GESTÃO DE ENERGIA ELÉCTRICA

João Martins (jf.martins@fct.unl.pt)

Faculdade de Ciências e Tecnologia

(MIEEC + MERCEUS)

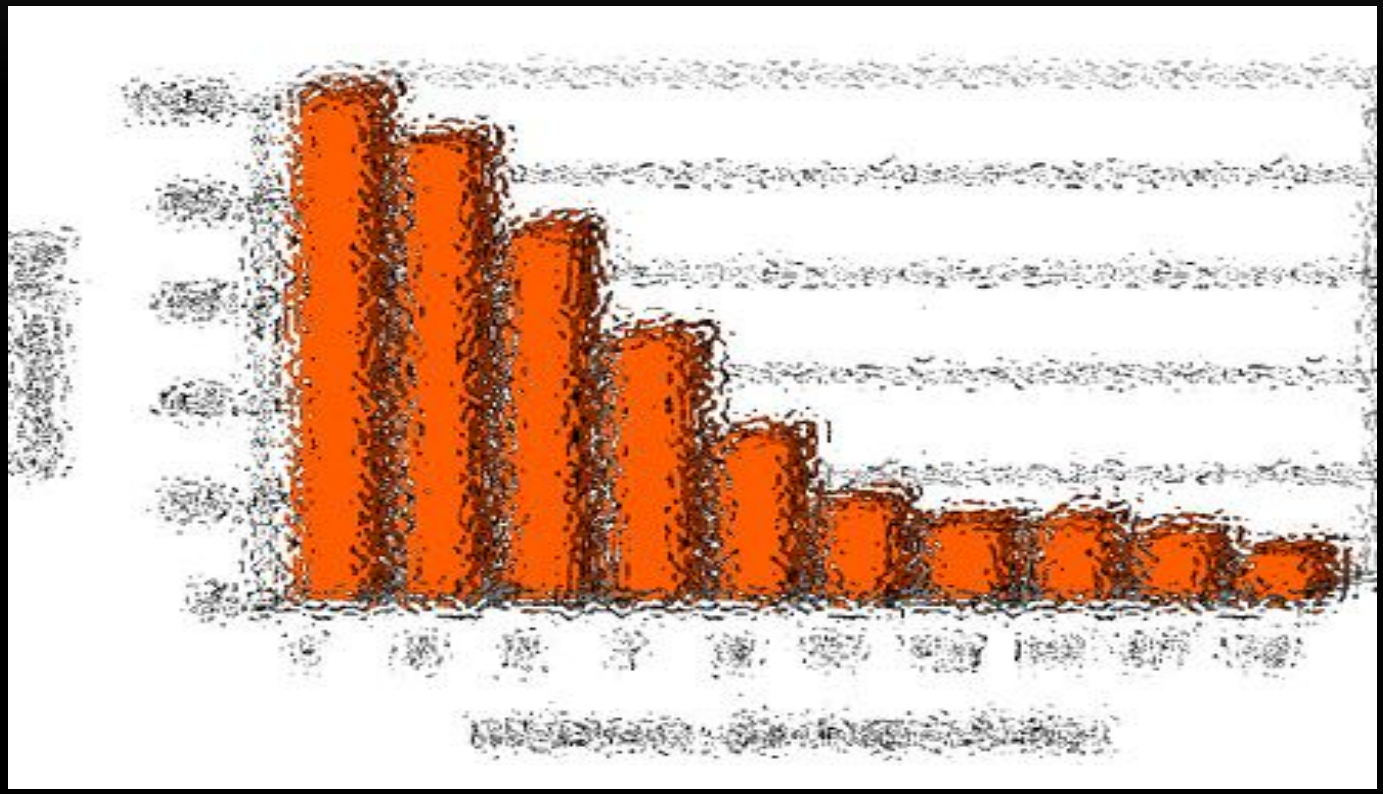
Qualidade da energia

- Harmónicas em sistemas de energia elétrica
- Correção do Fator de Potência
- Filtros para Correção do Fator de Potência

Objetivos

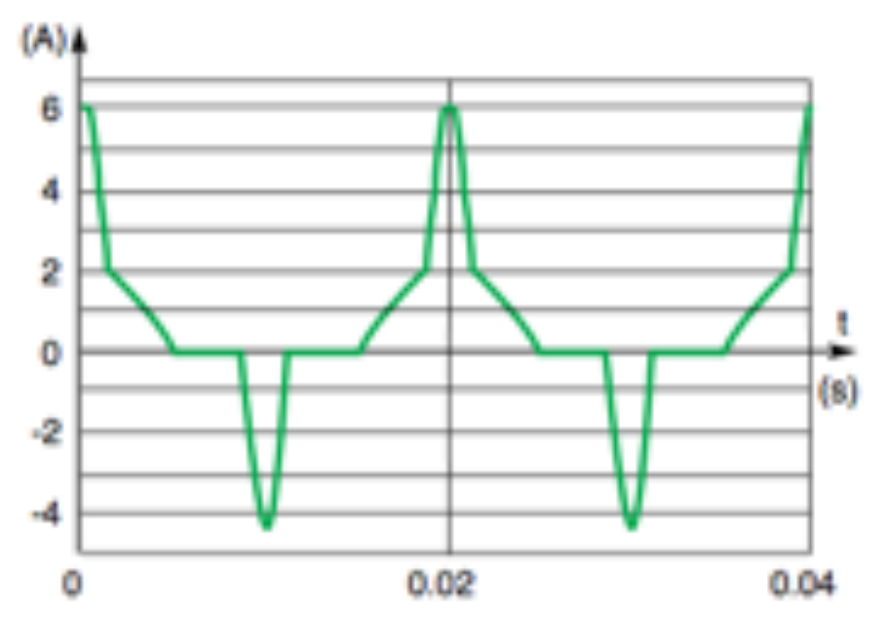
- Dimensionar sistemas de compensação do fator de potência
- Saber localizar sistemas de compensação do fator potencia
- Perceber o funcionamento de filtros passivos e ativos

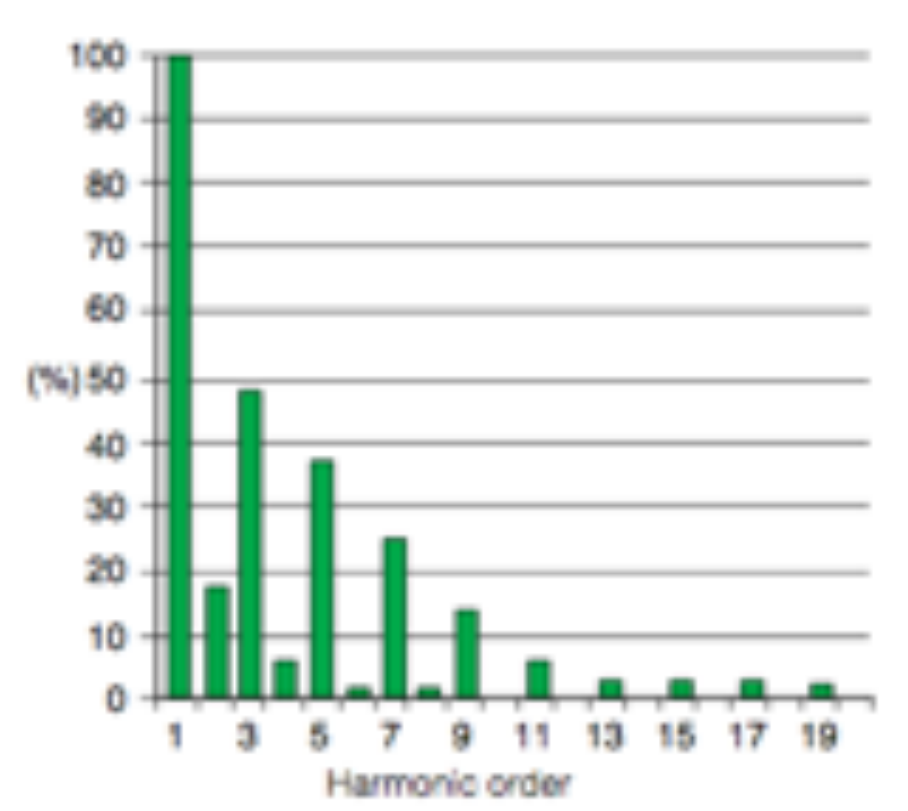
HARMÓNICAS EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA



PARTICULARIDADES DA ANÁLISE HARMÓNICA EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Considere-se uma qualquer carga não linear trifásica





Fonte: Electric Schneider

PARTICULARIDADES DA ANÁLISE HARMÓNICA EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Cargas não lineares simétricas

A simetria nas correntes implica que => $i(\omega t + \pi) = -i(\omega t)$

As harmónicas PARES são nulas !!!

PARTICULARIDADES DA ANÁLISE HARMÓNICA EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Considere-se, por absurdo, que existe uma harmónica par (por exemplo de segunda ordem)

$$i(\omega t) = I_1 sin(\omega t) + I_2 \sin(2\omega t)$$
$$i(\omega t + \pi) = I_1 sin(\omega t + \pi) + I_2 \sin(2\omega t + 2\pi) =$$
$$= -I_1 sin(\omega t) + I_2 \sin(2\omega t)$$

$$i(\omega t + \pi) = -i \sin(\omega t)$$ Se e só se I_2 fôr zero !

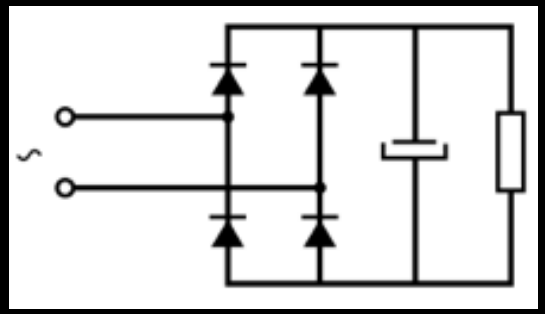
O raciocínio anterior pode ser estendido a todas as harmónicas pares.

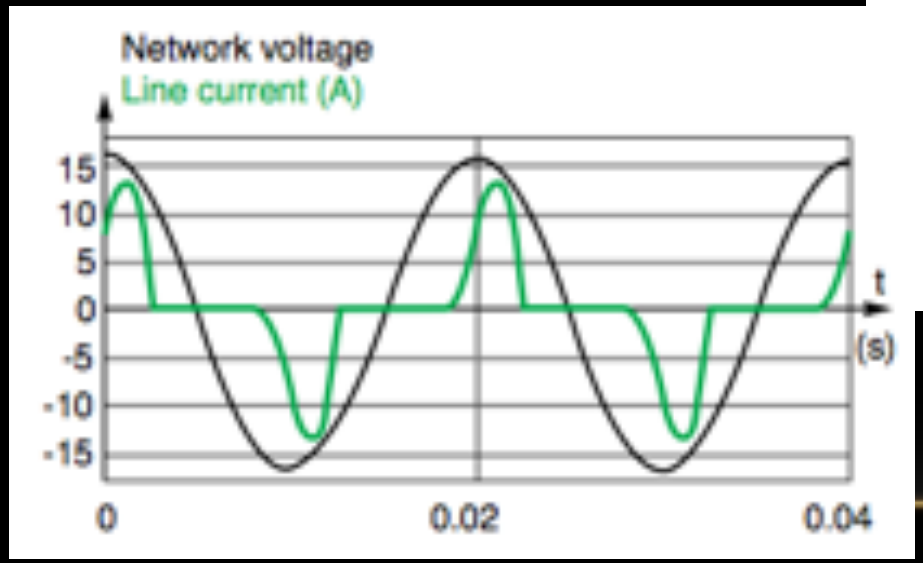
Cargas não lineares simétricas não geram harmónicas pares

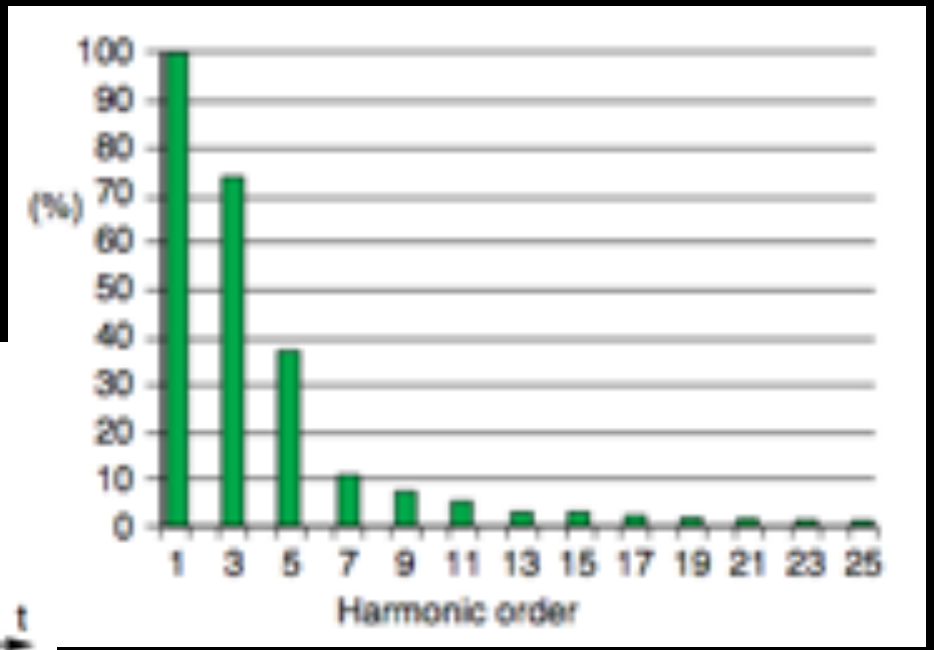
Cargas monofásicas não geram harmónicas pares

PARTICULARIDADES DA ANÁLISE HARMÓNICA EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Exemplo: Rectificador monofásico







Fonte: Electric Schneider

PARTICULARIDADES DA ANÁLISE HARMÓNICA EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Cargas trifásicas simétricas

Considere-se uma carga trifásica, simétrica, balanceada, não linear, sem neutro.

Considere-se a existência de 3ª harmónica

$$\begin{cases} i_{R3} = I_3 \sin(3\omega t) \\ i_{S3} = I_3 \sin\left(3\left(\omega t - {}^{2\pi}/_{3}\right)\right) = I_3 \sin(3\omega t - 4\pi) = i_{R3} \\ i_{T3} = I_3 \sin\left(3\left(\omega t - {}^{4\pi}/_{3}\right)\right) = I_3 \sin(3\omega t - 4\pi) = i_{R3} \end{cases}$$

$$i_{R3} = i_{S3} = i_{T3}$$

PARTICULARIDADES DA ANÁLISE HARMÓNICA EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

As 3ª harmónicas de cada fase são iguais $i_{R3} = i_{S3} = i_{T3}$

Se não existir neutro $i_R + i_S + i_T = 0 \Leftrightarrow i_{R3} + i_{S3} + i_{T3} = 0$

Logo, tal só é possível se cada componente for nula

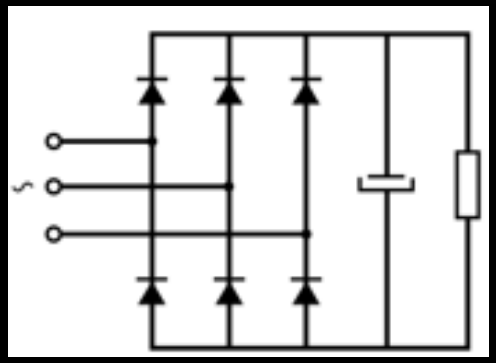
Sistemas trifásicos balanceados e simétricos NÃO produzem 3ª harmónicas.

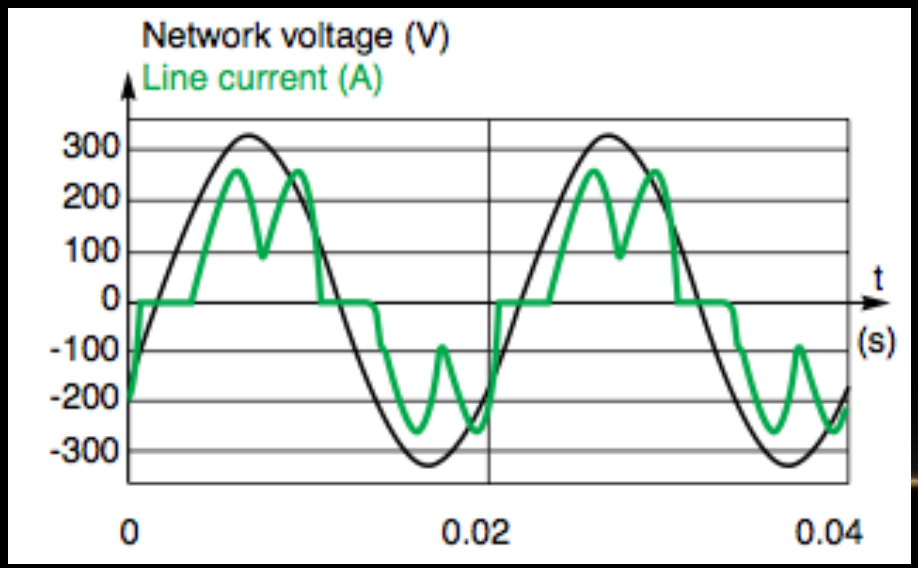
Nem todas as que forem múltiplas de 3…

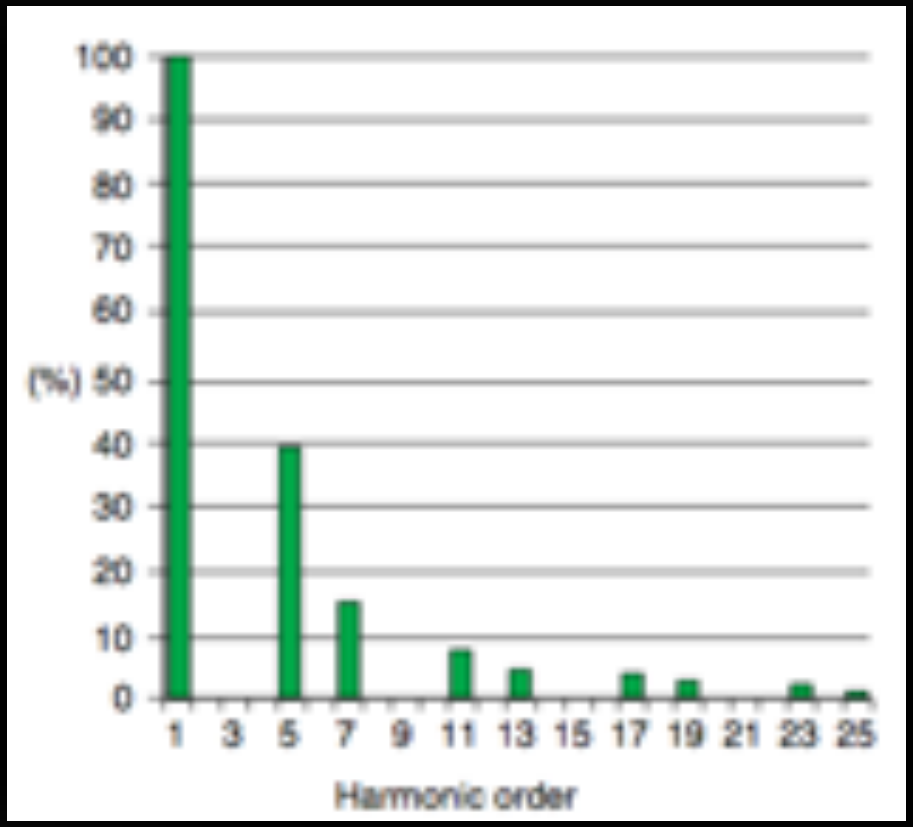
Só existem as harmónicas 5, 7, 11, 13… (6k+1)

PARTICULARIDADES DA ANÁLISE HARMÓNICA EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Exemplo: Rectificador trifásico





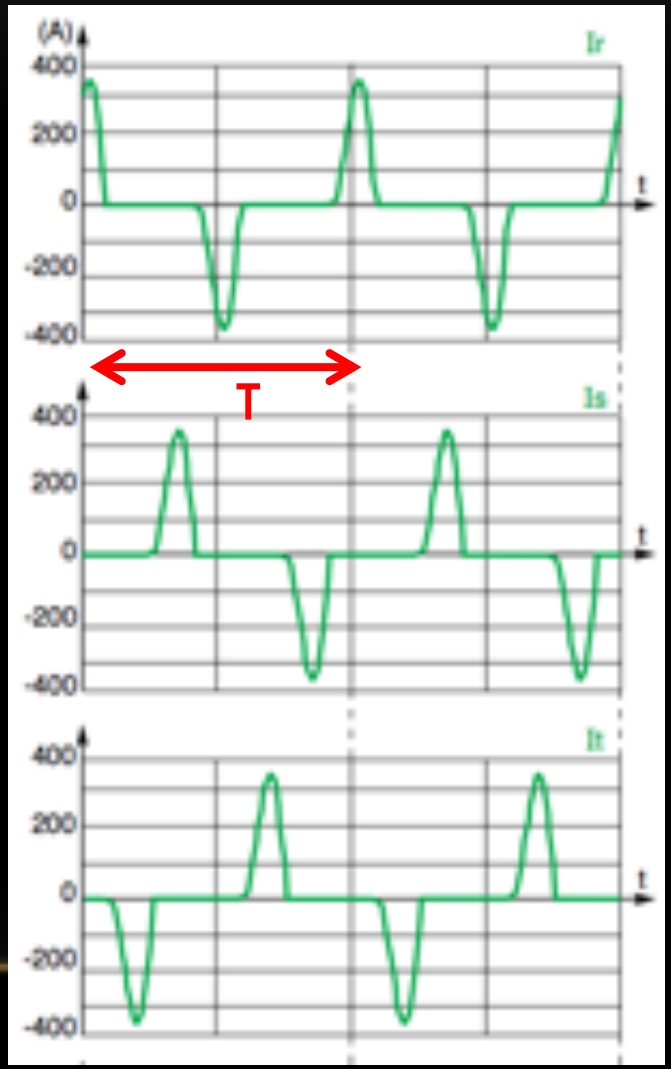


Fonte: Electric Schneider

PARTICULARIDADES DA ANÁLISE HARMÓNICA EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Corrente de neutro em presença de harmónicas

Considere-se uma carga trifásica simétrica (que se sabe NÃO ter harmónicas pares) com as seguintes correntes

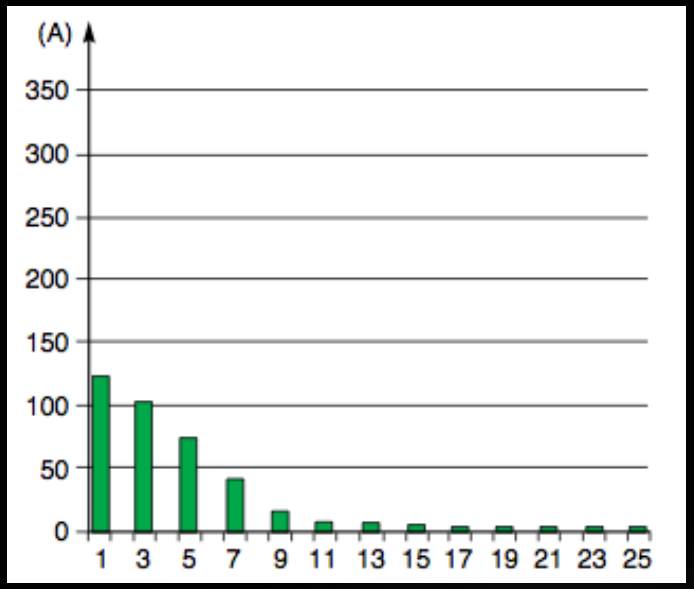


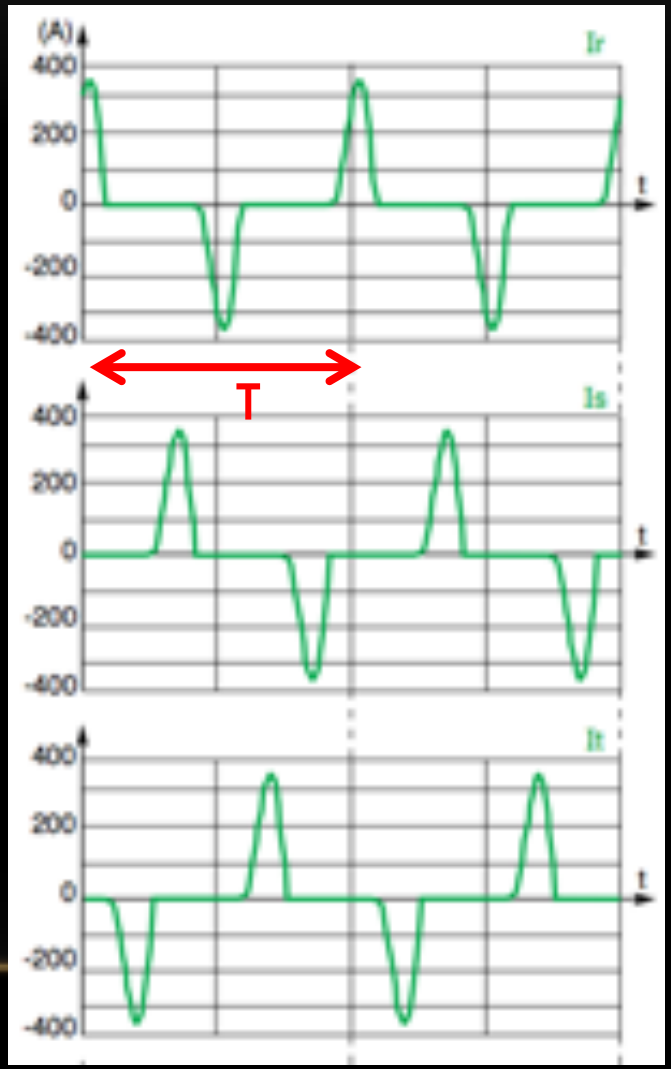
Fonte: Electric Schneider

PARTICULARIDADES DA ANÁLISE HARMÓNICA EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Corrente de neutro em presença de harmónicas

O espectro destas correntes é o seguinte



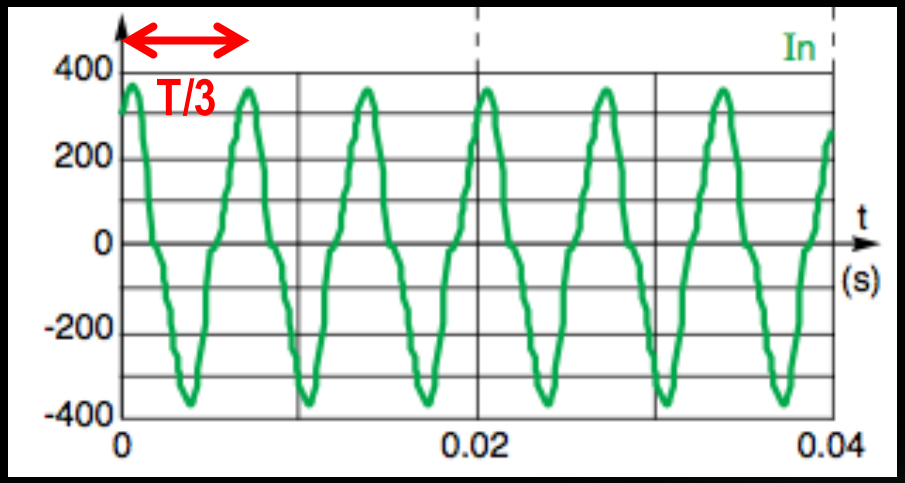


Fonte: Electric Schneider

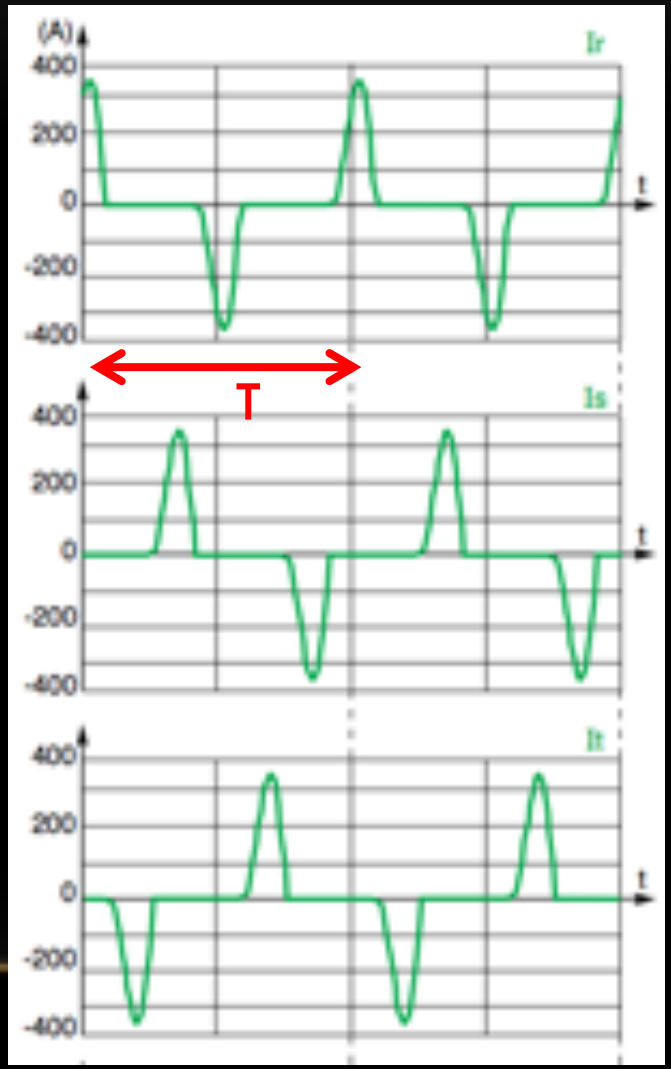
PARTICULARIDADES DA ANÁLISE HARMÓNICA EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Corrente de neutro em presença de harmónicas

O soma destas correntes é a seguinte



Onde circula esta corrente?

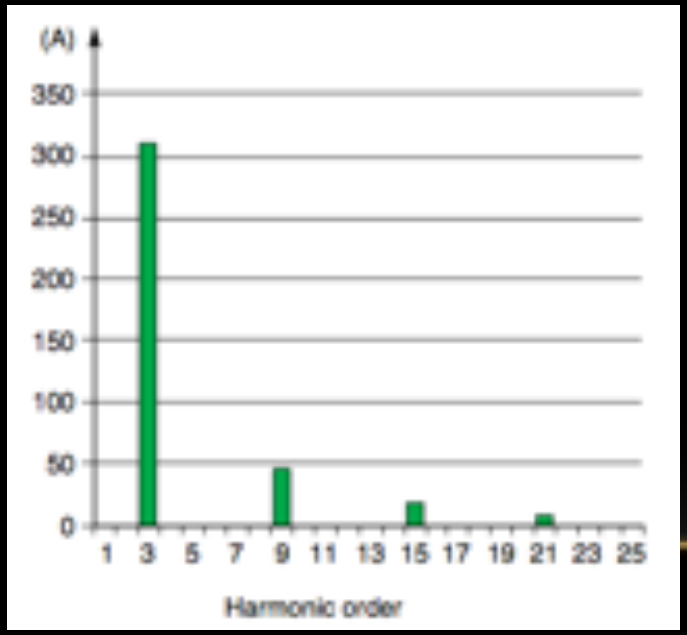


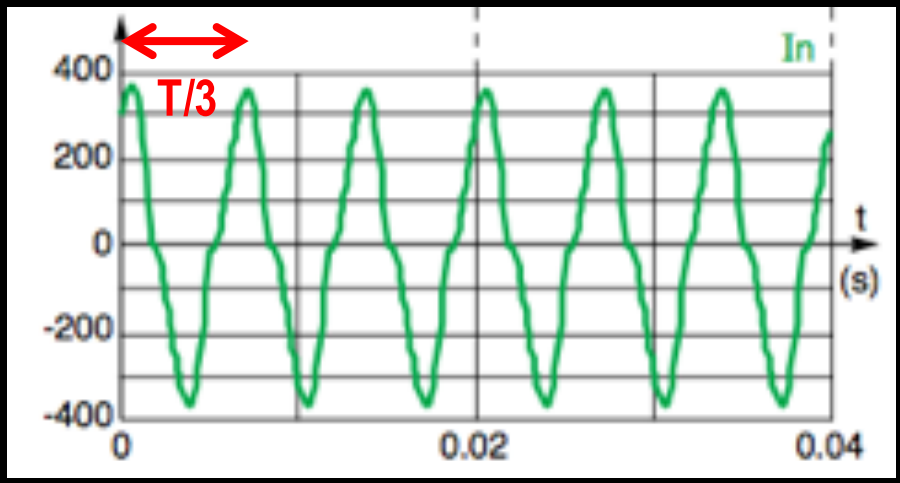
Fonte: Electric Schneider

PARTICULARIDADES DA ANÁLISE HARMÓNICA EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Corrente de neutro em presença de harmónicas

A soma das correntes de fase circula no neutro, que apresenta o seguinte espectro





Fonte: Electric Schneider

PARTICULARIDADES DA ANÁLISE HARMÓNICA EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Corrente de neutro em presença de harmónicas

As harmónicas ímpares, não múltiplas de 3, vão cancelar-se (não produzindo corrente de neutro)

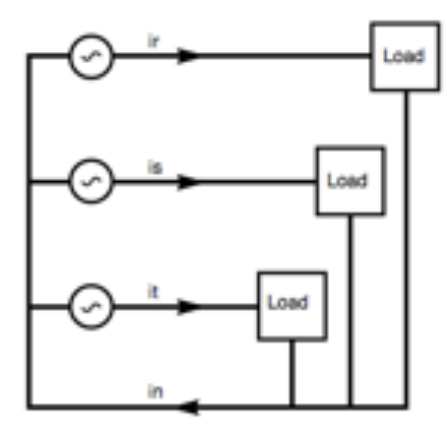
O valor eficaz da corrente de neutro é muito maior do que nas fases ($\sqrt{3}$ vezes maior)

$$I_{Nef} = \sqrt{\frac{1}{T/3}\int_0^{T/3} i_N^2 dt} = \sqrt{3}\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^{T/3} i_N^2 dt} = \sqrt{3}\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^{T} i_R^2 dt} = \sqrt{3} I_{Ref}$$

PARTICULARIDADES DA ANÁLISE HARMÓNICA EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Corrente de neutro em presença de 3ª harmónica

As harmónicas múltiplas de 3, num sistema balanceado simétrico e não linear, são iguais



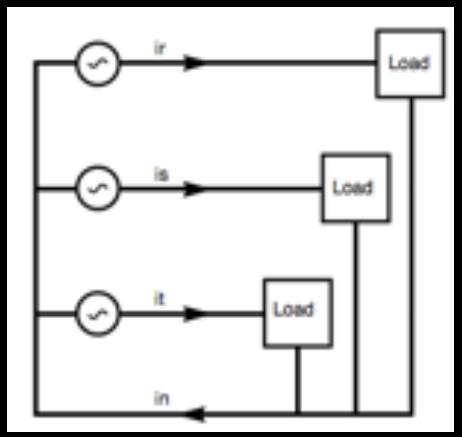
$$i_{R3} = i_{S3} = i_{T3}$$

$$i_{N3} = i_{R3} = i_{S3} = i_{T3} = 3i_{R3}$$

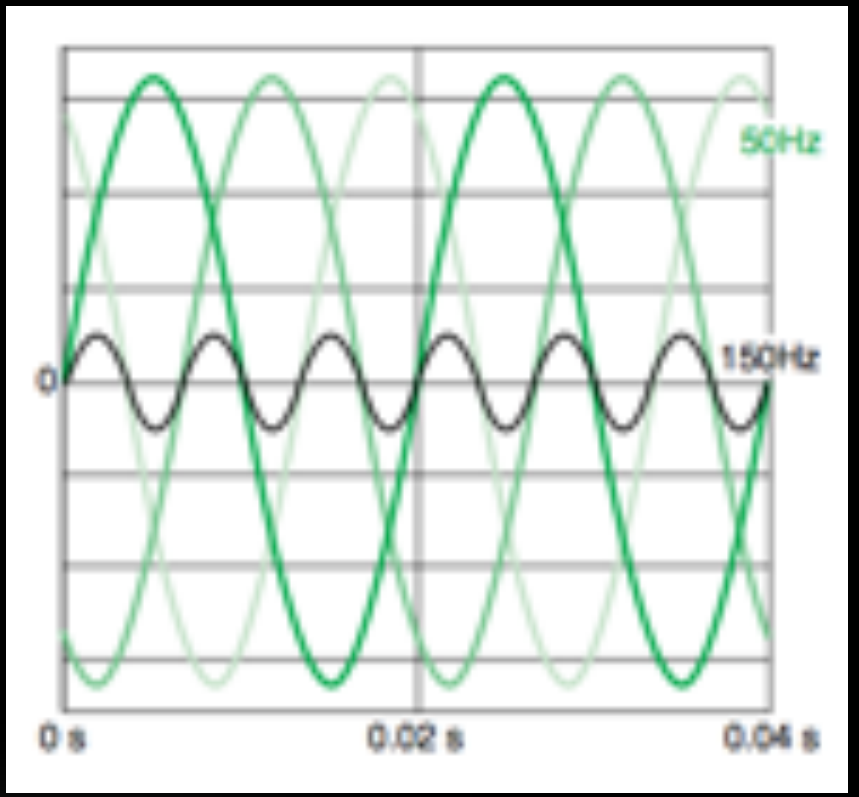
Todas as harmónicas não múltiplas de 3 se cancelam

PARTICULARIDADES DA ANÁLISE HARMÓNICA EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Corrente de neutro em presença de 3ª harmónica



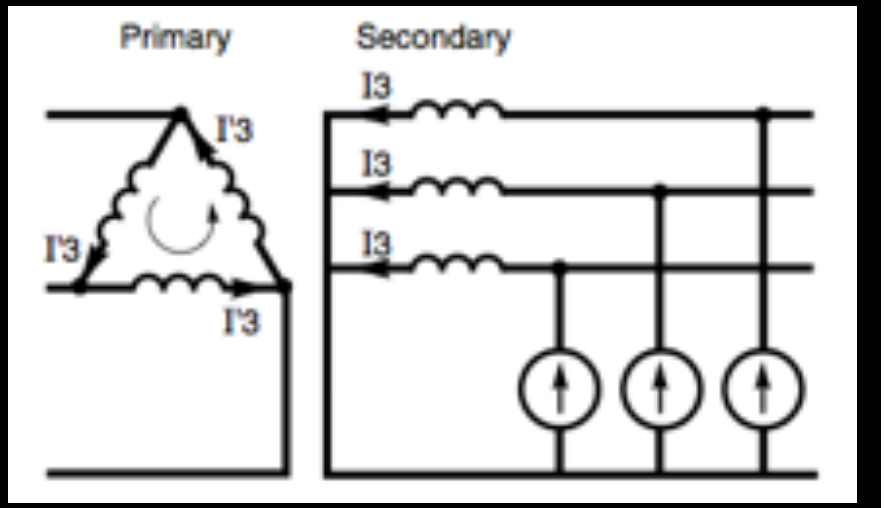
Fonte: Electric Schneider



PARTICULARIDADES DA ANÁLISE HARMÓNICA EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Soluções para o problema da 3ª harmónica

- Utilizar um neutro para cada fase
- Sobredimensionar o condutor de neutro (pelo menos 2x)
- Utilizar transformadores D/Y
  - Como, em sistemas trifásicos, as harmónicas múltiplas de 3 são iguais em cada fase:
  - Somam-se no neutro
  - Continuam iguais no primário
  - Não saem do triângulo, cancalando-se em cada nó

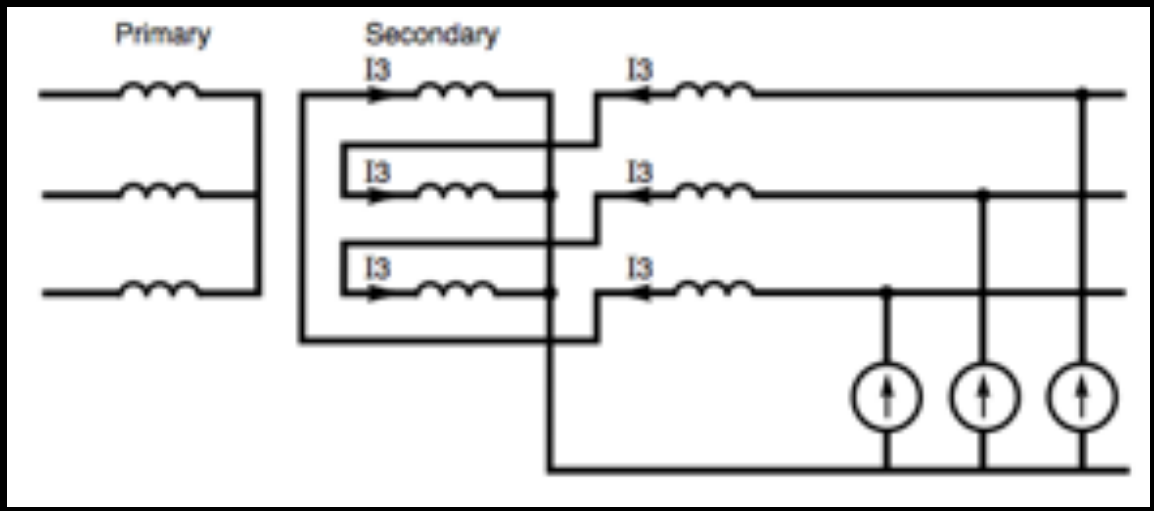


Fonte: Electric Schneider

PARTICULARIDADES DA ANÁLISE HARMÓNICA EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Soluções para o problema da 3ª harmónica

- Utilizar transformadores Y/Z (zig-zag)
  - As harmónicas múltiplas de 3 anulam-se em cada ramo do circuito magnético

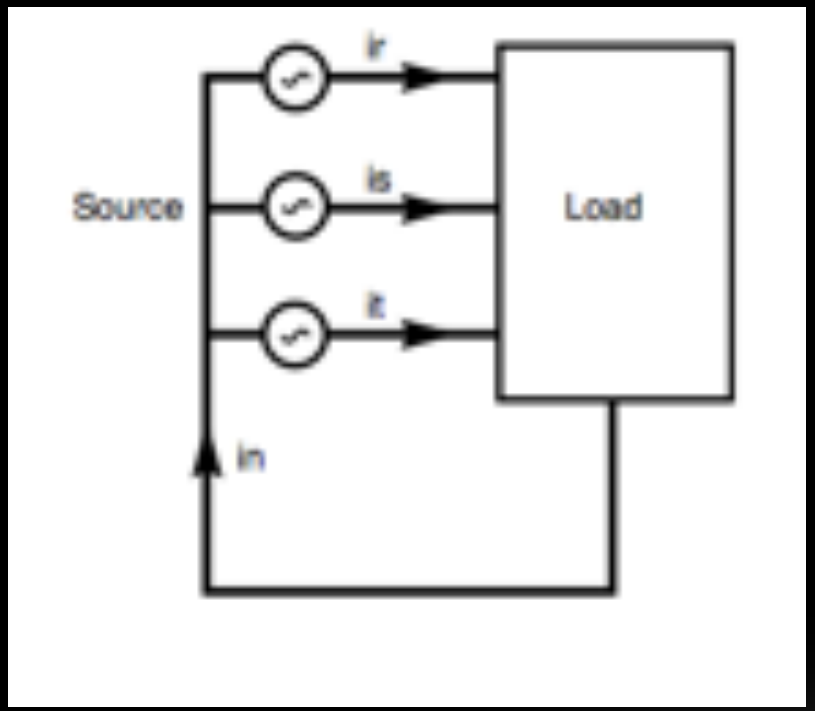


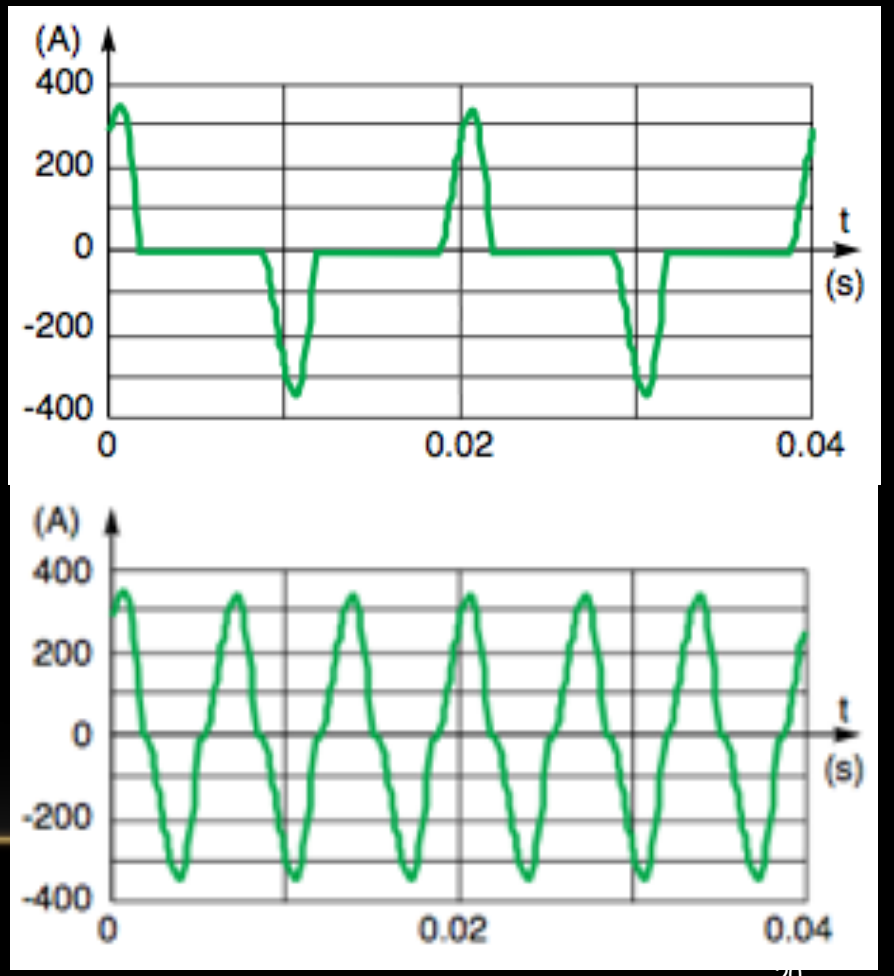
Fonte: Electric Schneider

PARTICULARIDADES DA ANÁLISE HARMÓNICA EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Soluções para o problema da 3ª harmónica

- Utilizar filtros (no neutro)



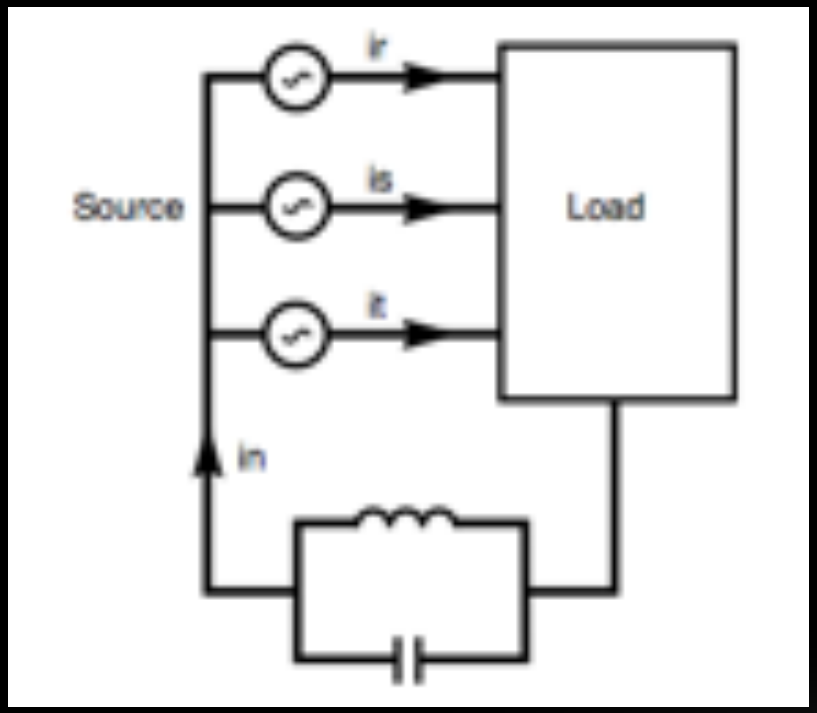


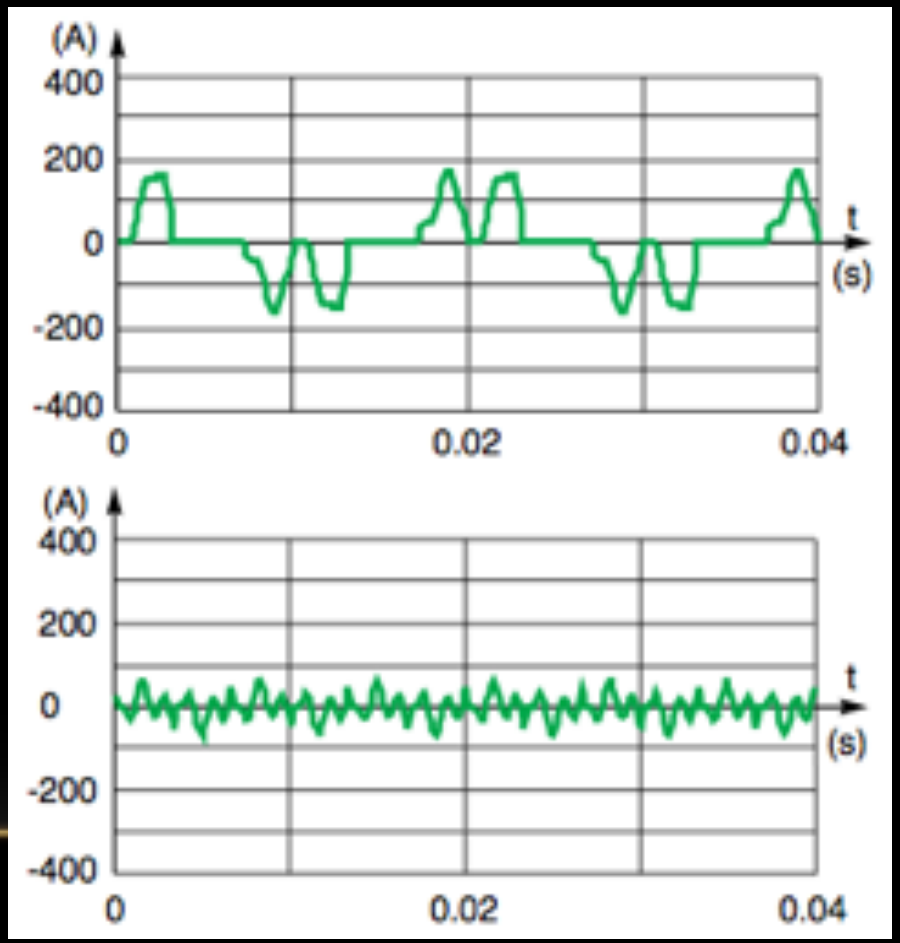
Fonte: Electric Schneider

PARTICULARIDADES DA ANÁLISE HARMÓNICA EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Soluções para o problema da 3ª harmónica

- Utilizar filtros (no neutro)





Fonte: Electric Schneider

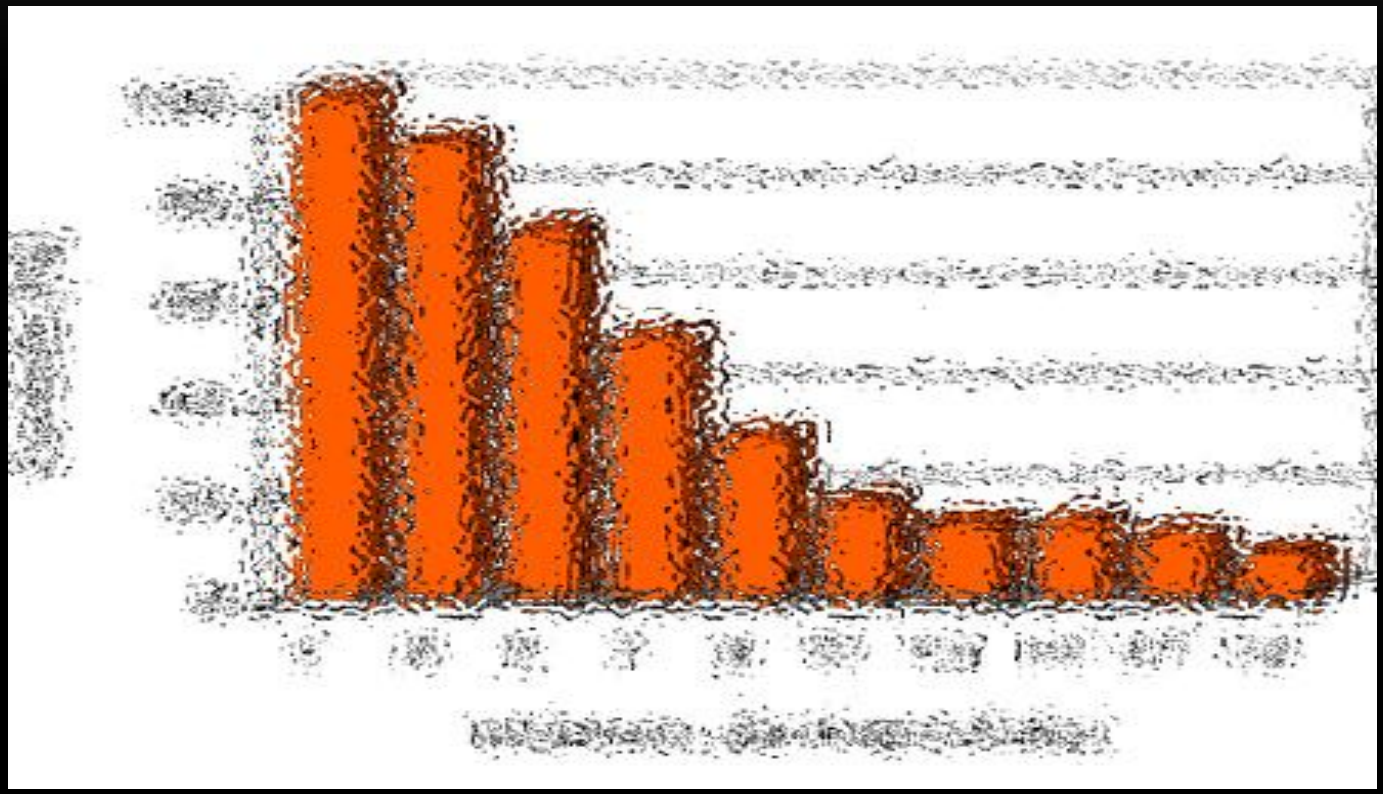
PARTICULARIDADES DA ANÁLISE HARMÓNICA EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Para cada período de uma semana, 95% dos valores eficazes médios de 10 minutos de cada tensão harmónica não devem exceder os limites definidos na Tabela. A THD da tensão de alimentação, incluindo os harmónicos até à ordem 40, não deve ser superior a 8%.

Tensões harmónicas ímpares				Tensões harmónicas pares	
Não múltiplas de 3		Múltiplas de 3			
Ordem h	Tensão relativa (%)	Ordem h	Tensão relativa (%)	Ordem h	Tensão relativa (%)
5	6,0	3	5,0	2	2,0
7	5,0	9	1,5	4	1,0
11	3,5	15	0,5	6 ... 24	0,5
13	3,0	21	0,5		
17	2,0				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

Fonte: EDP, Manual da qualidade da energia eléctrica

CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA



RESSONÂNCIA EM SISTEMAS DE ENERGIA

O que é a ressonância?

Ocorre quando a impedância dos elementos capacitivos iguala a impedância dos elementos indutivos

$$Z_L = \omega L = 2\pi f L$$

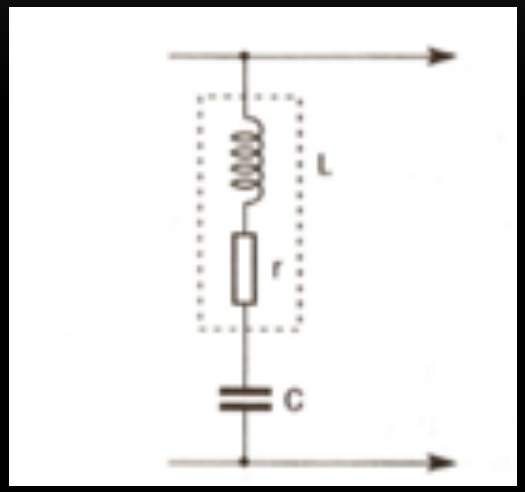
$$Z_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$$

$$2\pi f_R L = \frac{1}{2\pi f_R C}$$

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$(\omega^2 LC = 1)$$

RESSONÂNCIA SÉRIE



$$Z = Z_L - Z_C$$

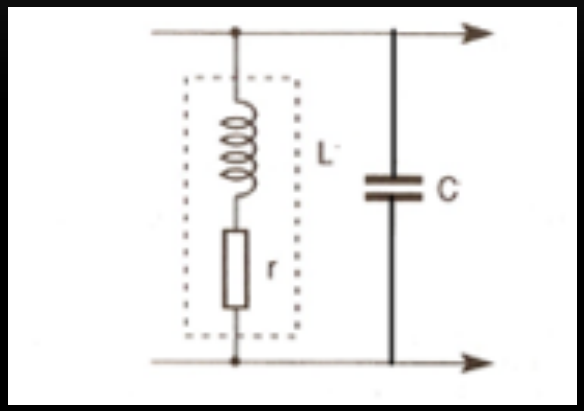
$$Z = \frac{\omega^2 LC - 1}{\omega C}$$

$$\omega_R = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Na ressonância a impedância é quase nula.

Isto origina sobrecorrentes à frequência da ressonância.

RESSONÂNCIA PARALELA



$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{Z_L} - \frac{1}{Z_C}$$

$$Z = \frac{\omega L}{1 - \omega^2 LC}$$

$$\omega_R = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Na ressonância a impedância é muito elevada.

Isto origina sobretensões à frequência da ressonância que distorcem a tensão de entrada

CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

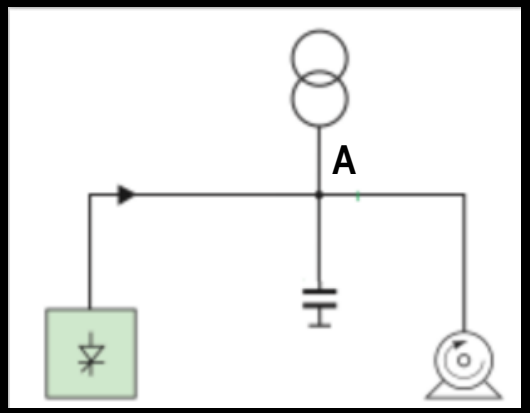
Qual o caracter das instalações de utilização de energia elétrica?

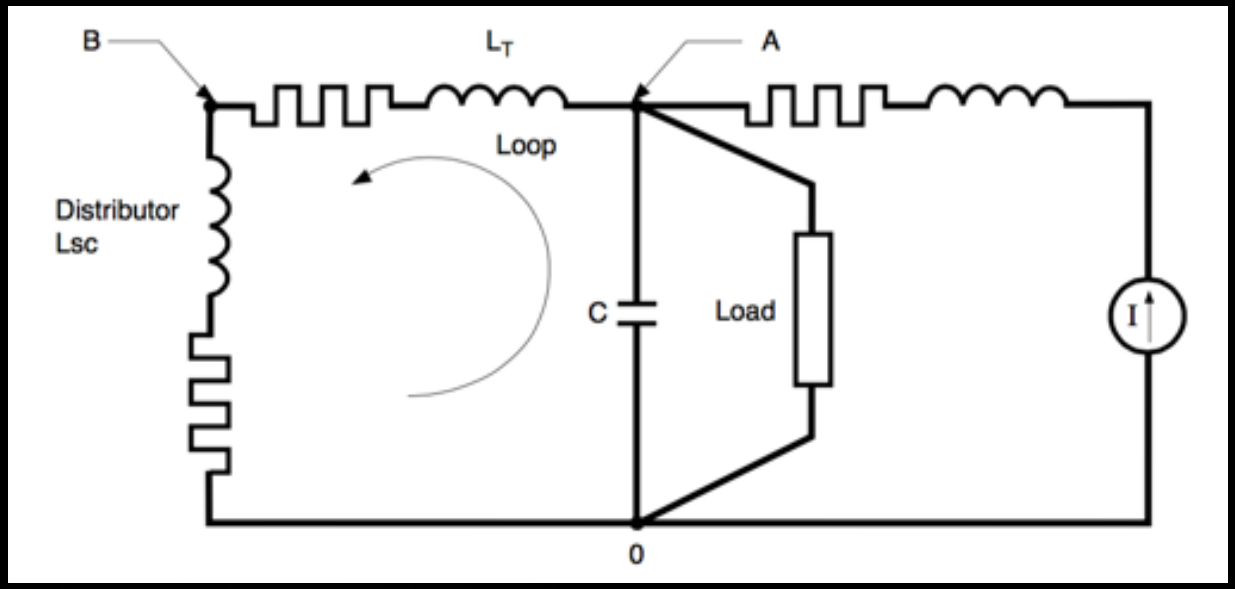
- Indutivo
- Existe o perigo de ressonância com os bancos de condensadores utilizados para compensação do fator de potência
- Os condensadores são elementos lineares, pelo que não geram harmónicas. A ordem da harmónica de ressonância entre o banco de condensadores e o sistema é dada por

$$h_0 = \sqrt{\frac{S_{CC}}{Q_C}}$$

CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

As componentes harmónicas (correntes) injetadas pelas cargas não lineares, comportam-se como uma fonte de corrente em paralelo com a rede, as cargas e o banco de condensadores.



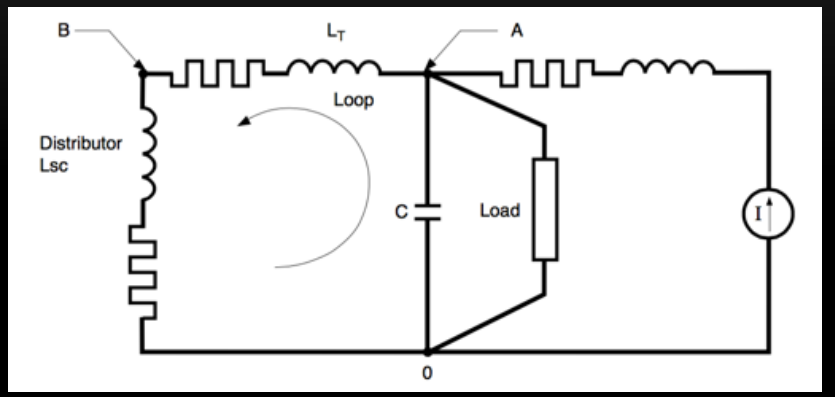


CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

$$Q = \frac{U^2}{X}$$

$$Q_L = \frac{U^2}{\omega L}$$

$$Q_C = U^2 \omega C$$



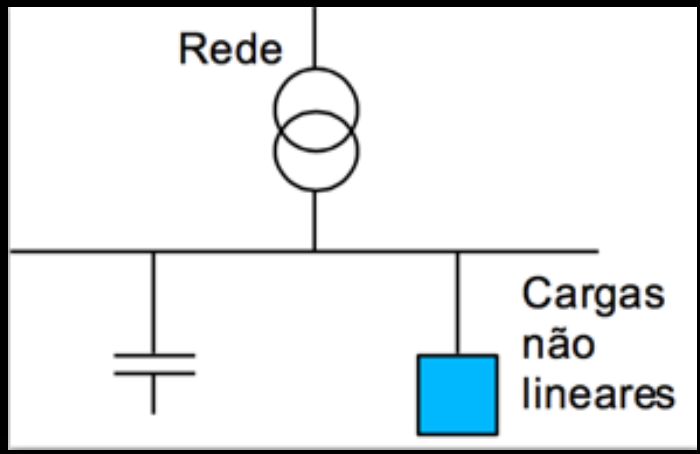
$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{U^2}{\omega Q_L}\frac{Q_C}{U^2\omega}}} = \frac{f_0}{\sqrt{\frac{Q_C}{Q_L}}}$$

$$\frac{f_R}{f_0} = \sqrt{\frac{Q_L}{Q_C}}$$

CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

Admitindo que a indutância em causa representa o caracter indutivo da rede de alimentação de energia (impedância de curto-circuito), a potência reativa de caracter indutivo pode ser considerada como a potência de curto-circuito a montante do banco de condensadores.

$$\frac{f_R}{f_0} = h_0 = \sqrt{\frac{S_{CC}}{Q_C}}$$



CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

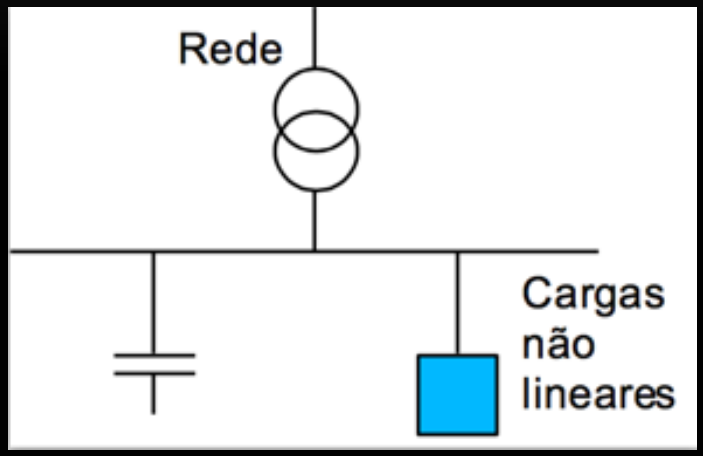
Exemplo

Transformador

- 10/0,4 kV
- S=1000 kVA
- Ucc=10%
- 50Hz

Bateria de condensadores

- Qc=136 KVAr
- Cargas
- P=490kW

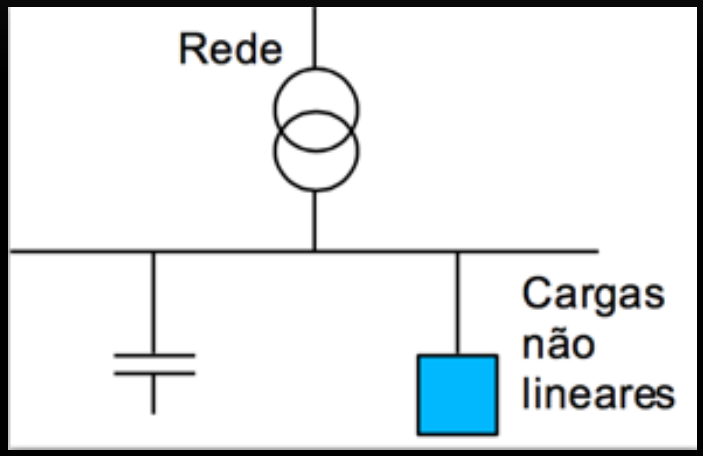


CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

Exemplo

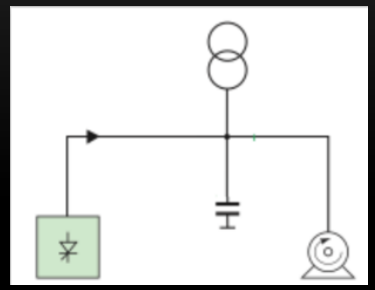
$$S_{CC} = \frac{1}{0{,}1} = 10pu = 10MVA$$

$$f_R = f_0 \sqrt{\frac{S_{CC}}{Q_C}} = 50 \sqrt{\frac{10000}{136}} = 429Hz$$



- Este valor está muito perto da 9ª harmónica (450 Hz).
- Necessário analisar a instalação para verificar se a 9ª harmónica está presente na rede.
- Nesse caso deve reajustar-se a bateria de condensadores.

CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA



Considerando que o sistema de compensação do fator de potência é efetuada por bancos de condensadores…

- A presença de harmónicas pode resultar num valor elevado de corrente nos condensadores (devido às sobretensões resultantes da ressonância paralela)…
- É habitual dimensioná-los para valores de corrente estipulada 30% superiores. Todos os restantes elementos (ligadores, protecções…) devem ser sobredimensionados em 30-50%.

CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

Onde se devem colocar as cargas não lineares geradoras de harmónicas?

- O mais perto possível da fonte de alimentação, pois a potência de curto-circuito é mais elevada, reduzindo o problema das harmónicas
- Uma outra solução (cara) será considerar um transformador para as cargas não lineares
- As cargas não lineares devem estar o mais possível afastadas das cargas lineares

CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

- Por vezes é difícil conhecer com exactidão o valor da impedância de curto-circuito a montante. Sendo que este valor poderá variar ao longo do tempo.
- Como a frequência de ressonância depende deste valor, é importante estabilizá-la num valor que não corresponda a nenhuma das componentes harmónicas presentes.
- Isto pode ser feito colocando uma **indutância em série** com o banco de condensadores

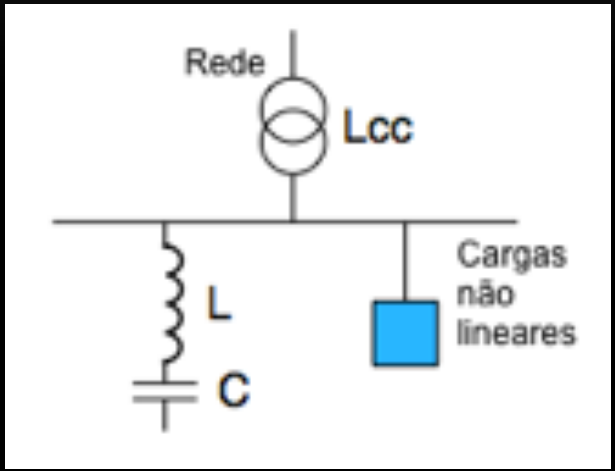
CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

- Antes

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{CC}C}}$$

- Depois

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_{CC}+L)C}}$$

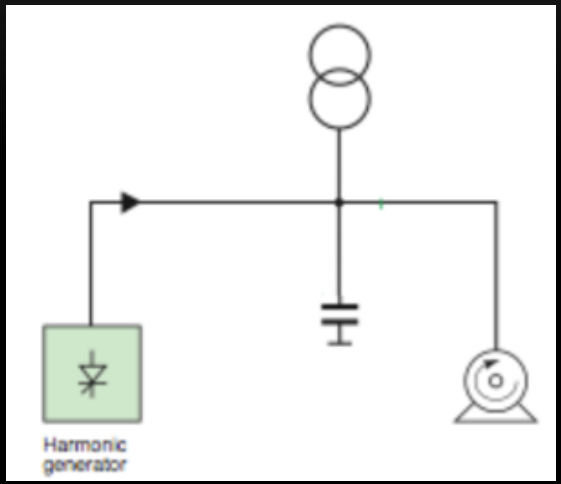


- Como Lcc<<L a frequência de ressonância é menos dependente da impedância de curto-circuito e fica sujeita a menores variações

CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

Exemplo

- Scc/Qc=8,6 => h0=2,93
- f0=2,93x50=146,5Hz



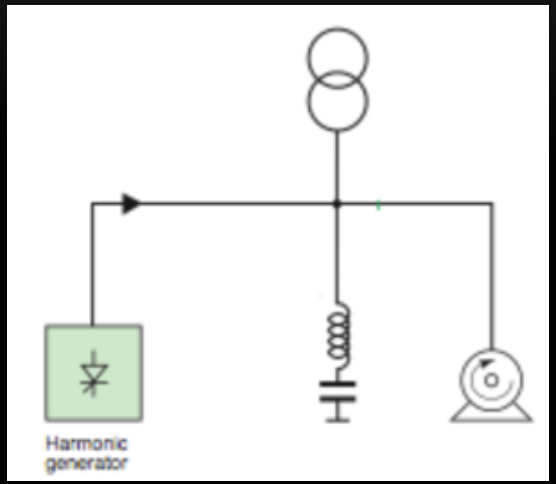
Neste caso, a frequência de ressonância está muito perto da 3ª harmónica, o que pode ser perigoso.

Adicionar uma indutância em série, por forma a que a frequência natural dessa associação fique próximo dos 190Hz.

CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

Exemplo

- h0=f0/50=190/50=3,8



190Hz situa-se sensivelmente entre a 3ª e a 5ª harmónicas

A adição da indutância aumenta a corrente no condensador em cerca de 7-8%, pelo que é habitual utilizar condensadores de 440V em sistemas de 400V.

INDUTÂNCIA ANTI-HARMÓNICA PARA BANCOS DE CONDENSADORES

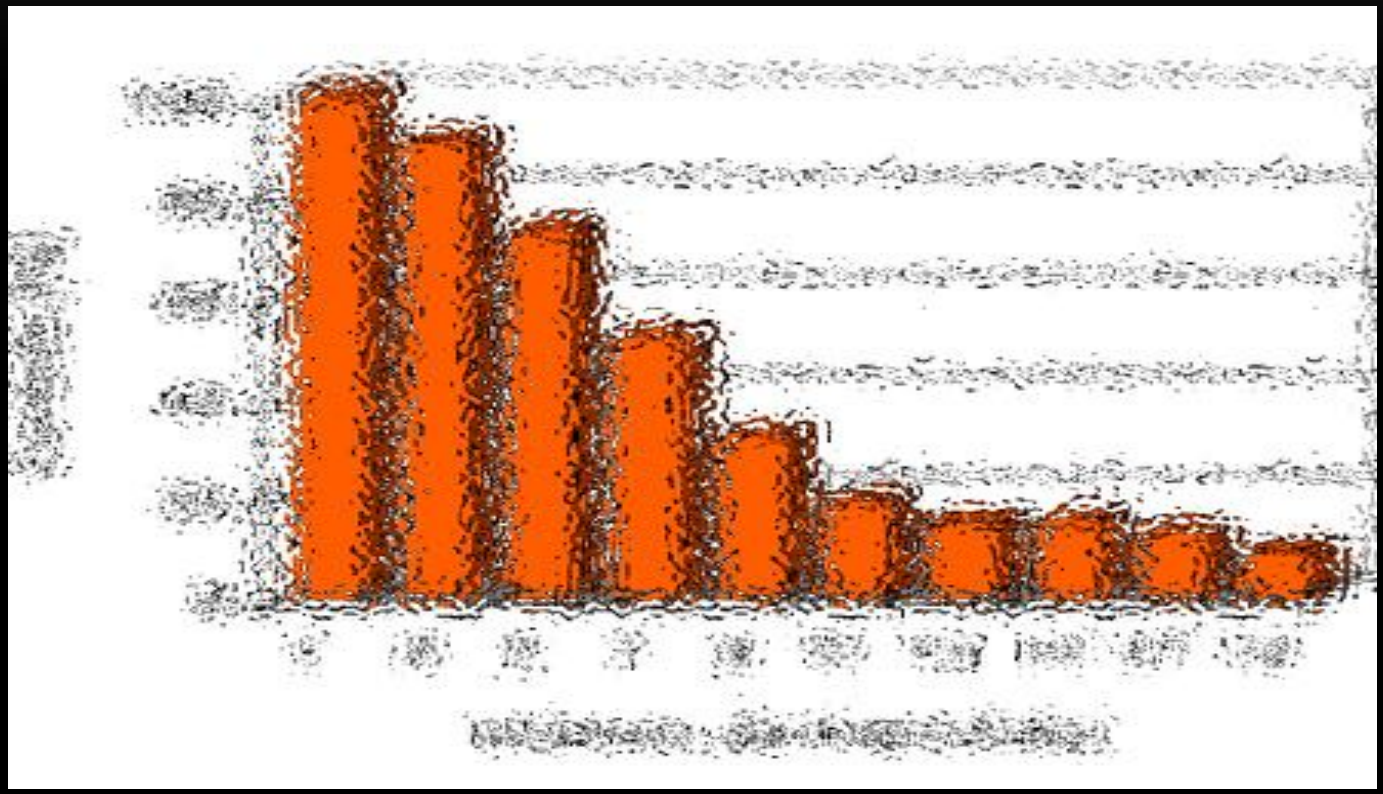
Vantagens

- Elimina o perigo de correntes elevadas de componentes harmónicas de ordem superior nos condensadores
- Evita distorções elevadas nas tensões (sem as eliminar totalmente)

Cuidados

- Não deve existir outro banco de condensadores (pois pode induzir um comportamento capacitivo perto da frequência de ressonância)
- f_R não deve ser da ordem de grandeza das frequências utilizadas pelos sistemas de controlo, pois tal aumentará a carga nos geradores de frequência

FILTROS PARA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA



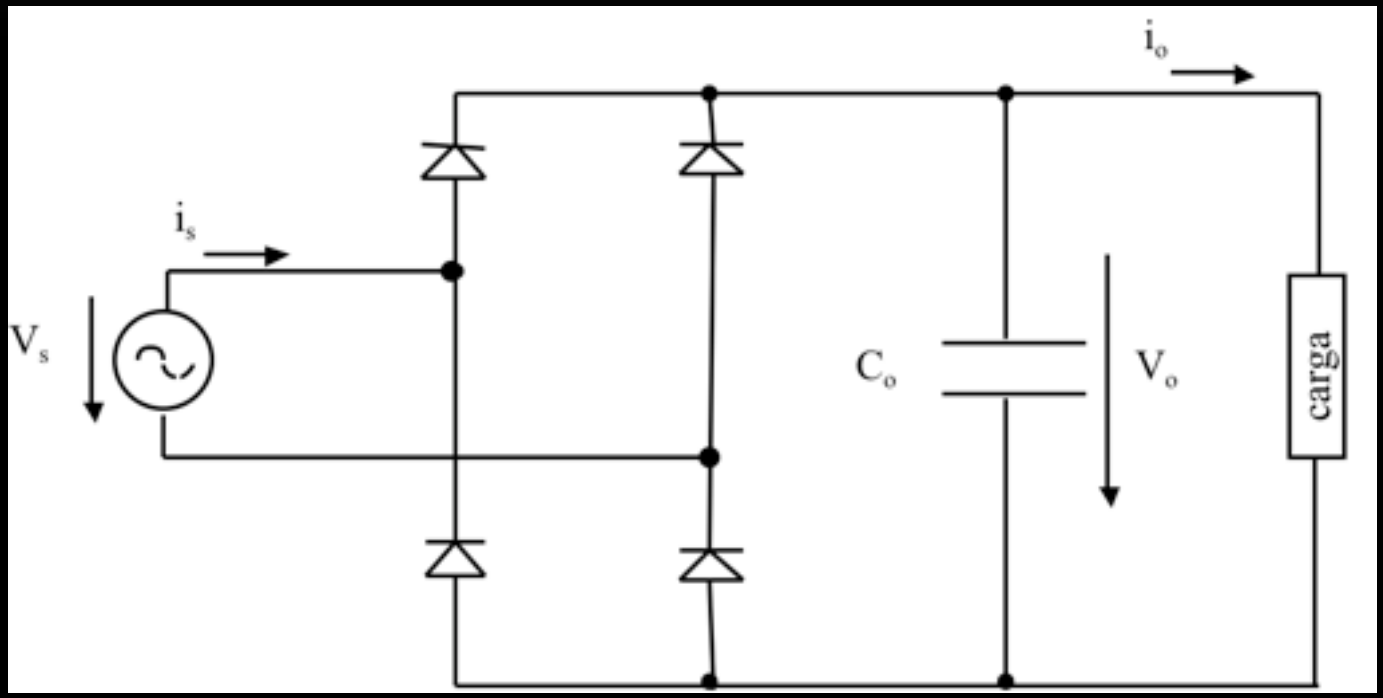
FILTROS PARA A CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

Para que servem?

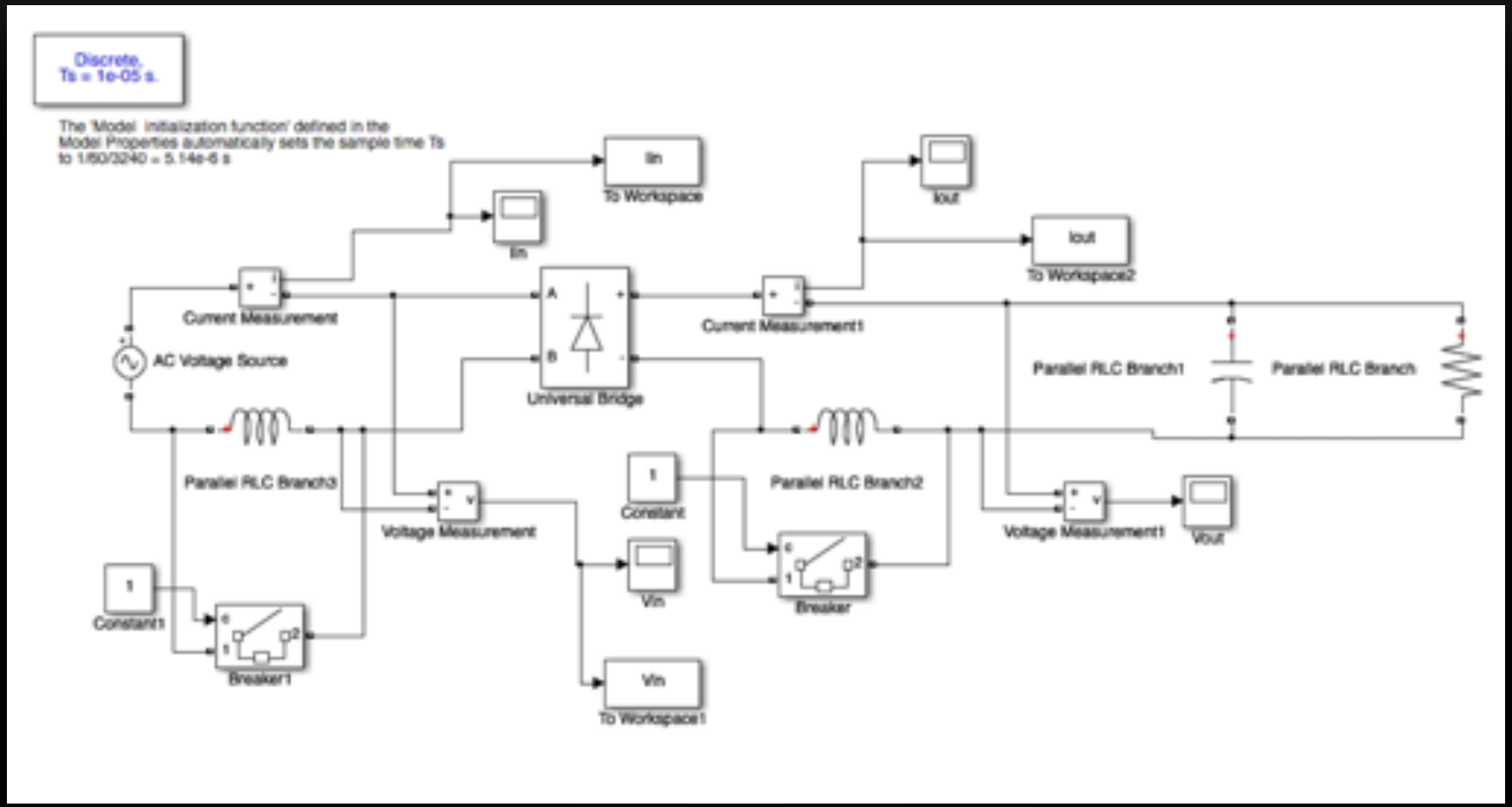
Como funcionam?

- **PASSIVOS**
- **ATIVOS**

FILTROS PASSIVOS PARA A CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

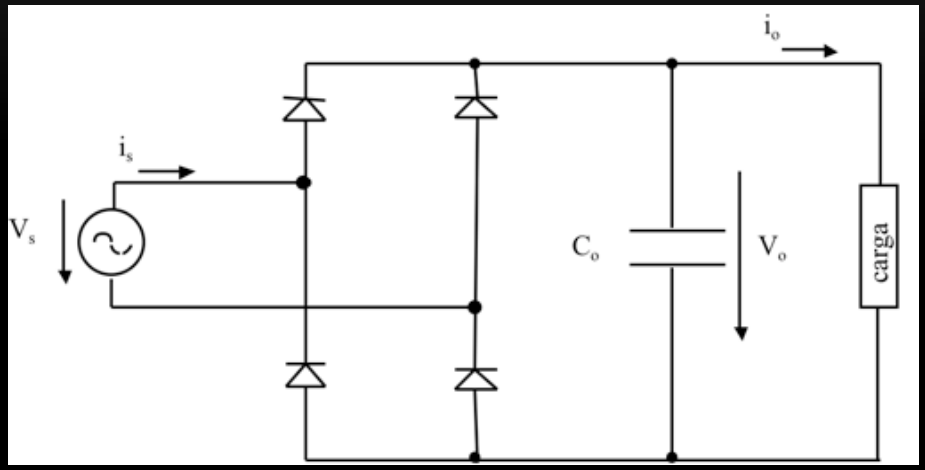


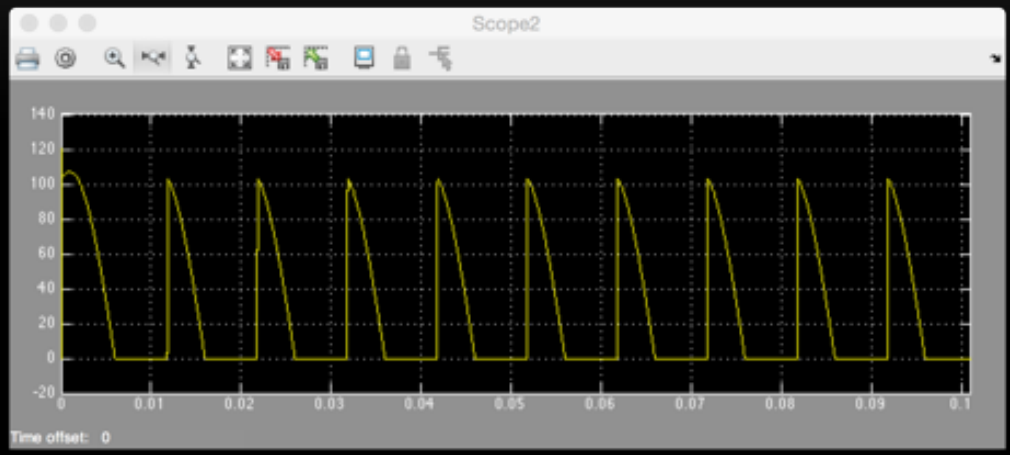
FILTROS PASSIVOS PARA A CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

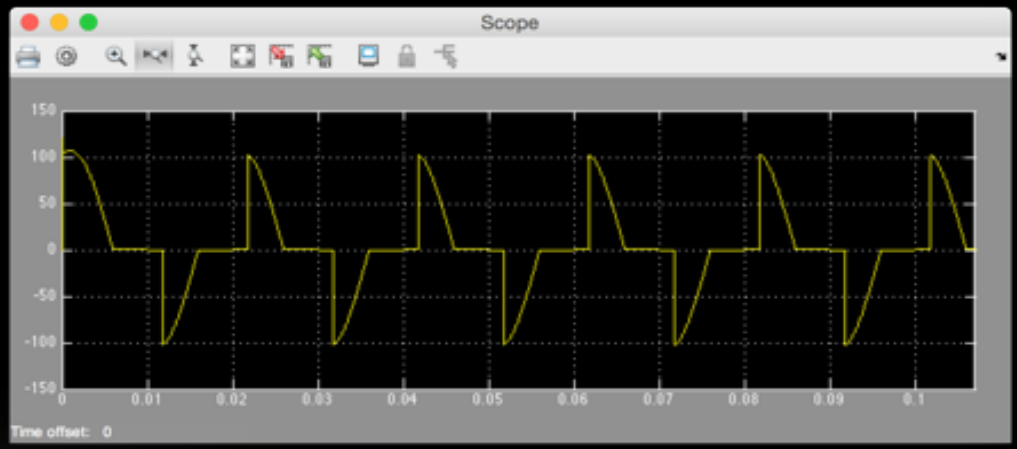


Filtros_passivos.slx

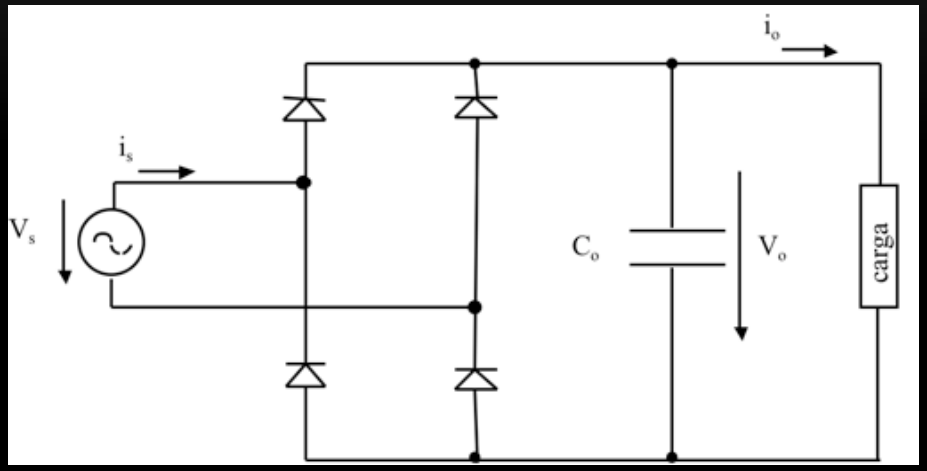
FILTROS PASSIVOS PARA A CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

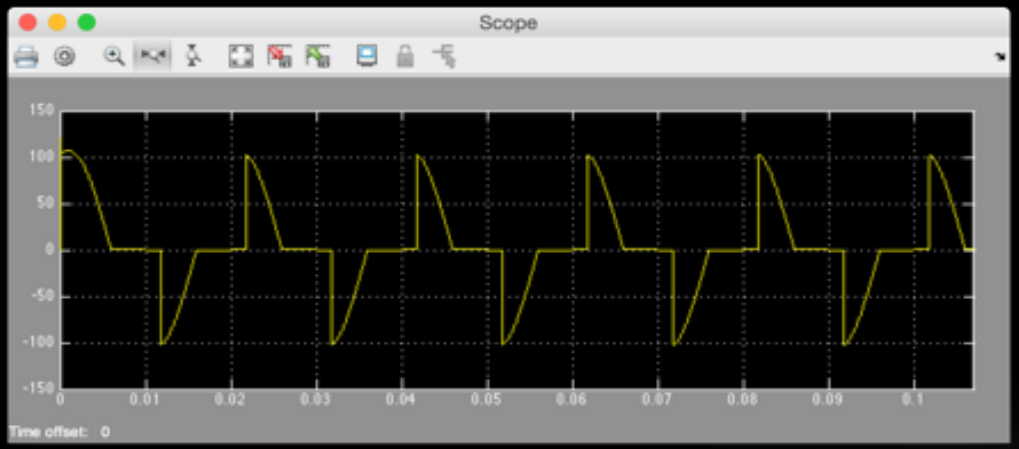


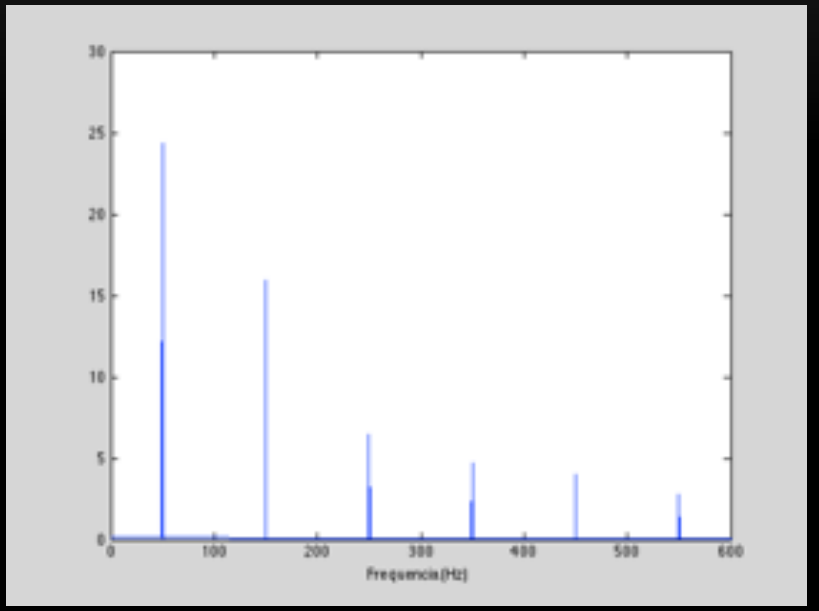




FILTROS PASSIVOS PARA A CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

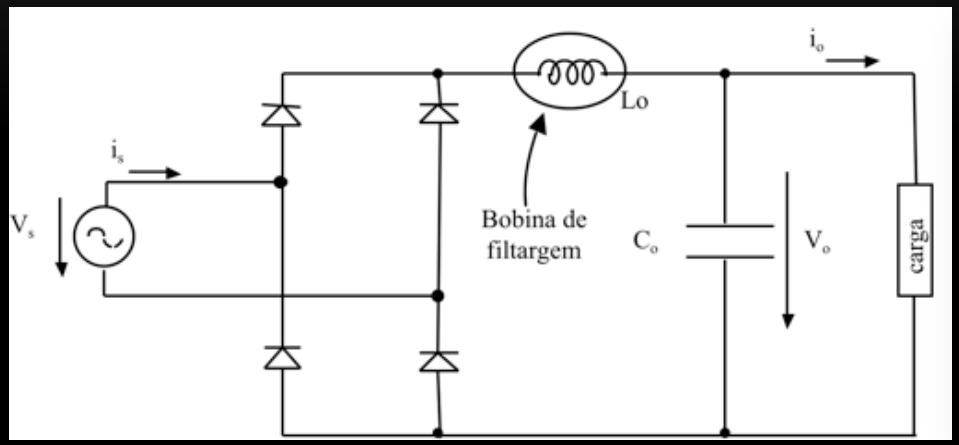


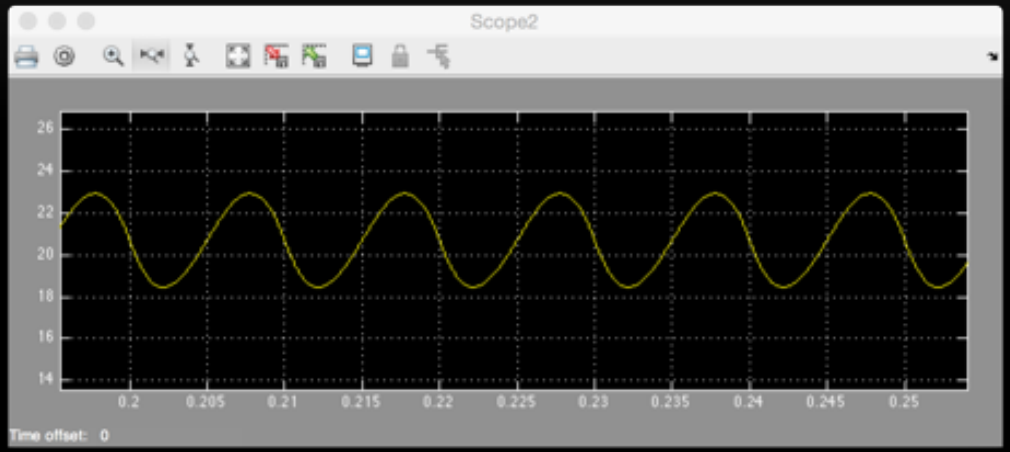


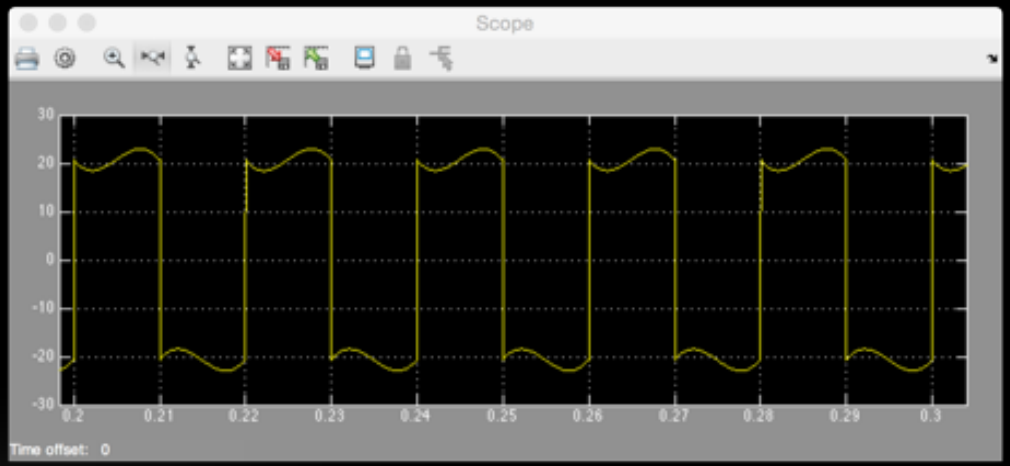


THD = 63 %

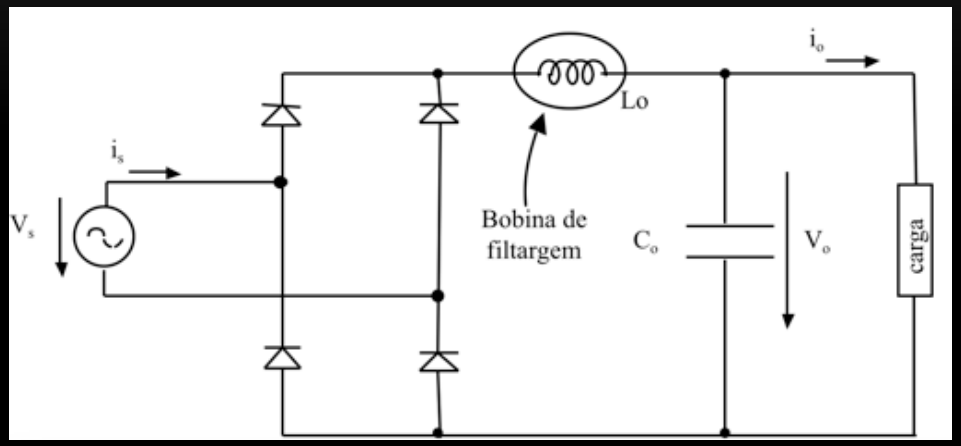
FILTROS PASSIVOS PARA A CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

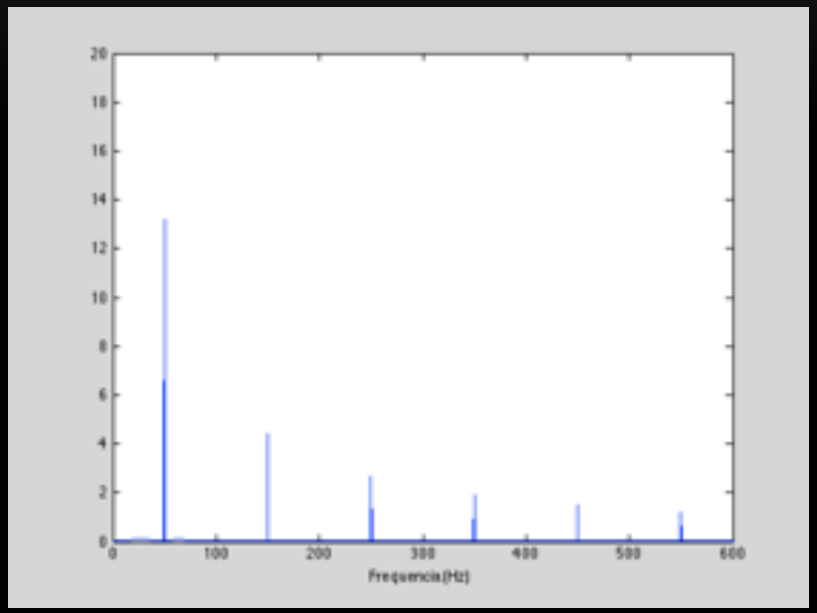


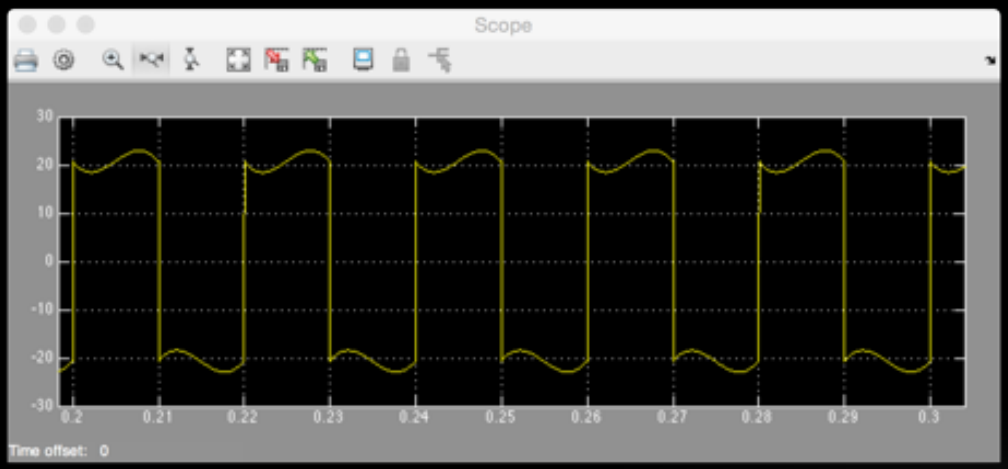




FILTROS PASSIVOS PARA A CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

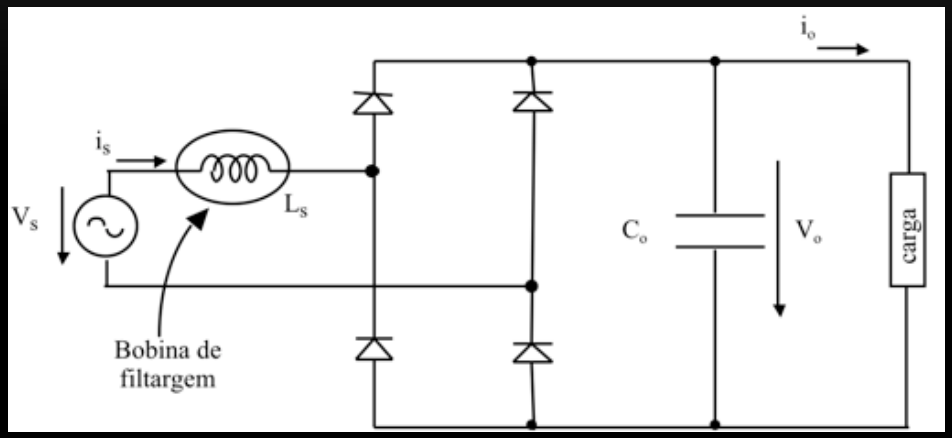


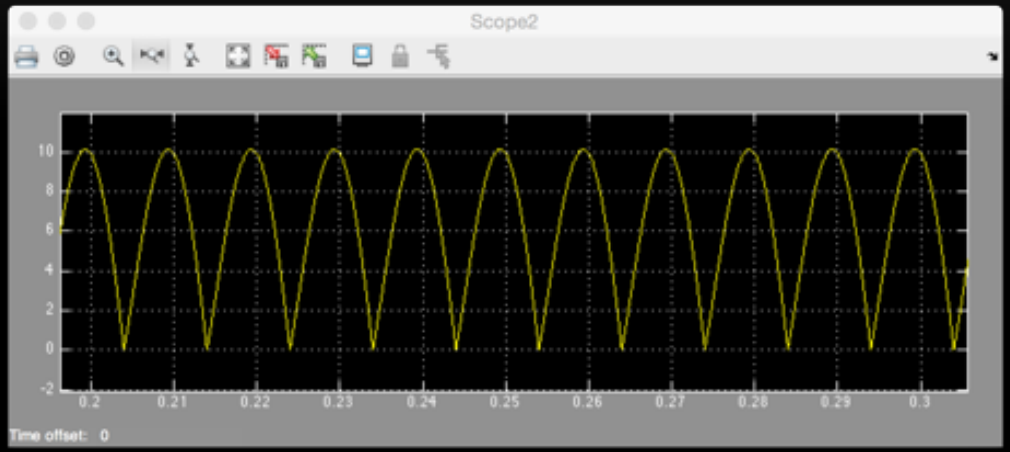


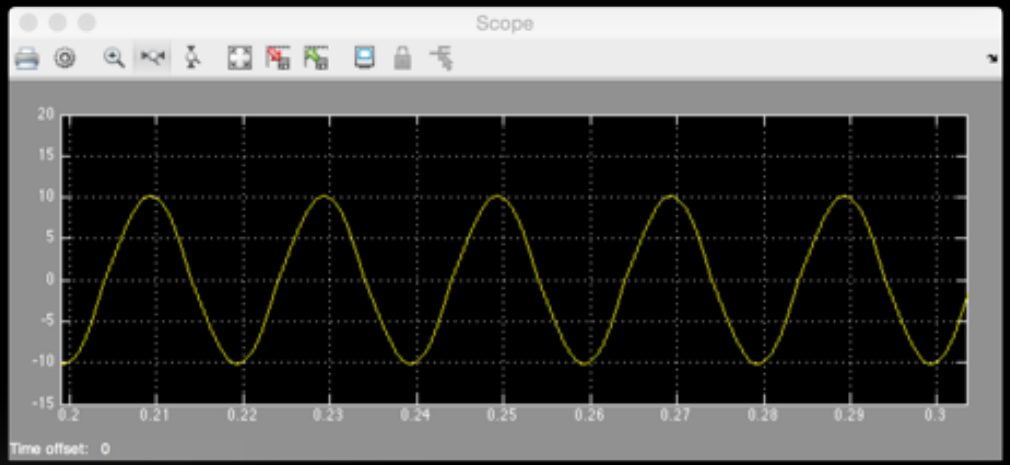


THD = 44 %

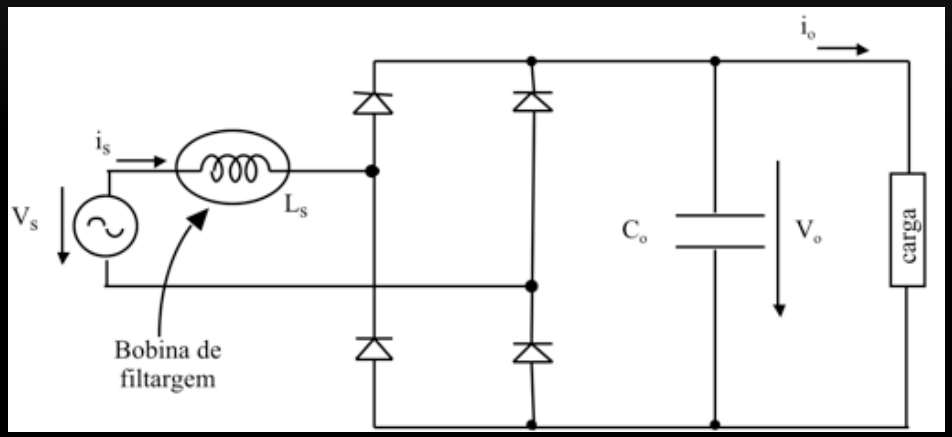
FILTROS PASSIVOS PARA A CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

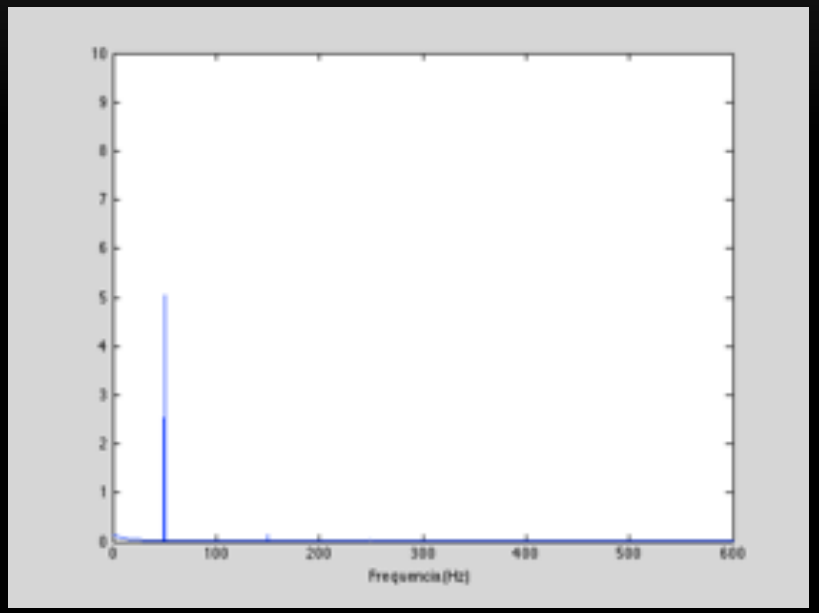


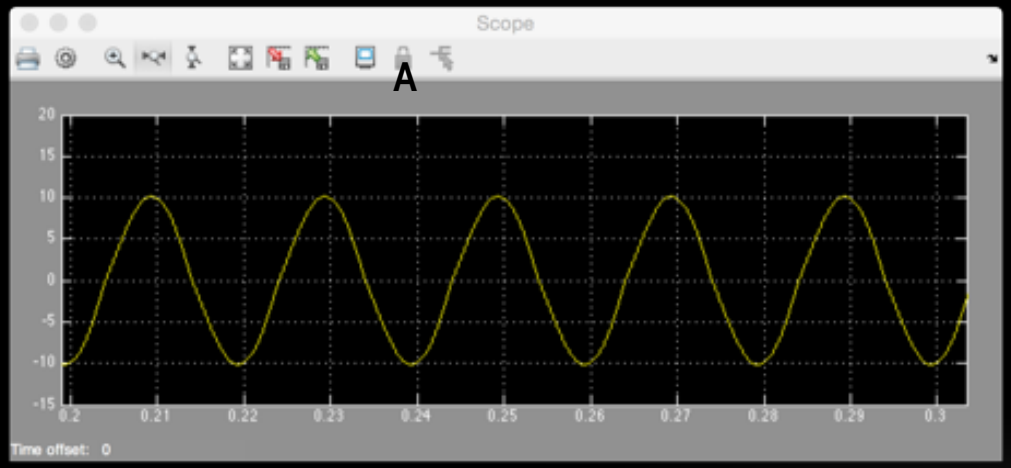




FILTROS PASSIVOS PARA A CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA







THD = 16 %

FILTROS PASSIVOS PARA A CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA - DESVANTAGENS

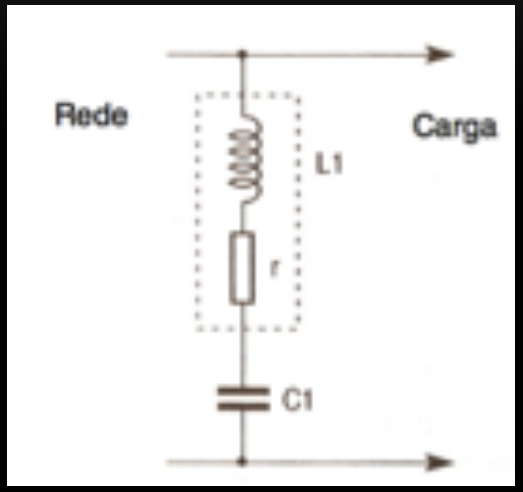
A aplicação destes filtros pode originar:

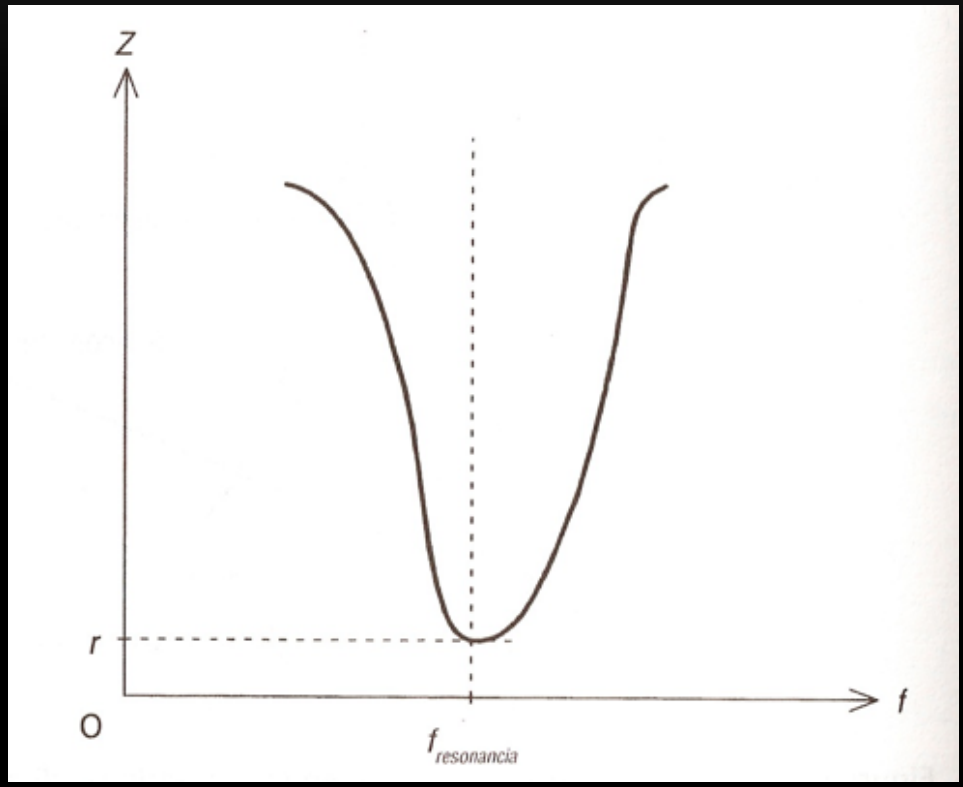
- ressonâncias com a impedância da rede de energia elétrica
- pouca flexibilidade para compensações dinâmicas de componentes harmónicas de frequência diferente
- Impossibilidade adaptação a alterações de carga e/ou frequência da rede de energia elétrica

FILTROS PASSIVOS SINTONIZADOS

- Um filtro passivo sintonizado é basicamente um filtro ressonante série, colocado em paralelo com a instalação, dimensionado para uma dada frequência que se pretenda eliminar.
- Para esta frequência, a impedância do filtro é muito baixa e a respetiva corrente será absorvida pelo filtro não sendo injetada na rede.
- Pode ser colocado um filtro ressonante por cada frequência que se deseje eliminar. Primeiro é necessário estudar a instalação para verificar quais as harmónicas necessário eliminar.

FILTROS PASSIVOS SINTONIZADOS

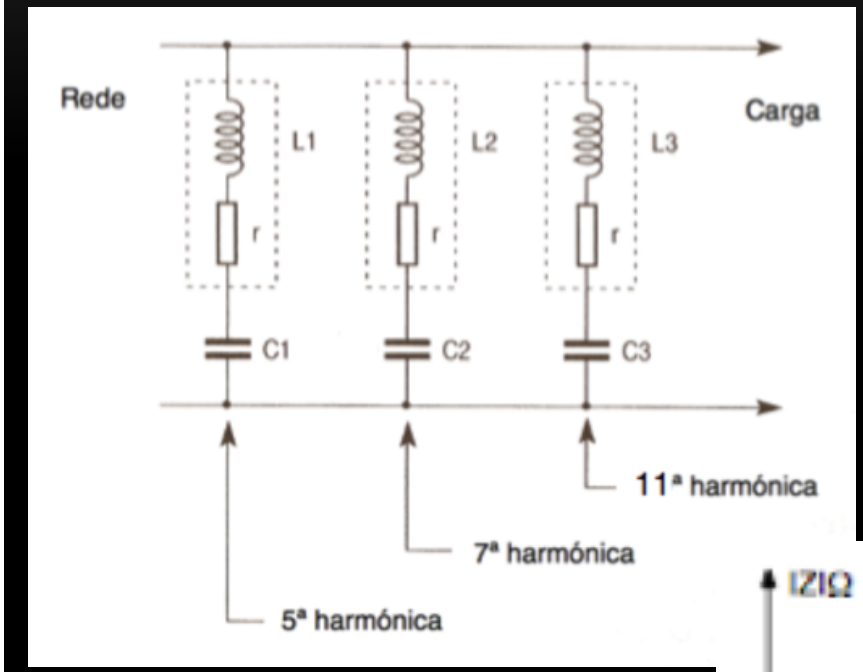


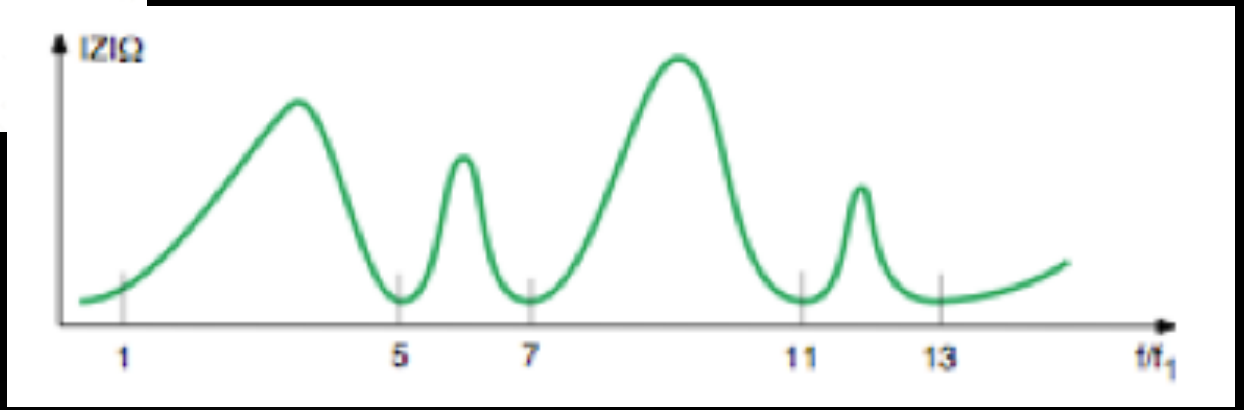


$$Z = \frac{\omega^2 LC - 1}{\omega C}$$

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

FILTROS PASSIVOS SINTONIZADOS





FILTROS ATIVOS PARA A CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

- Um **filtro ativo de potência** compreende um circuito eletrónico de potencia com dispositivos ativos (interruptores) e passivos de armazenamento (bobines e condensadores)
- Podem ser usados em vários contextos, mas são particularmente utilizados para melhorar a qualidade da energia

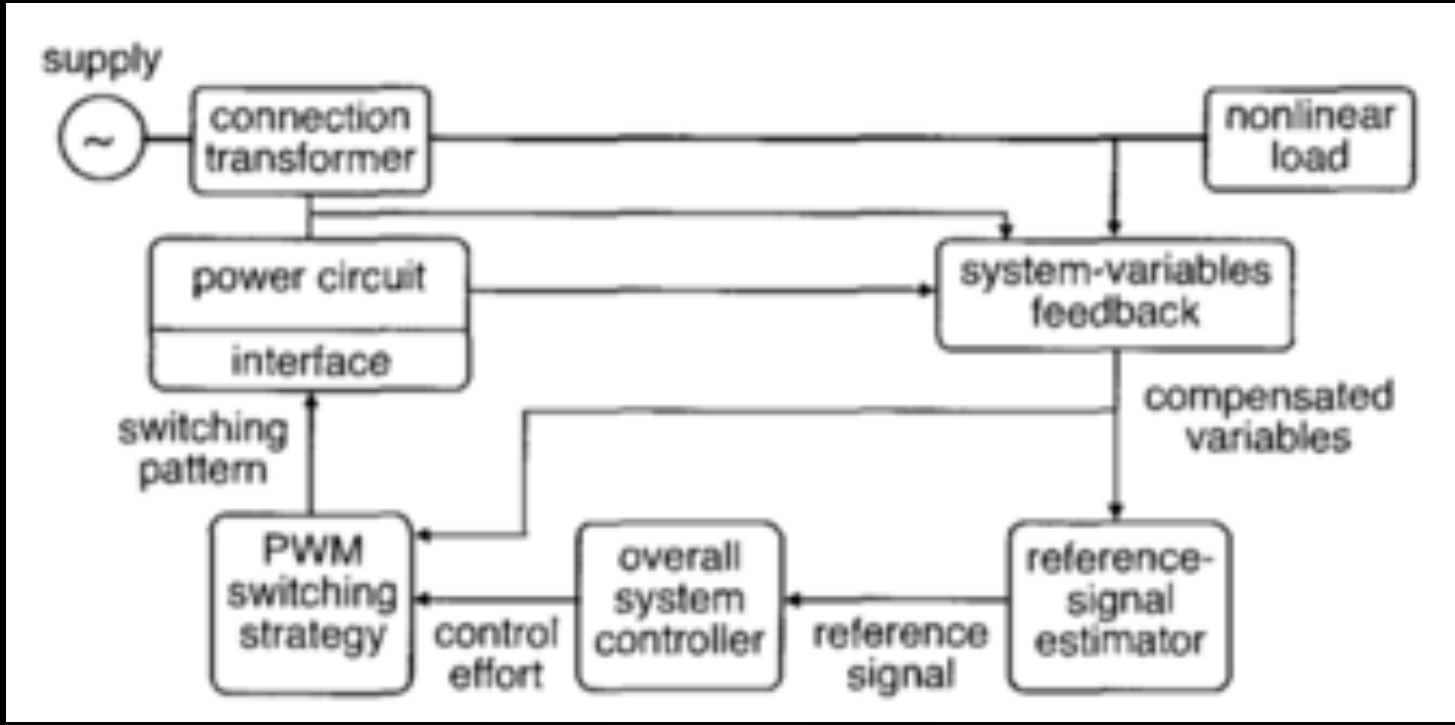
FILTROS ATIVOS PARA A CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

A aplicação destes filtros possibilita

- Compensar harmónicas de corrente e/ou tensão
- Compensar potência reativa (carga puramente resistiva vista do lado da rede)
- Regular tensão de carga
- Atenuar variações de pequena duração da tensão
- Melhorar o equilíbrio das tensões em sistemas trifásicos

FILTROS ATIVOS PARA A CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

Diagrama de blocos conceptual



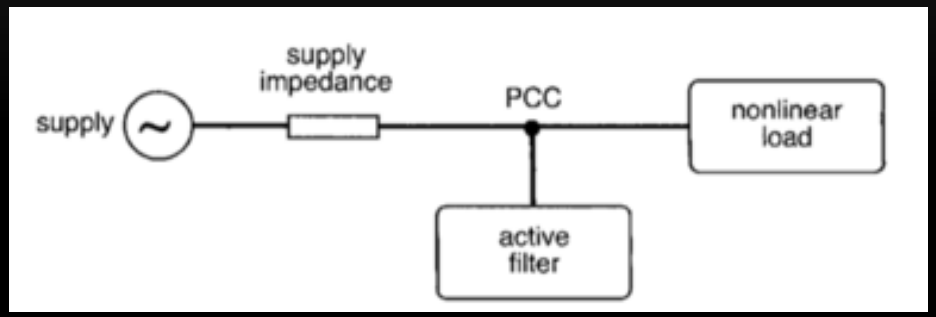
Fonte: El-Habrouk et.al.

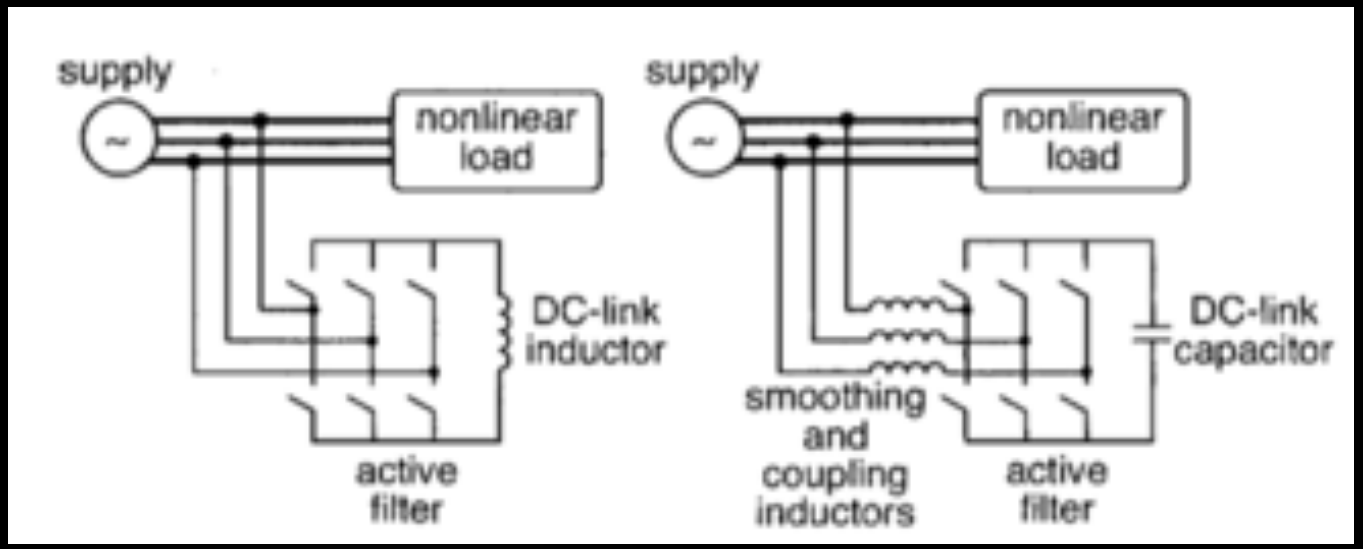
FILTROS ATIVOS PARA A CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

Os filtros ativos podem ser classificados (quanto à sua configuração e tipo de ligação) em:

- Paralelo
- Série
- Híbrido

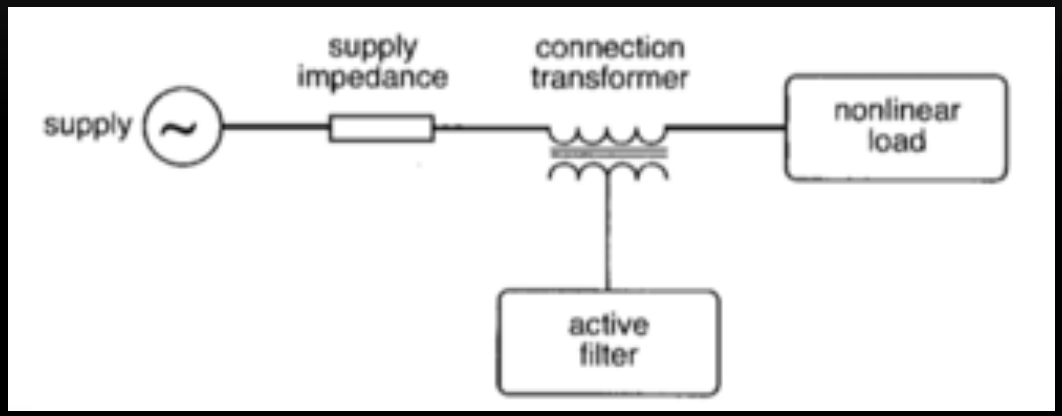
FILTROS ATIVOS PARA A CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA – FILTROS PARALELOS

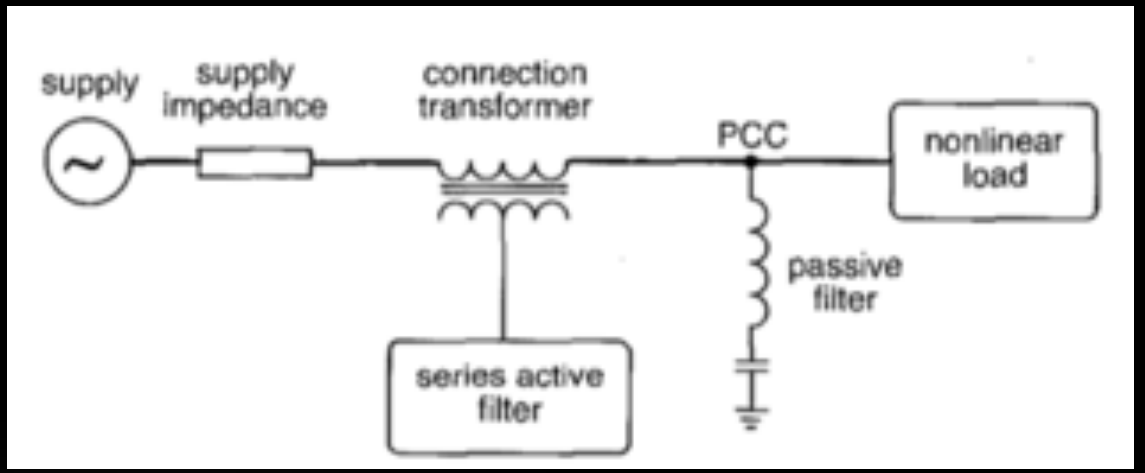




Fonte: El-Habrouk et.al.

FILTROS ATIVOS PARA A CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA – FILTROS SÉRIE E HÍBRIDOS





Fonte: El-Habrouk et.al.

FILTROS ATIVOS PARA A CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

Filtros ativos paralelos:

Compensação de harmónicas de corrente, potência reativa e desequilíbrios de carga

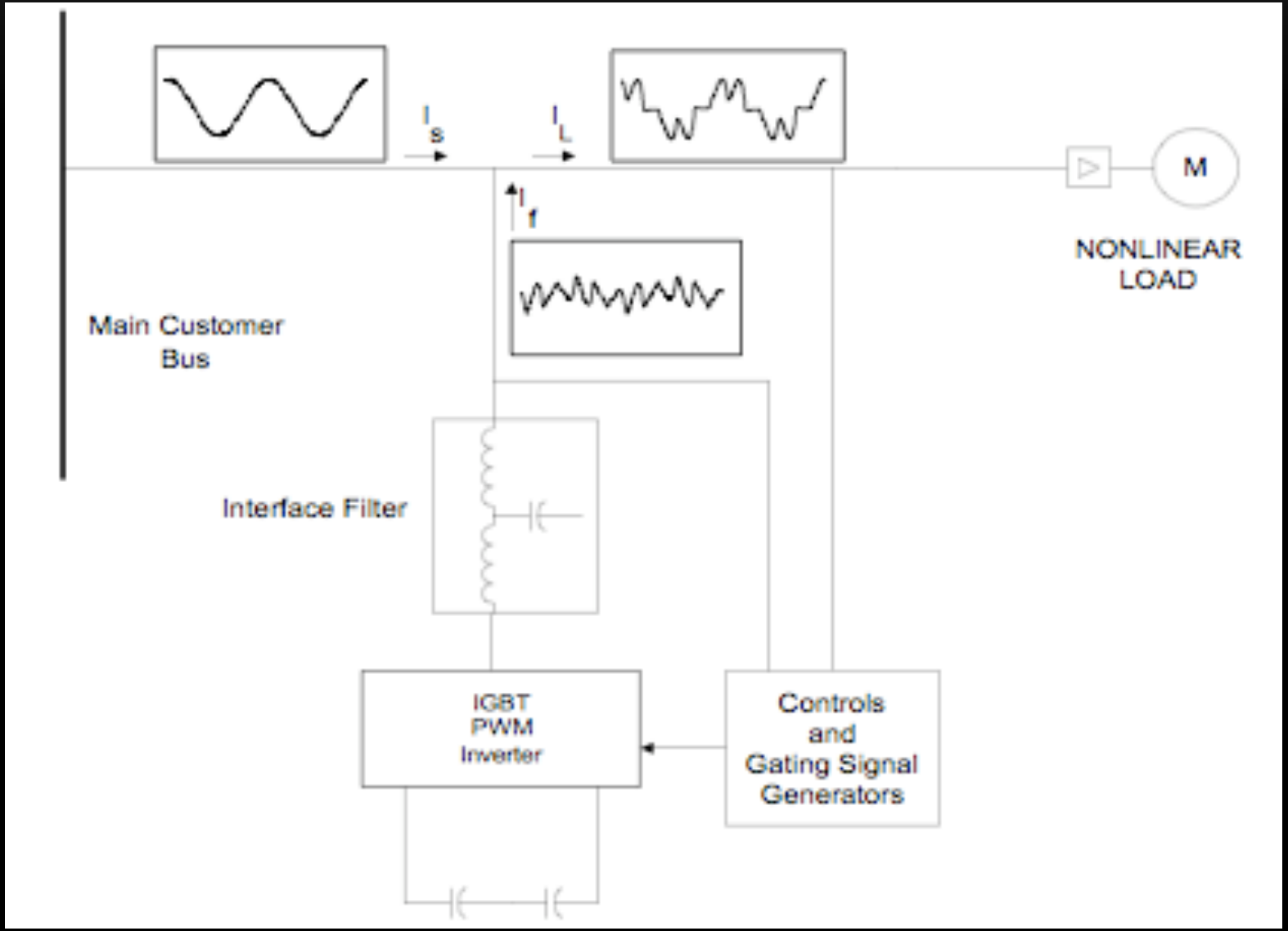
Filtros ativos série:

Eliminar as harmónicas de tensão e para regular e equilibrar as tensões aos terminais das cargas e/ou linhas

Filtros ativos híbridos:

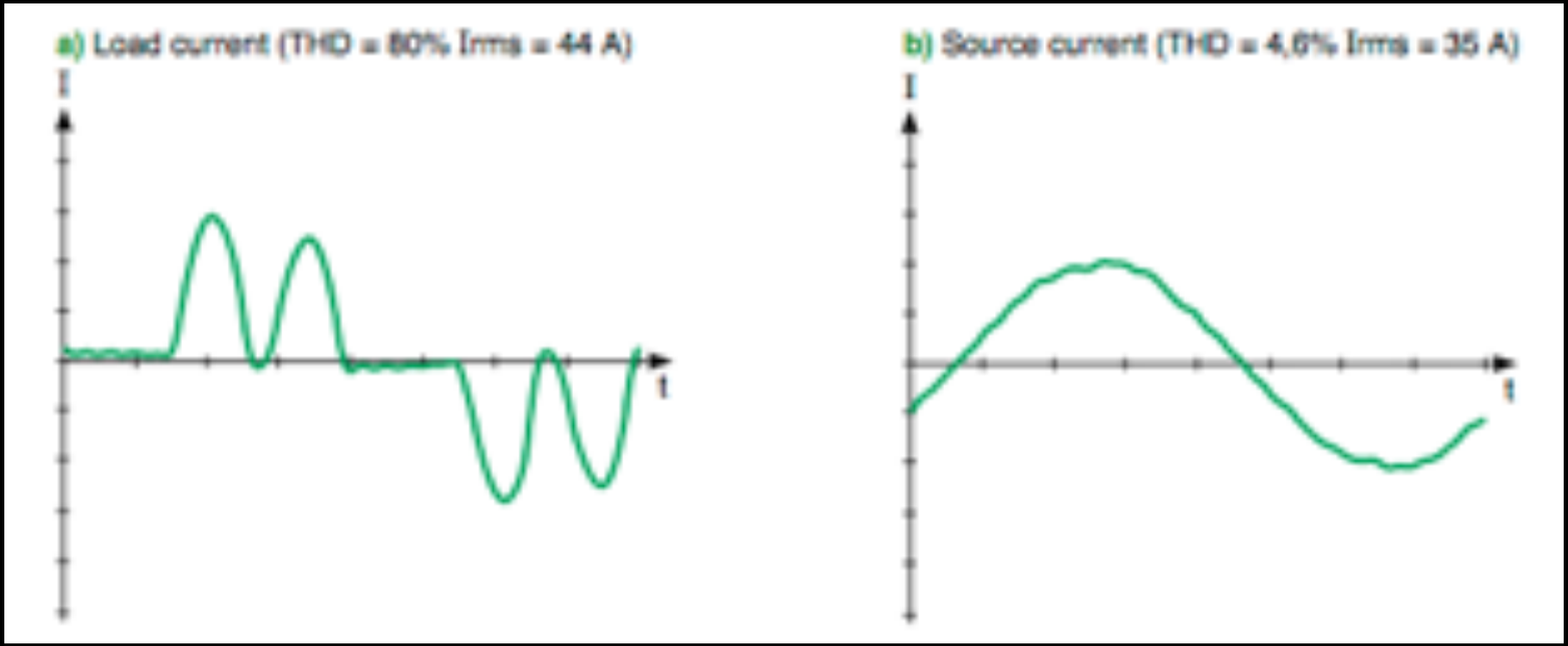
Utilizados para compensações de grandes sistemas de potência, uma vez que, a potência do filtro ativo é muito reduzida (cerca de 10% do valor da carga). O filtro passivo LC irá compensar as harmónicas de corrente de baixa ordem e a potência reativa.

FILTROS ATIVOS PARA A CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA – FILTROS PARALELOS



FILTROS ATIVOS PARA A CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA – FILTROS PARALELOS

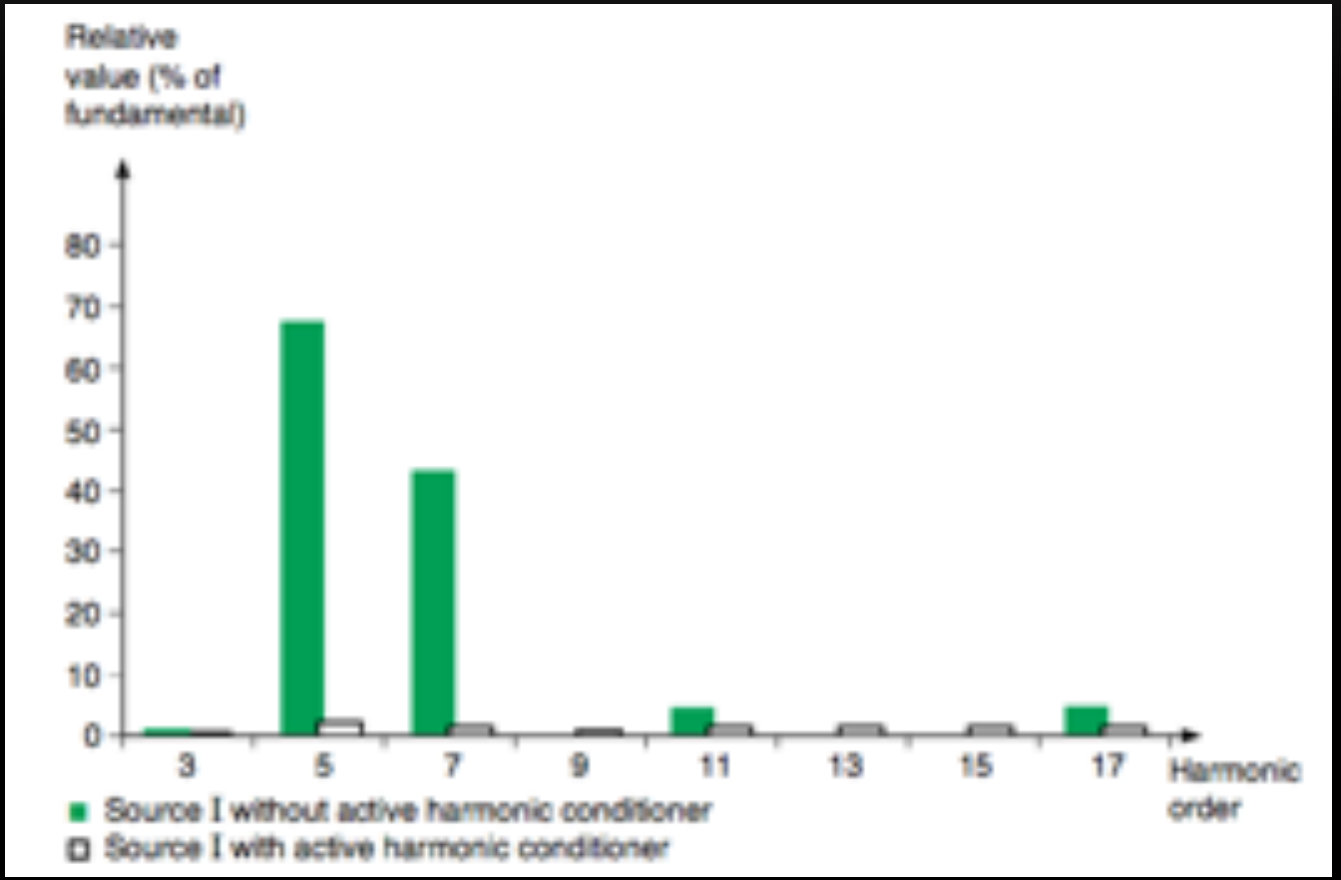
Carga: UPS



Fonte: Electric Schneider

FILTROS ATIVOS PARA A CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA – FILTROS PARALELOS

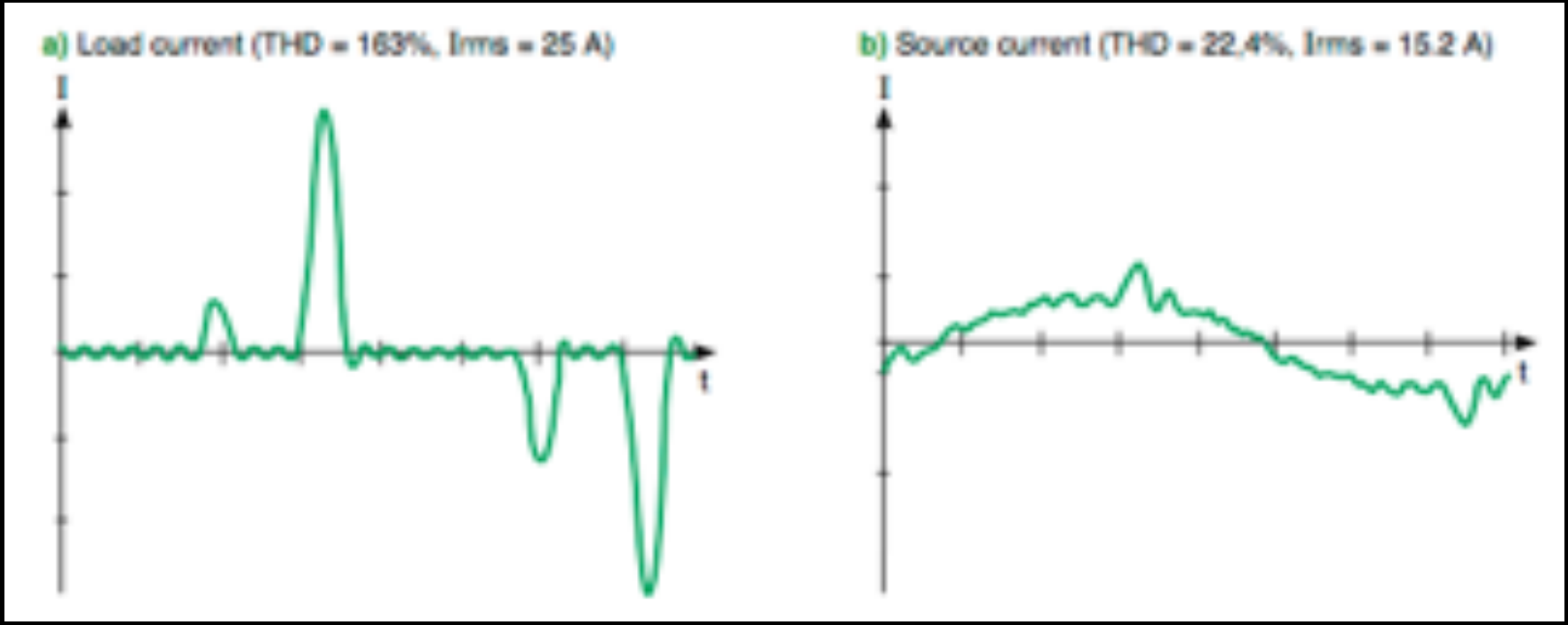
Carga: UPS



Fonte: Electric Schneider

FILTROS ATIVOS PARA A CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA – FILTROS PARALELOS

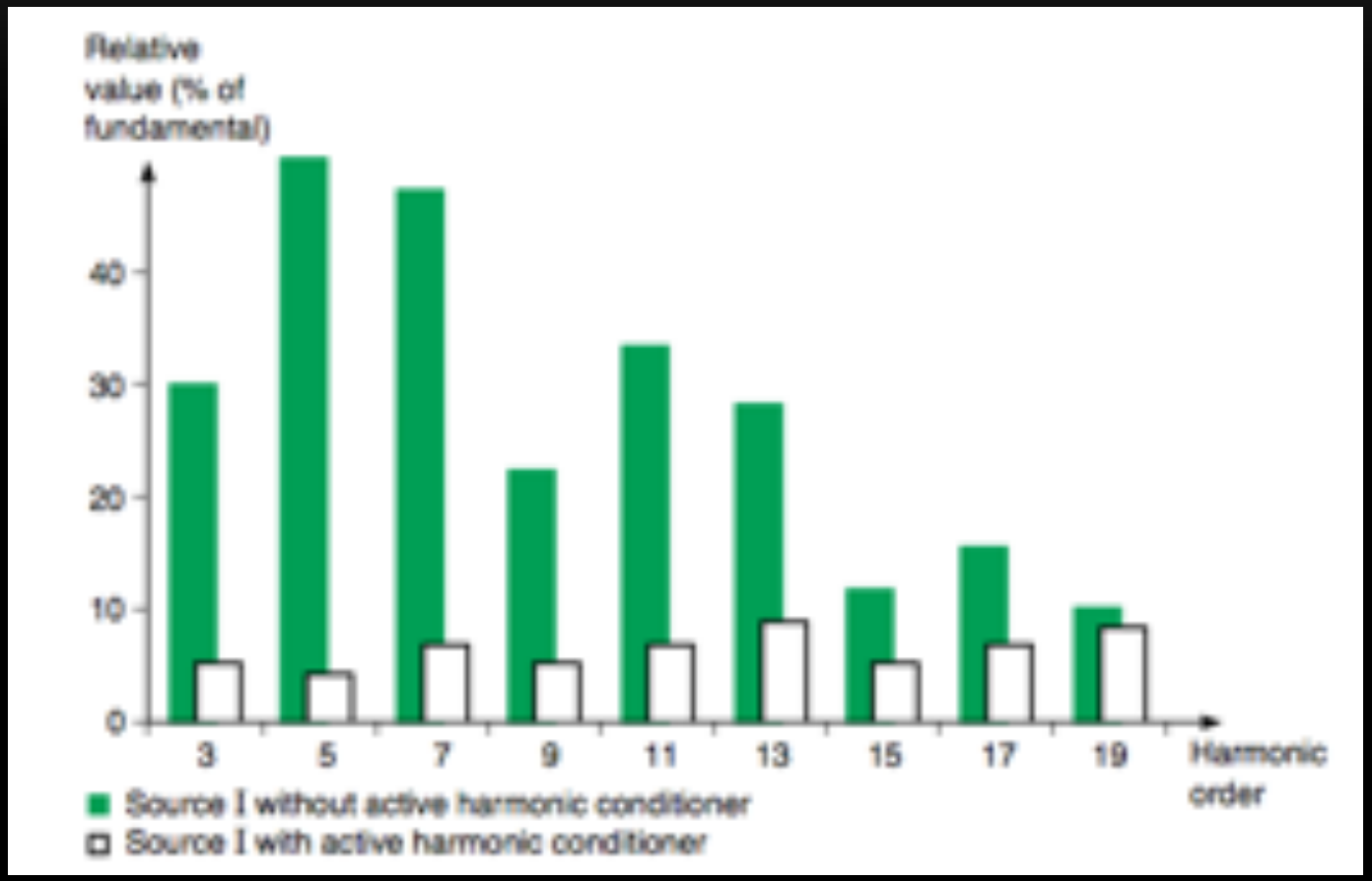
Carga: Variador Eletrónico de Velocidade



Fonte: Electric Schneider

FILTROS ATIVOS PARA A CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA – FILTROS PARALELOS

Carga: Variador Eletrónico de Velocidade



Fonte: Electric Schneider

RESUMO

- A existência de harmónicas implica que o fator de potencia não coincida com o desfamaneto entre tensão e corrente
- A potencia ativa depende do valor eficaz e desfazamento da primeira harmonica de corrente
- O fator de potencia depende da taxa de distorção harmonica

BIBLIOGRAFIA

- A. Kusko e M. T. Thompson, Power Quality in Electrical Systems, McGraw-Hill, 2007
- R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso e H. W. Beaty, Electrical Power Systems Quality, McGraw-Hill, 2004
- Muhammad H. Rashid, Power Electronics: Circuits, Devices & Applications 4ed, Pearson ed., 2014
- Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins, Power Electronics: Converters, Applications, and Design, 3ed, Wiley, 2003
- M. El-Habrouk, M. K. Darwish and P. Mehta, "Active power filters: a review," in *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, vol. 147, no. 5, pp. 403-413, Sep 2000.
- António Martins, José Ferreira and Helder Azevedo (2011). Active Power Filters for Harmonic Elimination and Power Quality Improvement, Power Quality, Mr Andreas Eberhard (Ed.), InTech