

Aula 12 – Harmônicos: causas e efeitos



Prof. Heverton Augusto Pereira
Prof. Mauro de Oliveira Prates

Universidade Federal de Viçosa - UFV
Departamento de Engenharia Elétrica - DEL
Gerência de Especialistas em Sistemas Elétricos de Potência – Gesep

heverton.pereira@ufv.br

www.gesep.ufv.br
TEL: +55 (31) 3899-3266

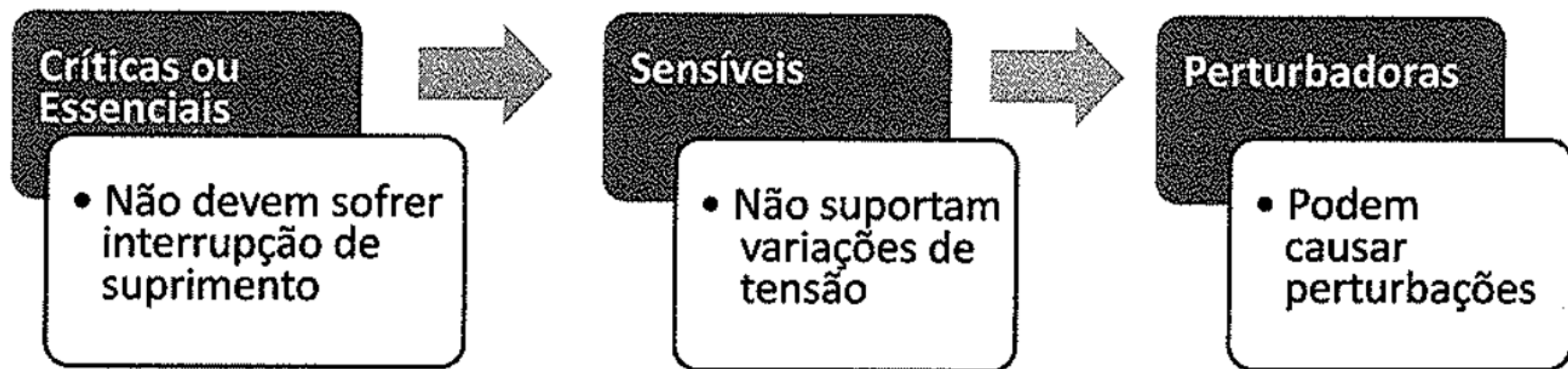
Grupos de carga

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Críticas: lineares ou não, como dos centros de controle de vôos, hospitais, etc.

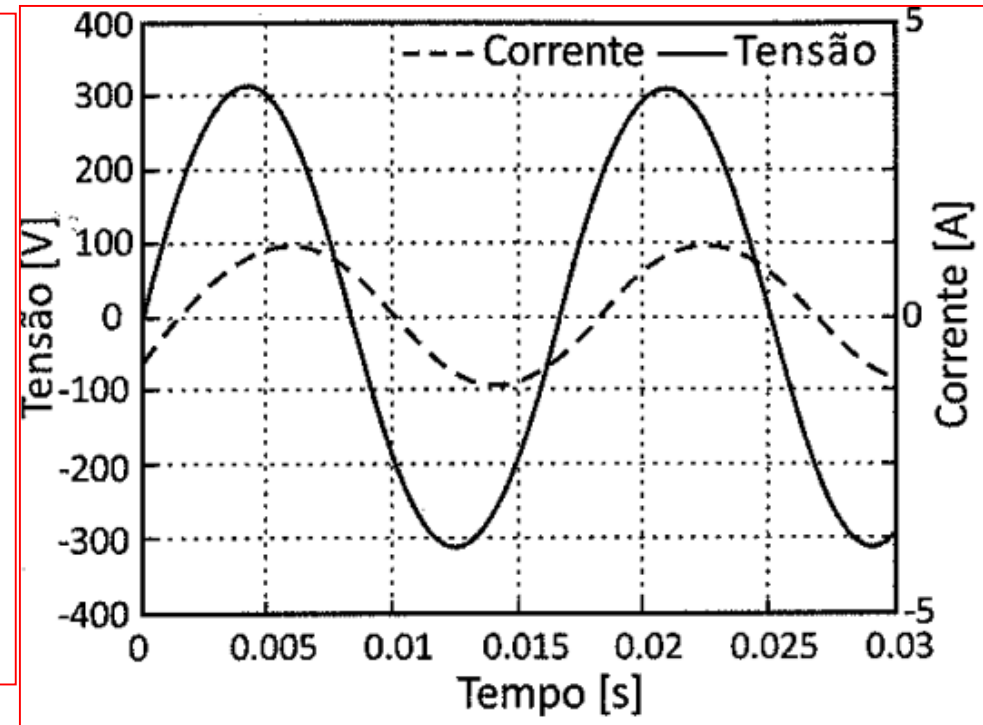
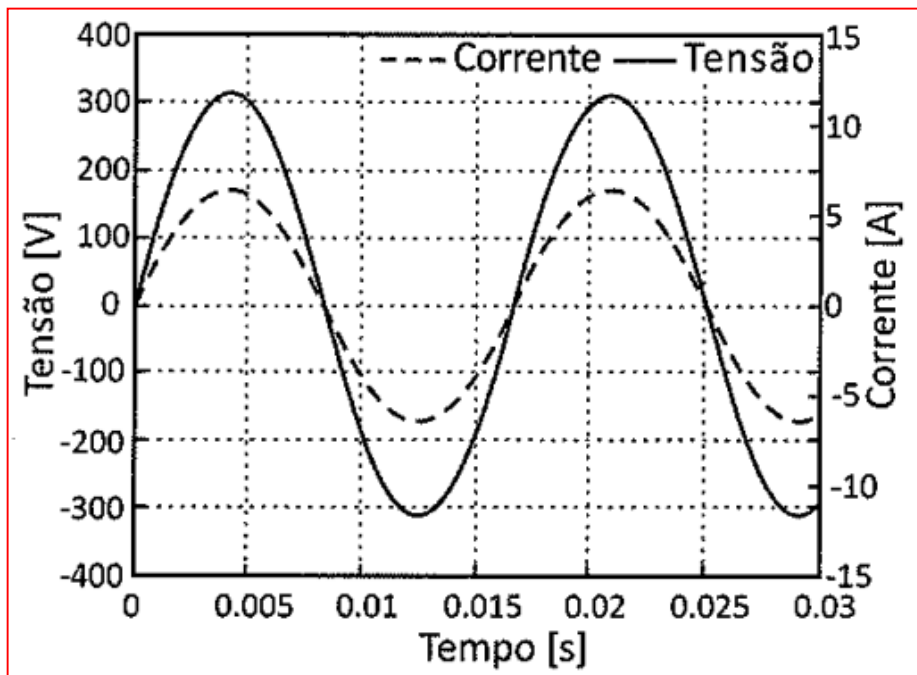
Sensíveis: não lineares eletrônicas, como CLP, PC, inversor de frequência, etc.

Perturbadoras: materiais ferromagnéticos, conversores de potência, fornos a arco, grandes motores, etc.



Grupos de carga

Lineares: corrente que circula é diretamente proporcional à tensão aplicada. Drenam corrente da mesma forma de onda da fonte de alimentação.



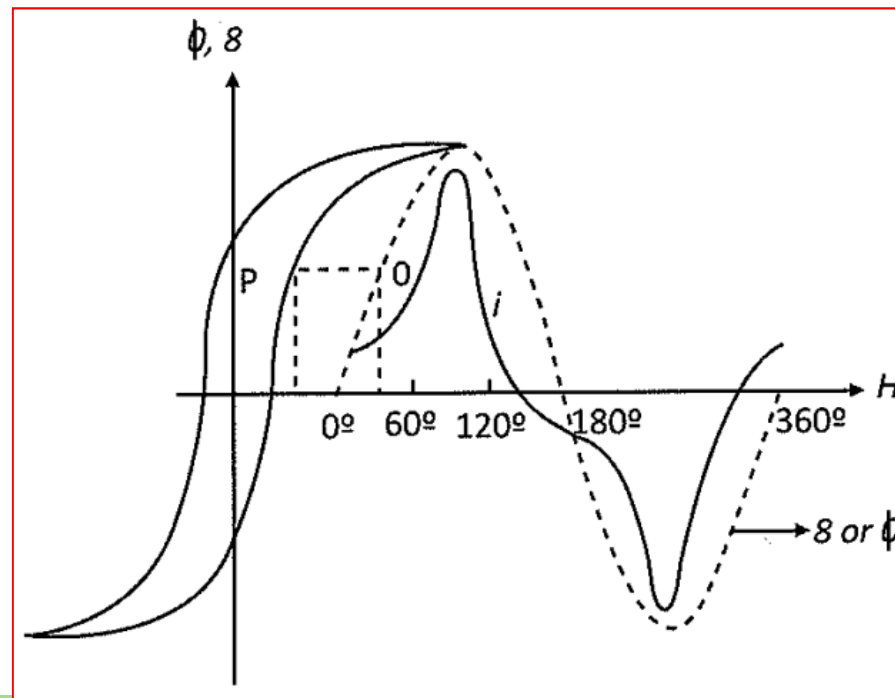
Grupos de carga

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Não Lineares: corrente que circula **não** é diretamente proporcional à tensão aplicada. Qualquer carga que requisita corrente não senoidal de uma tensão senoidal é não linear.

Causam correntes distorcidas mesmo quando alimentadas por fonte senoidal.

Indutor com núcleo saturável.
Ex: transformadores; máquinas elétricas, fornos a arco.



Grupos de carga

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Não Lineares: eletrônica de potência tem disponibilizado uma vasta gama de equipamentos: retificadores (CA-CC), Inversores (CC-CA), conversores buck (cc-cc), etc. Essa eletrônica faz uso de diodo, transistores e tiristores. Todos os semicondutores de potência mudam rapidamente de um estado

– Dispositivo de controle da corrente e da tensão na carga.

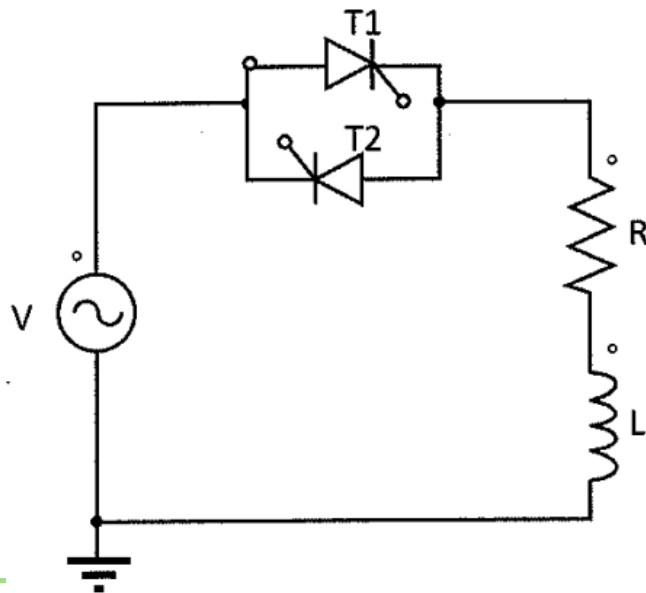
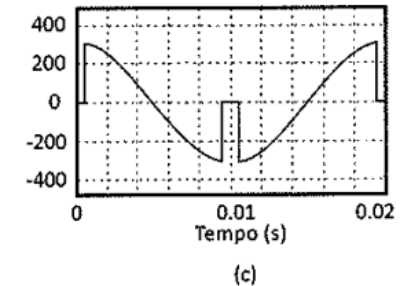
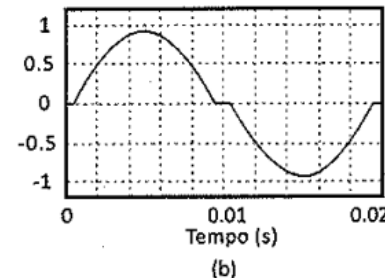
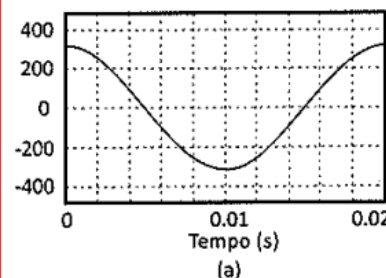


Figura 6.12 – Formas de onda: (a) tensão da fonte de alimentação; (b) corrente distorcida da carga; (c) tensão distorcida na carga.

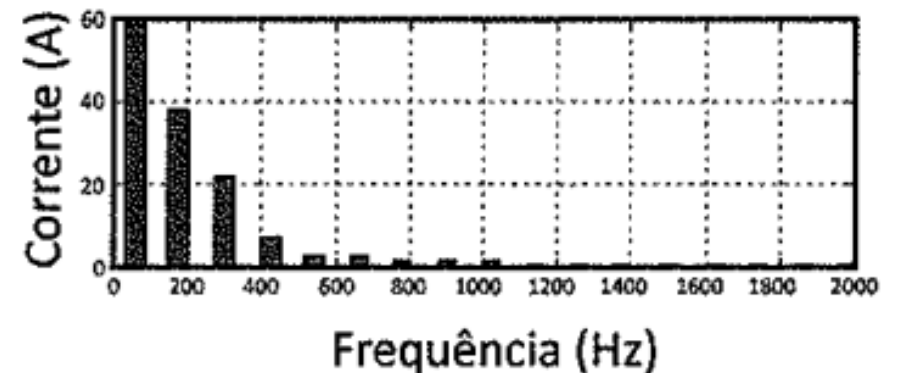
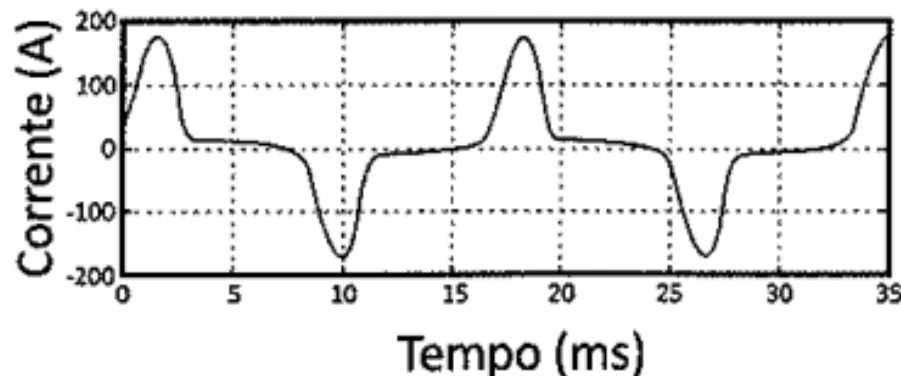


Fontes de Harmônicos

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Conversores Eletrônicos: mais importante classe de cargas não lineares no SEP.

Ambiente comercial ou residencial é comum a presença de cargas monofásicas chaveadas, que possuem alto conteúdo de 3^o harmônico.



Fontes de Harmônicos

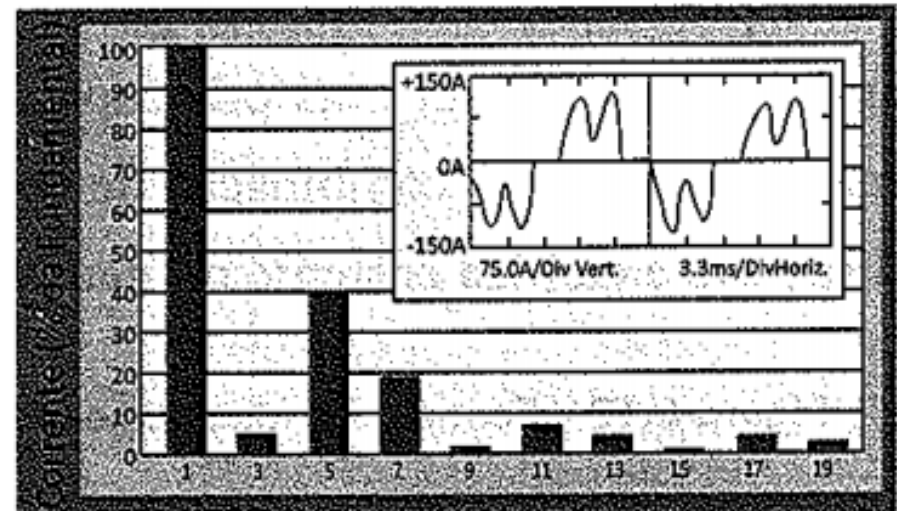
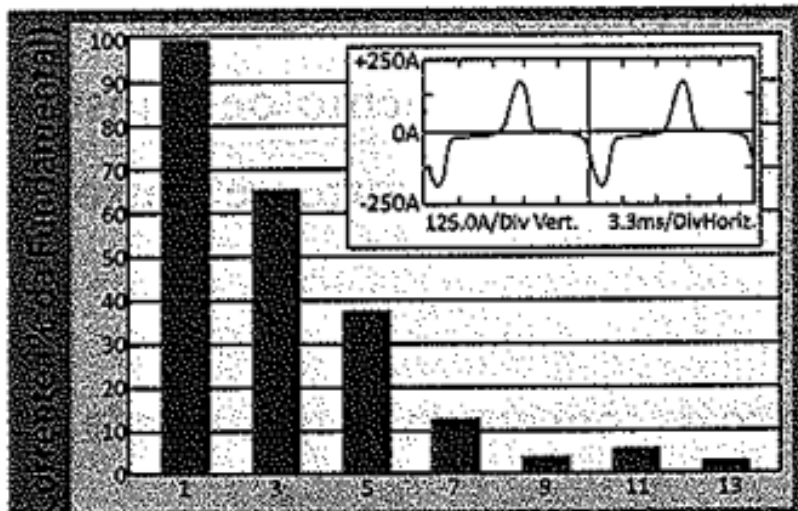
ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Conversores Eletrônicos: os trifásicos geram harmônicas características da ordem $h = kq \pm 1$.

$q = n^\circ$ de pulsos do conversor e k inteiro (2, 3, ...).

Sob condições de desequilíbrio, pode aparecer o 3º harm.

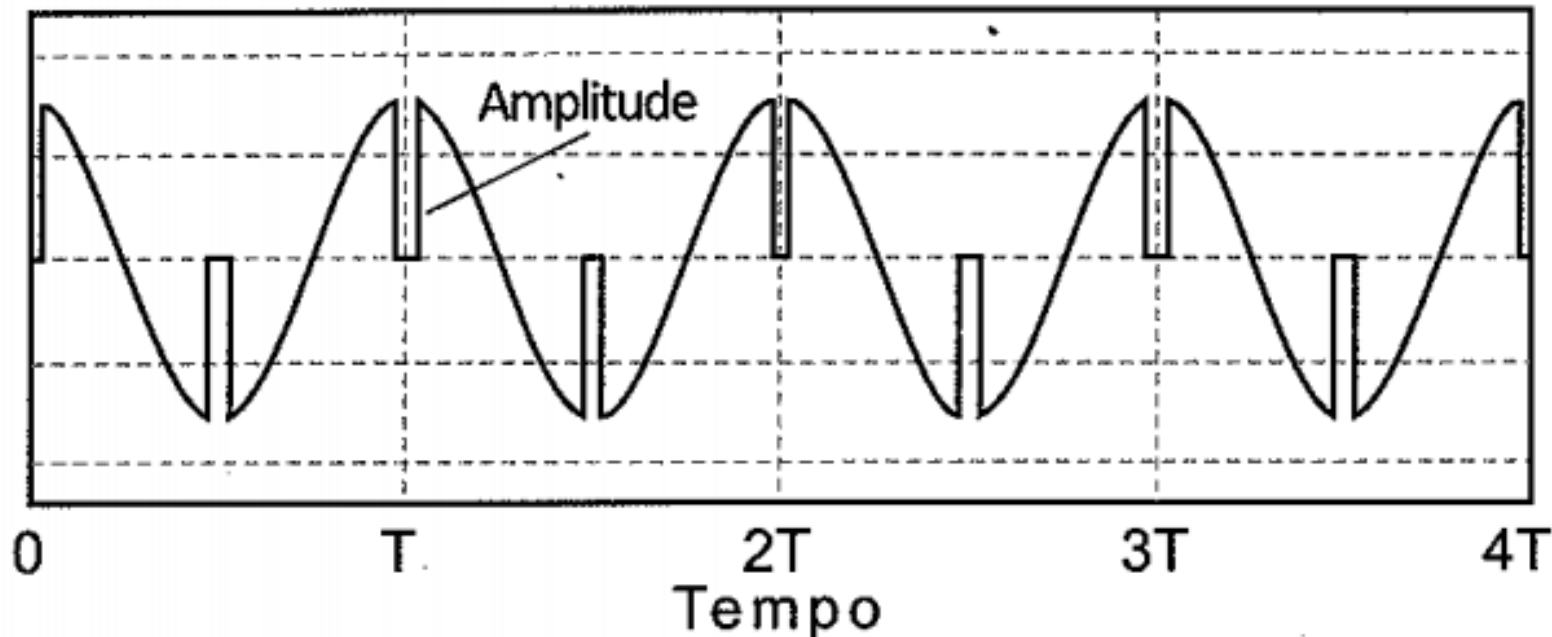
(a) monofásico e (b) trifásico.



Conversores Eletrônicos

Notches de tensão é um tipo de distorção periódica na forma de onda produzida pela operação normal de conversores, durante a comutação dos interruptores.

Figura 6.15 – Ranhuras ou *notches* de tensão.



Conversores Eletrônicos

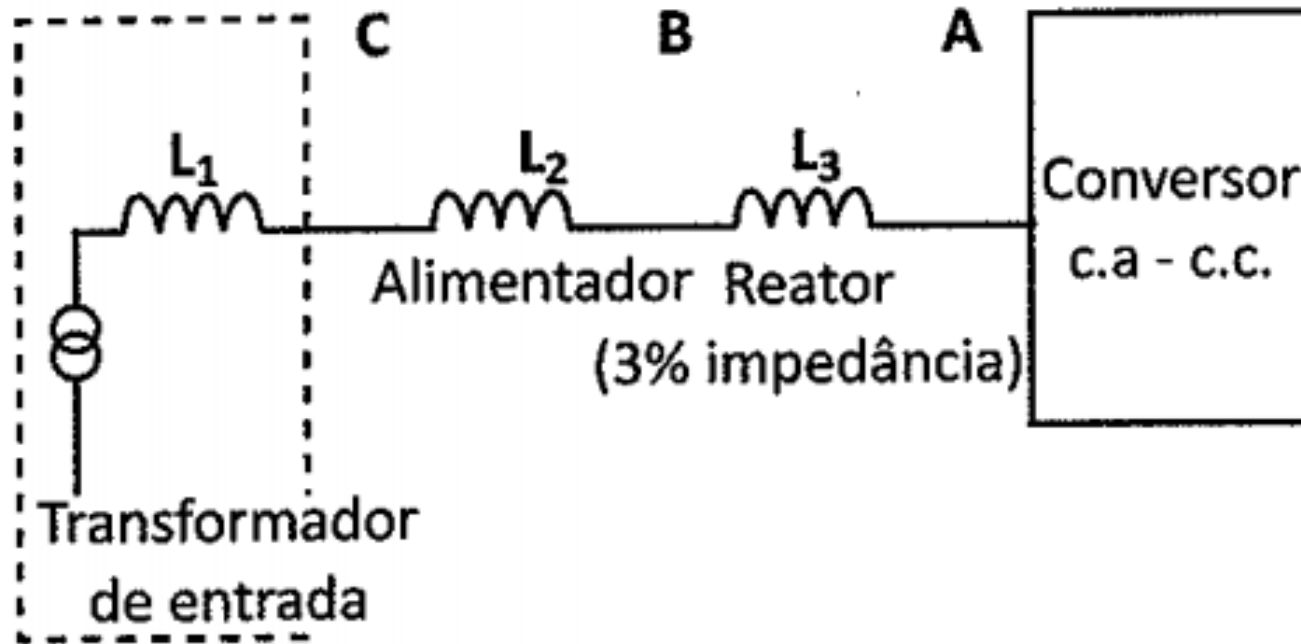
Notches de tensão não serão severos para afetar outros equipamentos, caso a impedância do sistema de distribuição seja pequena.

Podem causar falhas em relógios, sistemas de segurança ou equipamentos de TI, e produzir operação inapropriada de acionamentos variáveis.

Fontes de Harmônicos

Conversores Eletrônicos

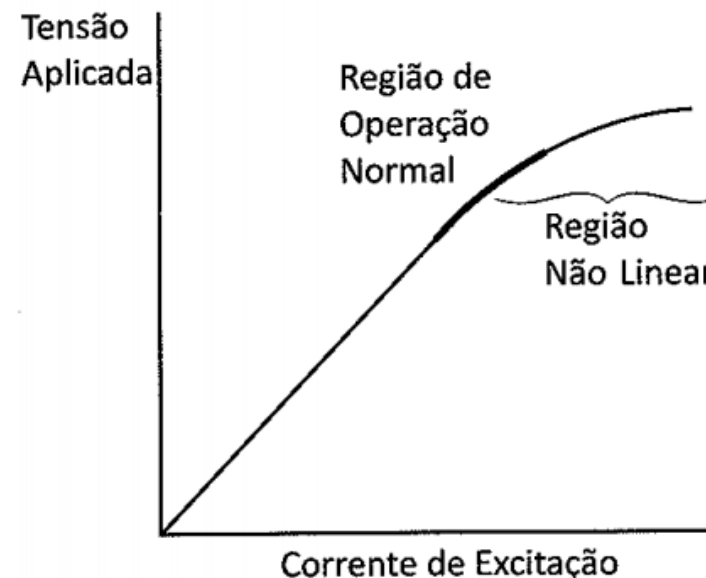
Notches de tensão: o método mais utilizado para amenizar os notches é criar um divisor de tensão, acrescentando reatores de linha.



Fontes de Harmônicos

Transformadores: devido às características não lineares dos materiais ferromagnéticos utilizados nos núcleos dos transformadores, a corrente de magnetização necessária à criação e manutenção do fluxo magnético é não senoidal. Operam próximo ao joelho da **curva de saturação**.

Figura 6.20 – Curva de excitação de transformadores.

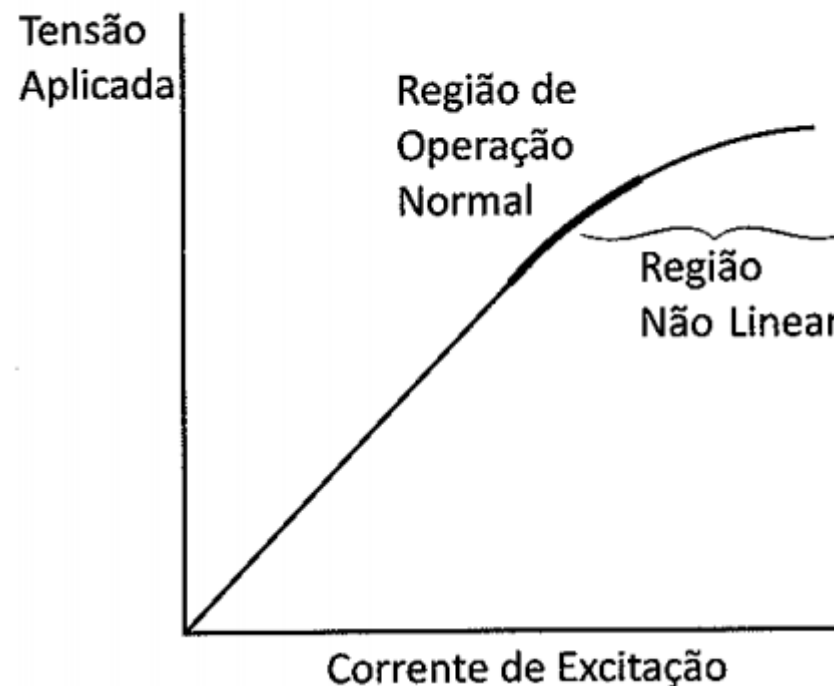


Fontes de Harmônicos

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Transformadores: Quando operam acima de V_{nominal} (em condição de carga leve, por exemplo - ~10%), os trafos trabalham na região de saturação (não linear), resultando em corrente de magnetização muito maior que a normal, e **bem distorcida**.

Figura 6.20 – Curva de excitação de transformadores.

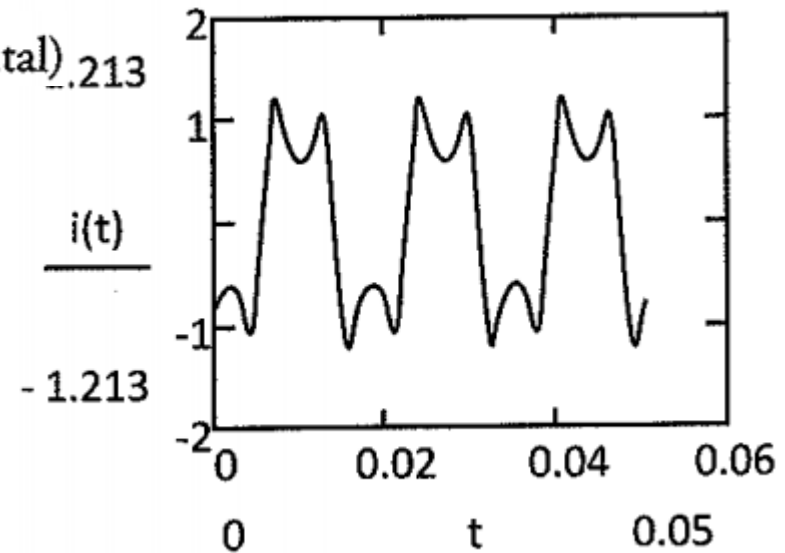


Fontes de Harmônicos

Transformadores: Conteúdo harmônico da corrente de magnetização de um transformador monofásico de baixa tensão:

h	1	3	5	7	9	11	13
$ i_h $ p.u.	1,0000	0,5176	0,1106	0,0303	0,0201	0,0080	0,0060
$\angle i_h^\circ$	-118,5	-9,9	100,3	46,6	147,2	105,6	-172,1

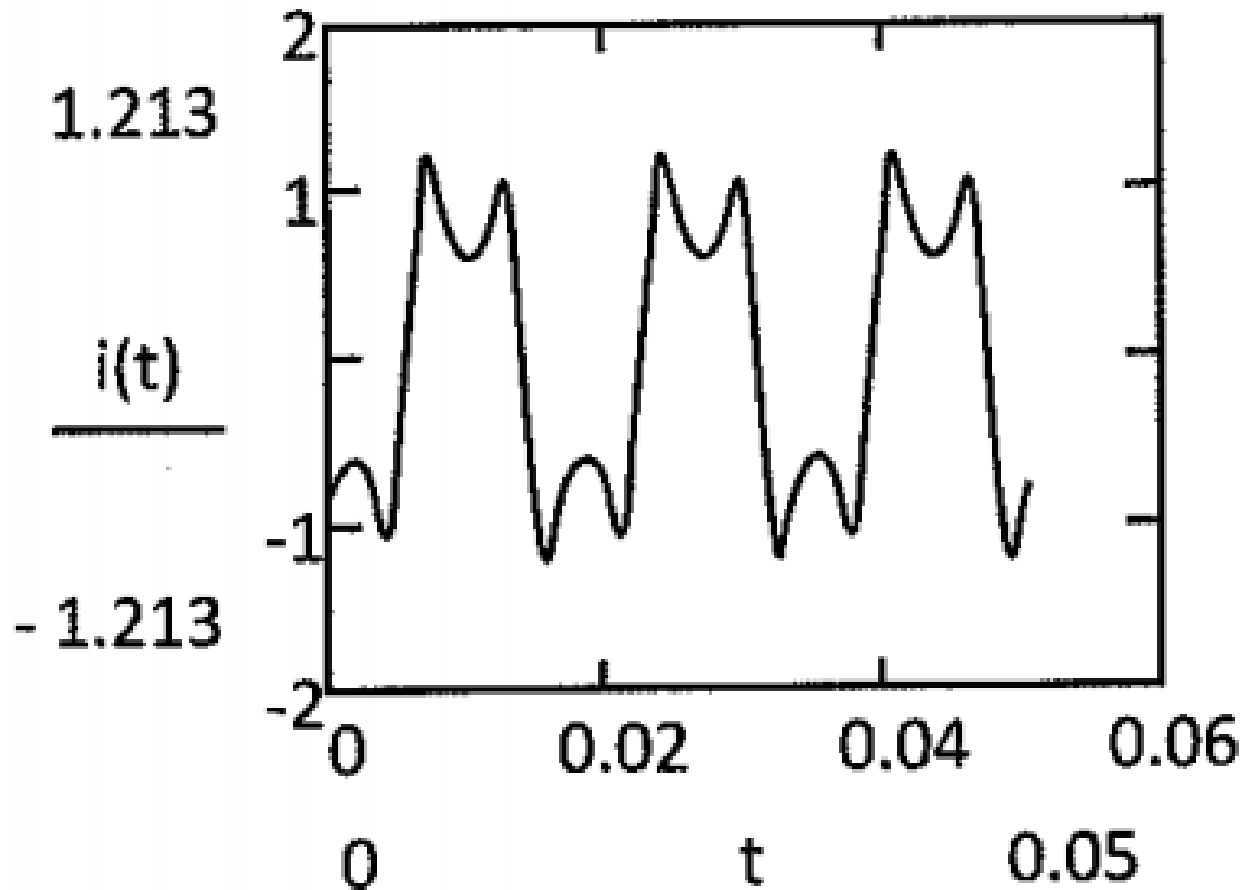
de 3ª ordem significativa ($\approx 50\%$ da fundamental)



Fontes de Harmônicos

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Transformadores: Conteúdo harmônico da corrente de magnetização de um transformador monofásico de baixa tensão:



Fontes de Harmônicos

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Transformadores: Conteúdo harmônico da corrente de magnetização de um transformador monofásico de baixa tensão:

h	1	3	5	7	9	11	13
$ i_h $ p.u.	1,0000	0,5176	0,1106	0,0303	0,0201	0,0080	0,0060
$\angle i_h^\circ$	-118,5	-9,9	100,3	46,6	147,2	105,6	-172,1

Pode provocar aumento de I_{RMS} e perdas ôhmicas.

$$I_m = \sum_{h=1}^{13} \sqrt{i_h^2}$$

$$= \sqrt{1 + (0,5176)^2 + (0,1106)^2 + (0,0302)^2 + (0,0201)^2 + (0,0080)^2 + (0,0060)^2}$$

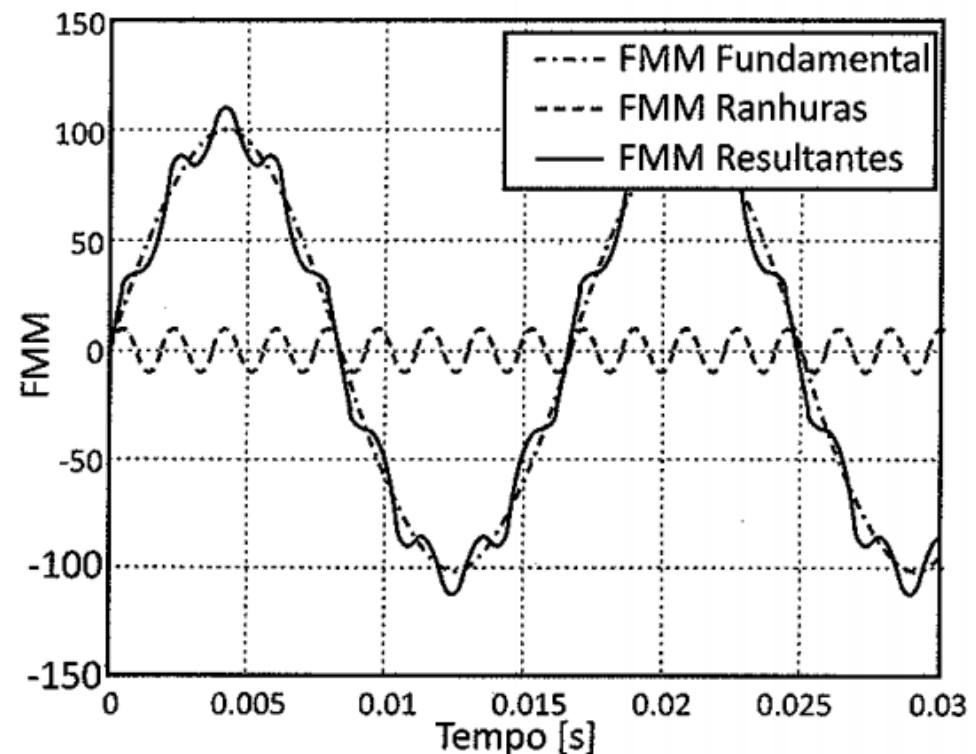
$$= 1,1321 \text{ p.u.}$$

Fontes de Harmônicos

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Máquinas Rotativas: o enrolamento de armadura distribuído por várias ranhuras permite criar uma onda FMM senoidal com frequência diferente da fundamental.

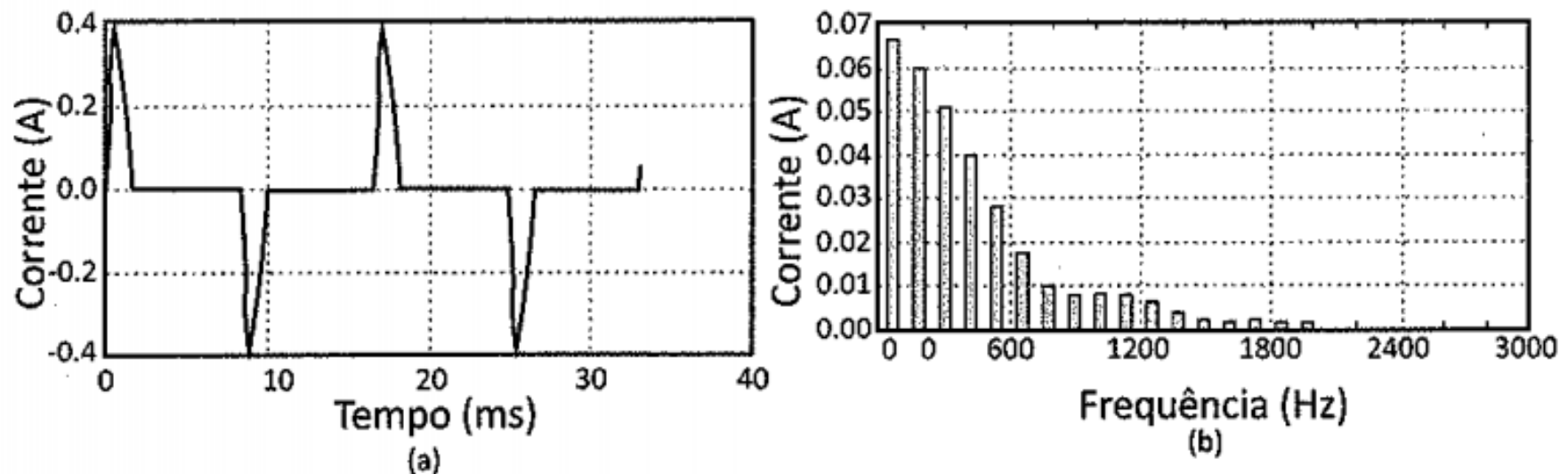
FMM presente no entreferro:



Fontes de Harmônicos

Iluminação: tem experimentado significativa evolução tecnológica, com aumento considerável na eficiência e redução no consumo de energia.

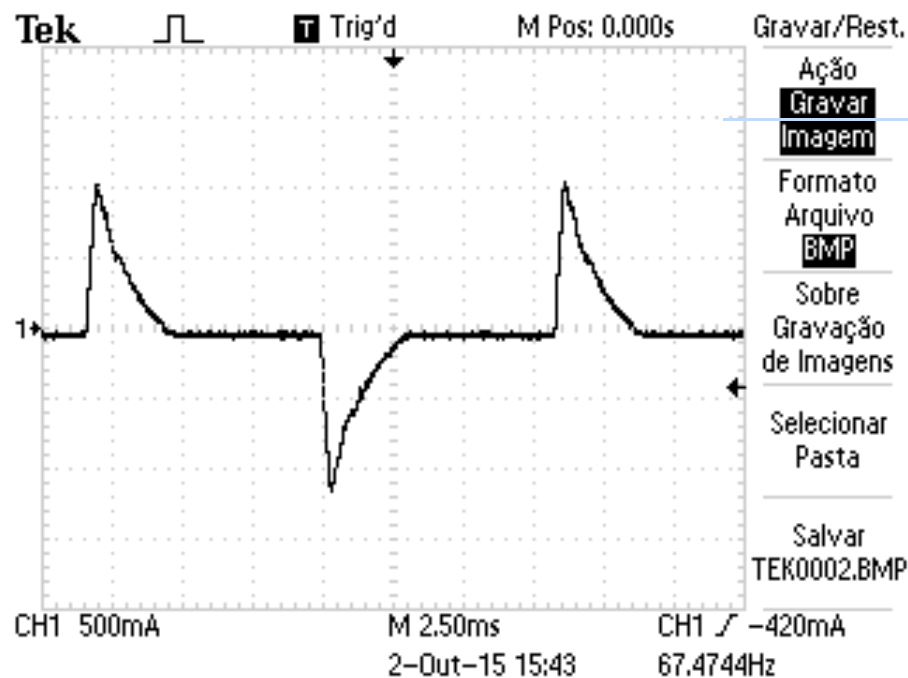
Figura 6.23 – Lâmpada fluorescente com reator eletrônico: (a) forma de onda, (b) espectro harmônico.



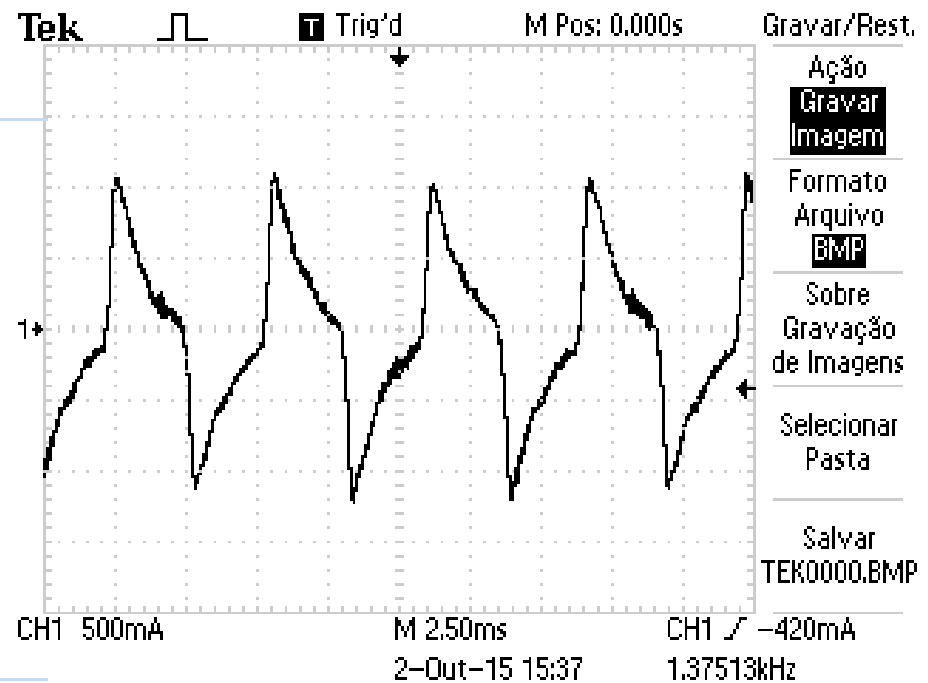
Fontes de Harmônicos

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Iluminação: tem experimentado significativa evolução tecnológica, com aumento considerável na eficiência e redução no consumo de energia.



Fase – True RMS: 0,38A



Neutro: 0,52A

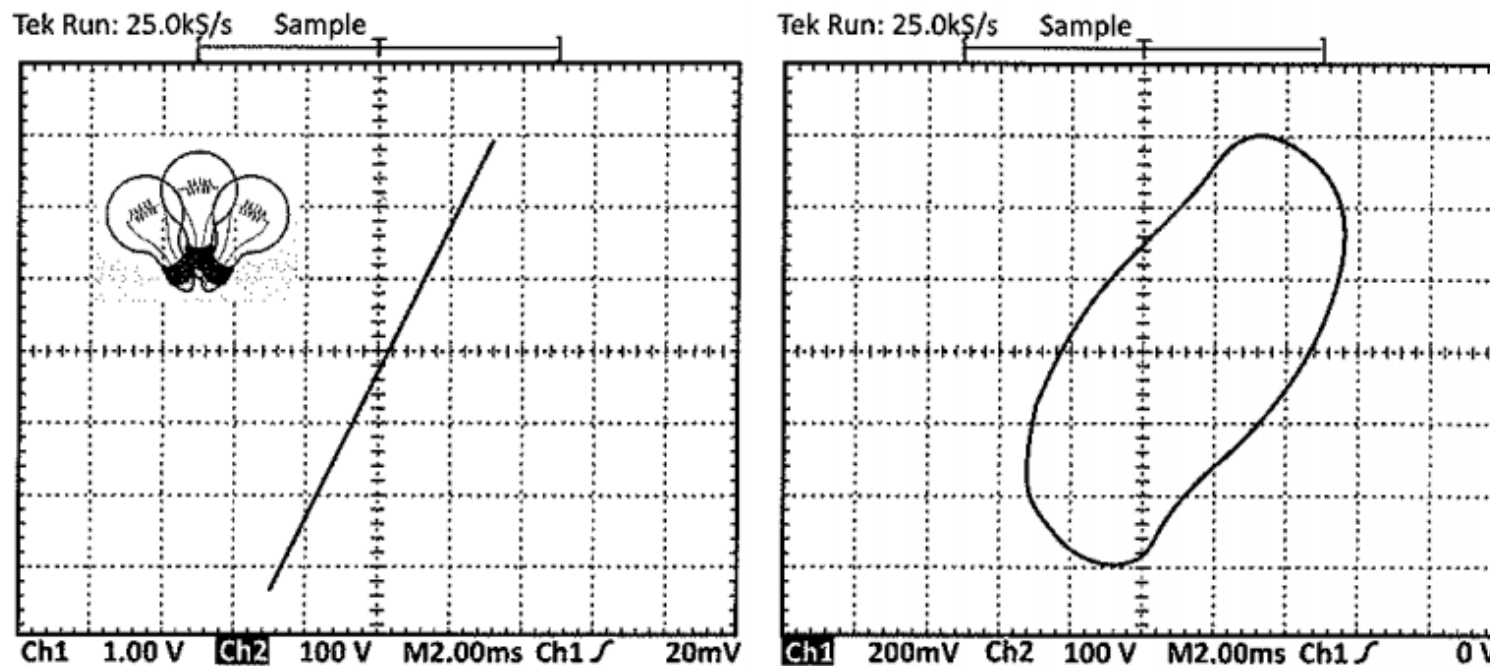
Ligação de 3 lâmpadas fluorescentes em estrela.

Fontes de Harmônicos

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Iluminação: tem experimentado significativa evolução tecnológica, com aumento considerável na eficiência e redução no consumo de energia.

Figura 6.24 – (a) Lâmpada incandescente com fator de correlação $V \times I$ de 0,99935;
(b) Lâmpada de descarga de vapor de Hg alta pressão HPL-N 400W/220V Phillips com fator de correlação $V \times I$ de 0,12636.

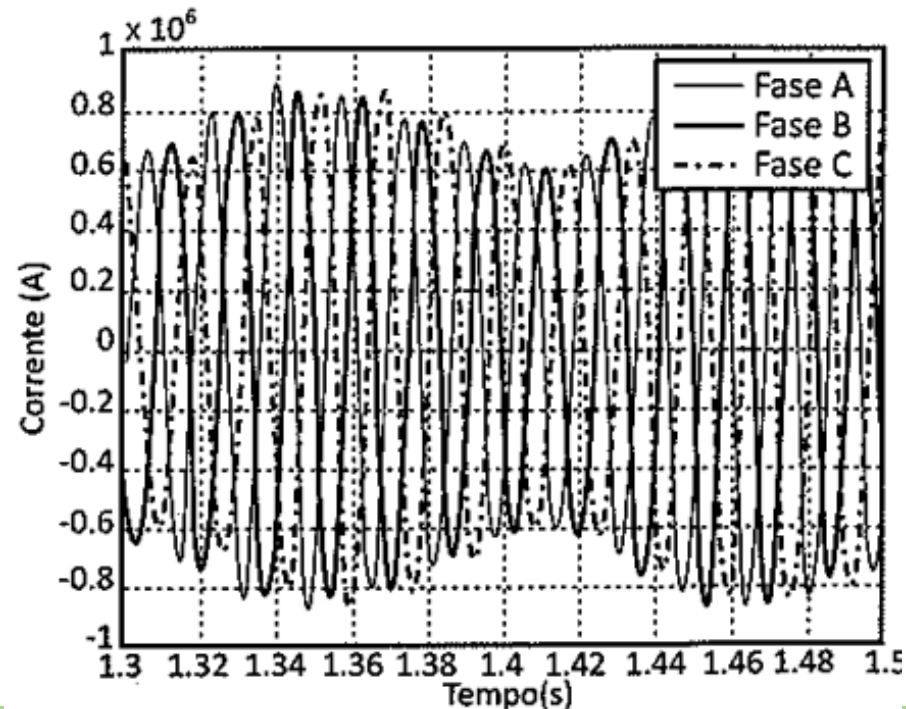


Fontes de Harmônicos

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Fornos Elétricos a Arco: usados no processo de fundição e refino de metais, principalmente ferro, para a produção de aço. O calor para aquecimento provém do arco elétrico.

Corrente no secundário do transformador do forno:



Fontes de Harmônicos

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Fornos Elétricos a Arco: os harmônicos são imprevisíveis, randômicos, por causa da variação do arco elétrico a cada ciclo. As mais predominantes são, nesta ordem, a 3^a, 2^a, 5^a e 4^a harmônicas.

Tabela 6.3 – Conteúdo harmônico de corrente de forno a arco em dois estágios de operação.

	Corrente Harmônica % da Fundamental				
	Ordem do Harmônico				
	2	3	4	5	7
Condição do forno: Início da fusão (arco ativo)	7,7	5,8	2,5	4,2	3,1
Refino (arco estável)	0,0	2,0	0,0	2,1	0,0

Efeitos dos Harmônicos

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

- Baixo Fator de potência;
- Correntes no neutro podem igualar ou exceder as correntes de fase;
- Sobreaquecimento de transformadores e motores;
- Atuação intepestiva de dispositivos de proteção (disjuntores, chaves seccionadoras, relés) ;

Efeitos dos Harmônicos

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

- Estresse, por possível avaria de capacitores de correção do fator de potência;
- Aumento da temperatura, estresse do isolamento, aumento da vibração, perda de dados, queima de motores, interferência nos sistemas de comunicação e de medição, etc.

Efeitos dos Harmônicos

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Motores e geradores: causam aumento na temperatura, perdas no ferro e cobre, afetando na eficiência das máquinas.

- Correntes harmônicas de sequência positiva criam, cada uma, um fluxo magnético rotativo direto no entreferro;
- Correntes harmônicas de sequência negativa produzem um campo magnético rotativo inverso;

Efeitos dos Harmônicos

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Assim, a corrente harmônica produzida no rotor terá uma frequência rotacional correspondente à **diferença rotacional líquida** entre a fundamental na ranhura e a harmônica h correspondente.

Ex.: 5^a (seq. negativa) $\rightarrow |1 - (-5)| = 6^a$ harmônica

Ex.: 7^a (seq. positiva) $\rightarrow |1 - (7)| = 6^a$ harmônica

Efeitos dos Harmônicos

Motores e geradores:

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Ex.: 5ª (seq. negativa) $\rightarrow |1-(-5)| = 6^{\text{a}}$ harmônica

Ex.: 7ª (seq. positiva) $\rightarrow |1-(7)| = 6^{\text{a}}$ harmônica

Tabela 6.4 – Componentes harmônicas induzidas no rotor.

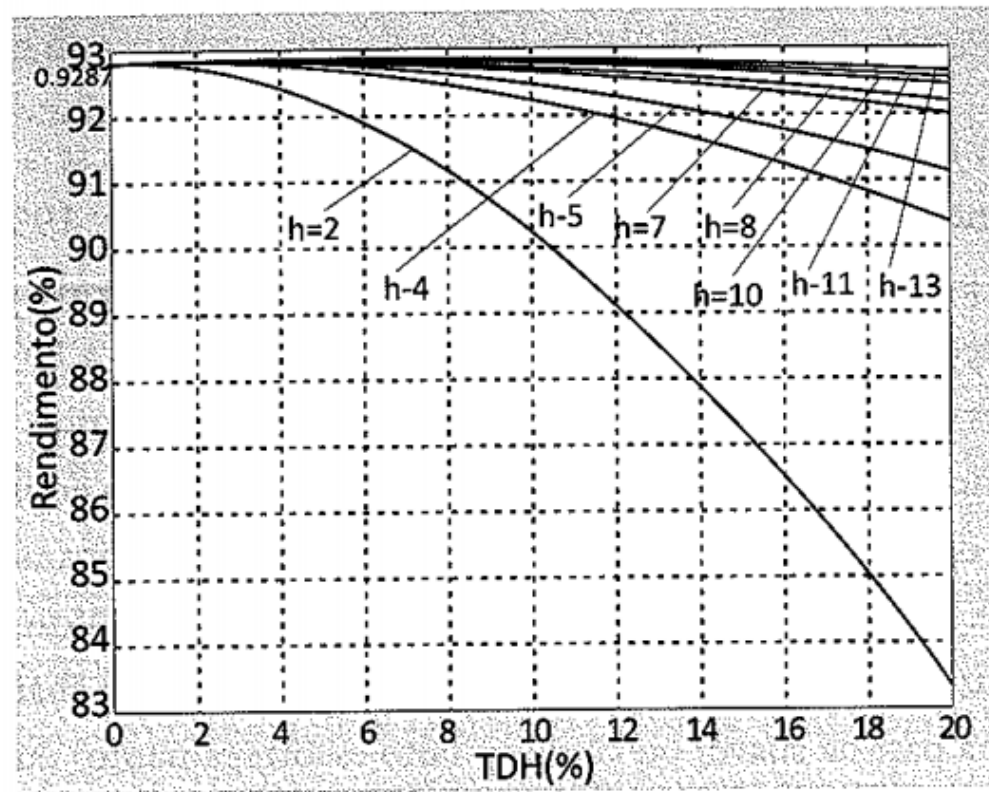
Ordem harmônica	Frequência Hz	Sequência	Harmônica no estator	Rotação da harmônica	Harmônica no rotor
1	60	+	1	<i>forward</i>	-
5	300	-	5	<i>backward</i>	6
7	420	+	7	<i>forward</i>	6
11	660	-	11	<i>backward</i>	12
13	780	+	13	<i>forward</i>	12
17	1020	-	17	<i>backward</i>	18
19	1140	+	19	<i>forward</i>	18
23	1380	-	23	<i>backward</i>	24
25	1500	+	25	<i>forward</i>	24

Fonte: IEEE Std. 519 (1992).

Efeitos dos Harmônicos

Motores e geradores: os maiores efeitos dos harmônicos nestas máquinas são o calor resultante e o torque pulsante.

Figura 6.31 – Variação do rendimento em motor de indução com distorção na tensão de alimentação.



Efeitos dos Harmônicos

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Motores e geradores: os torques pulsantes podem interromper processos produtivos sensíveis, como bobinadeiras na indústria de papel e celulose.

O uso crescente dos acionamentos de velocidade variável aumentou os níveis de distorção aplicados aos motores, embora novas técnicas de chaveamento os estejam reduzindo consideravelmente.

Problemas de aquecimento excessivo geralmente ocorrem quando a DHT_v atinge de 8% a 10%.

Efeitos dos Harmônicos

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Transformadores: por causa das harmônicas triplas, o primário dos trafos são ligados em delta, não sendo injetadas no sistema de alimentação.

Mas 5ª e 7ª harmônicas da corrente de excitação são injetadas no sistema. O efeito é mais acentuado quando o transformador está operando com pouca carga e a tensão é elevada, aumentando a corrente de excitação.

Tabela 6.5 – Nível de distorção admissível em transformadores.

Plena carga	Vazio
$\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2} \leq 5\%$	$\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2} \leq 10\%$

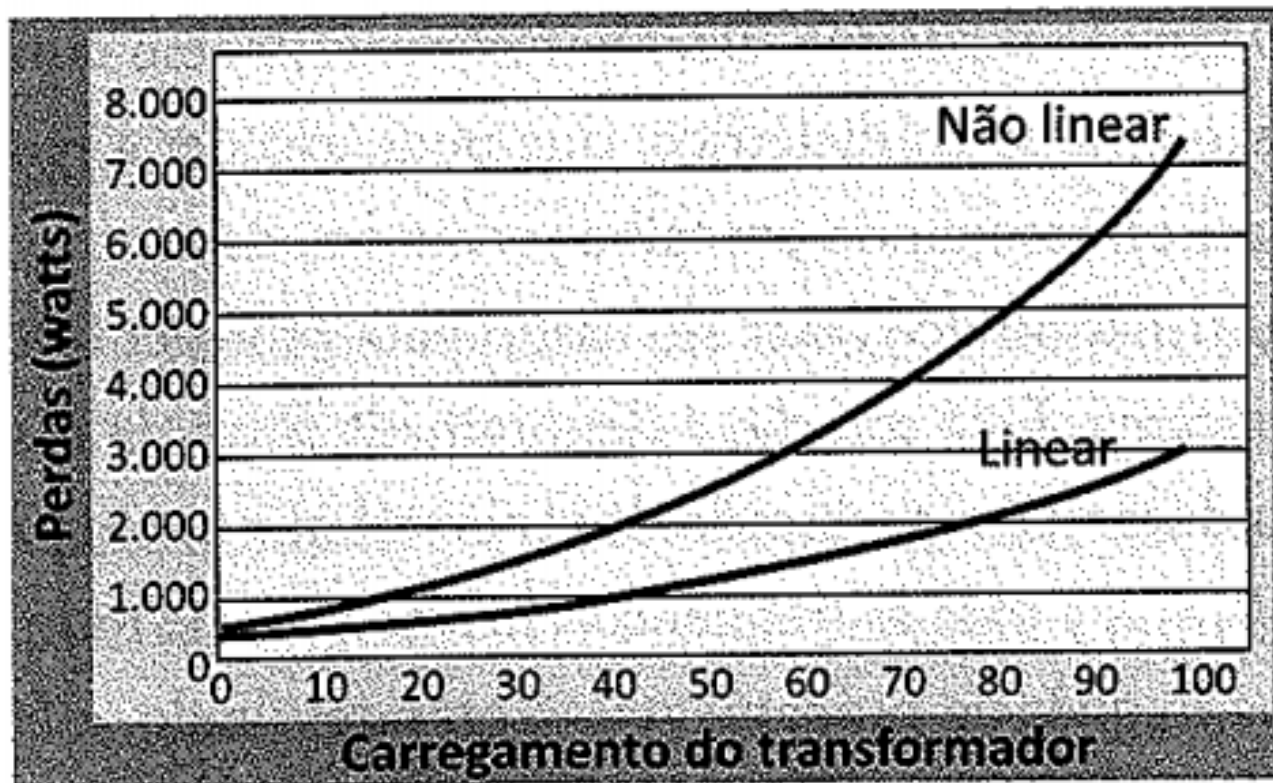
Efeitos dos Harmônicos

Transformadores:

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Aumenta perdas no cobre, núcleo e perdas por correntes parasitas;

Perdas em um transformador de 75 kVA suprindo cargas linear e não linear.



Efeitos dos Harmônicos

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Banco de capacitores:

Não geram harmônicos, mas são altamente sensíveis à sua presença.

São receptores naturais de frequência harmônicas produzidas por cargas não lineares e, por oferecerem aos harmônicos um caminho de baixa impedância, ficam suscetíveis a sobrecarga. Com o aumento da tensão no dielétrico, pode resultar em falha prematura.

Banco de capacitores:

Sempre haverá uma frequência em que os capacitores estarão em ressonância com o fornecimento. A maior preocupação está nas frequências iguais ou próximas às de 5^a, 7^a, 11^a e 13^a ordens.

Ressonância impõe tensões e correntes consideravelmente elevadas.

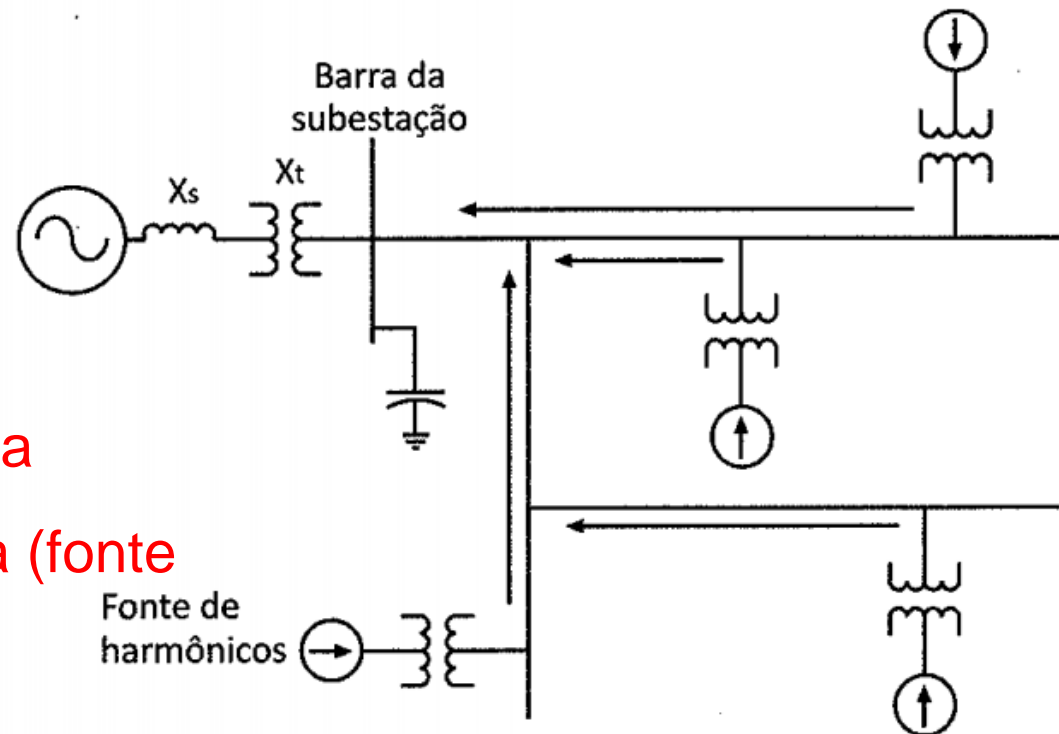
Efeitos dos Harmônicos

Banco de capacitores:

Ressonância Paralela: as correntes harmônicas tendem a fluir das cargas não lineares em direção a baixas impedâncias (fonte da concessionária e capacitor).

Ponto de vista das fontes de harmônicos:

Capacitor em paralelo com a impedância total do sistema (fonte e transformador)



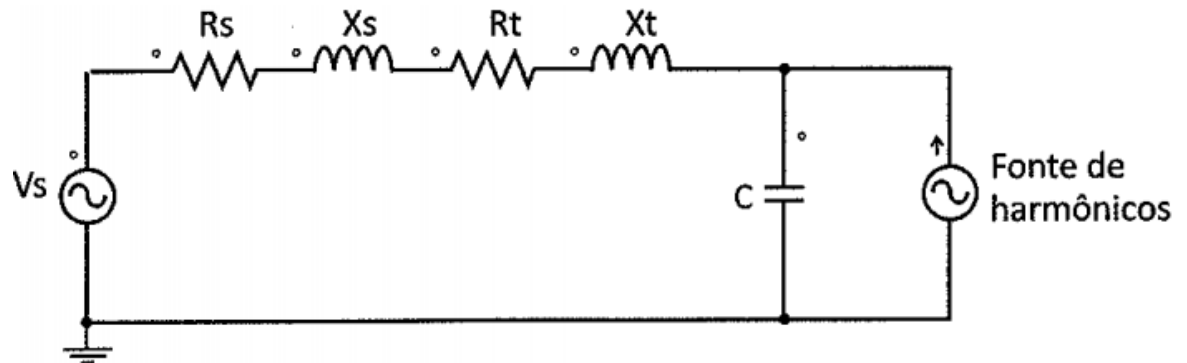
Efeitos dos Harmônicos

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Banco de capacitores:

Ressonância Paralela: neste caso, a tensão na barra da subestação pode ser amplificada, em caso de ressonância.

Ponto de vista das fontes de harmônicos (**visto da barra da subestação**):



Capacitor em paralelo com a

impedância total do sistema (fonte e transformador)

Efeitos dos Harmônicos

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Banco de capacitores:

Ressonância Paralela:

Magnitude da impedância equivalente:

$$|Z_s| = \frac{V^2}{S_{cc}}$$

V tensão nominal fase-fase;

S_{cc} potência aparente de curto-circuito trifásica.

Em pu:

$$Z_{s,pu} = \frac{Z_s}{Z_{b1}} = \frac{(V^2/S_{cc}^*)}{(V_{b1}^2/S_b)}$$

Se $V = V_{b1} \rightarrow$

$$Z_{s,pu} = \frac{S_b}{S_{cc}^*} = \frac{1}{S_{cc,pu}^*}$$

Z do transformador em pu:

$$Z_{t,pu} = \frac{R_t + jX_t}{Z_{b1}} = R_{t,pu} + jX_{t,pu}$$

Reatância do capacitor em pu:

$$X_{c,pu} = \frac{X_c}{Z_{b2}} = \frac{X_c}{(V_2^2/S_b)} = \frac{1}{Q_{c,pu}}$$

Efeitos dos Harmônicos

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Banco de capacitores:

Ressonância Paralela:

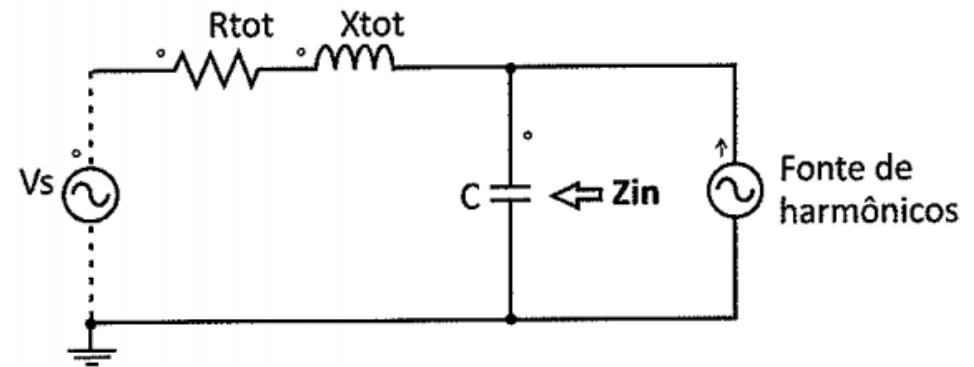
Como o SEP tem fonte de tensão apenas em 60Hz, esta é curto circuitada para as demais frequências.

Z vista pela fonte de harmônicos:

$$Z_{in} = \frac{-jX_c (R_{tot} + jX_{tot})}{R_{tot} + j(X_{tot} - X_c)}$$

em que:

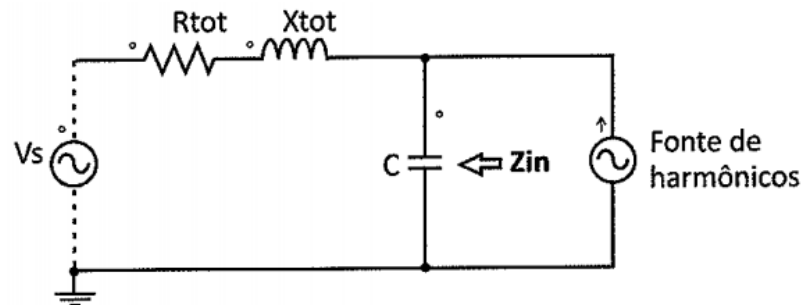
$$R_{tot} + jX_{tot} = (R_s + R_l) + j(X_s + X_l)$$



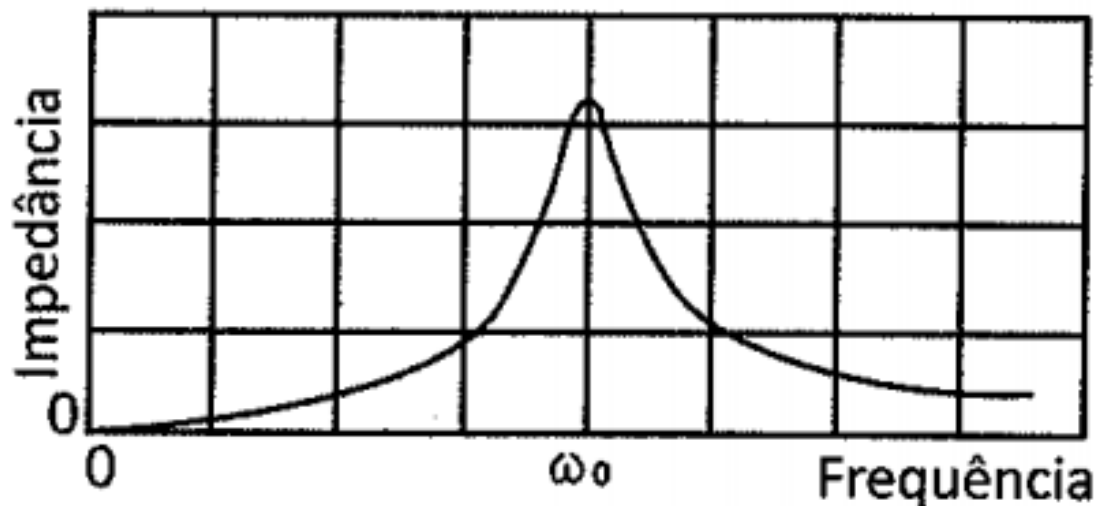
Efeitos dos Harmônicos

Banco de capacitores:

Ressonância Paralela:



Como X_L e X_C variam com a frequência, Z_{in} determina impedância do SEP em qualquer frequência:



Efeitos dos Harmônicos

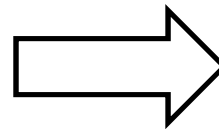
ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Banco de capacitores:

Ressonância Paralela:

Na frequência ressonante ($X_{tot} = X_C$), Z_{in} torna-se muito elevada:

$$Z_{in} = \frac{-jX_c (R_{tot} + jX_{tot})}{R_{tot} + j(X_{tot} - X_c)}$$



$$Z_{in} = \frac{X_c (X_{tot} - jR_{tot})}{R_{tot}}$$

Efeitos dos Harmônicos

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Banco de capacitores:

Ressonância Paralela:

$$Z_{in} = \frac{X_c (X_{tot} - jR_{tot})}{R_{tot}}$$

Considerando que $R_{tot} \ll X_{tot}$:

$$Z_{in} \cong \frac{X_{tot}^2}{R_{tot}} = \frac{X_c^2}{R_{tot}} = QX_{tot} = QX_c$$

$$Q = \frac{X_{tot}}{R_{tot}}$$

Q, definido como fator de qualidade, determina a amplitude da impedância paralela na frequência ressonante:

Efeitos dos Harmônicos

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Banco de capacitores:

Ressonância Paralela:

Nota-se que, durante a ressonância paralela, uma pequena corrente harmônica pode causar grande queda de tensão sobre a impedância Z_{in} . **A tensão na barra do capacitor será amplificada e altamente distorcida:**

Corrente no capacitor será ampliada Q vezes na ressonância:

Efeitos dos Harmônicos

Banco de capacitores:

Ressonância Paralela:

A ordem do harmônico que causa a ressonância é calculado como:

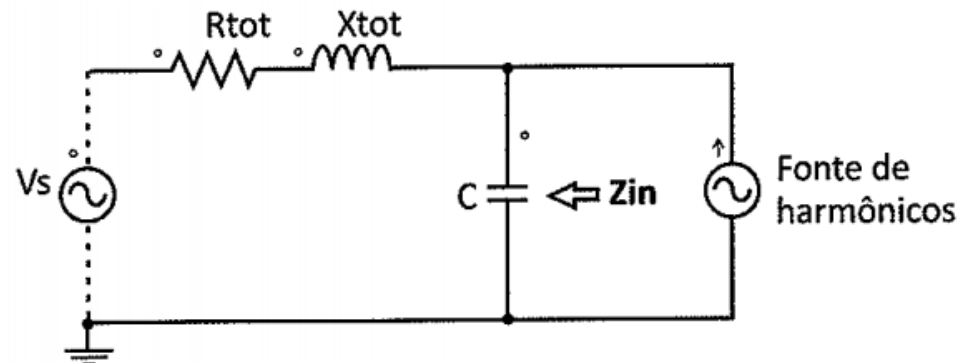
$$h_r = \sqrt{\frac{X_{c,1}}{X_{tot,1}}}$$

ou

$$h_r = \sqrt{\frac{V^2/X_{tot,1}}{V^2/X_{c,1}}} = \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q_c}}$$

Se $X_{s,1} \ll X_{t,1}$:

$$h_r = \sqrt{\frac{X_{c,1}}{X_{t,1}}}$$



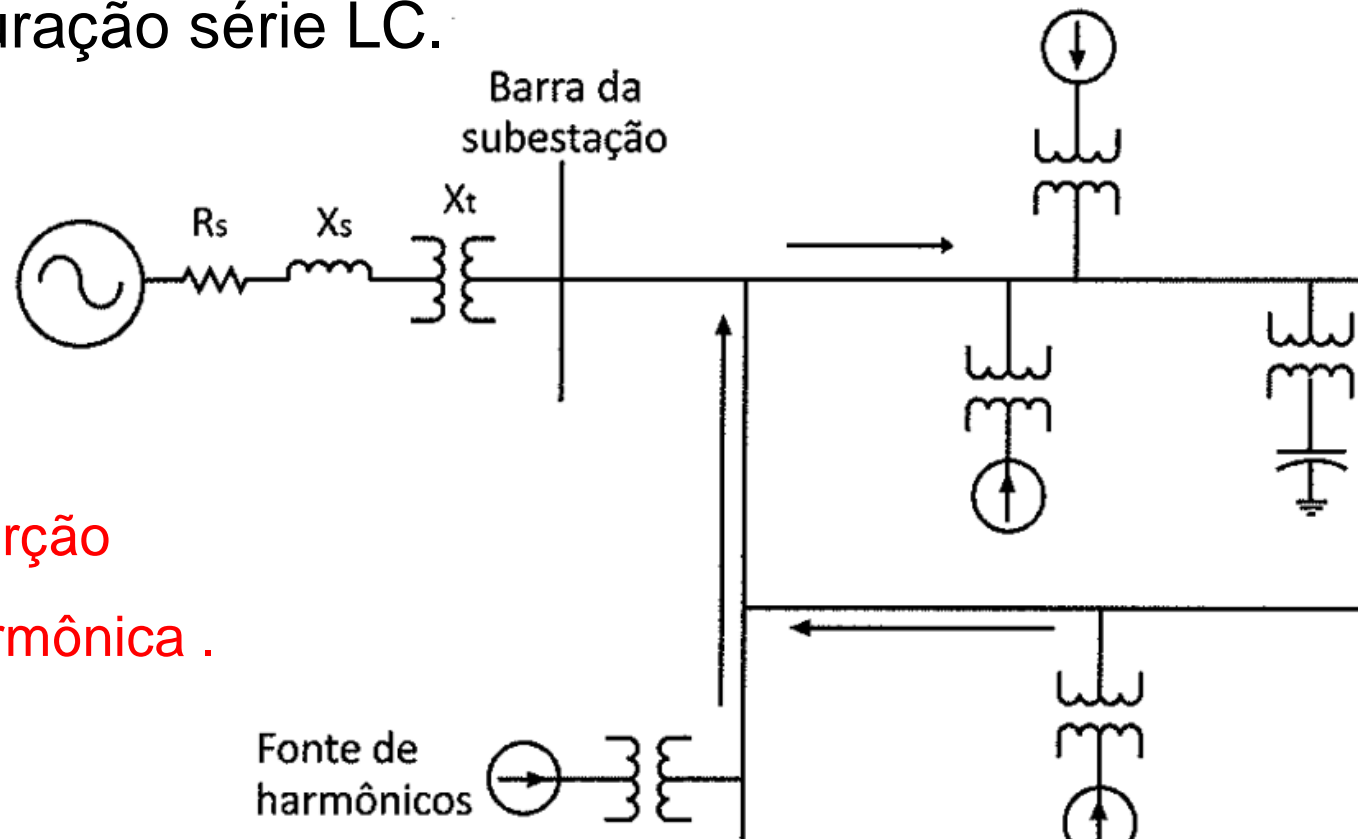
$$R_{tot} + jX_{tot} = (R_s + R_t) + j(X_s + X_t)$$

Efeitos dos Harmônicos

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Banco de capacitores:

Ressonância Série: pode acontecer do capacitor e a indutância do transformador ou da linha de distribuição se apresentarem numa configuração série LC.



O LC drenará
uma grande porção
da corrente harmônica .

Efeitos dos Harmônicos

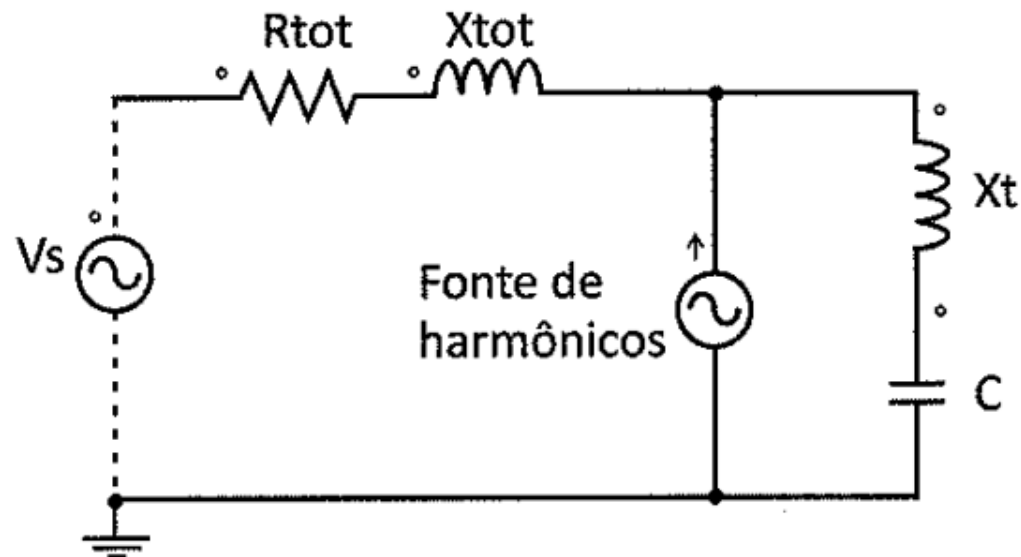
Banco de capacitores:

Ressonância Série: o capacitor para correção do FP forma um circuito série com o transformador de entrada do

$$V_c = \frac{X_c}{R_t + j(X_t - X_c)} V_b$$

Na ressonância $X_t = X_c$:

$$V_c = \frac{X_c}{R_t} V(\omega_0)$$



Ramo LC pode absorver harmônicos, desviando-os da fonte de alimentação (princípio do filtro sintonizado).

Neste caso ocorre simultaneamente a ressonância paralela.

Efeitos dos Harmônicos

Banco de capacitores:

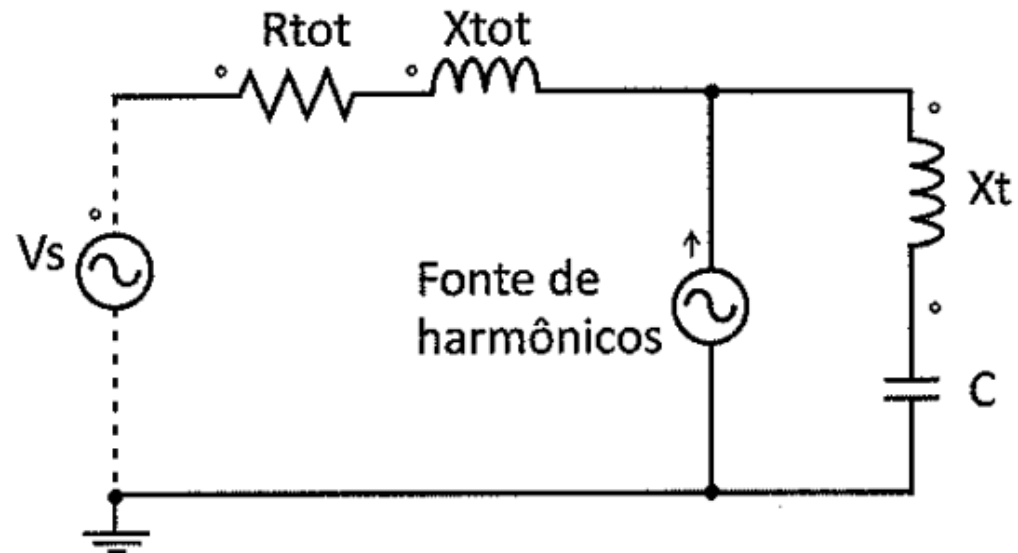
Neste caso ocorre simultaneamente a ressonância serie e paralela, pois as correntes harmônicas podem ser desviadas também para a fonte de alimentação.

Z é máxima, Y é mínima:

$$Y = \frac{1}{R_{tot} + jX_{tot}} - j \frac{1}{X_t - X_c}$$

$R_{tot} \ll X_{tot}$ e Y mínima:

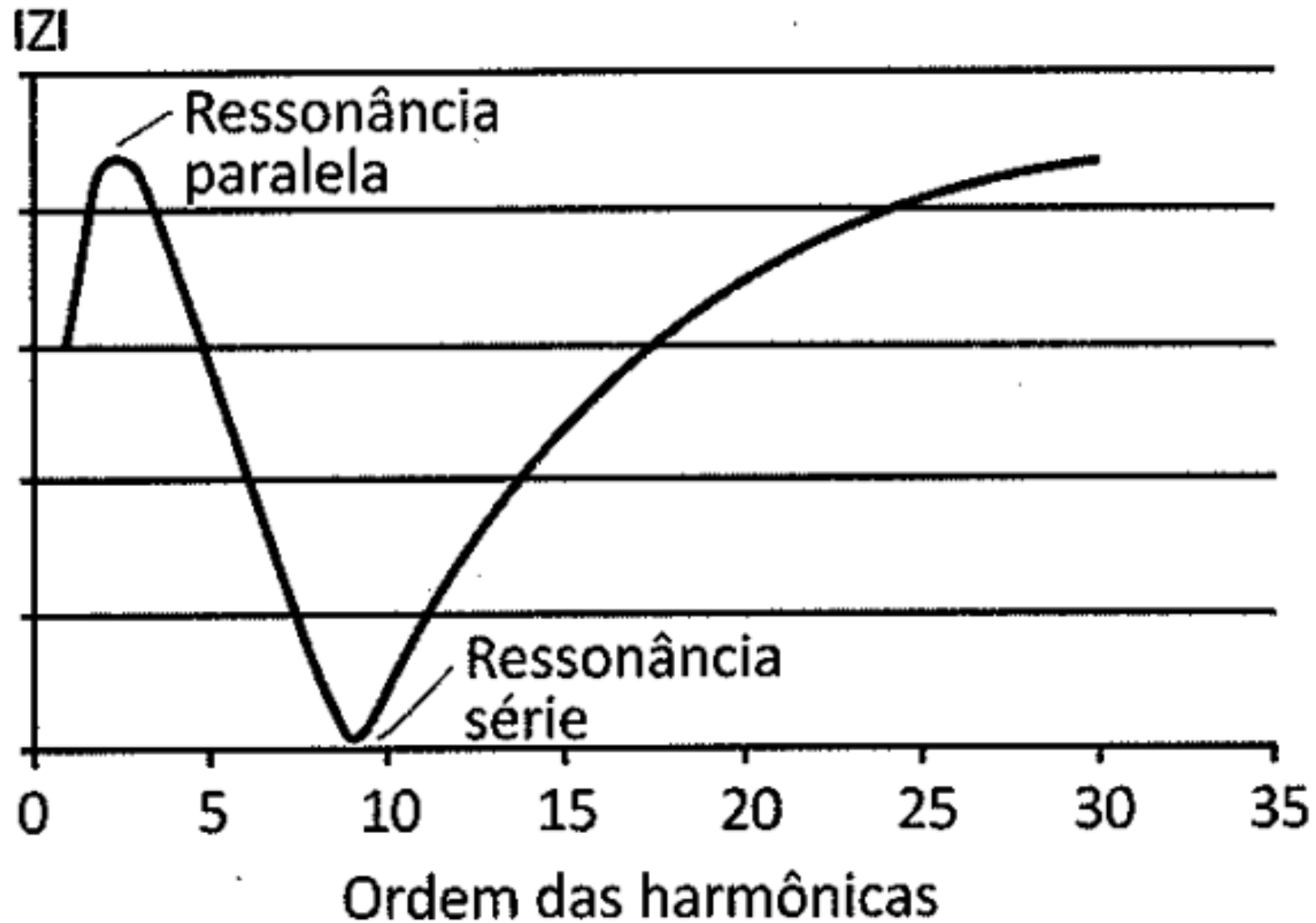
$$\frac{1}{hX_{tot,1}} = \frac{1}{(hX_{t,1} - X_{c,1}/h)}$$



$$h_r = \sqrt{\frac{X_{c,1}}{X_{t,1} - X_{tot,1}}}$$

Efeitos dos Harmônicos

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA



Efeitos dos Harmônicos

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Banco de capacitores:

Para evitar a ressonância, algumas medidas podem ser tomadas:

- Variar a potência de saída do Banco de Capacitores a fim de alterar a frequência de ressonância;
- chavear módulos de capacitores para permitir flexibilidade e mudança na frequência ressonante para cada unidade capacitiva adicionada.

Banco de capacitores:

Limites de operação dos capacitores

-Tolerância de variação da capacitância (IEE 1531, 2003):

- 10% (25° C). No projeto de filtros, é reduzida para $\pm 5\%$ da nominal;
- 110 % da tensão rms nominal