

PEA2503 Laboratório de Qualidade de Energia

Filtros Passivos de Harmônicos

Prof. Lourenço Matakas Jr

Versão 23/Out/2018 (editado pelo prof. Wilson Komatsu)

1. Objetivos

- Aprender a estratégia de filtragem passiva de harmônicos de corrente, utilizando filtros LC sintonizados;
- Equacionamento do filtro LC;
- Verificar sua operação e influência dos parâmetros através de simulações utilizando o programa PSIM;
- Verificar que o filtro LC pode absorver harmônicos de outras fontes ligadas à rede elétrica.

1. Filtro Passivo de Corrente

1.1 Princípio de Funcionamento

Uma carga não linear, alimentada com tensão $v_{rede}(t)$ absorve uma corrente deformada $i_{carga}(t)$, conforme mostrado na figura 1

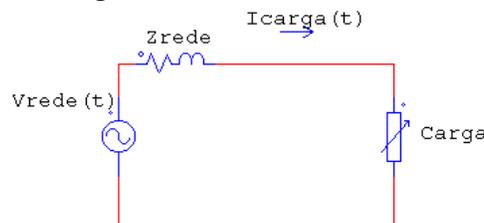


Figura 1: Carga não linear conectada à rede.

Inserir-se uma impedância Z_{filtro} em paralelo com a carga, conforme mostrado na figura 2a, com o objetivo de absorver parte dos harmônicos da carga (i_{filtro}), evitando que estes fluam pela rede.

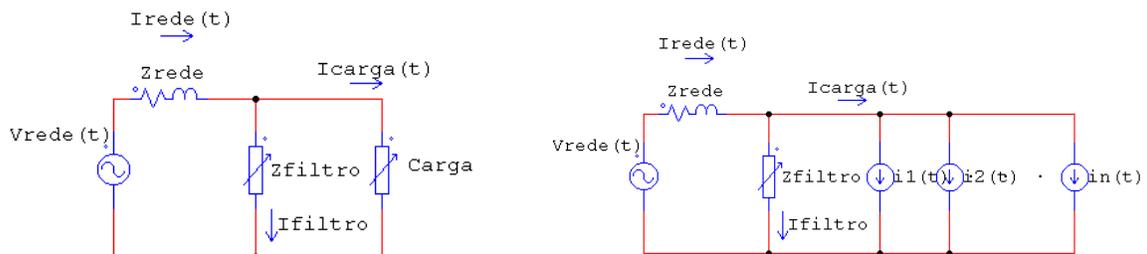


Figura 2a: Filtro em paralelo com a carga. Figura. 2b: Representando a carga por fontes de corrente ideais.

Para efeito de modelamento será considerado que o espectro da corrente de carga não se altera com a inserção do filtro, o que não é completamente verdadeiro em casos práticos,

particularmente quando a carga for um retificador com filtro capacitivo. Neste caso a forma de onda da corrente é muito dependente da tensão da rede.

Considerando-se o espectro da carga independente da inserção do filtro, e da forma de onda da tensão, representa-se a carga como uma associação paralela de fontes de corrente, uma para cada harmônico, conforme indicado na figura 2b. Pode-se calcular a atenuação imposta pelo filtro ao componente de ordem h , considerando-se o divisor de corrente formado por Z_{filtro} e Z_{rede} (equação (1)). Adotou-se tensão $v_{rede}(t)$ senoidal, de modo que ela possa ser considerada como um curto circuito para os harmônicos diferentes da fundamental.

$$k = \left| \frac{\dot{I}_{rede}(h\omega)}{\dot{I}_{carga}(h\omega)} \right| = \left| \frac{\dot{Z}_{filtro}(h\omega)}{\dot{Z}_{filtro}(h\omega) + \dot{Z}_{rede}(h\omega)} \right| = \left| \frac{1}{\sqrt{1 + \left| \dot{Z}_{rede}(h\omega) / \dot{Z}_{filtro}(h\omega) \right|^2}} \right| \quad (1)$$

Para que se obtenha baixo valor para o fator k (ou seja, boa atenuação da h -ésima harmônica) será necessário que $\dot{Z}_{rede}(h\omega) / \dot{Z}_{filtro}(h\omega) \gg 1$, ou seja que a impedância do filtro, na frequência do harmônico em questão seja bem menor que a da rede. Esta condição é conseguida com um circuito LC série, que apresenta ressonância na frequência do harmônico de ordem h . Nesta condição a impedância do filtro será mínima, com valor igual à resistência série do indutor (R_f) (figuras 3a e 3b).

1.2 Equacionamento do ramo do filtro de ordem h .

Neste equacionamento simplificado, a impedância de rede será aproximada por $\dot{Z}_{rede} = jX_{L_rede}$, na frequência fundamental. A figura 3a mostra o filtro de ordem h para a frequência fundamental. A figura 3b mostra os valores das reatâncias para a frequência $h\omega$.

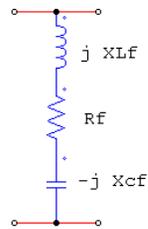


Figura 3a: Parâmetros do filtro na Frequência fundamental.

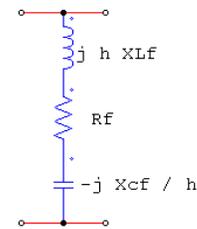


Figura 3b: Parâmetros na Frequência $h\omega$.

A equação (2) mostra o valor da atenuação, a partir da equação (1), substituindo-se os valores acima adotados para os parâmetros. Como o filtro está em ressonância série para a frequência $h\omega$, tem-se $hX_{Lf} = X_{Cf} / h$, resultando em $\dot{Z}_{filtro}(h\omega) = jhX_{Lf} - jX_{Cf} / h + R_f = R_f$.

$$k = \left| \frac{\dot{I}_{rede}(h\omega)}{\dot{I}_{carga}(h\omega)} \right| = \left| \frac{1}{\sqrt{1 + \left(hX_{L_rede} / \left| \dot{Z}_{filtro}(h\omega) \right| \right)^2}} \right| = \left| \frac{1}{\sqrt{1 + \left(hX_{L_rede} / R_f \right)^2}} \right| \quad (2)$$

Nota-se que existem infinitos pares de indutor e capacitor de filtro que apresentam ressonância série em $h\omega$. Apresentam-se a seguir algumas restrições que definem o valor do capacitor C_f do filtro. Calculando-se a impedância do filtro para a frequência fundamental obtém-se:

$$\dot{Z}_{\text{filtro}}(\omega) = jX_{L_f} - jX_{C_f} + R_f \quad (3)$$

Da condição de ressonância para a frequência $h\omega$ obtém-se:

$$hX_{L_f} = X_{C_f} / h \longrightarrow X_{L_f} = X_{C_f} / h^2 \quad (4)$$

De (3) e (4):

$$\dot{Z}_{\text{filtro}}(\omega) = jX_{C_f} / h^2 - jX_{C_f} + R_f = j(1/h^2 - 1)X_{C_f} + R_f = jX + R_f \cong jX \quad (5)$$

Como a parcela X (reatância equivalente) é muito maior que R_f , e como $(1/h^2 - 1) < 0$, pode-se afirmar que **para a frequência fundamental o filtro LC tem comportamento capacitivo**. Se a carga não linear tiver fator de defasagem menor que a unidade (comportamento indutivo), pode-se utilizar a característica capacitiva do filtro para compensar o fator de defasagem. Se a carga for formada por retificadores com filtro capacitivo, com fator de defasagem próximo da unidade, devem-se evitar baixos valores de X_{C_f} que resultariam em baixos valores para o fator de defasagem e para o fator de potência do conjunto filtro mais carga.

Assumindo-se uma corrente no filtro de I_{f_pu} para a frequência fundamental obtém-se X por:

$$|X| = V_{\text{no min al}} / I_f = V_{\text{no min al}} / (I_{f_pu} I_{\text{no min al}}) = Z_{\text{base}} / I_{f_pu} \quad (6)$$

$$\text{(onde } Z_{\text{base}} = V_{\text{base}} / I_{\text{base}} = V_{\text{no min al}} / I_{\text{no min al}} \text{)} \quad (6a)$$

Da equação (5), a reatância equivalente X é dada por:

$$X = X_{C_f} \left(\frac{1}{h^2} - 1 \right) = X_{C_f} \frac{1 - h^2}{h^2} \quad (7)$$

Das equações (4), (6) e (7) obtém-se X_{L_f} em função da corrente I_{f_pu} :

$$X_{L_f} = \frac{X_{C_f}}{h^2} = \frac{|X|}{(h^2 - 1)} = \frac{Z_{\text{base}}}{I_{f_pu} (h^2 - 1)} \quad (8)$$

As perdas de um indutor são quantificadas pelo índice de mérito definido na equação (9):

$$Q_f = X_{L_f} / R_f \quad (9)$$

De (8) e (9) obtém-se a resistência de perdas R_f :

$$R_f = \frac{X_{L_f}}{Q_f} = \frac{Z_{\text{base}}}{I_{f_pu} (h^2 - 1) Q_f} \quad (10)$$

A impedância de rede X_{L_rede} pode ser escrita em função da impedância de base:

$$X_{L_rede} = X_{L_rede_pu} Z_{base} \quad (11)$$

Volta-se agora ao coeficiente de atenuação k da equação (2), substituindo-se os valores de R_f e X_{L_rede} obtidos nas equações (10) e (11).

$$k = \left| \frac{\dot{I}_{rede}(h\omega)}{\dot{I}_{carga}(h\omega)} \right| = \left| \frac{1}{\sqrt{1 + (hX_{L_rede}/R_f)^2}} \right| = \left| \frac{1}{\sqrt{1 + (h(h^2 - 1)X_{L_rede_pu} Q_f I_{f_pu})^2}} \right| \quad (12)$$

A equação (12) quantifica a atenuação do filtro de ordem h em função do índice de mérito do filtro Q_f , da impedância da rede $X_{L_rede_pu}$ (em pu) e da corrente fundamental no filtro I_{f_pu} (em pu). A utilização de valores de parâmetros relativos facilita a análise do filtro.

Consegue-se boa atenuação (valores baixos de k) para:

- valores elevados de $X_{L_rede_pu}$, o que é inviável, por piorar a regulação da tensão no ponto de acoplamento da carga;
- valores elevados de Q_f , o que exige um indutor com baixas perdas e com custo elevado;
- valores elevados de I_{f_pu} , o que pode piorar o fator de deslocamento e consequentemente o fator de potência.

2. Atividades

2.1 Supondo uma rede com regulação de tensão de 3% ($X_{L_rede_pu} = 0.03pu$); indutor com fator de mérito de $Q_f = 10$; alimentando um retificador com filtro capacitivo com componente fundamental de corrente de 1pu (valor de pico) e alimentado por tensão de rede senoidal com valor de pico de 1pu (60Hz). Como o fator de defasagem do retificador é quase unitário, a corrente fundamental no filtro I_{f_pu} deve ser baixa. Sugere-se $I_{f_pu} = 0.1pu$.

- calcular o fator de defasagem devido à corrente de filtro adotada $I_{f_pu} = 0.1pu$. É adequado?
- Calcular o acréscimo na corrente fundamental (valor de pico) devido à inclusão do filtro. É adequado?
- Projete um filtro de 3ª harmônica, obtendo os valores do capacitor C_f , do indutor L_f e do resistor R_f (figura 5).
- Calcular a atenuação para um filtro de 3ª harmônica ($h=3$). É adequada?

2.2 Devido ao péssimo resultado obtido em 2.1 sugere-se que se repitam os itens de 2.1 utilizando-se $X_{L_rede_pu} = 0.05pu$; $Q_f = 20$; $I_{f_pu} = 0.2pu$. Notar que os três parâmetros foram alterados de modo a melhorar a atenuação da terceira harmônica.

2.3 Carga sem filtro - Simular o circuito da figura 4, arquivo **exp10a-23-10-18.psimsch**, que corresponde a um retificador com filtro capacitivo com componente fundamental de corrente de aproximadamente 1pu de pico. A impedância de rede é de 0.05pu

(confirmar). Obtenha os espectros da corrente e tensão na entrada do retificador, preenchendo a tabela 1 abaixo. Sugere-se utilizar a função de localização dos picos do gráfico. Se não encontrar pergunte ao professor.

Tabela 1: Valores de pico das harmônicas de tensão e corrente do retificador com filtro C.

I1 (pico)	I3(pico)	I5(pico)	I7(pico)	I9(pico)
V1 (pico)	V3(pico)	V5(pico)	V7(pico)	V9(pico)

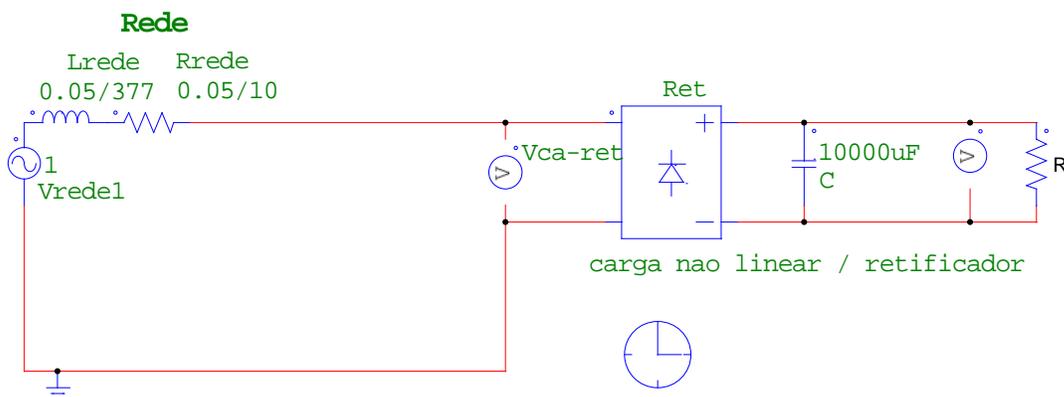


Figura 4. Retificador com filtro capacitivo sem filtro

2.4 Carga com filtro - Simular o circuito da figura 5 , arquivo **exp10b-23-10-18.psimsch**, que corresponde ao retificador com filtro de 3ª harmônica. Insira os valores calculados no item 2.2 de R_f , L_f e C_f , e obtenha os espectros da corrente no filtro, corrente no retificador, corrente na rede e tensão no retificador, anotando os valores na tabela 2 abaixo:

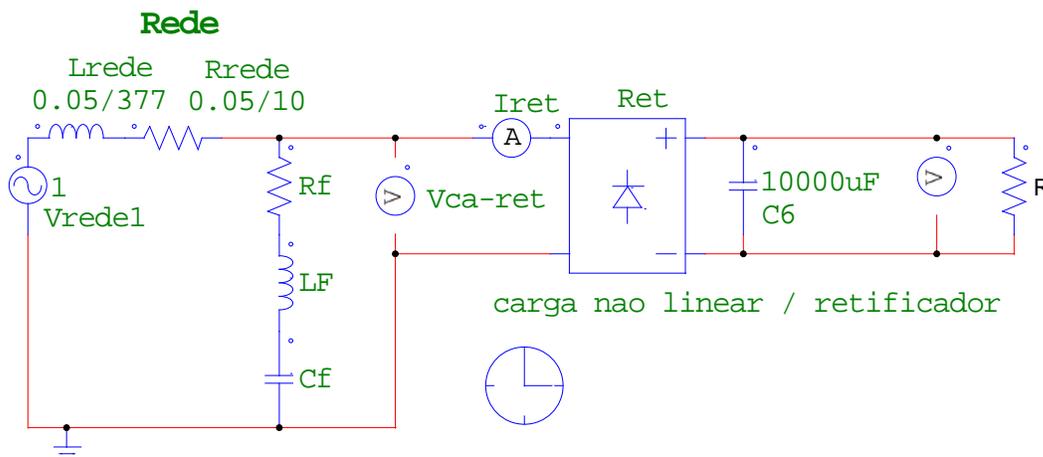


Figura 5: Retificador com filtro capacitivo com filtro passivo.

Tabela 2: Valores obtidos da simulação da figura 5.

	h=1	h=3	h=5	h=7
Iretificador				
Ifiltro				
Irede				
V retificador CA				
Iretificador sem filtro				

- 2.5 Para o item 2.5 anotar em uma única página três gráficos: o primeiro com a tensão no retificador e corrente na rede, o segundo com a corrente no filtro, e o terceiro com a tensão e corrente no retificador. Aproveitando a página mostrada, exiba os espectros dos sinais acima listados.
- 2.6 Comentar o espectro da corrente no retificador, com e sem filtro. A hipótese feita, de espectro invariante com a inserção do filtro ainda é válida? O que aconteceu? Porque?
- 2.7 Comparar os valores da atenuação k , obtidos via equação (12) e via simulação.
- 2.8 Simular o arquivo **exp10c-23-10-18.psim**, onde uma carga sem filtro foi adicionada ao ramal 2. O que acontece com a corrente no filtro ao se inserir o ramal 2?

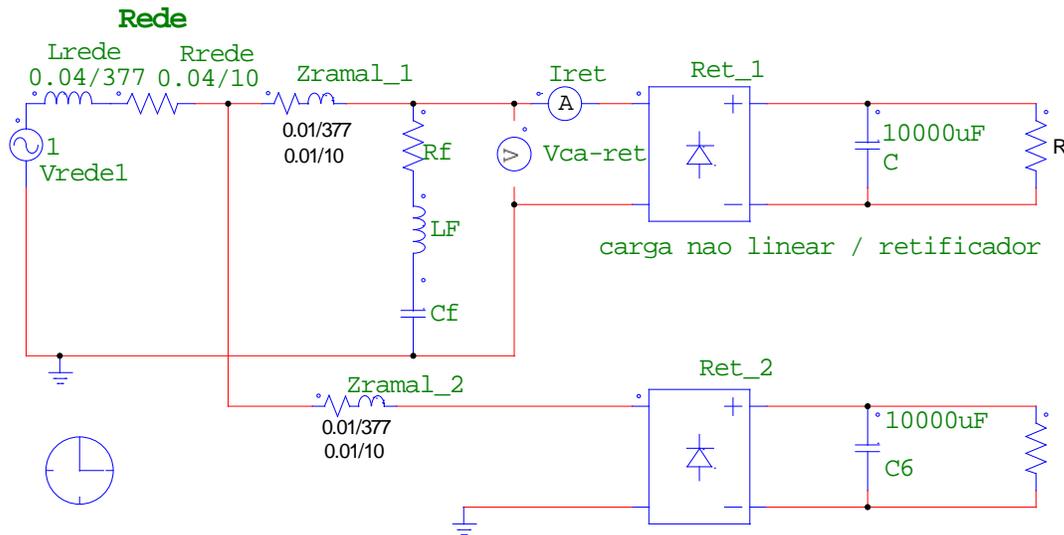


Figura 6: Influência de outras cargas no filtro do ramal 1.

2.9 Filtros de 3ª e 5ª harmônicas

- Projete filtros de 3ª e 5ª harmônicas. Considere $X_{L_rede_pu} = 0.05pu$; $Q_f = 20$ para cada um dos indutores; $I_{f_pu} = 0.2pu$ para o filtro de 3ª e $0.1pu$ para o de 5ª.
- Mostre as formas de onda das correntes na rede e na carga.
- Mostre os espectros das correntes na rede e na carga.
- Calcule os valores esperados de atenuação para as duas harmônicas e compare com os valores obtidos via simulação. Funcionou?

3. Bibliografia

- [1] N. Mohan, T. M. Undeland e W. P. Robbins: "Power Electronics: Converters, Applications and Design", 3rd Edition, John Willey & Sons, USA, 2004.
- [2] Kaiser, W; "Compensador Estático de Reativos", apostila do Laboratório de Eletrônica de Potência, PEA-3502, EPUSP, 2018.