where the energy matrices start to become overloaded, new forms of

energy generation appear. However, disturbances in the power grid arise that can impair the adequate supply of electricity. Given this scenario, it is necessary to conduct a study aimed at harmonic distortions, which are disturbances caused by equipment connected to the electrical network, which drain a non-sinusoidal current for its operation. This disturbance can imply a low power factor causing fines in industrial consumers, for example. The electricity quality indicators will be out of the expected if this disturbance is not properly mitigated.

REFERÊNCIAS

ATIKINSON, Guilherme de Souza. **Análise da qualidade de energia residencial: um estudo para identificação de distorções harmônicas e índices de fator de potência.** Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Regional do Noroeste do Rio Grande do Sul. Unijuí, 2017.

FIGUEREDO, Alfredo Arcanjo Cruz. **Análise de modelos para cargas não lineares no estudo trifásico de penetração harmônica.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, 2006.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações elétricas industriais.** 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

FLUKE CORPORATION. **Compreendendo Harmônicos de Energia.** Fluke Corporation, 2010.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Std. 519 -1992 – **Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.** 1991.[s.n.], 1991.

NERY, Alan. **Análise de distorções harmônicas em planta industrial modelada por fontes de corrente.** Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

PIRES, Igor Amirez. **Caracterização de harmônicos causados por equipamentos eletro-eletrônicos residenciais e comerciais no sistema de distribuição de energia elétrica.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2006.

PORTO, Paulo Henrique Cenachi. **Análise e correção de distorções harmônicas em um sistema elétrico industrial:** estudo de caso. Trabalho de Conclusão de Curso de Especialização – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2012.

SCHNEIDER ELECTRIC; PROCOBRE. **Workshop Instalação Elétrica de Baixa Tensão - Qualidade de Energia - Harmônicas.** SCHNEIDER Electric. São Paulo, 2003.

TEIXEIRA, Douglas Ângelo. **Análise das distorções harmônicas - estudo de caso de um sistema industrial.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2009.