

## Capítulo XII

# Medidas de mitigação de harmônicos

Igor Amariz Pires\*

A maneira mais comum de mitigar harmônicos é por meio da utilização de filtros. O principal objetivo dos filtros de harmônicos é reduzir a amplitude de tensões e correntes de uma ou mais frequências harmônicas.

Quando o objetivo é impedir que uma determinada corrente harmônica entre em uma planta elétrica ou em partes do sistema elétrico, é possível utilizar um filtro série que consiste no paralelo de um indutor com um capacitor, representando uma alta impedância para o harmônico que se deseja impedir.

Entretanto, esta solução não elimina o surgimento de harmônicos por parte da fonte geradora. Outra forma de evitar a penetração de harmônicos no sistema elétrico, a partir de uma fonte geradora, seria fornecer um caminho de derivação de baixa impedância para as correntes harmônicas.

Evitar circulação de correntes harmônicas, além de beneficiar aqueles dispositivos que sofrem danos por sua circulação, tais como cabos, transformadores e capacitores, significa também diminuir a distorção de onda de tensão. Isso será possível pela diminuição das correntes harmônicas nas impedâncias dos cabos presentes no sistema elétrico, causando, assim, uma menor queda de tensão harmônica.

Além dessas diferenças entre filtro série e paralelo (shunt), os filtros ainda podem ser classificados como passivos e ativos. Os primeiros são assim chamados porque utilizam elementos passivos (resistores, indutores e capacitores), enquanto os filtros ativos utilizam a eletrônica embarcada em um conjunto com elementos passivos para realizar a mitigação.

### **Filtros passivos**

Os filtros passivos-série são utilizados quando o

objetivo é evitar que uma determinada frequência (ou uma faixa de frequências) tenha acesso a uma parte do sistema. Com ação semelhante a uma bobina de bloqueio, este filtro é composto por um capacitor e um indutor em paralelo. Esta é uma solução cara e raramente utilizada, tendo como principal fator negativo o fato de o filtro ter de transportar toda a corrente passante no ponto do sistema em que ele foi instalado.

A solução mais usual para se evitar que correntes harmônicas penetrem em determinadas partes do sistema elétrico consiste na utilização dos chamados filtros em derivação (paralelo ou shunt), que oferecem um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas de interesse. Desse filtro, há dois tipos:

- filtro sintonizado
- filtro amortecido

Antes de definir os dois filtros, é necessário falar sobre o fator de qualidade (Q) de um filtro. O fator de qualidade de um filtro determina seu grau de seletividade e é expresso pela divisão da frequência de ressonância do filtro ( $\omega_n$ ) por sua banda de passagem (BP), como mostrado na Equação 1.

$$Q = \omega_n / BP \quad (1)$$

### **Filtro sintonizado**

O filtro sintonizado é um circuito série RLC, como mostrado na Figura 1, sintonizado em uma frequência de um harmônico. Sua impedância é dada pela Equação 2.

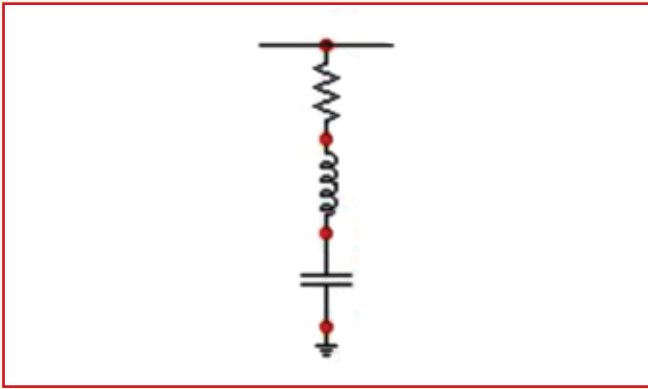


Figura 1 - Filtro sintonizado RLC.

$$Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (2)$$

A frequência de ressonância (ou sintonia) deste filtro é definida na Equação 3. A Figura 2 mostra uma curva qualitativa do módulo da impedância de um filtro RLC ao longo de um espectro de frequência. Na frequência de ressonância, a impedância do filtro é a menor de todo o espectro.

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3)$$

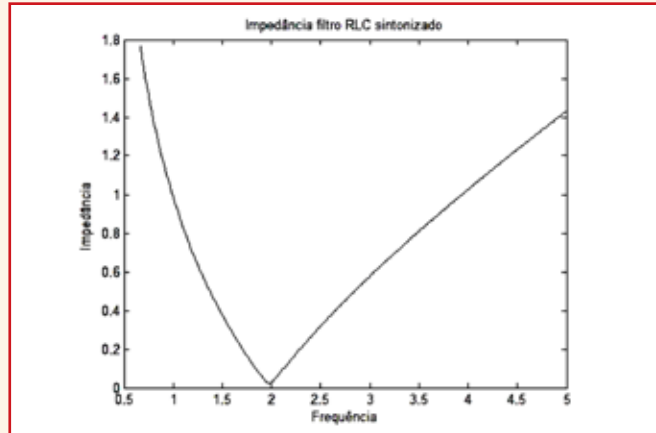


Figura 2 - Módulo da impedância versus frequência em um filtro sintonizado.

Neste tipo de filtro, o fator de qualidade  $Q$  do filtro sintonizado RLC é expresso pela Equação 4.

$$Q = X_o/R$$

$$\text{Onde } X_o = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (4)$$

O filtro sintonizado tem um fator de qualidade elevado, variando entre 30 e 80. Na Figura 2, o fator de qualidade foi 40.

Uma importante característica deste filtro é que ele se comporta

capacitivamente abaixo de sua frequência de ressonância, contribuindo para a compensação da potência reativa em relação à frequência da rede. Acima da frequência de ressonância o comportamento do filtro será indutivo.

Assim, para o desenvolvimento de um filtro sintonizado basta escolher a frequência de ressonância, a quantidade de potência reativa que será entregue na frequência fundamental (podendo ser próximo de zero, ficando o filtro com a exclusiva função de filtrar os harmônicos) e o fator de qualidade. A partir dessas escolhas, os elementos R, L e C são facilmente fornecidos pelas Equações 1, 2, 3 e 4.

### Filtro amortecido

São filtros passa-alta que apresentam uma baixa impedância a partir da frequência de ressonância. Esta é sintonizada, normalmente, em um harmônico de baixa ordem. É constituído por um capacitor em série com um RL paralelo, como mostrado na Figura 3. O fator de qualidade deste filtro é baixo, sendo da ordem de 1 a 10.

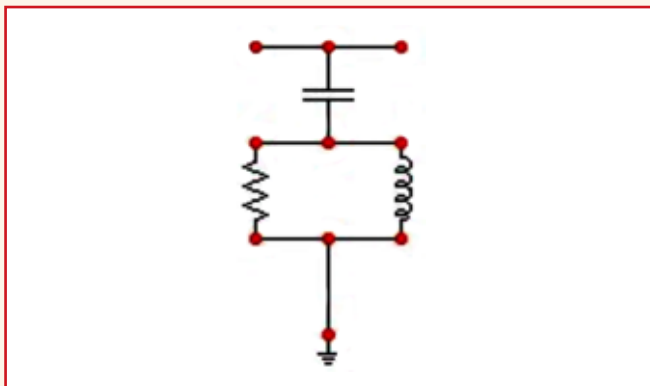


Figura 3 - Filtro amortecido.

A frequência de ressonância e o fator de qualidade têm as mesmas fórmulas do filtro sintonizado (Equações de 1 a 4). A Figura 4 mostra um gráfico qualitativo do módulo da impedância do filtro amortecido ao longo da frequência. O R escolhido na Figura 4 é igual a 1. Nas altas frequências, a tendência do filtro é ter uma impedância igual a R.

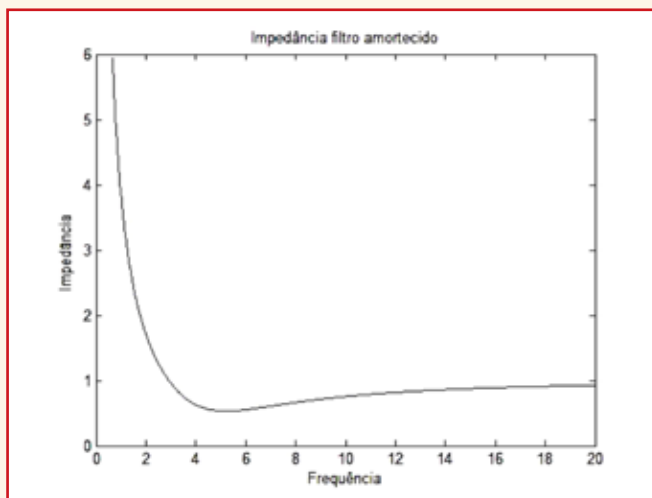


Figura 4 - Módulo da impedância versus frequência do filtro amortecido.

A filosofia de desenvolvimento deste filtro não é muito diferente do exposto no filtro sintonizado. Ou seja, basta escolher a frequência de ressonância, a quantidade de potência reativa que será entregue na frequência fundamental e o fator de qualidade.

### Aplicações

Os filtros sintonizado e amortecido, muitas vezes, são aplicados em conjunto para mitigar correntes harmônicas de uma fonte poluidora. Como exemplo, podemos citar um conversor estático de seis pulsos, haverá quatro filtros sintonizados, sendo estes nas frequências do 5°, 7°, 11° e 13° harmônico e um filtro amortecido com frequência de ressonância no 17° harmônico. Esse último filtro será responsável por amortecer os harmônicos de ordens superiores.

No trabalho *Reduction of Harmonics Currents in Fluorescent Lighting Systems: Design and Realisation*, os autores apresentam um filtro passivo para minimizar a corrente harmônica no neutro em sistemas de iluminação por lâmpadas fluorescentes. Ele consiste em um filtro duplamente sintonizado, como mostrado na Figura 5, que nada mais é do que uma extensão do filtro sintonizado, contendo duas frequências de ressonância. O filtro é instalado em série com o neutro.

Nas frequências de ressonância, a impedância do filtro é baixa, sendo alta nas demais frequências. Uma das frequências de ressonância escolhidas é a fundamental, sendo que a segunda é em uma frequência diferente de um harmônico. Esta configuração série tem por objetivo “barrar” as correntes de sequência zero, o que, em um sistema equilibrado, representa os harmônicos triplos (3°, 9°, 15°, etc.).

No artigo, os autores apresentam um exemplo de dimensionamento desse filtro. Os valores por eles utilizados foram:

Ramo série –  $C1 = 1250 \mu\text{F}$ ,  $L1 = 4,4 \text{ mH}$ ,  $R1=0,1 \Omega$

Ramo paralelo –  $C1 = 340 \mu\text{F}$ ,  $L1 = 3,3 \text{ mH}$ ,  $R1=0,1 \Omega$ .

Vale lembrar que a frequência fundamental, para esses autores, era 50 Hz. A Figura 6 apresenta o gráfico de impedância para diversos harmônicos para este filtro. As frequências de ressonância se dão na frequência fundamental e em torno do 4° harmônico.

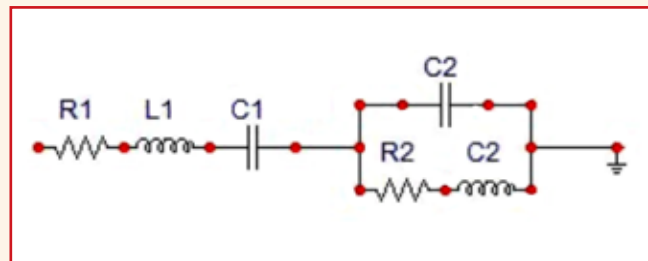
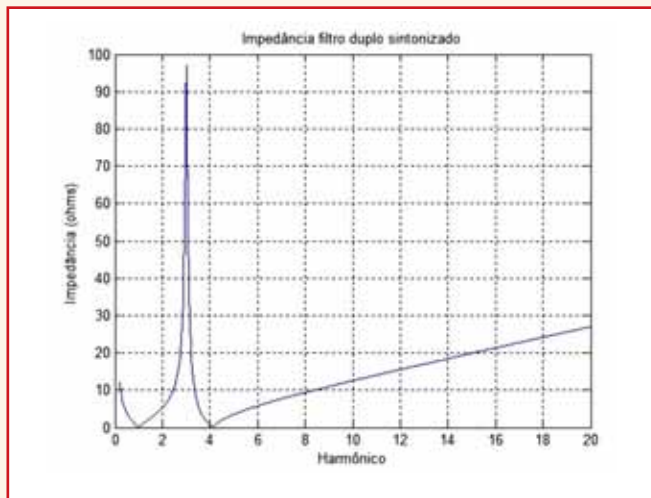
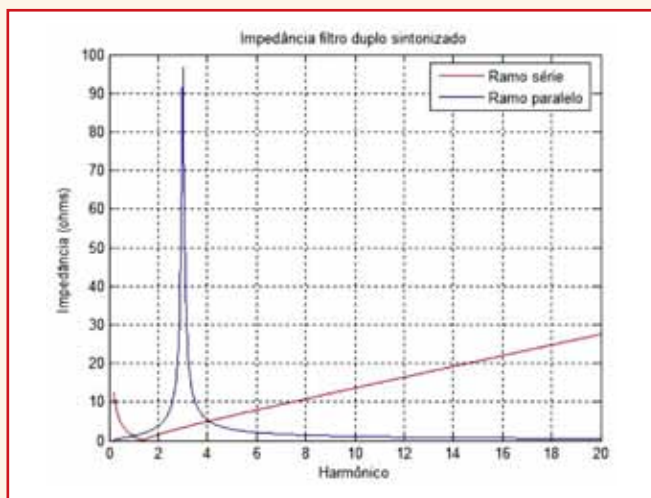


Figura 5 - Filtro duplo sintonizado.



**Figura 6 - Módulo da impedância versus harmônicos – filtro duplamente sintonizado.**

A alta impedância no 3º harmônico (Figura 6) se deve ao ramo paralelo. O ramo série fica responsável por fornecer uma baixa impedância na fundamental. A Figura 7 apresenta o módulo da impedância de cada ramo (série e paralelo) por harmônico.



**Figura 7 - Módulo da impedância versus harmônico – filtro duplamente sintonizado – ramos série e paralelo.**

Por volta do 4º harmônico, o módulo da impedância do ramo paralelo é igual ao do ramo série, mas em valores complexos. A parte imaginária é o oposto da outra, sendo o ramo série positiva e o ramo paralelo negativa. Assim, o resultado final é uma impedância de baixo valor, constituindo, dessa forma, a 2ª frequência de ressonância.

Analisando novamente a Figura 6, as impedâncias que o filtro oferece para os harmônicos triplos (3º, 9º e 15º) são bastante elevadas. Os autores implementaram este filtro partindo de duas possibilidades: somente o ramo paralelo e o filtro duplo sintonizado (FDS). Ele foi colocado em um sistema de iluminação trifásico a quatro condutores e os autores mediram as correntes de fase e neutro nas situações de simetria e assimetria. Os resultados encontrados estão nas Tabelas 1 e 2.

**TABELA 1**

**RESULTADOS DA IMPLEMENTAÇÃO DO FILTRO DE CORRENTE DE NEUTRO –  
CORRENTES SIMÉTRICAS**

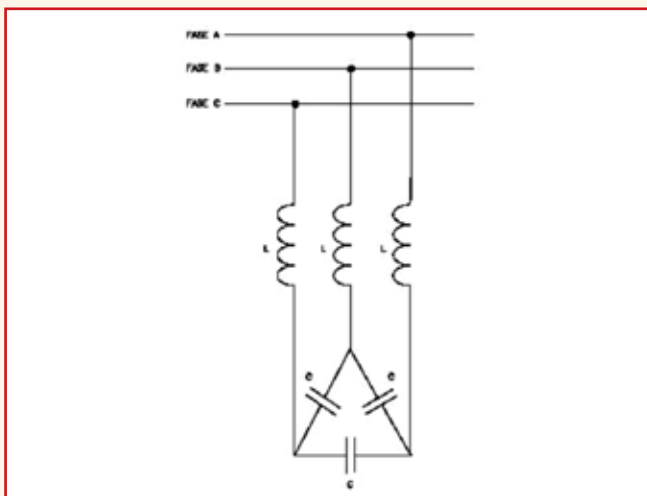
Corrente eficaz	Sem filtro (A)	Somente filtro paralelo (A)	FDS (A)
Fase A	21	19,9	19,8
Fase B	20,3	19,7	19,5
Fase C	20,7	19,6	19,6
Neutro	20	1,38	1,39

**TABELA 2**

**RESULTADOS DA IMPLEMENTAÇÃO DO FILTRO DE CORRENTE DE NEUTRO –  
CORRENTES ASSIMÉTRICAS**

Corrente eficaz	Sem filtro (A)	Somente filtro paralelo (A)	FDS (A)
Fase A	35,6	31,6	32,8
Fase B	29,4	28,2	29,2
Fase C	21	20,4	20,4
Neutro	21	6,32	8,38

Em um projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D) entre a Universidade de Uberlândia e as concessionárias de energia Escelsa e Enersul, em meados de 2000, foi desenvolvido um filtro harmônico passivo para utilização em circuitos secundários aéreos de distribuição. O filtro harmônico passivo é um filtro sintonizado com a configuração apresentada na Figura 8.

**Figura 8 - Diagrama trifilar do filtro passivo de redes secundárias.**

Inicialmente, determinou-se a quantidade de potência reativa que os capacitores forneceriam na frequência fundamental para compensação de reativos. A Tabela 3 traz a potência dos capacitores para diferentes transformadores.

**TABELA 3**

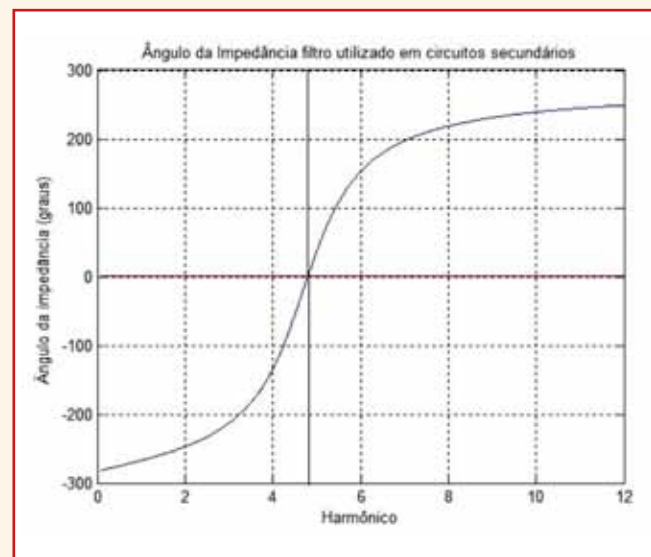
**POTÊNCIA DE CAPACITORES PARA DIFERENTES TRANSFORMADORES**

Potência do transformador (kVA)	Tensão (V)	Potência do capacitor (kVar)
30	220	7,5
45	220	10
75	220	15
112,5	220	20

Nos sistemas secundários de distribuição, tipicamente o 5º harmônico é o mais presente. Nas medições mostradas nos Capítulos VI, VII e VIII, este fato é comprovado. A frequência de sintonia do filtro foi escolhida como 4,8 vezes a frequência fundamental ou 288 Hz. Esta escolha foi realizada, conforme os autores, por motivos de segurança e não foi escolhido

em um harmônico específico devido à inconstância das características de topologia dos circuitos secundários de baixa tensão.

Conforme explicitado na descrição dos filtros sintonizados, abaixo da frequência de ressonância, o filtro se comporta como um capacitor. Acima desta frequência, ele se comporta como um indutor. A Figura 9 mostra o ângulo da impedância do filtro em questão, comprovando seu comportamento capacitivo e indutivo.

**Figura 9 - Ângulo da impedância do filtro.**

No desenvolvimento de um dimensionamento do filtro para um ramo monofásico, considerando um transformador de 45 kVA, o capacitor é determinado por:

$$C = \frac{Qc}{\omega V^2} = \frac{10000}{2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 220^2} = 548 \mu\text{F} \quad (5)$$

Escolhida a frequência de 288 Hz e utilizando a Equação 3, encontra-se uma indutância de 557  $\mu\text{H}$ . É possível incluir, ainda, para efeito de simulação, uma resistência de 0,4  $\Omega$  para computar as resistências intrínsecas do reator e condutores. Desta forma, o filtro fica com os seguintes parâmetros (Tabela 4).

**TABELA 4**

**PARÂMETROS DO FILTRO DE CIRCUITOS SECUNDÁRIOS**

R ( $\Omega$ )	L ( $\mu\text{H}$ )	C ( $\mu\text{F}$ )
0,4	557	548

O módulo da impedância do filtro resultante em função da frequência é apresentado na Figura 10, enquanto na Figura 9, usada como exemplo anteriormente, é mostrado o ângulo desta impedância.

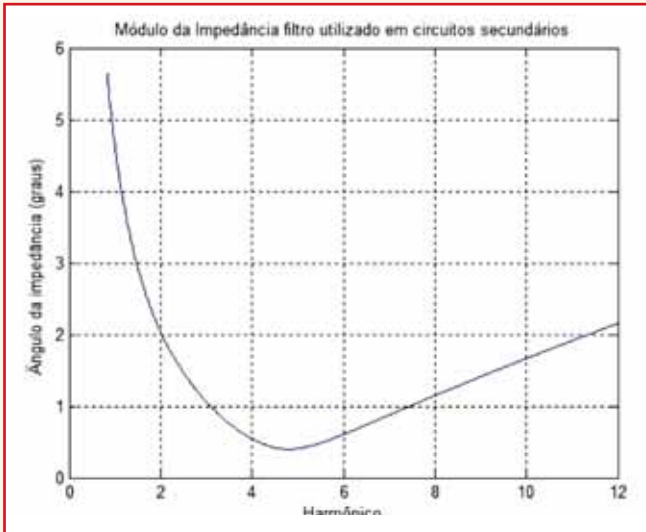


Figura 10 - Módulo da impedância do filtro implementado.

Como resultados, obtém-se uma redução média de 50% de THD de tensão no transformador de 45 kVA instalado (THDv médio de 4% para 2%). Neste presente trabalho, este filtro foi implementado no ATP e posto nas simulações do sistema de distribuição secundário em todos os casos simulados nos Capítulos IX e X. O filtro foi ligado diretamente nos terminais do secundário do transformador. As Tabelas 5 e 6 apresentam os resultados em três pontos de medição sem e com pré-distorção de tensão no transformador.

**TABELA 5**  
**DISTORÇÕES DE TENSÃO NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO SECUNDÁRIO – SEM PRÉ-DISTORÇÃO NO TRANSFORMADOR**

**Ponto de medição 1 – próximo ao transformador**

Carga / Horário	Sem filtro			Com filtro		
	Va (%)	Vb (%)	Vc (%)	Va (%)	Vb (%)	Vc (%)
Leve / 12h	0,33	0,26	0,27	0,29	0,23	0,23
Média / 2h	0,57	0,70	0,45	0,43	0,59	0,40
Pesada / 21h	0,69	1,48	1,11	0,58	1,21	1,02

**Ponto de medição 2 – ponta do sistema de distribuição secundário**

Carga / Horário	Sem filtro			Com filtro		
	Va (%)	Vb (%)	Vc (%)	Va (%)	Vb (%)	Vc (%)
Leve / 12h	0,42	0,34	0,33	0,36	0,31	0,29
Média / 2h	0,60	0,80	0,51	0,47	0,69	0,47
Pesada / 21h	0,76	1,76	1,44	0,68	1,48	1,35

**Ponto de medição 3 – ponta do sistema de distribuição secundário**

Carga / Horário	Sem filtro			Com filtro		
	Va (%)	Vb (%)	Vc (%)	Va (%)	Vb (%)	Vc (%)
Leve / 12h	0,33	0,20	0,33	0,29	0,17	0,28
Média / 2h	0,79	0,95	0,67	0,66	0,83	0,60
Pesada / 21h	0,89	1,67	1,16	0,77	1,37	1,05

**TABELA 6**  
DISTORÇÕES DE TENSÃO NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO SECUNDÁRIO – COM PRÉ-DISTORÇÃO NO TRANSFORMADOR

Ponto de medição 1 – próximo ao transformador						
Carga / Horário	Sem filtro			Com filtro		
	Va (%)	Vb (%)	Vc (%)	Va (%)	Vb (%)	Vc (%)
Leve / 12h	1,28	1,15	1,07	1,07	0,95	0,88
Média / 2h	1,05	1,10	1,35	0,88	0,90	1,20
Pesada / 21h	1,57	2,04	2,00	1,31	1,67	1,77
Ponto de medição 2 – ponta do sistema de distribuição secundário						
Carga / Horário	Sem filtro			Com filtro		
	Va (%)	Vb (%)	Vc (%)	Va (%)	Vb (%)	Vc (%)
Leve / 12h	1,35	1,20	1,08	1,15	0,96	0,88
Média / 2h	1,05	1,12	1,42	0,87	0,89	1,25
Pesada / 21h	1,61	2,24	2,29	1,38	1,81	2,06
Ponto de medição 3 – ponta do sistema de distribuição secundário						
Carga / Horário	Sem filtro			Com filtro		
	Va (%)	Vb (%)	Vc (%)	Va (%)	Vb (%)	Vc (%)
Leve / 12h	1,25	1,10	1,18	1,06	0,89	0,98
Média / 2h	1,35	1,20	1,08	1,15	1,02	0,89
Pesada / 21h	1,67	2,11	2,06	1,40	1,66	1,81

Nas Tabelas 5 e 6, quando inserido o filtro no secundário do sistema de distribuição, foi apresentada melhoria em todas as situações. Dessa forma, o filtro se mostrou eficiente com uma média de melhoria no THD de tensão de 20%.

No trabalho Análise da Instalação de Filtros Harmônicos Passivos em Circuitos Secundários de Distribuição, os autores

apresentaram os parâmetros R, L e C para transformadores de 30 kVA, 75 kVA e 112,5 kVA (Tabela 7), além do já previamente apresentado para o transformador de 45 kVA (Tabela 4). Todos os filtros foram projetados na frequência de ressonância de 288 Hz. As potências capacitivas dos filtros seguem a Tabela 3.

**TABELA 7**  
PARÂMETROS FINAIS DOS FILTROS

Potência do transformador (kVA)	R ( $\Omega$ )	L ( $\mu$ H)	C ( $\mu$ F)
30	0,30	411,04	742,97
75	0,30	685,07	445,78
112,5	0,30	822,08	371,48

### Filtro ativo

O filtro ativo é composto por elementos ativos que fornecem o conteúdo harmônico necessário a uma carga não linear, limpando a rede da circulação desses harmônicos. Há dois tipos: paralelo e série. Esses filtros foram inicialmente propostos por Akagi, sendo o filtro paralelo de 1984 e o filtro série de 1988. Este último em conjunto com filtro paralelo.

#### • Filtro ativo paralelo

De acordo com a Figura 11, o filtro ativo paralelo é representado pelo inversor fonte de tensão e seu controle. Este inversor funciona como malha de controle e tem a função básica de “curto-circuitar” as correntes indesejadas, geradas pela carga. Analisando de outra perspectiva, o filtro paralelo (ou shunt) irá fornecer as correntes harmônicas desejadas para o correto funcionamento da carga não linear.

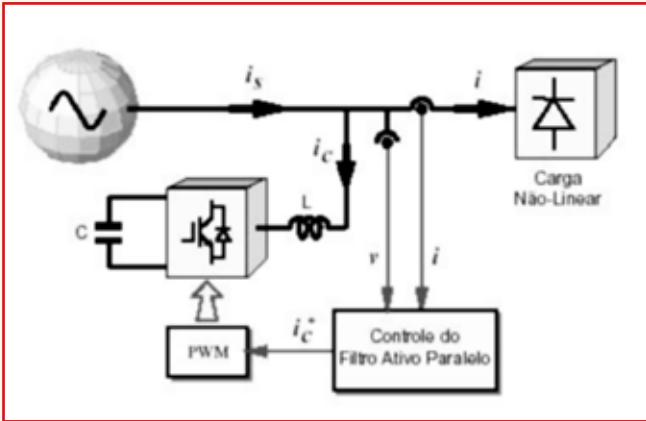


Figura 11 - Filtro ativo paralelo.

Vale dizer que as correntes não desejadas, na maioria dos casos, são harmônicos, mas podem, em alguns casos, ser correntes na frequência fundamental (como exemplo podemos citar a corrente reativa ou de desequilíbrio). Assim, o grande desafio no projeto de um filtro ativo paralelo baseado em conversores desse tipo está na determinação instantânea da referência de corrente a ser sintetizada.

• **Filtro ativo série**

O filtro série é mostrado na Figura 12. Nessa figura, a fonte de tensão está representada por uma fonte de tensão distorcida. O filtro ativo em série, entre a carga e a fonte, impede, dessa forma, que as parcelas não desejáveis de tensão sejam aplicadas na carga.

Vale lembrar que o filtro ativo série não é capaz de eliminar harmônicos de correntes geradas pela carga uma vez que este filtro está inserido em série com esta carga. Este consiste no conceito dual do que o ocorre com o filtro paralelo. Para se ter essa compensação, tanto de tensão quanto de corrente, é necessário utilizar um filtro ativo série/paralelo.

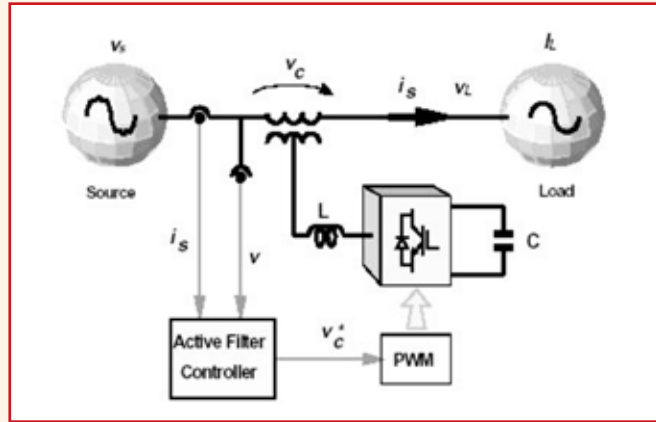


Figura 12 - Filtro ativo série.

• **Filtro ativo série/paralelo**

Para a compensação simultânea da tensão e da corrente, há uma combinação de filtros ativos série/paralelo, a qual foi convencionalmente denominada como um UPQC (do inglês, *Unified Power Quality Conditioner*).

A Figura 13 mostra uma situação típica para o emprego do UPQC. Este é um cenário em que se tem um grupo de cargas críticas muito sensíveis às distorções harmônicas e que requerem um suprimento de energia de boa qualidade. Porém, estas cargas estão conectadas a um barramento em que se encontram outras cargas ( $i_L$ ) não lineares, que são geradores de alto conteúdo de correntes harmônicas desbalanceadas.

Além disso, admite-se que a tensão de suprimento ( $v_s$ ) deste barramento também seja desbalanceada e distorcida, independentemente dessas cargas não lineares. O UPQC está inserido em paralelo, próximo à carga não linear e em série com a tensão de suprimento, de tal forma que a tensão do filtro série  $v_c$  compense a tensão  $v_s$  e torne a tensão  $v$  senoidal e balanceada.

Entretanto, a corrente  $i_c$  do filtro paralelo compensa os



harmônicos e desbalanços da corrente  $i_L$ , impedindo que essas componentes indesejadas da corrente fluam pelo sistema, distorcendo ainda mais a tensão de suprimento. Há ainda a possibilidade de haver filtros híbridos ativos e passivos. Duas possibilidades são existentes: ativo série/passivo paralelo e ativo paralelo/passivo paralelo.

### Filtro passivo versus Filtro ativo

Nas duas configurações de filtro apresentadas (passivo e ativo) cada uma apresenta vantagens e desvantagens. A principal vantagem do filtro passivo é o seu custo. Porém, podem ocorrer ressonâncias com elementos do sistema elétrico. Para seu bom desempenho, é necessária uma grande compensação capacitiva na frequência fundamental. A variabilidade da carga em que o filtro está conectado influencia o seu rendimento.

O filtro ativo deve ter uma potência igual ou maior que a carga não linear a ser filtrada, o que o torna economicamente inviável em alguns casos. Mais caro que o filtro passivo, o filtro ativo tem seu rendimento constante independente da variabilidade da carga.

Na referência *Influence of Load Characteristics on the Applications of Passive and Active Harmonic Filters*, os autores apresentam um trabalho em que se comparou um filtro passivo

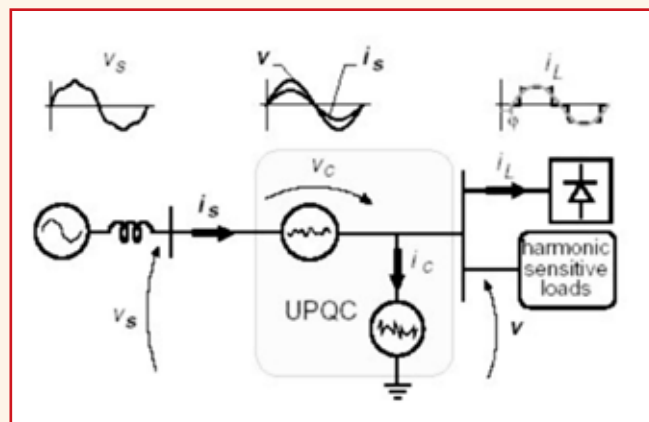
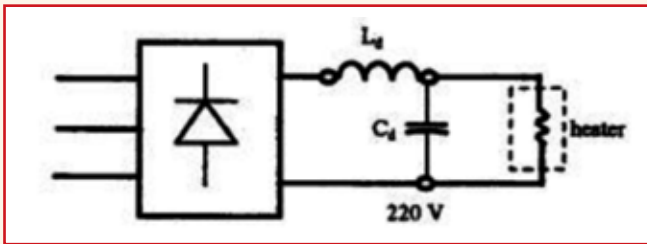


Figura 13 - UPQC - Filtros ativos série/paralelo.

de 54 kVAR e um filtro ativo de 50 kVAR para diminuir os harmônicos de corrente injetados na rede de um retificador trifásico de 110 kVA. O circuito elétrico do retificador é mostrado na Figura 14. Dois casos de carga do retificador foram considerados. No primeiro caso, retirou-se o indutor  $L_d$  (Figura 14) e, no segundo caso, o indutor foi novamente inserido no retificador.

A corrente do sistema elétrico que alimentava o retificador tinha uma distorção de 25,58% para o primeiro caso (sem indutor) e 50,48% no segundo caso (com indutor). Quando o



**Figura 14 - Retificador trifásico.**

filtro passivo foi inserido ao sistema, a distorção de corrente no primeiro caso foi de 7,84% e no segundo caso, 12,32%. Trocado o filtro passivo pelo filtro ativo, a distorção de corrente foi de 4,94%, no primeiro caso, e 11,15%, para o segundo caso.

O filtro ativo apresentou uma melhora nos níveis de distorção. Entretanto, paga-se um preço, por ser esta uma alternativa mais cara do que a utilização do filtro passivo.

### **Conclusões**

Este capítulo apresentou algumas formas de mitigação de harmônicos. O principal elemento que fez chegarmos a esse resultado foi a utilização do filtro. Por sua vez, duas formas de filtro foram utilizadas: filtros passivos e filtros ativos.

Resumidamente, filtros passivos são aqueles em que os seus

componentes são passivos (resistores, capacitores e indutores). Por sua vez, filtros ativos são aqueles compostos por elementos ativos que fornecem o conteúdo harmônico necessário a uma carga não linear, limpando a rede da circulação destes harmônicos.

Os filtros ainda podem ser utilizados na configuração em série, que tem o objetivo de barrar os harmônicos de tensão provenientes da rede elétrica para o consumidor, ou na configuração paralela, que objetiva limpar a rede elétrica de correntes harmônicas, estas provenientes do consumidor de energia elétrica, pela utilização de cargas não lineares.

Filtros passivos são mais baratos que filtros ativos. Para a boa performance do filtro passivo é necessário um capacitor em condições de fornecer uma grande compensação capacitiva na frequência fundamental. Um inconveniente deste filtro será a variabilidade de seu desempenho devido à variabilidade da carga, na qual o filtro está submetido. Pode ainda ocorrer ressonâncias com o sistema elétrico.

Filtros ativos, para terem uma boa performance, necessitam ter uma potência igual ou superior à carga não linear a ser filtrada, tornando-se, em alguns casos, economicamente inviáveis. Entretanto, têm seu desempenho constante