Filtros Passivos de Potência

Prof. Wilson Komatsu
Prof. Lourenço Matakas Jr.

LEP - Laboratório de Eletrônica de Potência
PEA – EPUSP

Junho de 2007

Tópicos Abordados

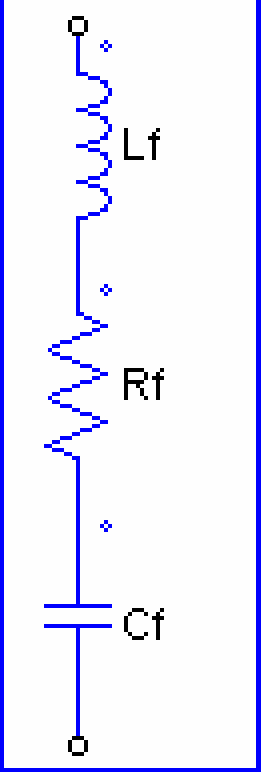
- Descrição geral dos Filtros Passivos de Potência
- Exemplo de cálculo de Filtro Passivo de Potência
- Problemas com o uso de Filtros Passivos de Potência

Filtros Passivos de Potência

- Formados por associações de indutores, capacitores e resistores
- Destinam-se a prover um caminho para harmônicas de corrente (filtro paralelo ou shunt) ou bloqueá-los (filtro série)

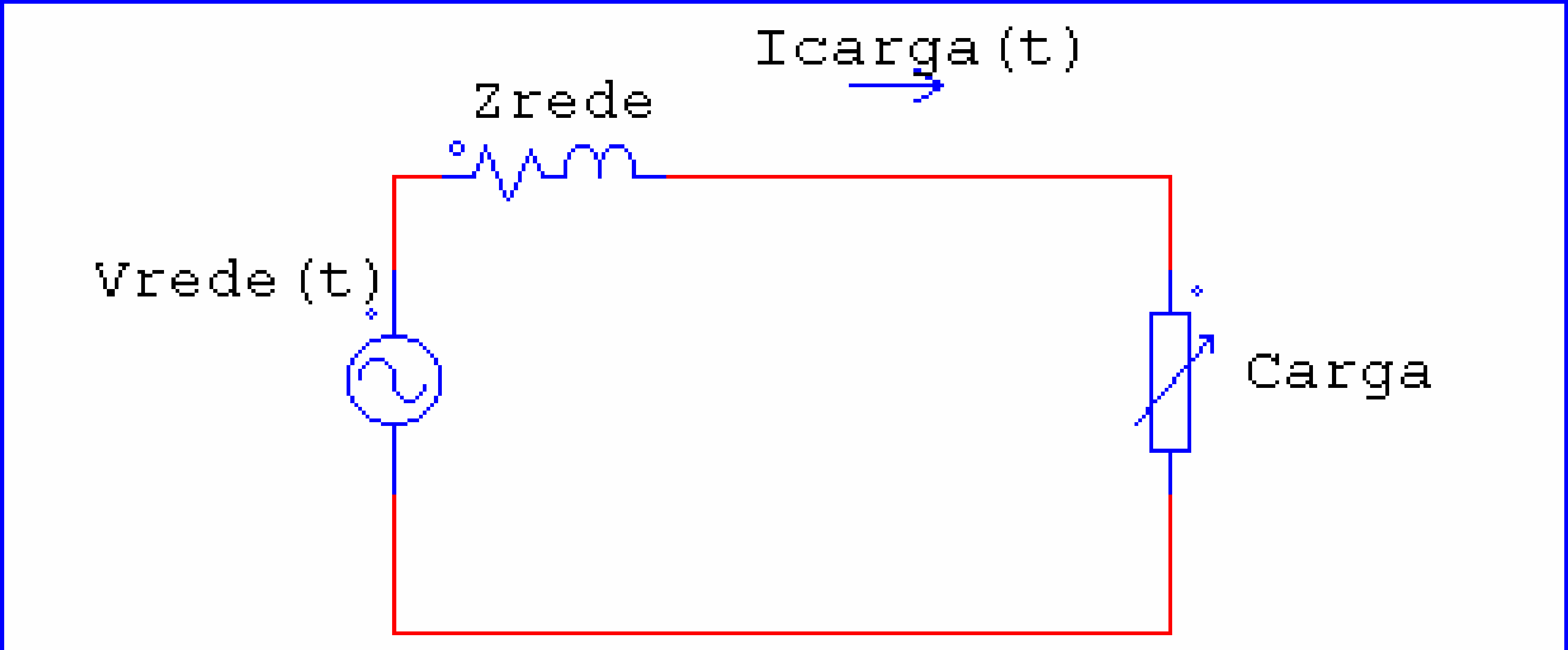
Filtro passivo LC (shunt LC)

- Filtro com L em série com C
- Inserido em paralelo com a carga "suja" a ser filtrada
- A resistência Rf pode ser a interna do Indutor Lf ou externa



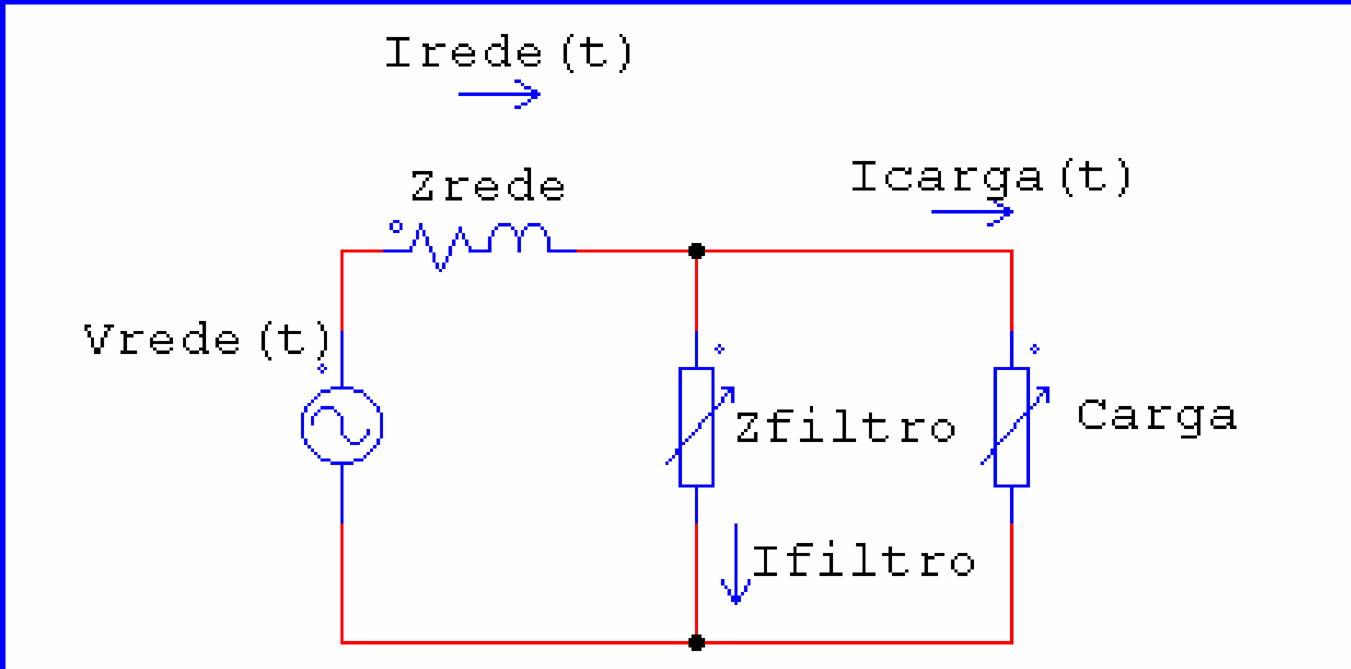
Princípio de Funcionamento – Filtro LC

- Uma carga não linear, alimentada com tensão Vrede(t) absorve uma corrente deformada Icarga(t), conforme mostrado na figura



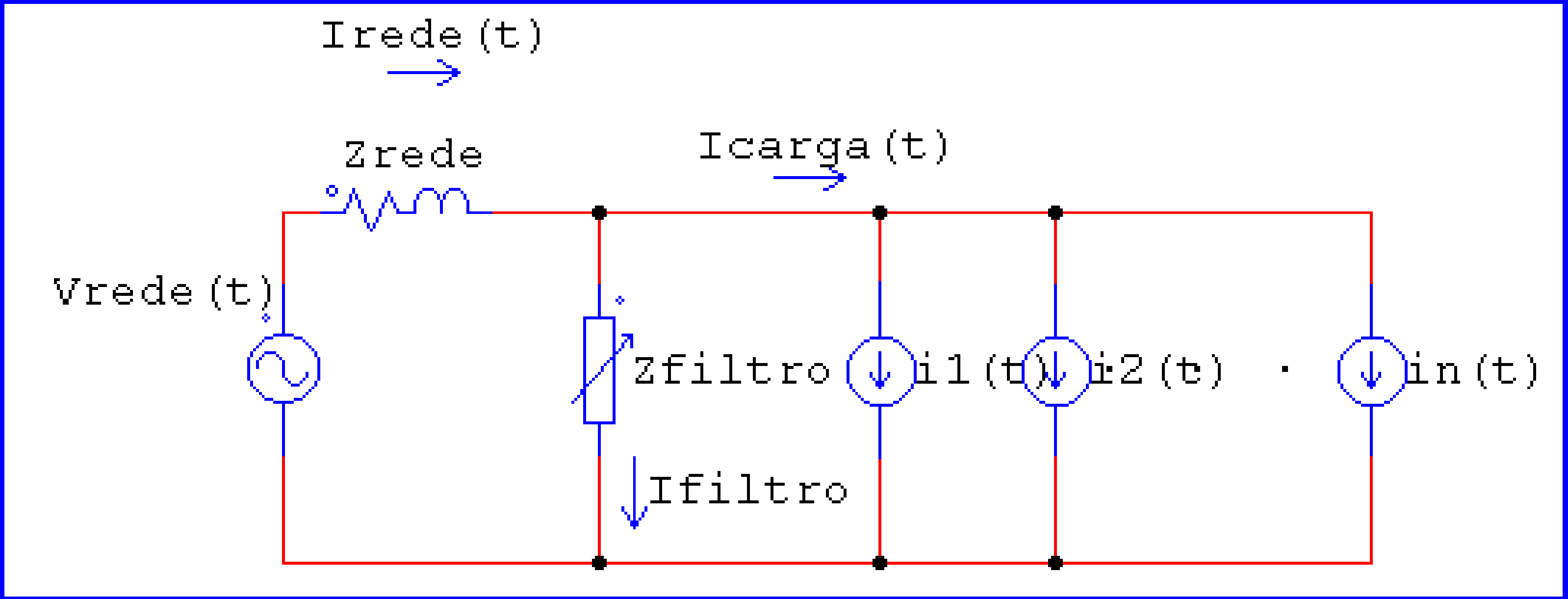
Princípio de Funcionamento – Filtro LC

- Insere-se uma impedância Zfiltro em paralelo com a carga, conforme mostrado na figura, com o objetivo de absorver parte dos harmônicos da carga (Ifiltro), evitando que estes fluam pela rede



Princípio de Funcionamento – Filtro LC

- Representando a carga por fontes de corrente ideais (invariáveis com a inserção do filtro)
- Esta representação pode não ser verdadeira dependendo da carga (p.ex., retificadores com filtragem capacitiva)



Equacionamento – Fator k de atenuação

- Fator de atenuação k do filtro para a componente harmônica de ordem h;
- Divisor de corrente formado por Zfiltro e Zrede;
- Hipótese: tensão Vrede(t) senoidal (curto circuito para os harmônicos diferentes da fundamental);
- Deseja-se baixo valor para o fator k (alta atenuação)

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

Equacionamento – Fator k de atenuação

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

- É necessário que Zfiltro << Zrede na freqüência do harmônico de ordem h;
- Para isso Zfiltro é um circuito LC série, com ressonância na freqüência do harmônico de ordem h;
- Nesta condição a impedância do filtro será mínima com valor igual à resistência série do indutor (Rf).

Equacionamento – Zfiltro na ressonância

- Hipótese: Resistência da rede desprezível.

$$\dot{Z}_{rede} = jX_{L\_rede}$$

- Hipótese: LC do filtro em ressonância.

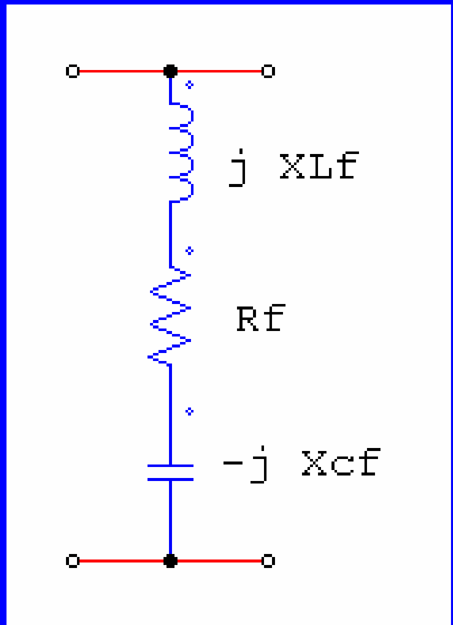
$$h\,X_{Lf} = X_{Cf}\;/\,h$$

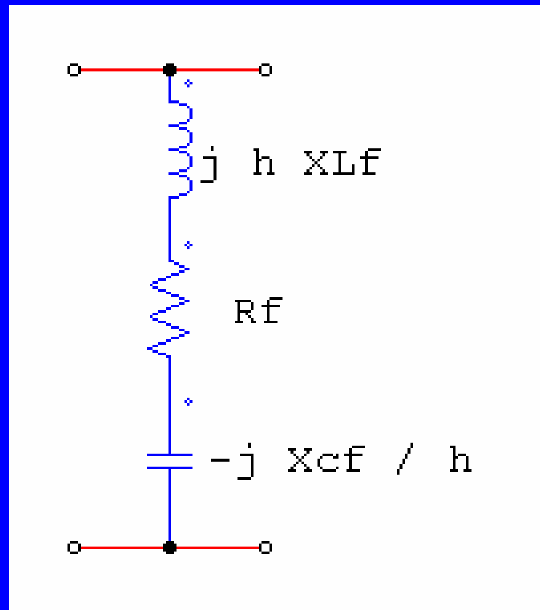
- Resulta em:

$$\dot{Z}_{filtro}(h\omega) = jh\,X_{Lf} - jX_{Cf}\,/\,h + R_f = R_f$$

Equacionamento – filtro na freqüência hω

- Lembrando que:





- Parâmetros do filtro na freqüência fundamental ω
- Parâmetros do filtro na freqüência hω

Equacionamento – k na ressonância

- Na freqüência de ressonância a atenuação k fica:

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

- Obviamente há infinitos pares de indutor Lf e capacitor Cf de filtro que apresentam ressonância na freqüência hω;
- Um critério de projeto determina o valor do capacitor Cf em função do comportamento do filtro na freqüência da rede ω.

Equacionamento – determinação de Cf

- Impedância do filtro na freqüência fundamental ω:

$$\dot{Z}_{filtro}(\omega) = jX_{Lf} - jX_{Cf} + R_f$$

- Impedância do indutor na freqüência hω :

$$h X_{Lf} = X_{Cf} / h \longrightarrow X_{Lf} = X_{Cf} / h^2$$

- Impedância do filtro na freqüência fundamental ω:

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

- Na freqüência ω (fundamental) a parcela reativa X é muito maior que a resistiva Rf

Equacionamento – determinação de Cf

- A impedância do filtro na fundamental é praticamente a da reatância:

$$\dot{Z}_{filtro}(\omega) = jX + R_f \cong jX$$

- Como: $(1/h^2 - 1) < 0$

- Conclui-se que a impedância do filtro shunt LC na fundamental é capacitiva!
- A inserção do filtro altera o fator de defasagem da carga na fundamental ($\cos\varphi_1$)

Equacionamento – determinação de Cf

- O filtro shunt LC apresenta comportamento capacitivo na freqüência fundamental;
- Se a carga tiver comportamento indutivo na fundamental, o filtro melhora o fator de potência pois compensa o fator de defasagem;
- Se a carga tiver fator de defasagem perto da unidade (retificadores com filtro capacitivo, p.ex.), com o filtro o fator de potência pode ficar capacitivo e cair;
- Neste último caso deve-se minimizar o valor de Cf.

Equacionamento – valores em p.u.

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

$$|X| = V_{nominal} / I_f = V_{nominal} / (I_{f\_pu} I_{nominal}) = Z_{base} / I_{f\_pu}$$

(onde $Z_{base} = V_{base} / I_{base} = V_{nominal} / I_{nominal}$)

- A reatância equivalente X é dada por:

$$X = X_{Cf}\left(\frac{1}{h^2} - 1\right) = X_{Cf}\,\frac{1 - h^2}{h^2}$$

Equacionamento – valores em p.u.

- Obtém-se X_{Lf} em função da corrente I_{f_pu} :

$$X_{Lf} = \frac{X_{Cf}}{h^2} = \frac{|X|}{(h^2 - 1)} = \frac{Z_{base}}{I_{f\_pu}(h^2 - 1)}$$

- O índice de mérito do indutor é:

$$Q_f = X_{Lf} / R_f$$

- E a resistência de perdas Rf:

$$R_f = \frac{X_{Lf}}{Q_f} = \frac{Z_{base}}{I_{f\_pu}(h^2 - 1)Q_f}$$

Equacionamento – valores em p.u.

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

$$X_{L\_rede} = X_{L\_rede\_pu} Z_{base}$$

- Pode-se reescrever a expressão da atenuação k por valores em p.u. e adimensionais:

$$k = \left| \frac{\dot{I}_{rede}(h\omega)}{\dot{I}_{carga}(h\omega)} \right| = \left| \frac{1}{\sqrt{1 + \left(hX_{L\_rede}/R_f\right)^2}} \right| = \left| \frac{1}{\sqrt{1 + \left(h(h^2 - 1)X_{L\_rede\_pu} Q_f I_{f\_pu}\right)^2}} \right|$$

Equacionamento – valores em p.u.

$$k = \left| \frac{\dot{I}_{rede}(h\omega)}{\dot{I}_{carga}(h\omega)} \right| = \left| \frac{1}{\sqrt{1 + \left(hX_{L\_rede} / R_f\right)^2}} \right| = \left| \frac{1}{\sqrt{1 + \left(h(h^2 - 1)X_{L\_rede\_pu} Q_f I_{f\_pu}\right)^2}} \right|$$

- A equação acima quantifica a atenuação do filtro de ordem h em função de:
  - índice de mérito do filtro (Qf);
  - da impedância da rede em pu ($X_{L\_rede\_pu}$);
  - da corrente fundamental no filtro (I_{F_pu});
- A utilização de valores de parâmetros relativos facilita a análise do filtro

Equacionamento – valores em p.u.

$$k=\left|\frac{\dot{I}_{rede}(h\omega)}{\dot{I}_{c\arg a}(h\omega)}\right|=\left|\frac{1}{\sqrt{1+\left(hX_{L\_rede}/R_f\right)^2}}\right|=\left|\frac{1}{\sqrt{1+\left(h(h^2-1)X_{L\_rede\_pu}Q_f I_{f\_pu}\right)^2}}\right|$$

- Consegue-se boa atenuação para:
  - valores elevados de $X_{L\_rede\_pu}$, o que pode ser 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.

Problemas na Aplicação de Filtros Passivos

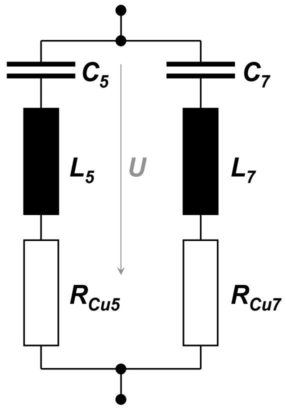
- Potência nominal:
  - Influência de outras cargas harmônicas;
  - Crescimento da planta;
  - Não se pode associar filtros “iguais” em paralelo devido a tolerâncias de sintonia.
- Filtro limitado a uma faixa restrita de harmônicas;
- Filtro sujeito a ressonâncias com outras cargas da planta.

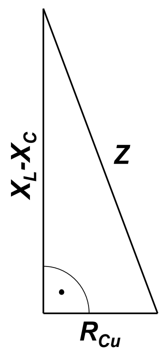
Exemplo de Cálculo de Filtro Passivo

Dimensioning a combined filter consisting of 2 acceptor circuits operating in parallel – input values

Harmonics in the mains voltage:		
No.	f	U_f
1	50Hz	239,49V
2	100Hz	0,00V
3	150Hz	12,00V
4	200Hz	0,00V
5	250Hz	8,00V
6	300Hz	0,00V
7	350Hz	4,00V
8	400Hz	0,00V
9	450Hz	3,00V
10	500Hz	0,00V
11	550Hz	2,50V
12	600Hz	0,00V
13	650Hz	2,00V
14	700Hz	0,00V
15	750Hz	1,50V
16	800Hz	0,00V
17	850Hz	1,00V
18	900Hz	0,00V
19	950Hz	0,50V
20	1000Hz	0,00V
21	1050Hz	0,00V
22	1100Hz	0,00V
23	1150Hz	0,00V
24	1200Hz	0,00V
25	1250Hz	0,00V
26	1300Hz	0,00V
27	1350Hz	0,00V

Ratings of your system and the filters:			
U	240,000	V	Rated TRMS mains voltage
f	50,000	Hz	Rated mains frequency
R_5	16,600	mΩ	Ohmic winding resistance of lower frequency reactor (usually tuned to or near the 5th harmonic)
L_5	1,587	mH	Inductance of lower frequency reactor (usually tuned to or near the 5th harmonic)
C_5	417,700	µF	Capacitance of lower frequency reactor (usually tuned to or near the 5th harmonic)
R_7	16,600	mΩ	Ohmic winding resistance of higher frequency reactor (usually tuned to or near the 7th harmonic)
L_7	0,810	mH	Inductance of higher frequency reactor (usually tuned to or near the 7th harmonic)
C_7	213,112	µF	Capacitance of higher frequency reactor (usually tuned to or near the 7th harmonic)
$f_{0(5)}$	195,479	Hz	Resonance frequency of the 5th order filter
$f_{0(7)}$	383,138	Hz	Resonance frequency of the 7th order filter





Planilha PassiveFilters.xls (autoria de Stephan Fassbinder)

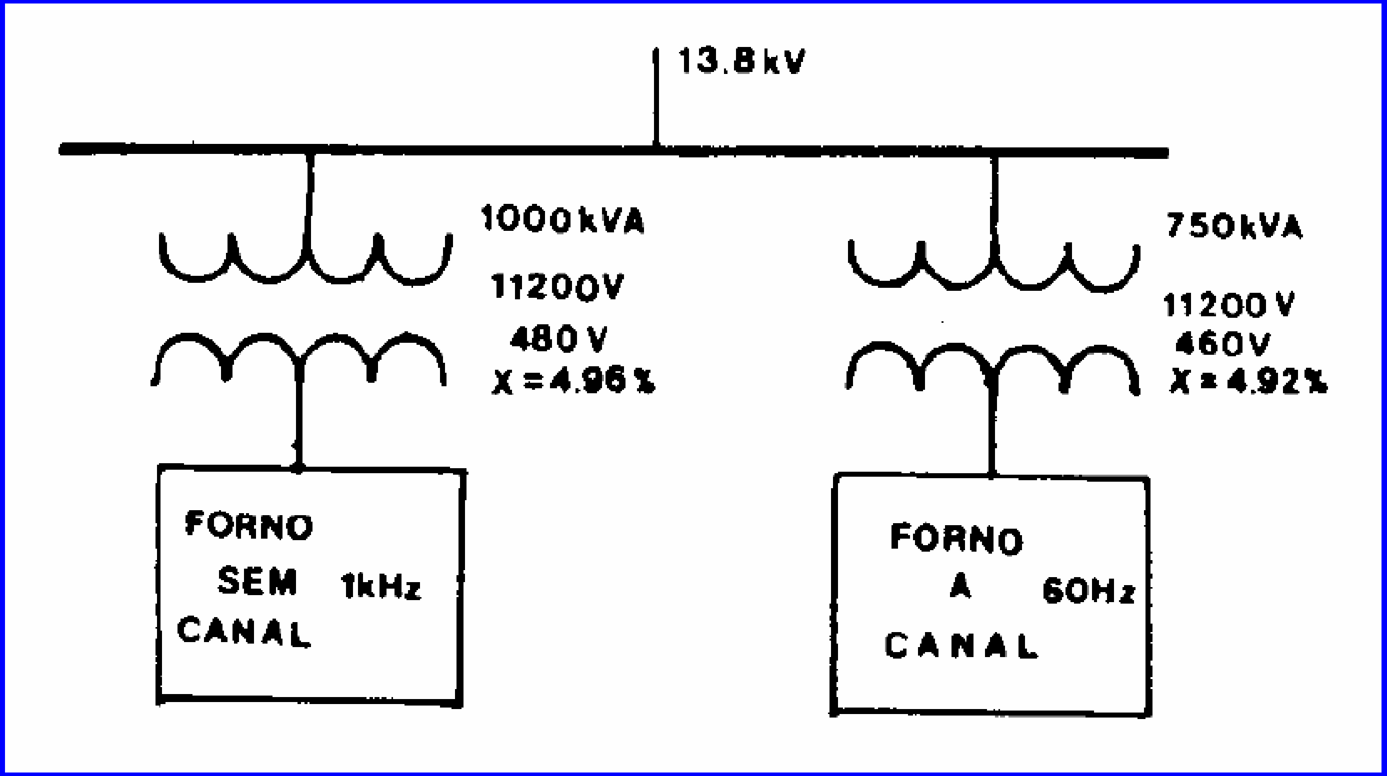
Exemplo de Cálculo de Filtros Passivos

- Muitas vezes se realiza uma “dessintonia” entre 5% a 10% para se evitar corrente excessiva na freqüência harmônica;
- O uso de indutores em série no capacitores de correção de fator de potência também é uma forma de “dessintonia”;
- O indutor do filtro shunt LC tem potência bem menor que o capacitor, pois o filtro LC apresenta reativos capacitivos à freqüência da rede:

$$C_{filtro\_equivalente}(\omega_{rede}) = \frac{C_f}{1 - L_f \cdot C_f \cdot \omega_{rede}^2}$$

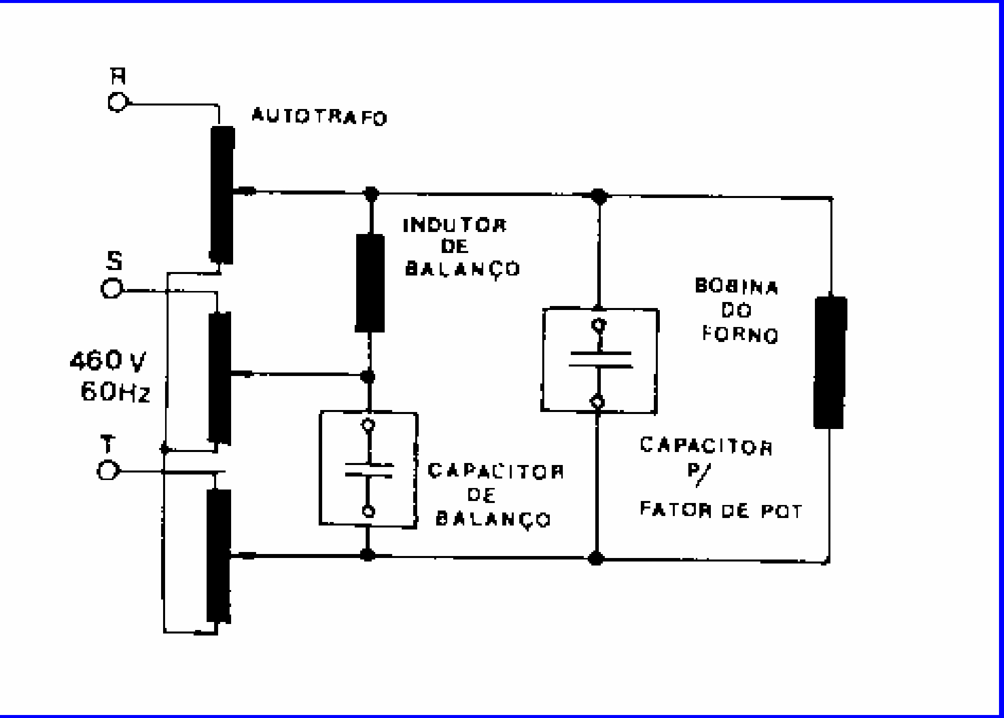
Exemplo de Ressonância

- Forno de indução a canal em uma planta com cargas geradoras de harmônicas



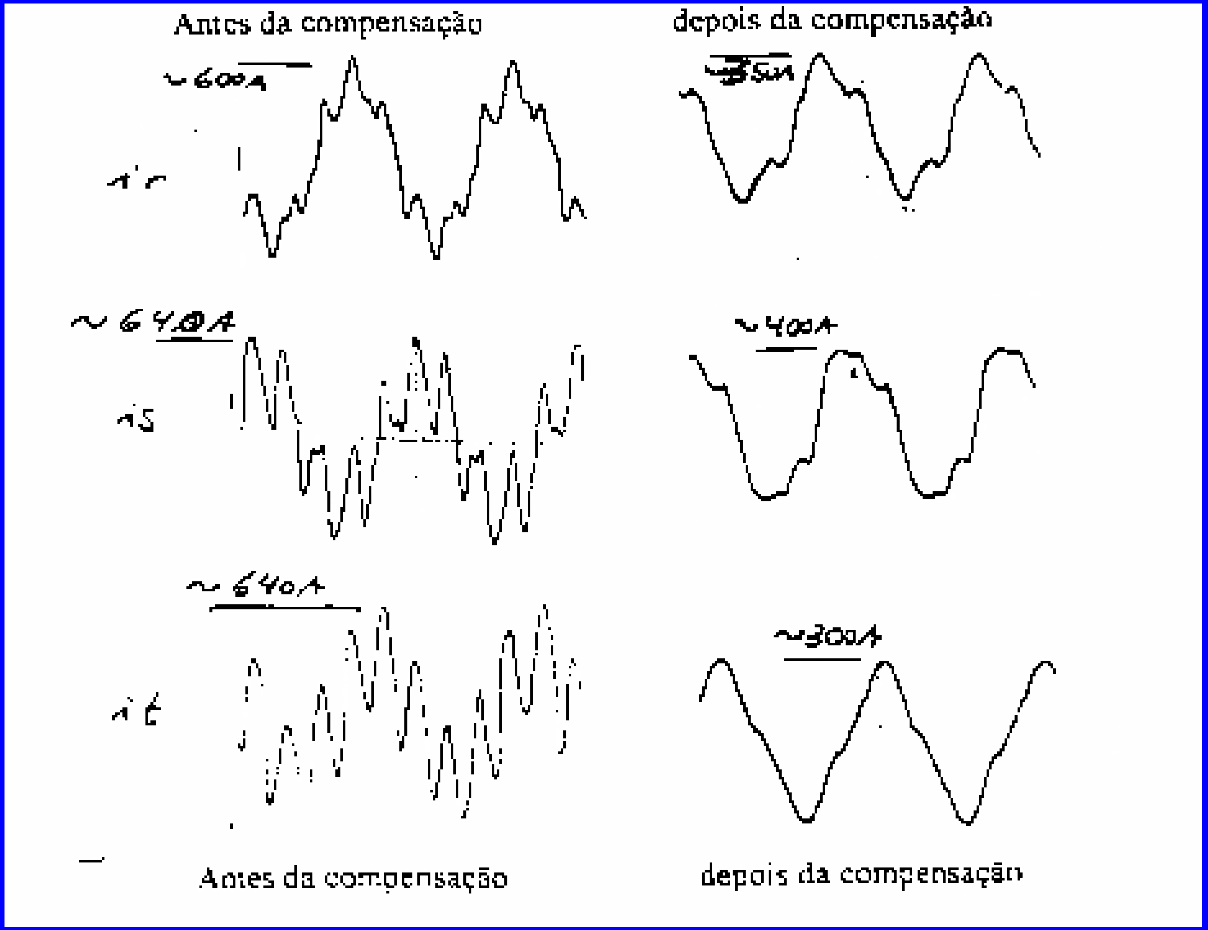
Exemplo de Ressonância

- Forno de indução a canal – esquema elétrico do circuito de balanceamento e correção de fator de potência



Exemplo de Ressonância

- Compensação das correntes do forno de indução a canal



Comparação entre filtro passivo e ativo

Filtro Passivo	Filtro Ativo
Baixo custo	Alto custo é decrescente
Robusto	Robustez depende de projeto
Projeto específico	Projeto mais genérico
Limitação de faixa filtrada	Faixa filtrada depende da dinâmica do conversor
Não seletivo	Seletivo
Pode gerar ressonâncias	Pode amortecer ressonâncias