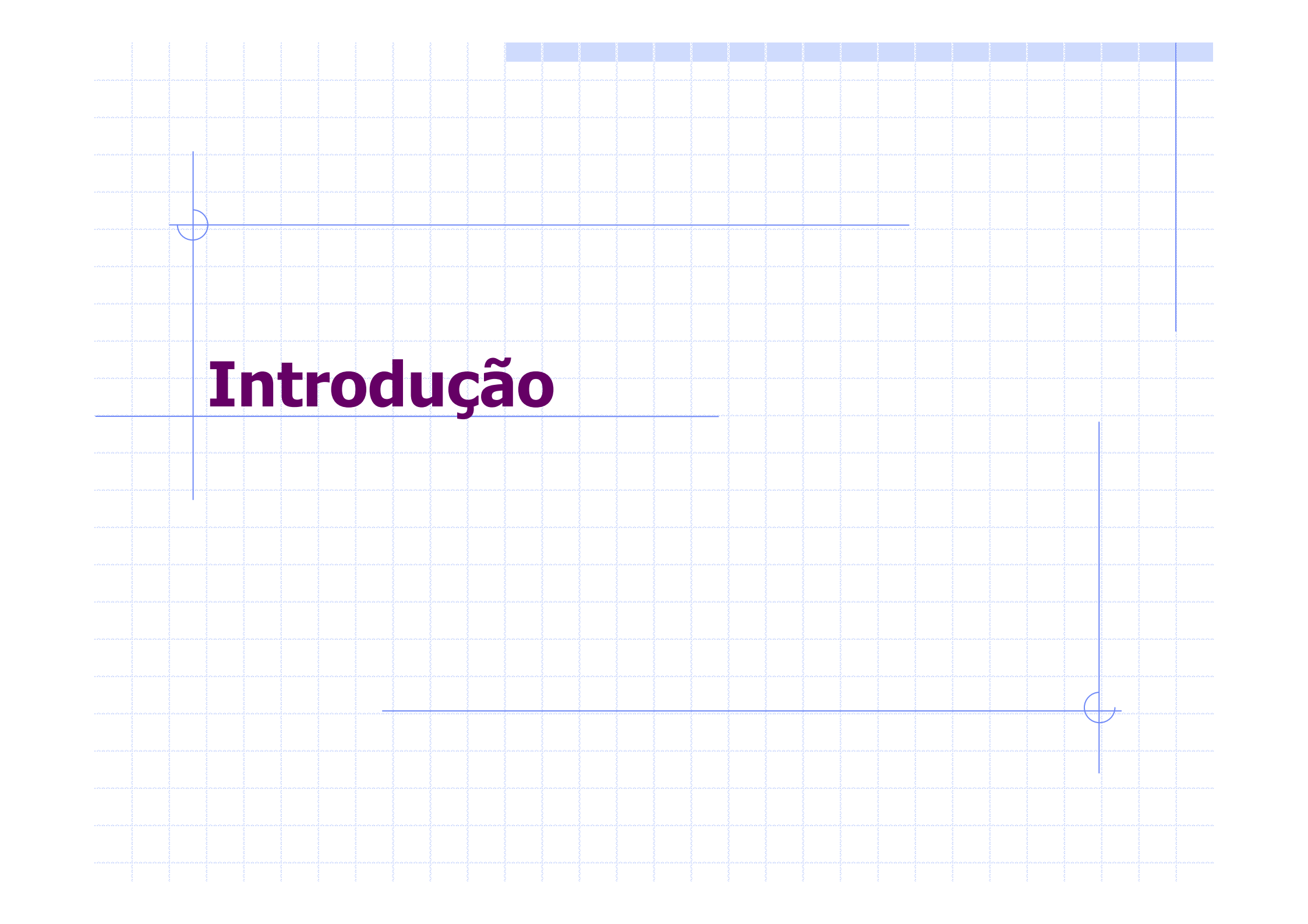




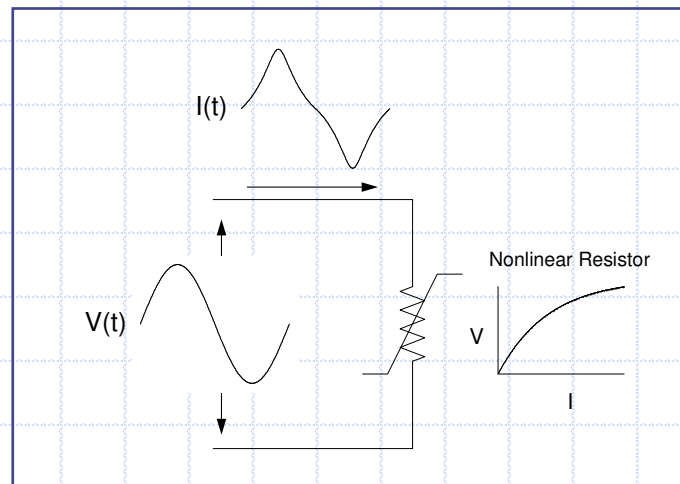
Harmônicos



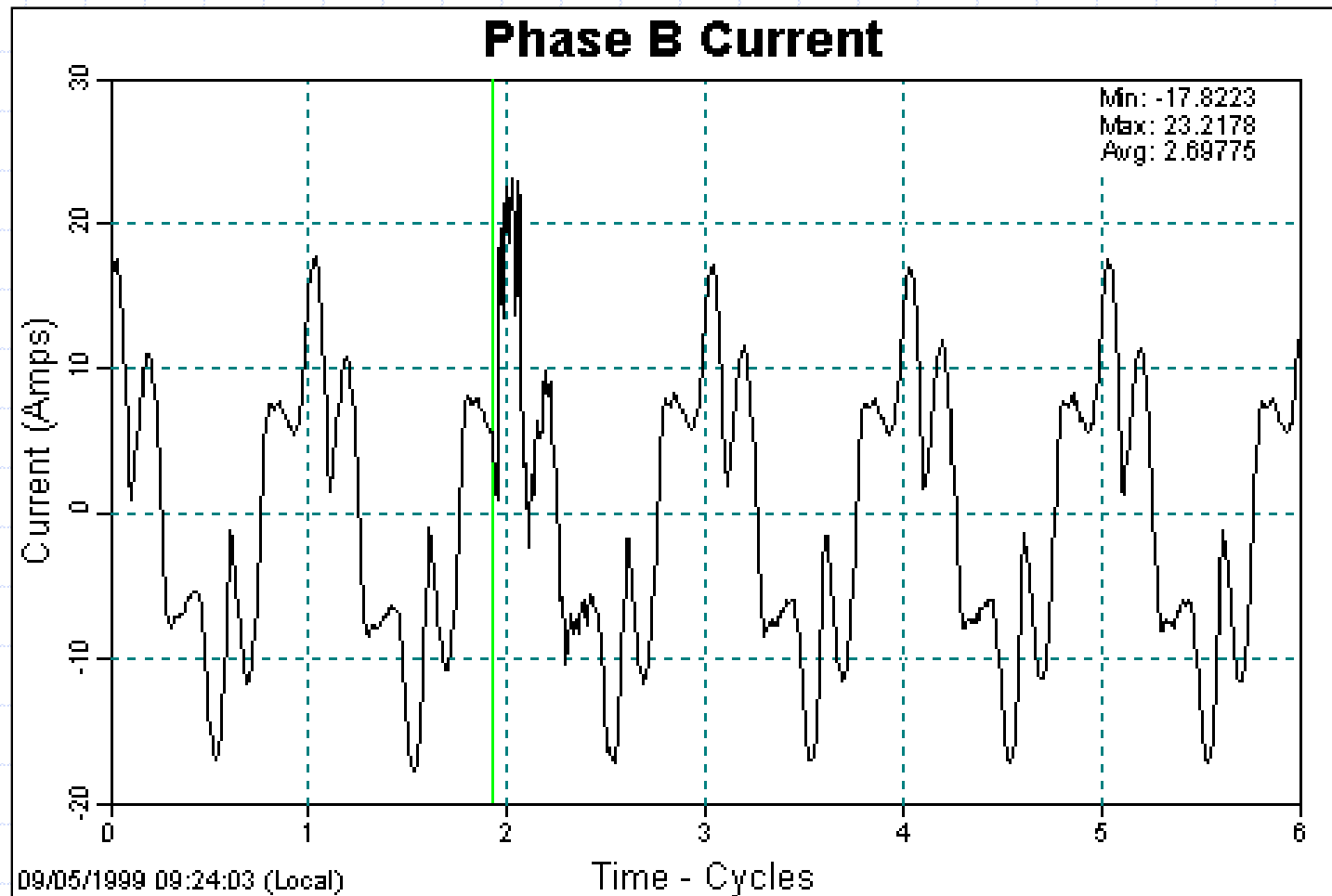
Introdução

O que são harmônicos?

- ◆ Harmônicos são causados por distorções periódicas nas formas de onda de correntes e tensões
- ◆ A distorção é proveniente de dispositivos não lineares, principalmente cargas



Exemplo de forma de onda de corrente num escritório

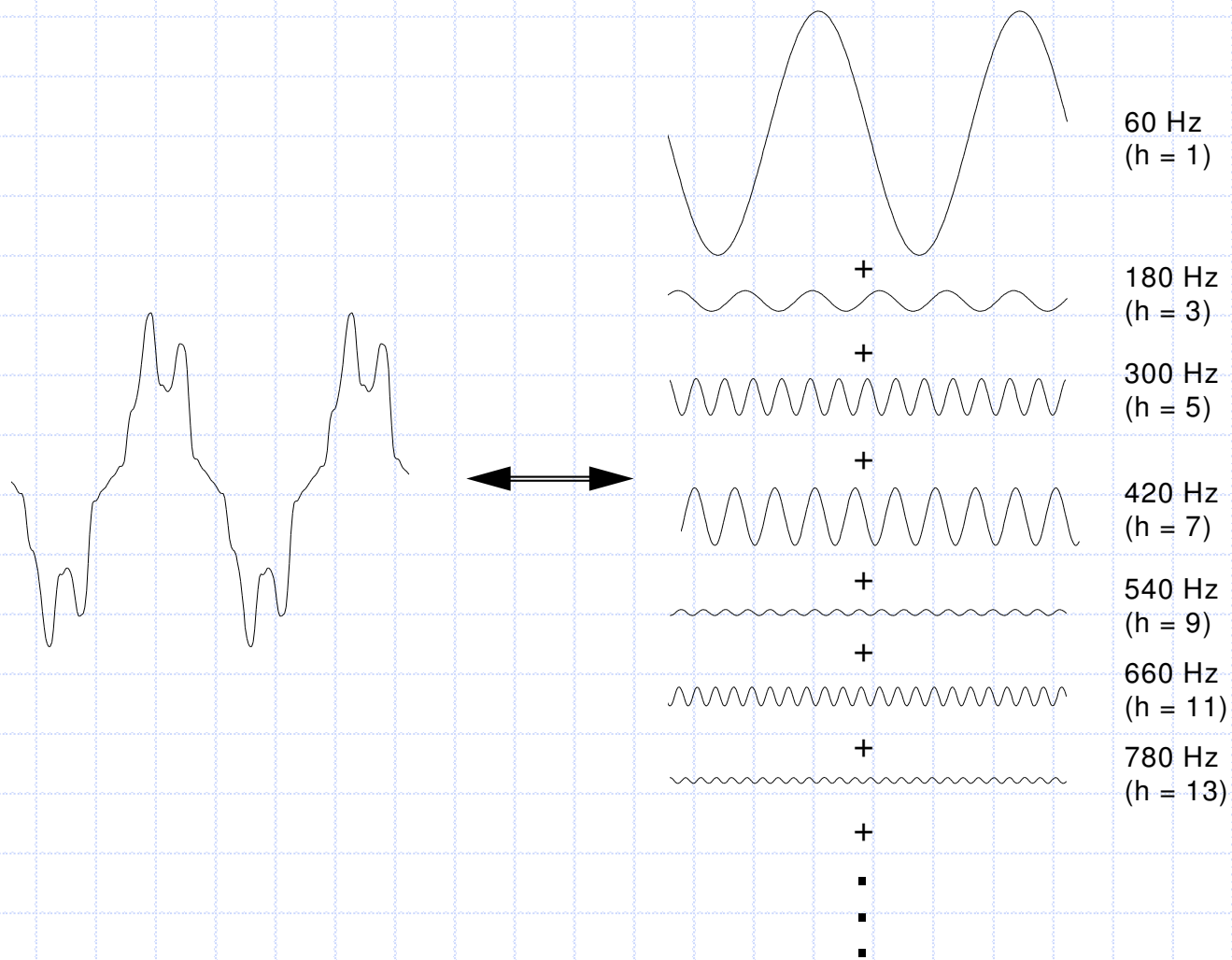


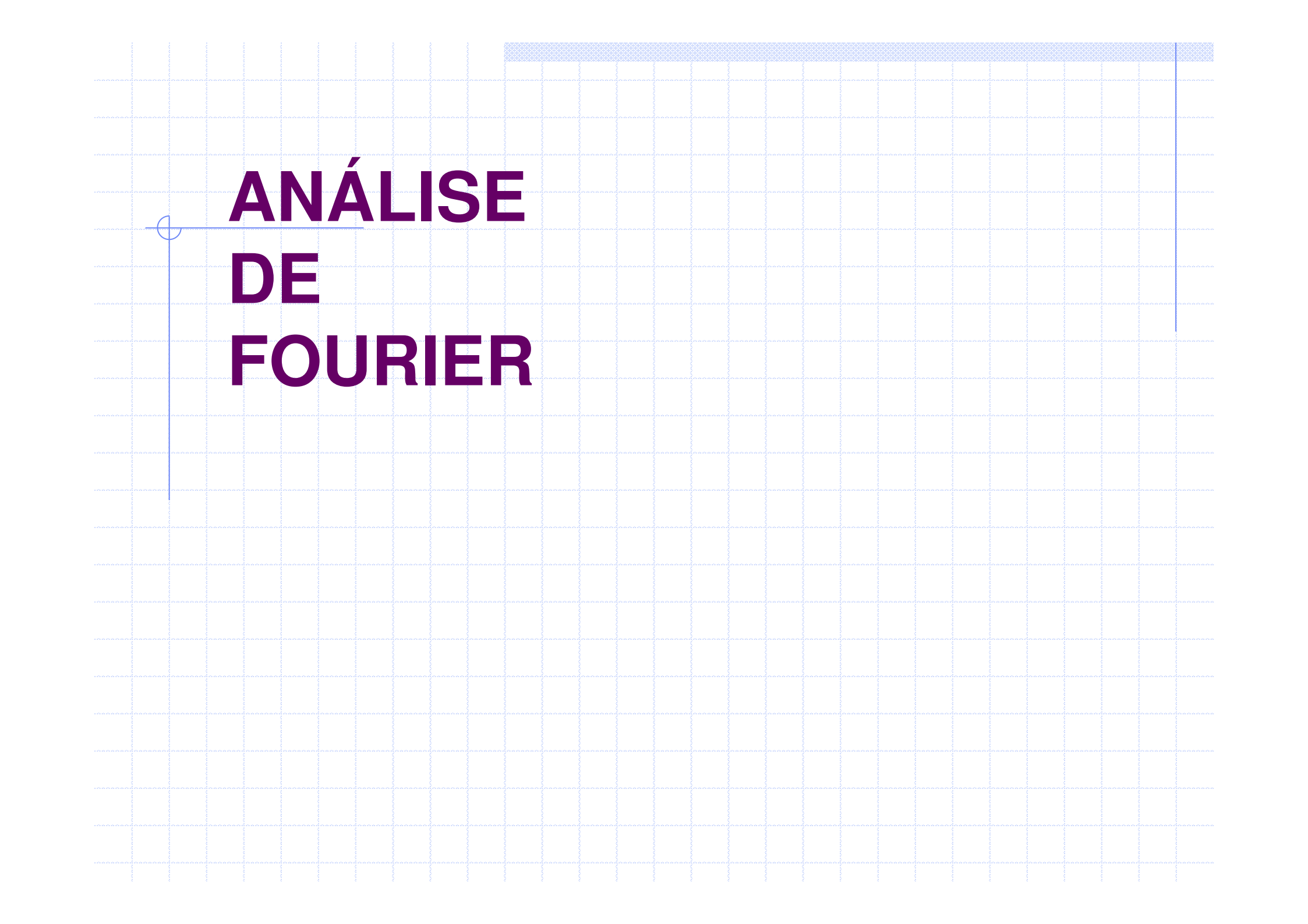
Fourier, Jean B.J.



1768 - 1830, Auxerre France

Decomposição em componentes harmônicas





ANÁLISE DE FOURIER

Função Periódica

$$f(t) = f(t + hT), \quad h = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

T : período da função $f(t)$

Uma função
periódica
pode ser
representada
pela soma
de componentes
senoidais de
frequências
harmônicas



Série de Fourier

$$f(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} \{a_h \cos(h\omega_0 t) + b_h \sin(h\omega_0 t)\}$$

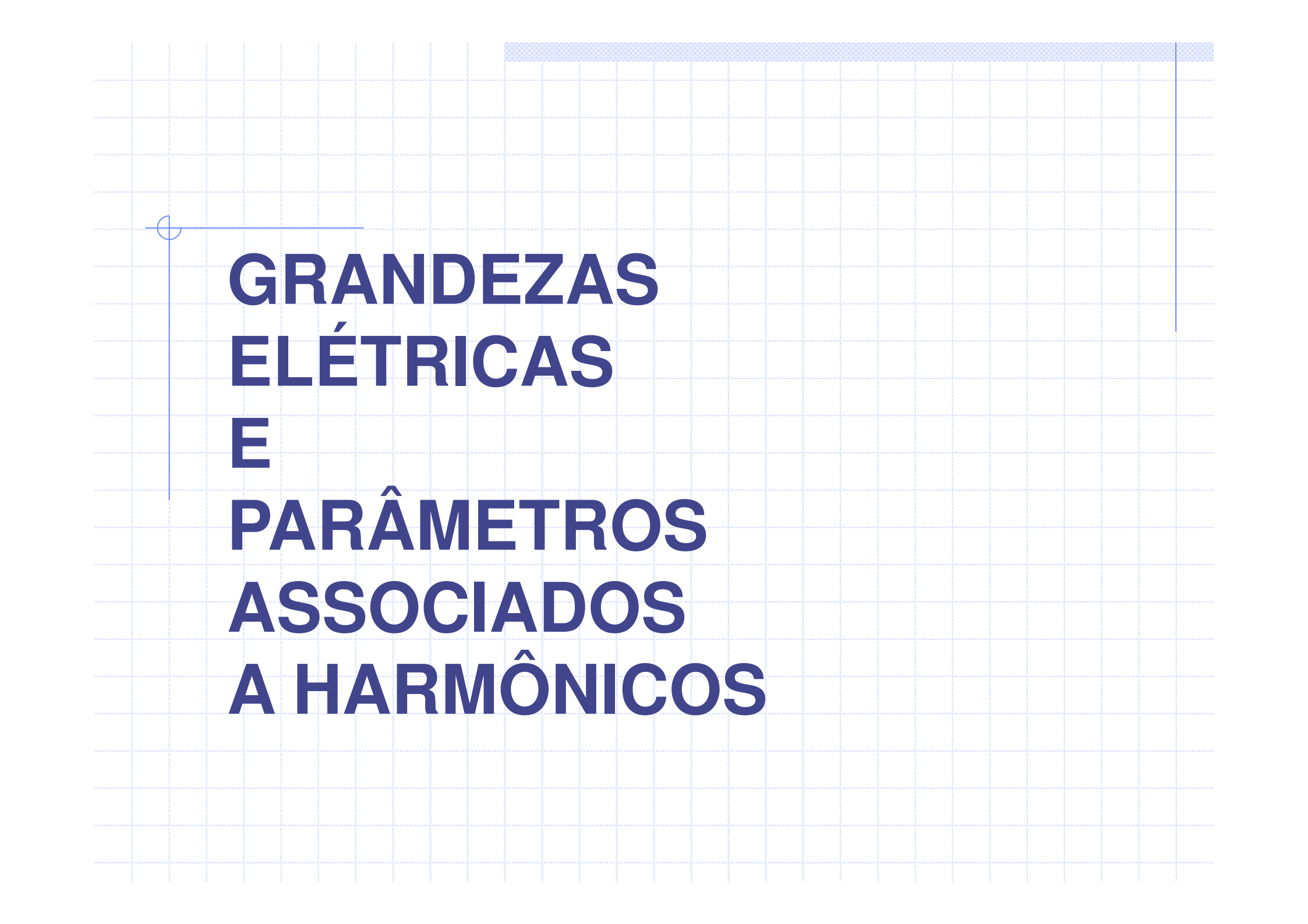
onde:

$$\omega_0 = 2\pi / T$$

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_T f(t) dt$$

$$a_h = \frac{2}{T} \int_T f(t) \cos(h\omega_0 t) dt$$

$$b_h = \frac{2}{T} \int_T f(t) \sin(h\omega_0 t) dt$$



GRANDEZAS ELÉTRICAS E PARÂMETROS ASSOCIADOS A HARMÔNICOS

• Grandezas elétricas usuais

- Tensão e corrente instantâneas
- Tensão e corrente eficazes (RMS)
- Potência instantânea
- Potência média ou potência ativa
- Potência aparente
- Potência reativa
- Potência de distorção
- Fator de potência total ou verdadeiro
- Fator de potência de deslocamento
- Fator de potência de distorção
- etc.

Tensão e Corrente Instantâneas

$$v(t) = \sum_{h=1}^{\infty} v_h(t) = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} V_h \operatorname{sen}(h \omega_0 t + \theta_h)$$

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} i_h(t) = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} I_h \operatorname{sen}(h \omega_0 t + \delta_h)$$

Potência Instantânea e Potência Média

$$p(t) = v(t)i(t)$$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt$$

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\theta_h - \delta_h) = \sum_{h=1}^{\infty} P_h$$

Tensão e Corrente Eficazes (RMS)

$$V_{\text{ef}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2}$$

$$I_{\text{ef}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}$$

Potência Aparente

$$S = V_{\text{ef}} \cdot I_{\text{ef}}$$

Parâmetros ou índices Relativos a Harmônicos

- Distorção Harmônica Total (Fator de Distorção)
- Produtos V_T e I_T
- Distorção Total de Demanda
- Fator de Influência Telefônica
- Fator de perdas harmônicas de Transformador
- Constante harmônica

Distorção Harmônica Total (Fator de Distorção)

$$\text{THD}_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1}, \quad \text{THD}_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1}$$

$$V_{\text{ef}} = V_1 \sqrt{1 + (\text{THD}_V / 100)^2}$$

$$I_{\text{ef}} = I_1 \sqrt{1 + (\text{THD}_I / 100)^2}$$

$$\text{FP}_{\text{tot}} = \frac{P}{V_1 I_1 \sqrt{1 + (\text{THD}_V / 100)^2} \sqrt{1 + (\text{THD}_I / 100)^2}}$$

Distorção Total de Demanda (IEEE 519-1992)

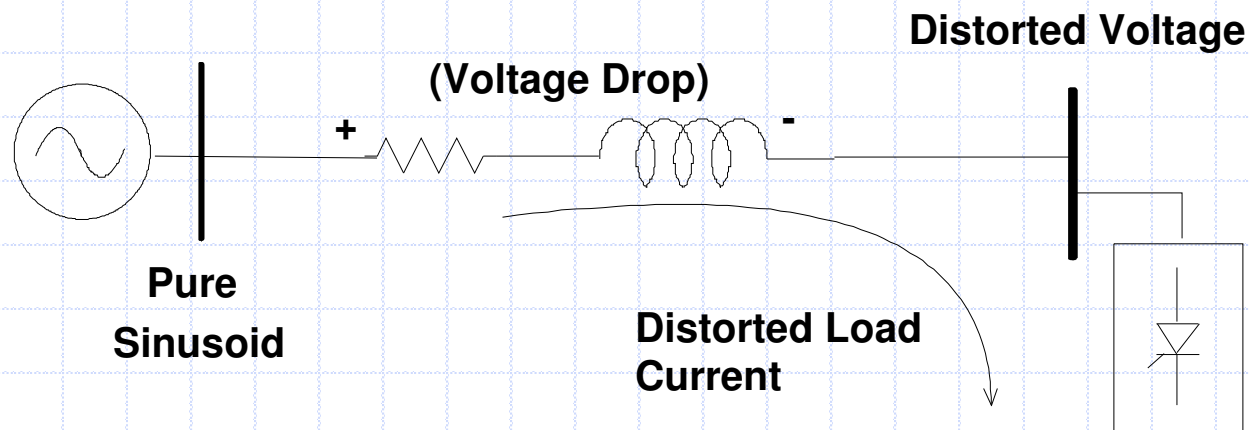
$$\text{TDD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_D}$$

I_D : Corrente máxima de demanda

Fator de Crista

$$F_c = \frac{V_{\text{pico}}}{V_{\text{ef}}}$$

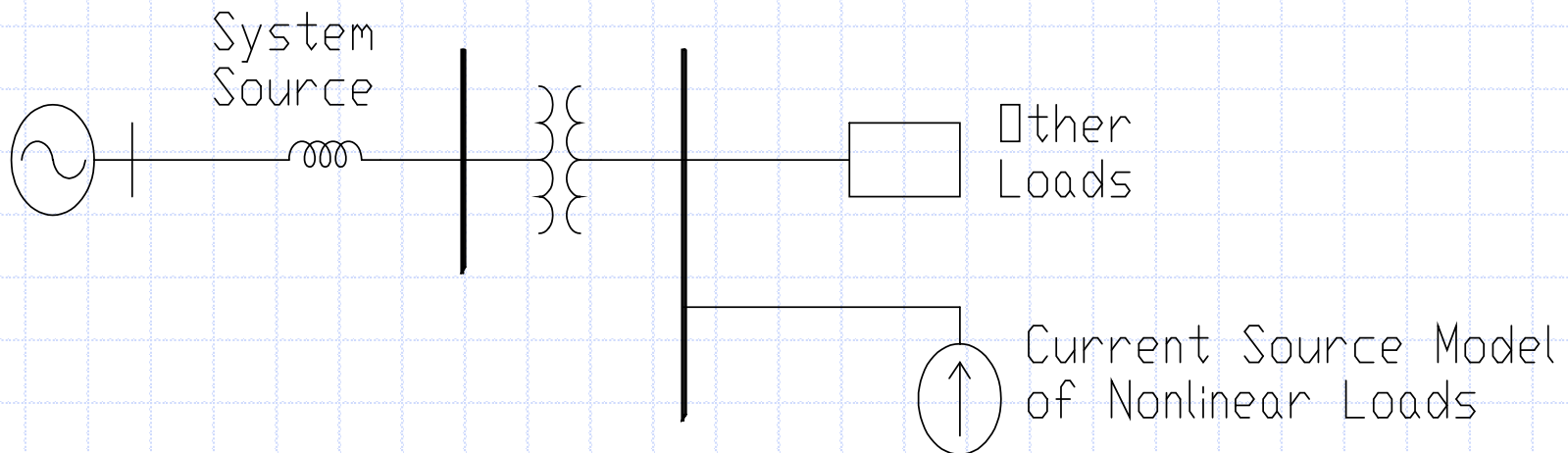
Harmônicos de corrente vs. tensão



Correntes harmônicas em impedâncias do sistema resultam em tensões harmônicas na carga

Representação de cargas não lineares

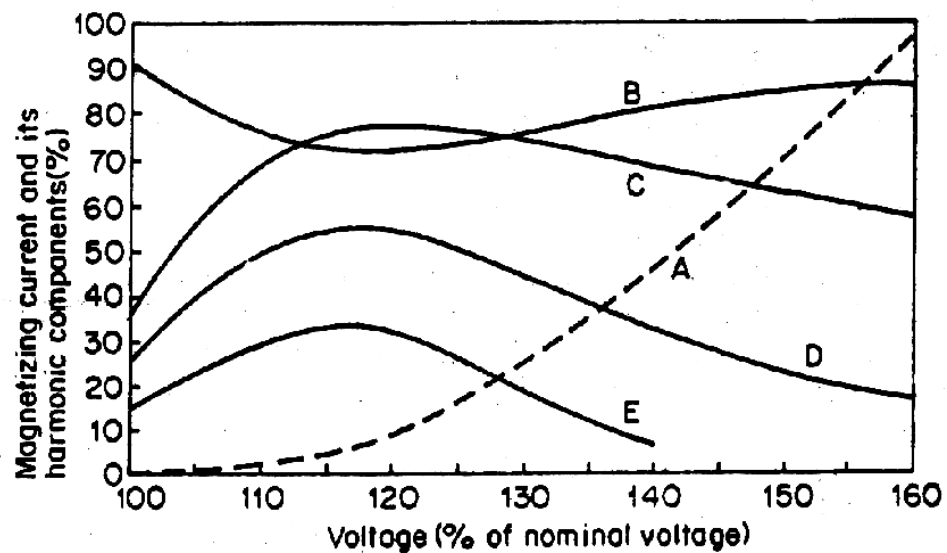
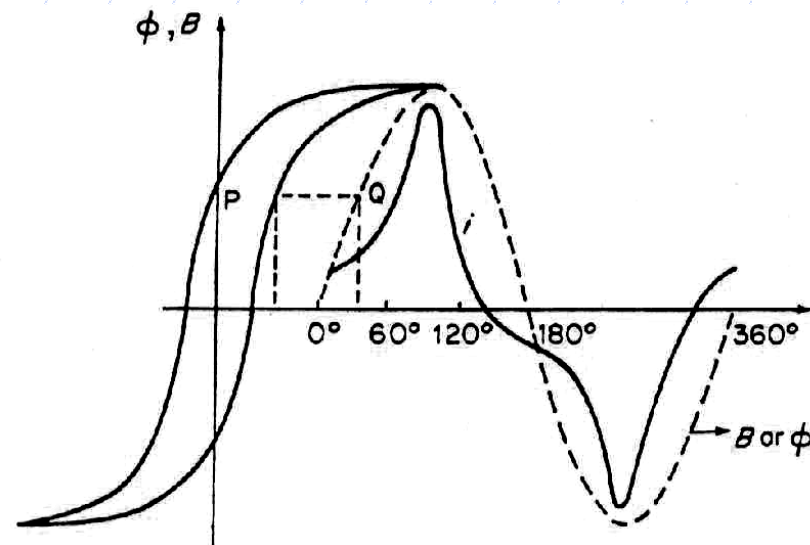
- ◆ Uma carga não linear pode ser representada como uma fonte de correntes harmônicas:



Fontes de harmônicos

- ◆ Dispositivos saturáveis:
transformadores e reatores não lineares
- ◆ Fornos a arco, máquinas de solda,
iluminação fluorescente
- ◆ Equipamentos de eletrônica de
potência- ASDs, fontes de potência
eletrônicas, acionamento de motores
CC, etc.

Corrente de magnetização de transformador



A: $I_{mag}(\%I_n)$

B: $I_1(\%I_n)$

C: $I_3(\%I_1)$

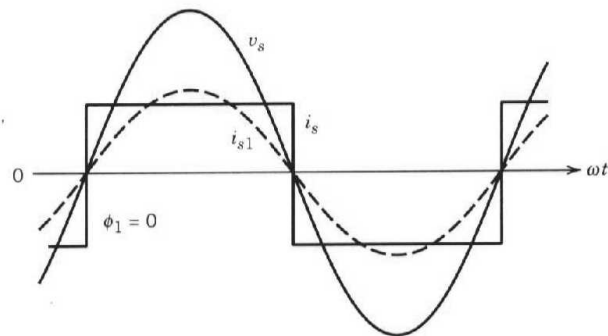
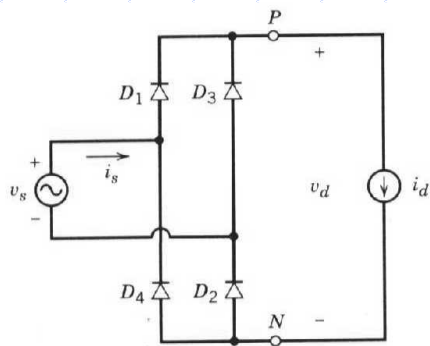
D: $I_5(\%I_1)$

E: $I_7(\%I_1)$

fonte: Arrilaga

Ponte retificadora monofásica

Retificador ideal



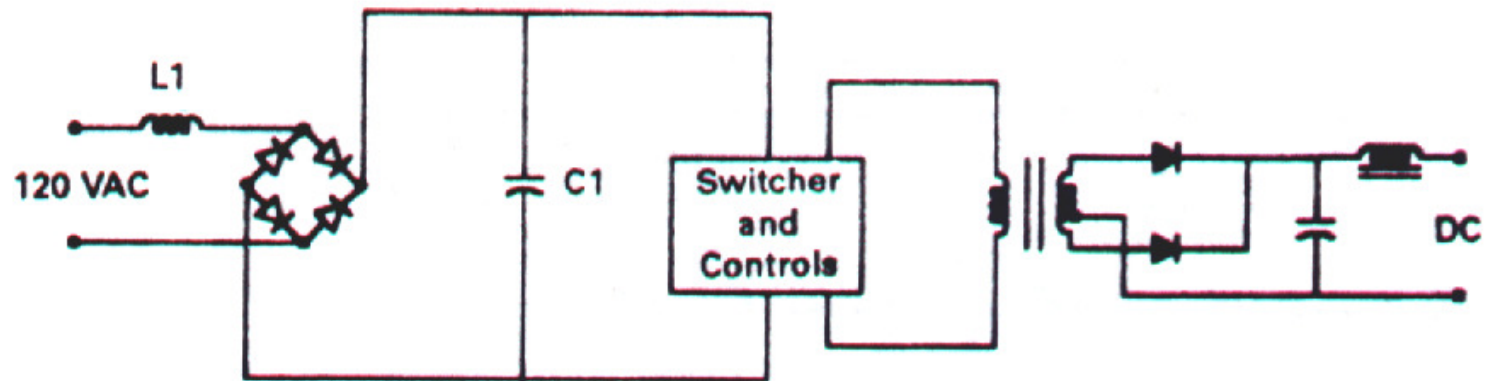
Harmônicos
característicos

$$h = 3, 5, 7, 9, \dots$$

$$I_h = I_1/h$$

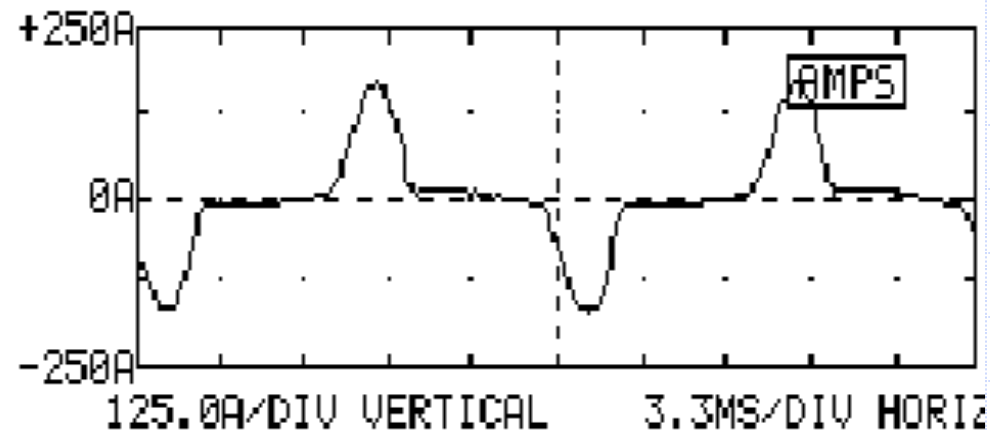
h	$I_h\%$
3	33.3
5	20
7	14.3
9	11.1
.	

Fonte chaveada monofásica



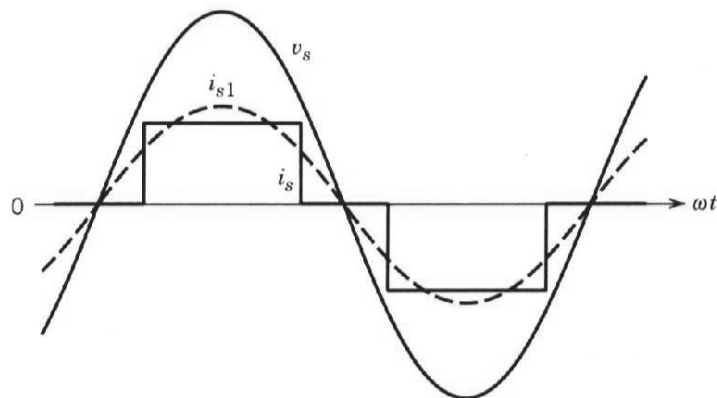
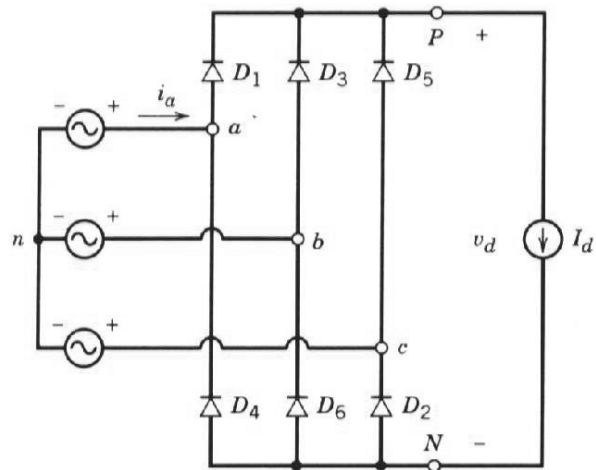
Ref.: Dugan, McGranaghan, Beaty

Exemplo de forma de onda de corrente de um aparelho eletrônico



Fundamental amps:			58.5 A rms		
Fundamental freq:			60.0 Hz		
HARM	PCT	PHASE	HARM	PCT	PHASE
FUND	100.0%	-37°	2nd	0.2%	65°
3rd	65.7%	-97°	4th	0.4%	-72°
5th	37.7%	-166°	6th	0.4%	-154°
7th	12.7%	113°	8th	0.3%	112°
9th	4.4%	-46°	10th		
11th	5.3%	-158°	12th	0.1%	142°
13th	2.5%	92°	14th	0.1%	65°
15th	1.9%	-51°	16th		
17th	1.8%	-151°	18th		
19th	1.1%	84°	20th		
21st	0.6%	-41°	22nd		
23rd	0.8%	-148°	24th		
25th	0.4%	64°	26th		
27th	0.2%	-25°	28th		
29th	0.2%	-122°	30th		
31st	0.2%	102°	32nd		
33rd	0.2%	56°	34th		

Retificador trifásico ideal



$$h = 6n \pm 1$$

$$h = 5, 7, 11, 13, 17, 19, \dots$$

$$I_h = I_1/h$$

h	$I_h\%$
5	20.0
7	14.3
11	9.1
13	7.7

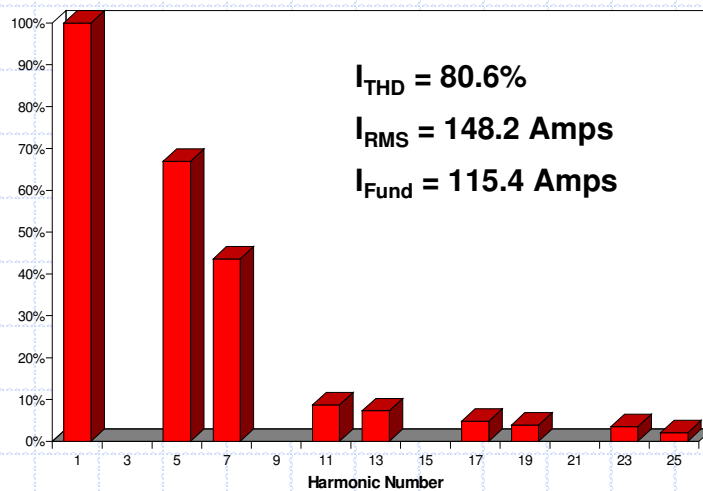
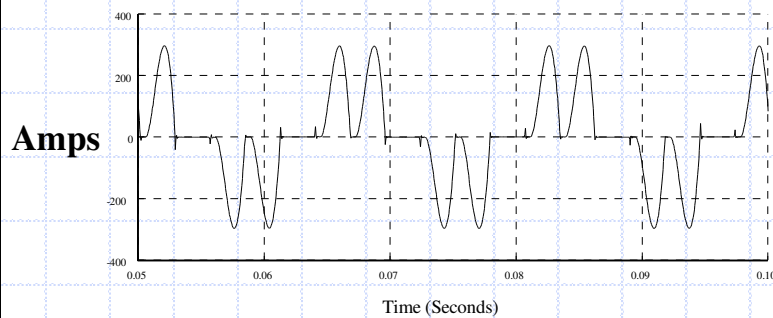
·
·

Correntes Teóricas e Típicas de Conversores de 6 pulsos com grande indutância (% da Corrente Fundamental)

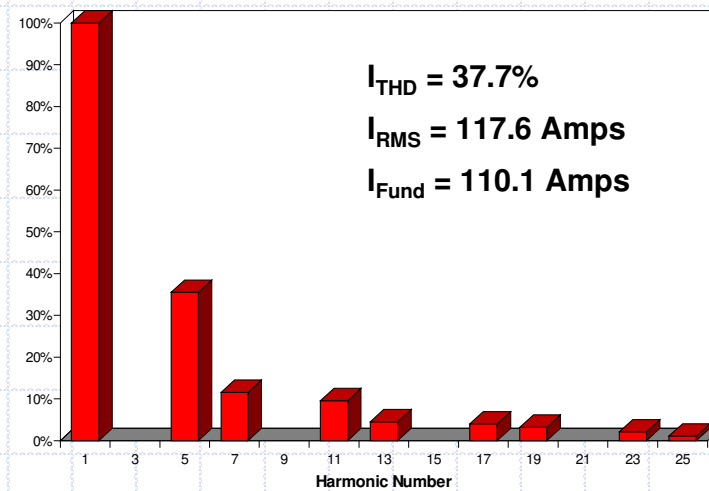
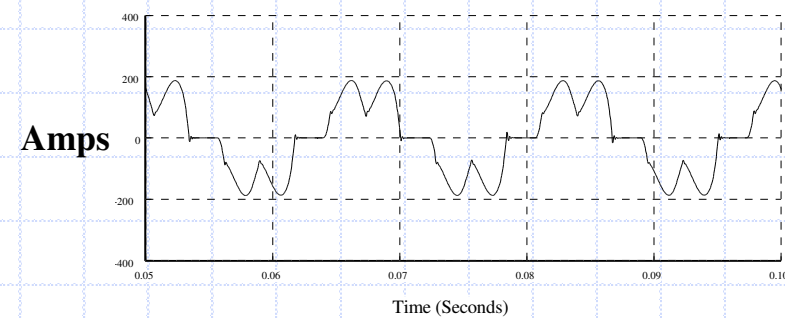
H	5	7	11	13	17	19	23	25
Teóricas	20.0	14.3	9.1	7.7	5.9	5.3	4.3	4.0
Típicas	17.5	11.1	4.5	2.9	1.5	1.0	0.9	0.8

Exemplos de correntes de acionadores de velocidade variável com diferentes níveis de distorção harmônica

TYPE 1 Waveform
100 HP PWM ASD - No Choke



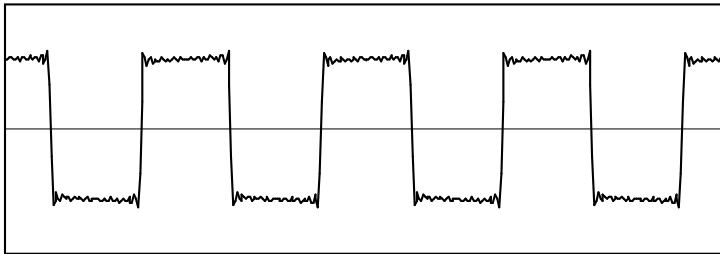
TYPE 2 Waveform
100 HP PWM ASD - 3% Choke



Exemplos de formas de onda típicas de retificadores

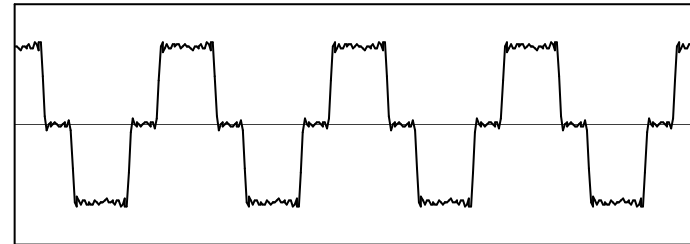
Ponte retificadora monofásica - filtro L

Ponte retificadora monof. - RL



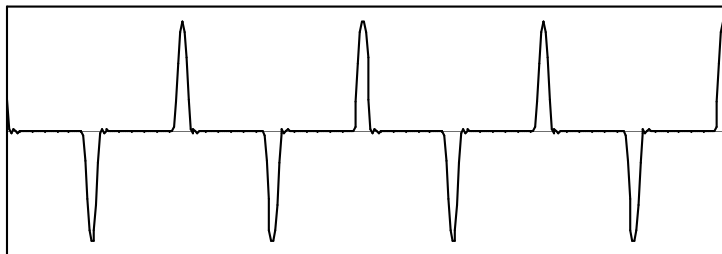
Ponte retificadora trifásica - filtro L

Ponte retificadora trifásica - RL



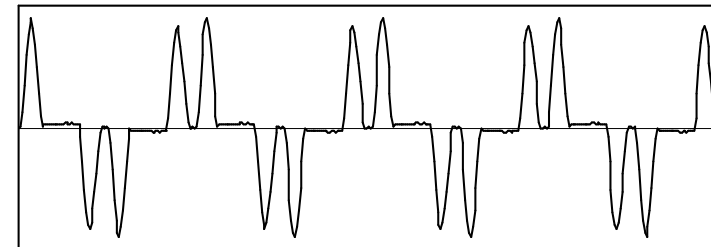
Ponte retificadora monofásica - filtro C

Ponte retificadora monof. - RC



Ponte retificadora trifásica - filtro C

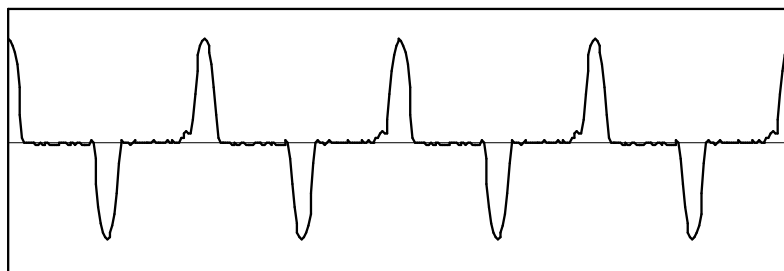
Ponte retificadora trifásica - RC



Forma de Onda Típica de Cargas Residenciais

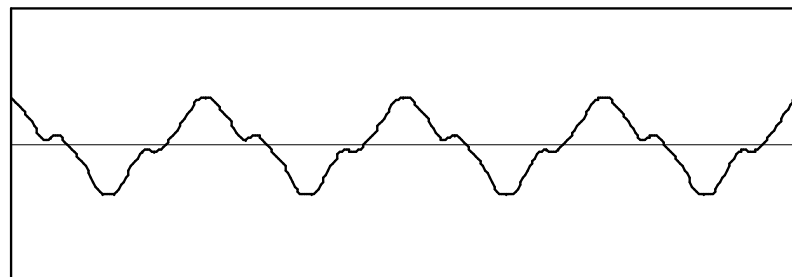
TV

TV



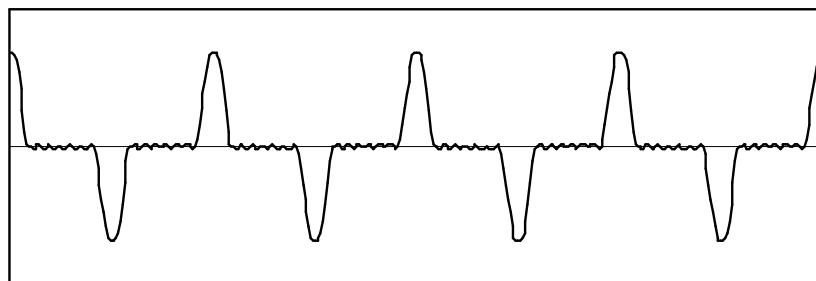
Forno de micro-ondas

Forno de microondas



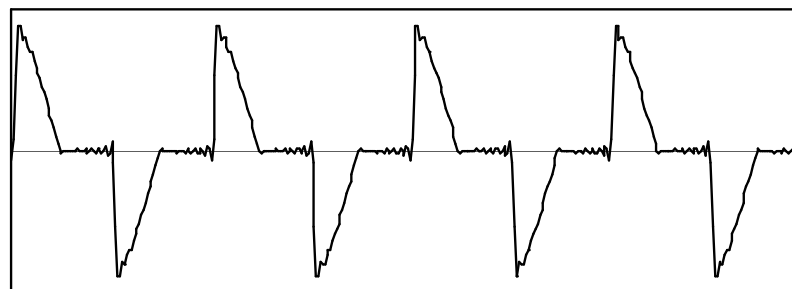
Computador

Microcomputador



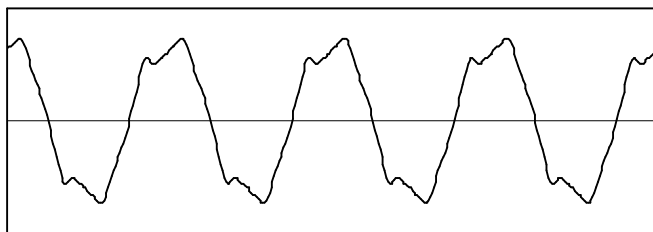
Dimmer e chuveiro com controle eletrônico

Dimmer 50%



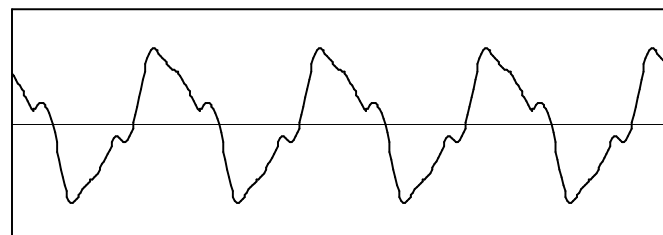
Lâmpada fluorescente com reator magnético

Reator, Lâmp. Fluoresc. B



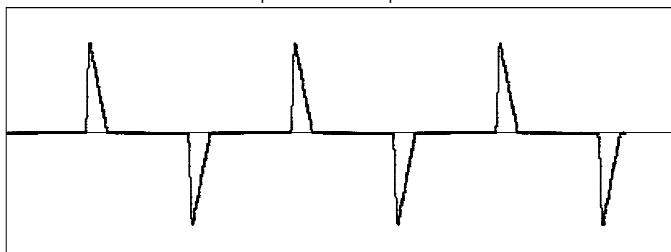
Lâmpada fluorescente com reator magnético

Reator, Lâmp. Fluoresc. A



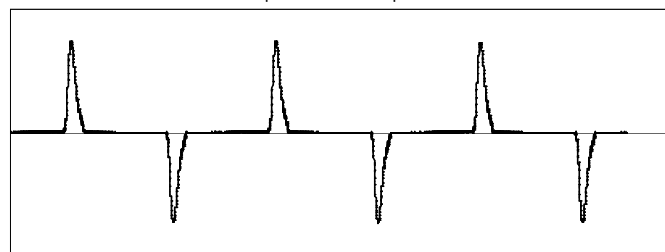
Lâmpada fluorescente compacta (com reator eletrônico)

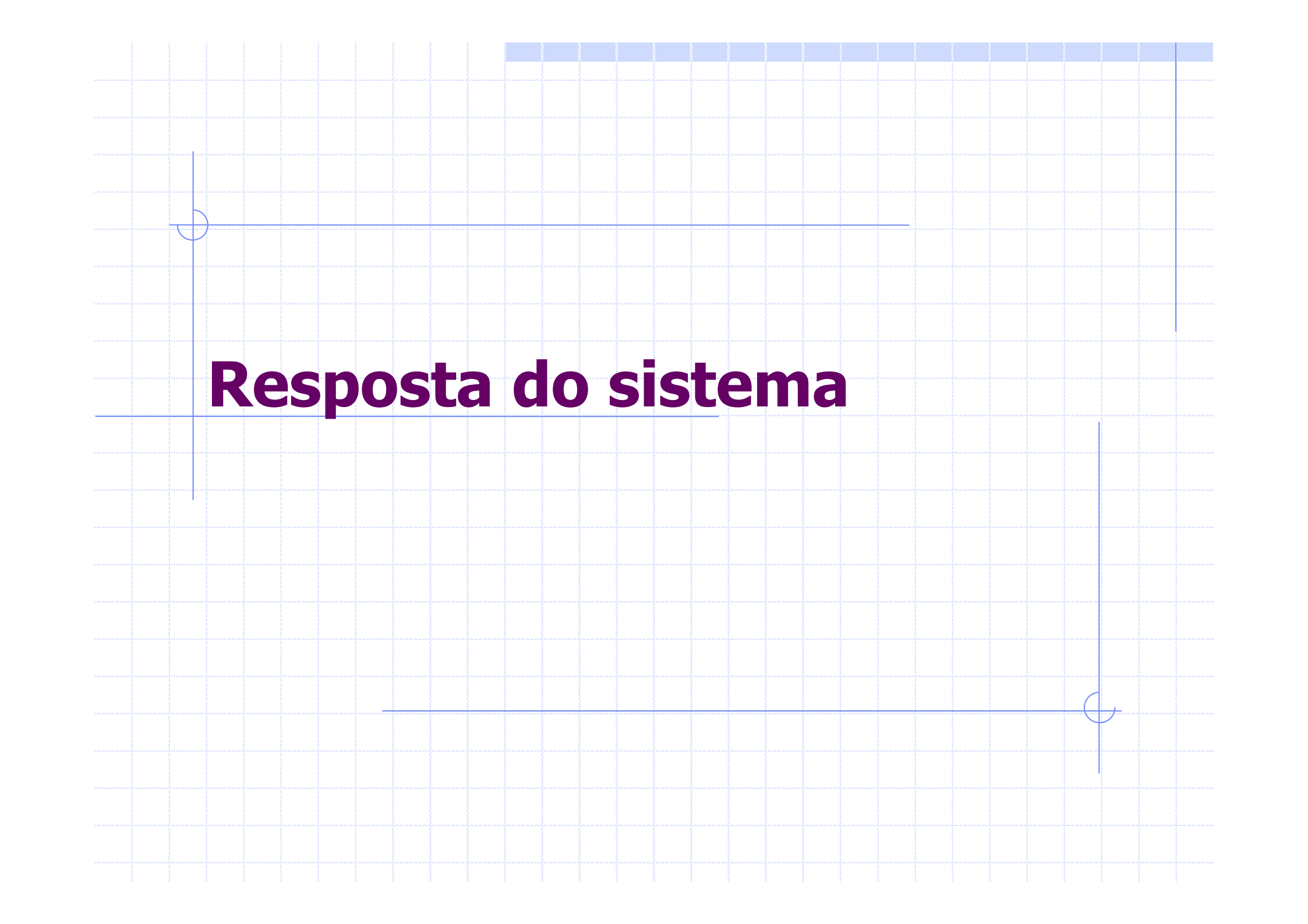
Lâmp. fLuoresc compacta A



Lâmpada fluorescente compacta (com reator eletrônico)

Lâmp. fLuoresc compacta B





Resposta do sistema

Resposta do sistema a harmônicos

- ◆ Tamanho das fontes de harmônicos
- ◆ Determinação da distorção de tensão resultante
- ◆ Análise da ressonância no sistema

Resposta do sistema a harmônicos

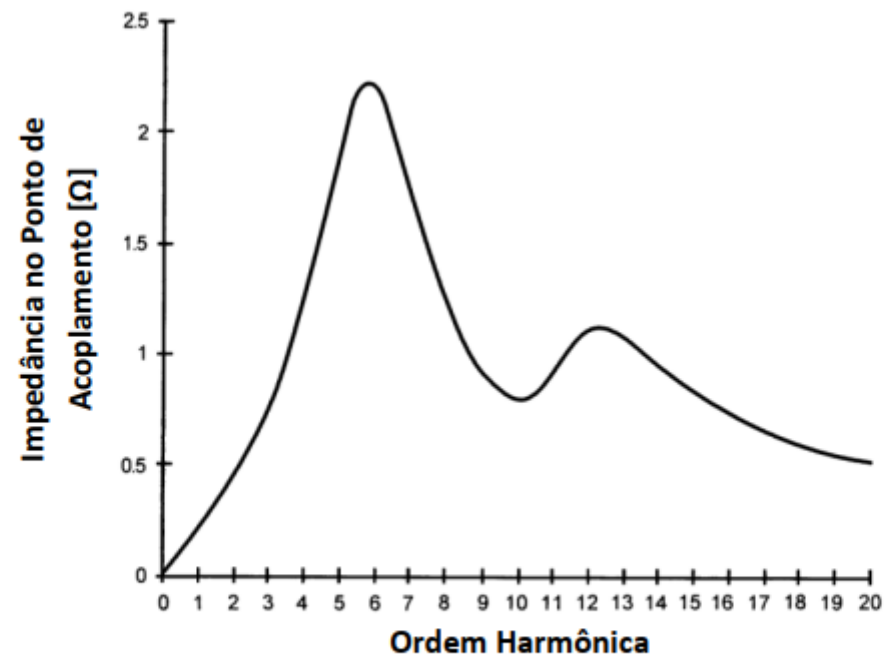


Figura 34 – Comportamento da impedância equivalente de um ponto de acoplamento qualquer – Extraído de [37].

Resposta do sistema a harmônicos

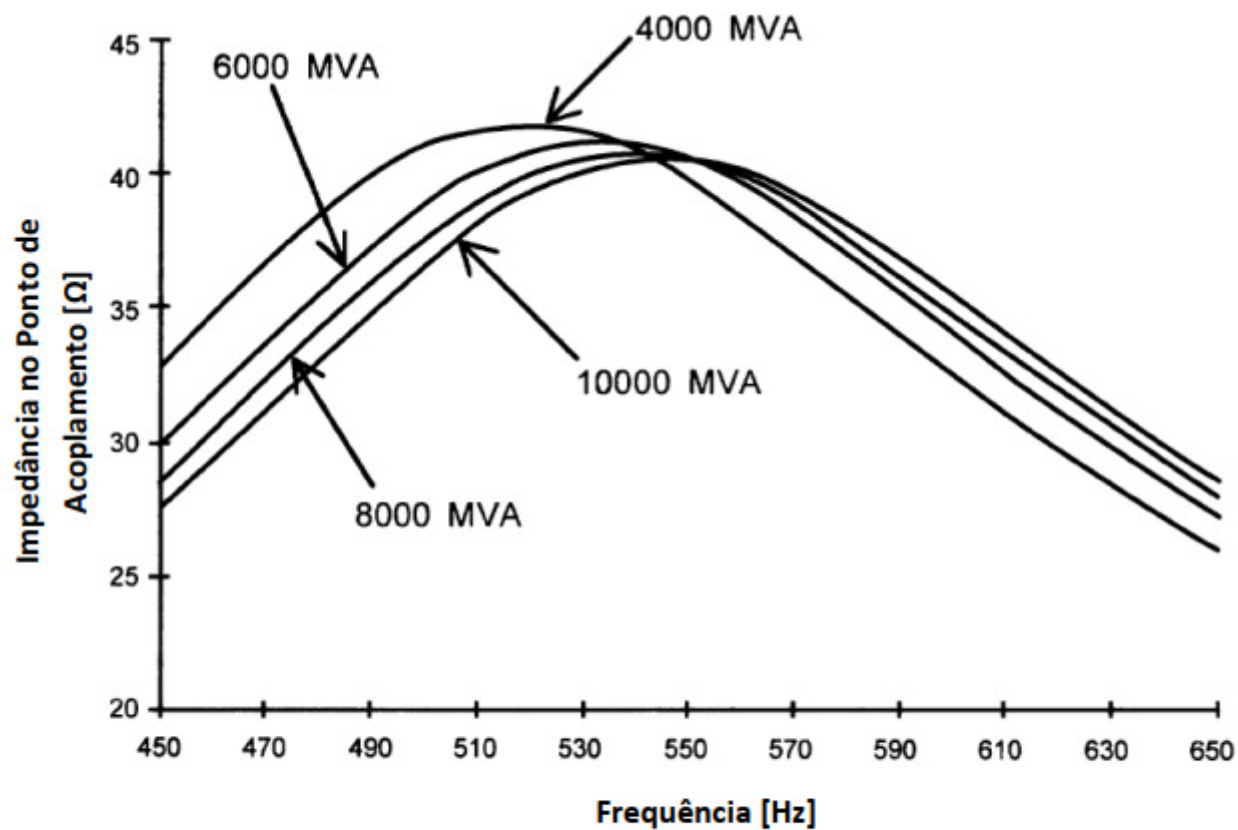
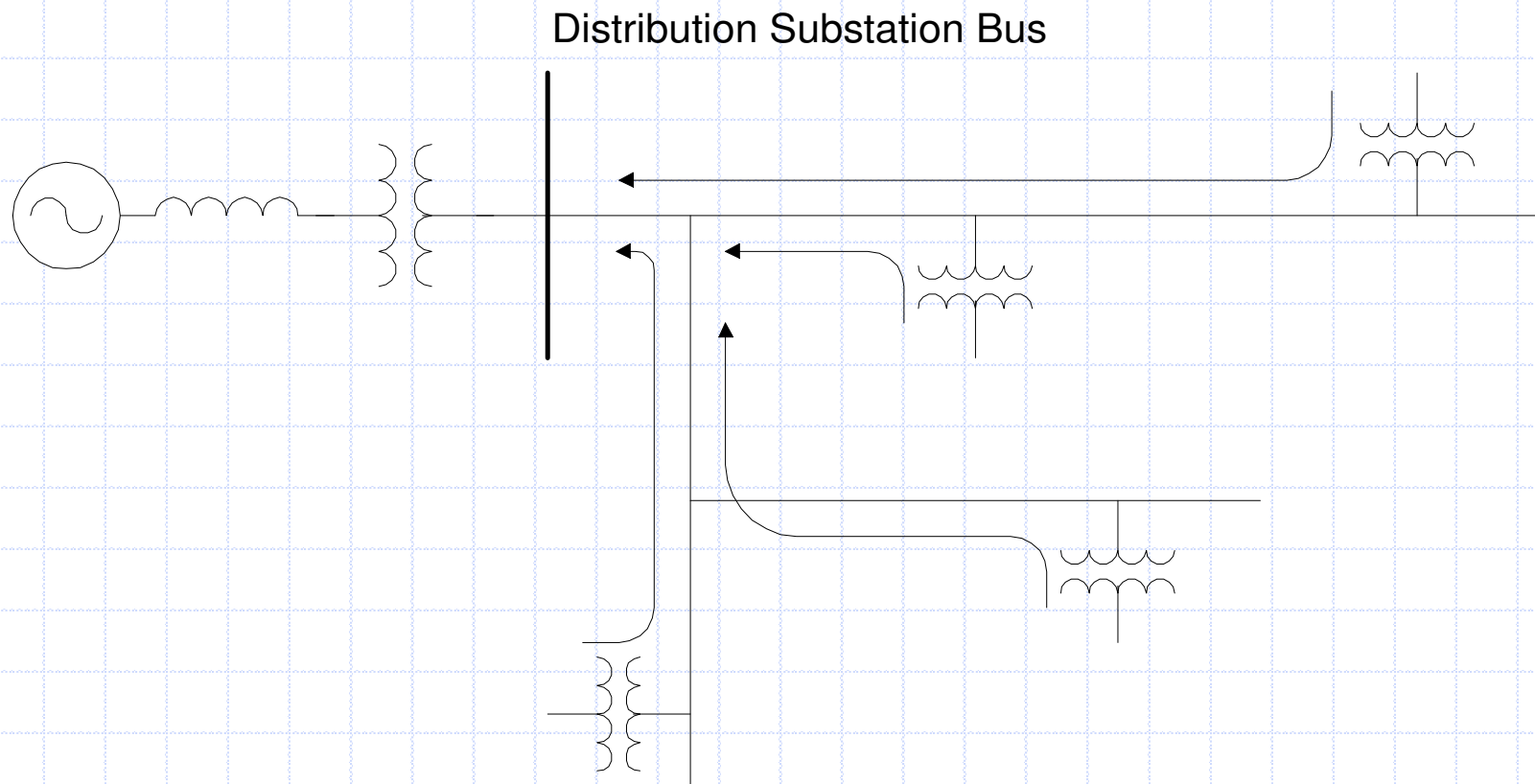


Figura 36 – Comportamento da impedância equivalente de um ponto de acoplamento qualquer – Extraído de [37].

Para onde os harmônicos vão?



Efeitos no sistema

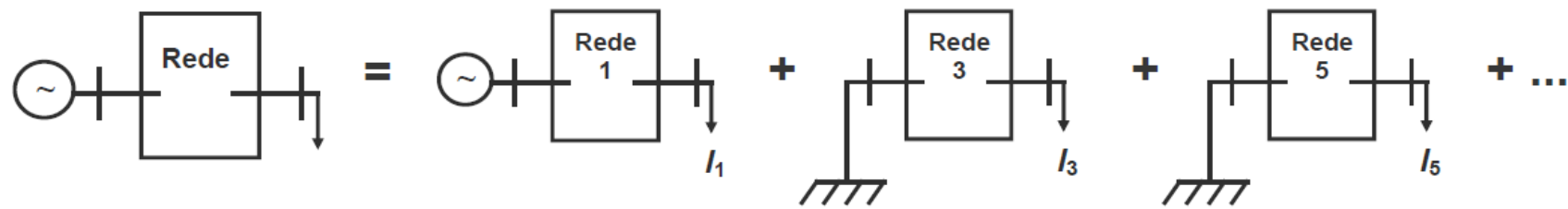


Figura 5.3 - Superposição de Efeitos

Indicadores

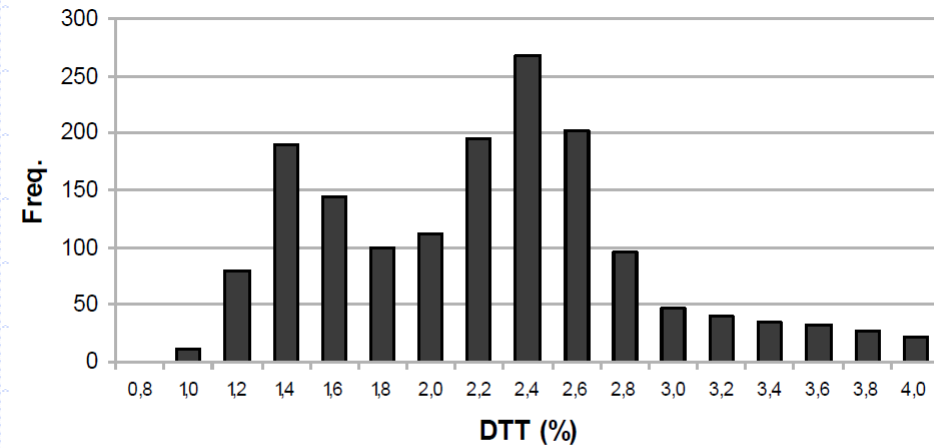
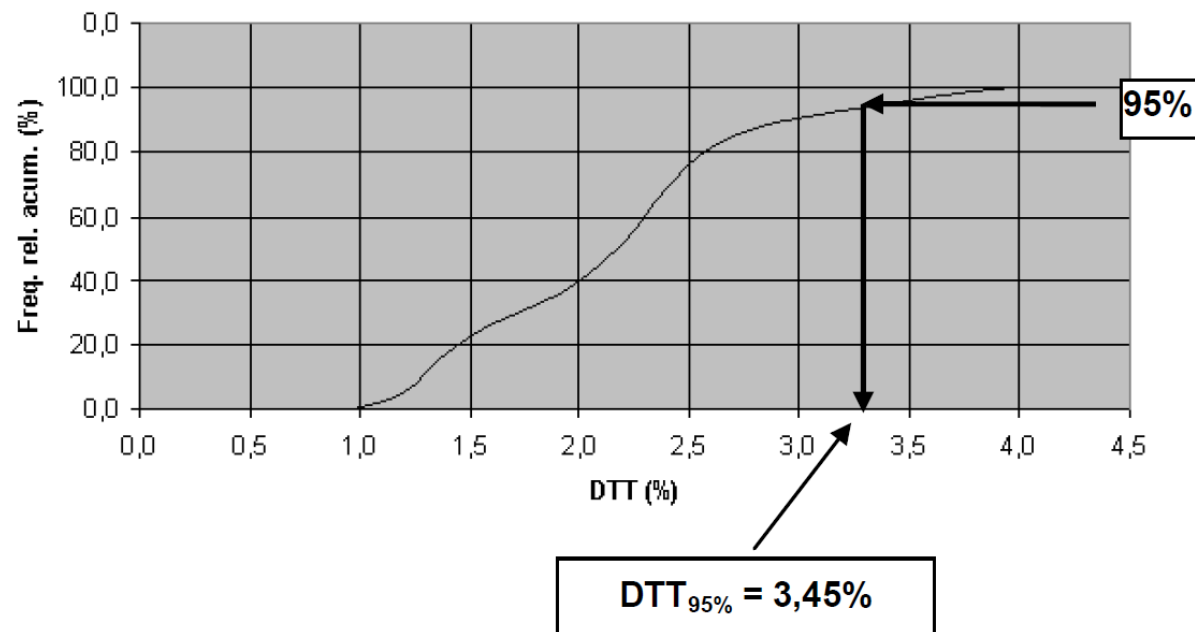


Figura 5.4 - Histograma de DTT



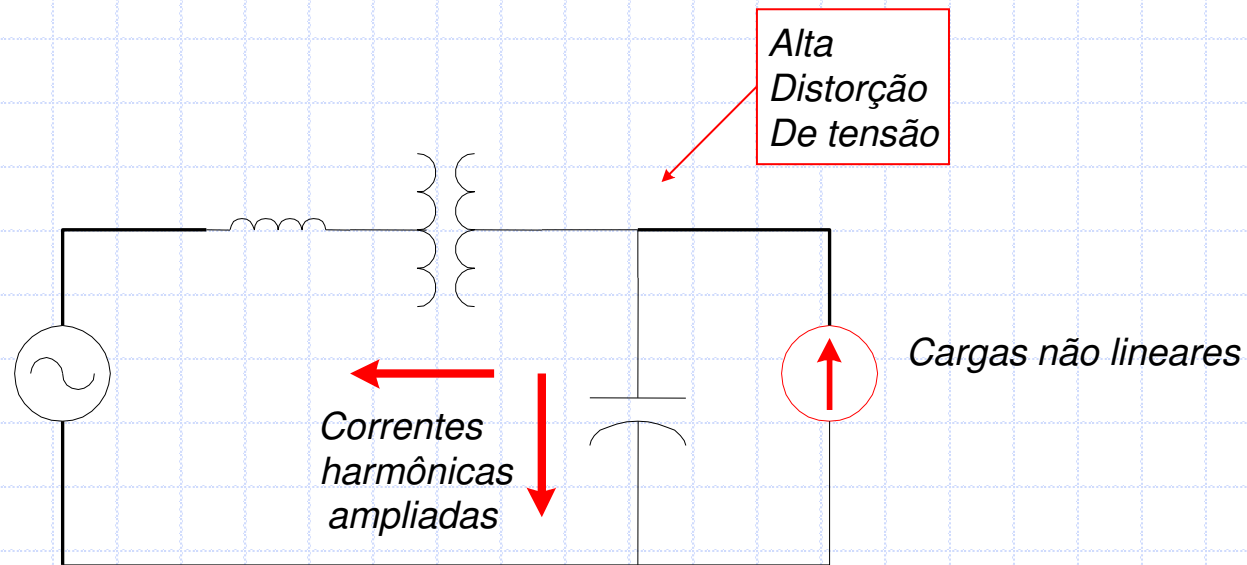
Harmônicos em sistemas trifásicos

Tabela 5.3 - Seqüência de fases para os componentes harmônicos ($h = 1, 3, 5, \dots$)

Componente harmônico	Seqüência de fases	Exemplos
$3*(2h - 1) - 2$	Direta	1, 7, 13, ...
$3*(2h - 1)$	Zero	3, 9, 15, ...
$3*(2h - 1) + 2$	Inversa	5, 11, 17, ...

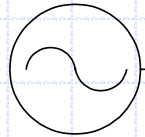
Ver exemplo 5.1 do livro

Ressonância paralela



Cálculo da frequência de ressonância

Fonte de
Tensão do
sistema



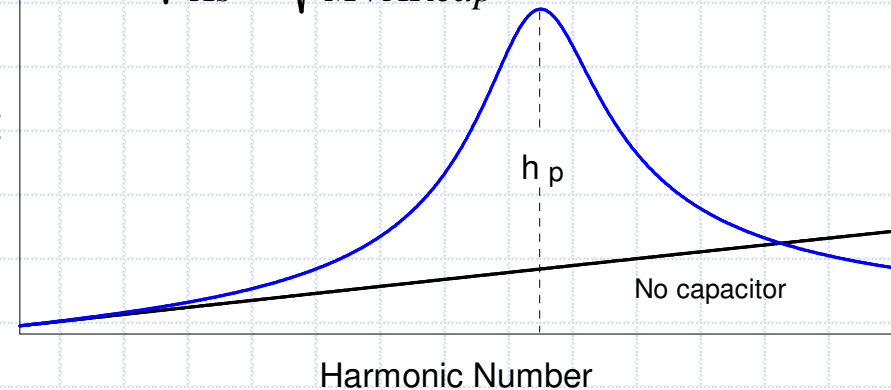
X_s

X_c

Fonte de
harmônicos

Z

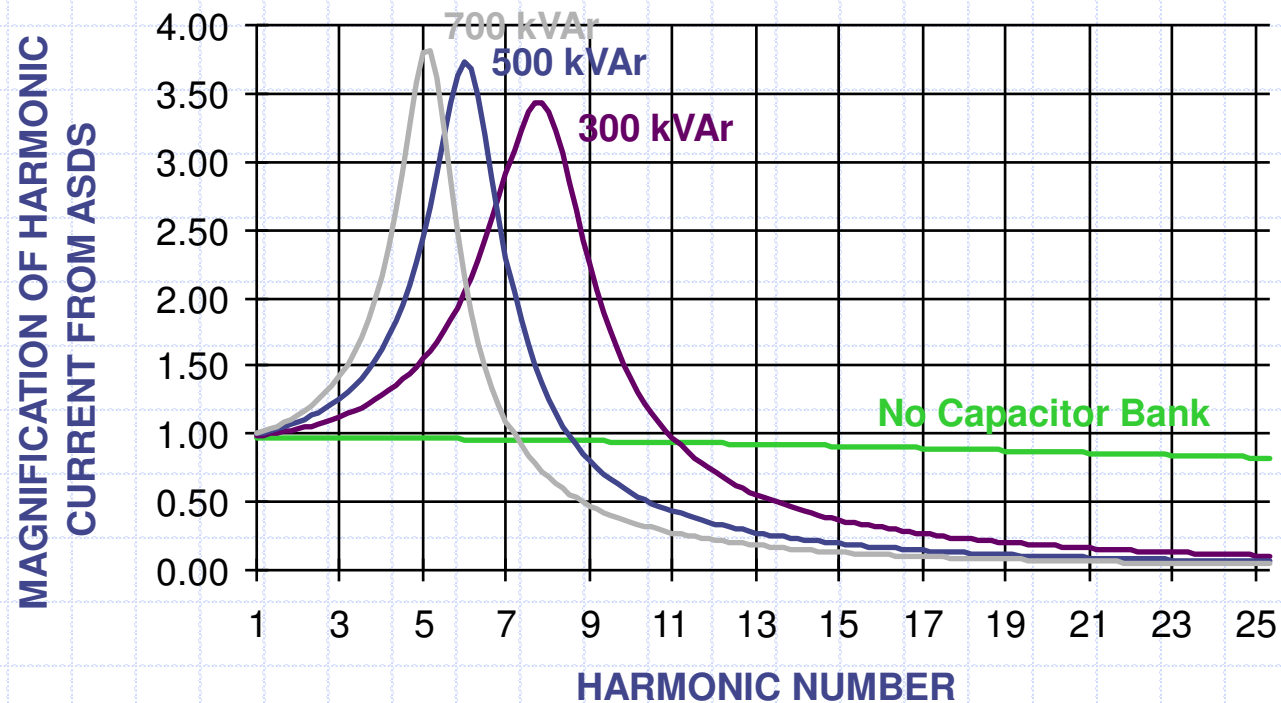
$$h_p = \sqrt{\frac{X_c}{X_s}} = \sqrt{\frac{MVAsc}{MVARcap}}$$



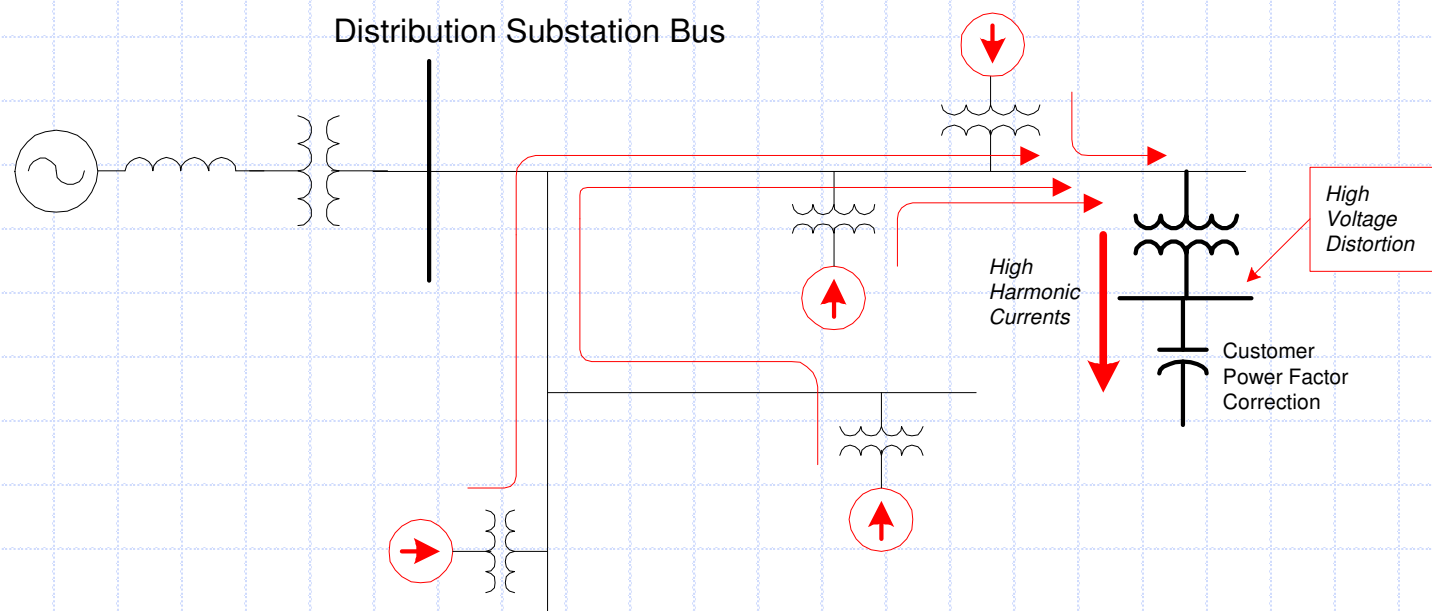
Se a frequência calculada corresponder à frequência harmônica característica, uma alta distorção pode ocorrer

Frequências de ressonância

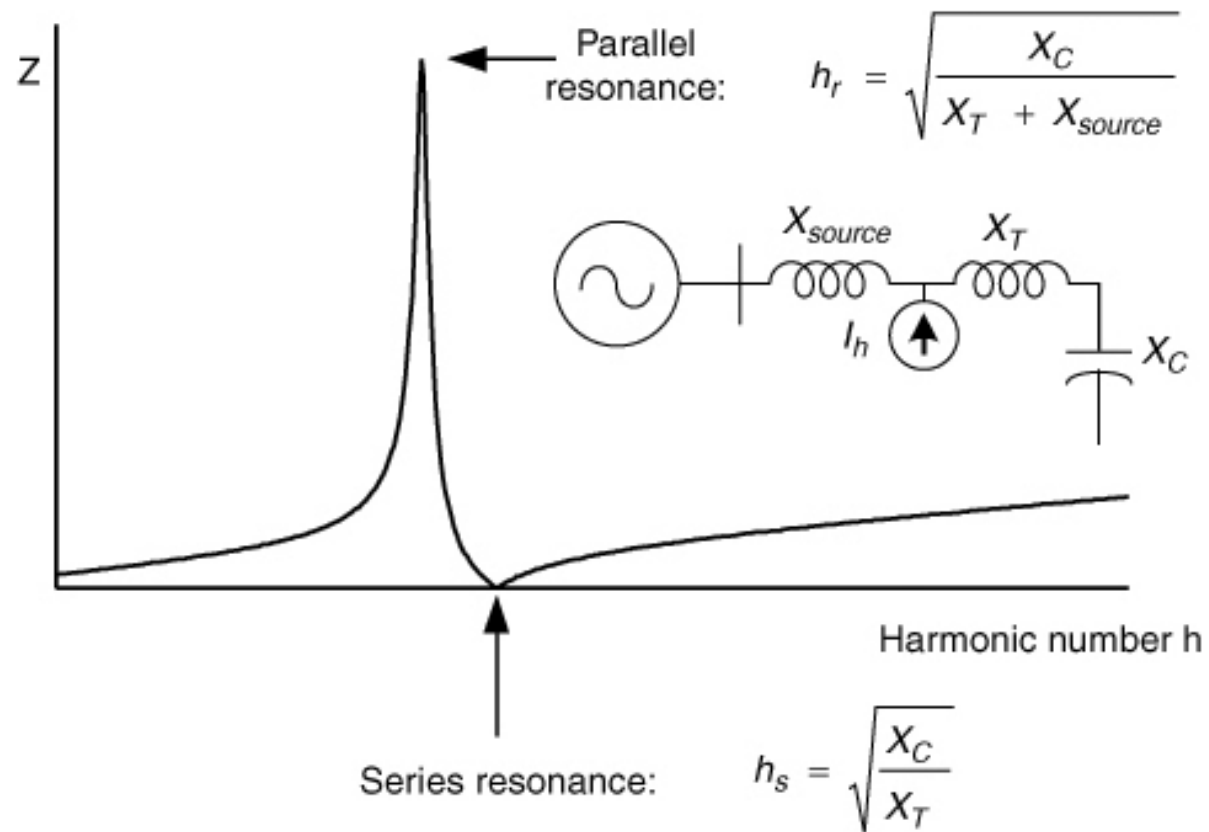
Ressonância vs. tamanho do capacitor para um consumidor típico suprido com um transformador de 1500 kVA, $x=6\%$.



Ressonância série



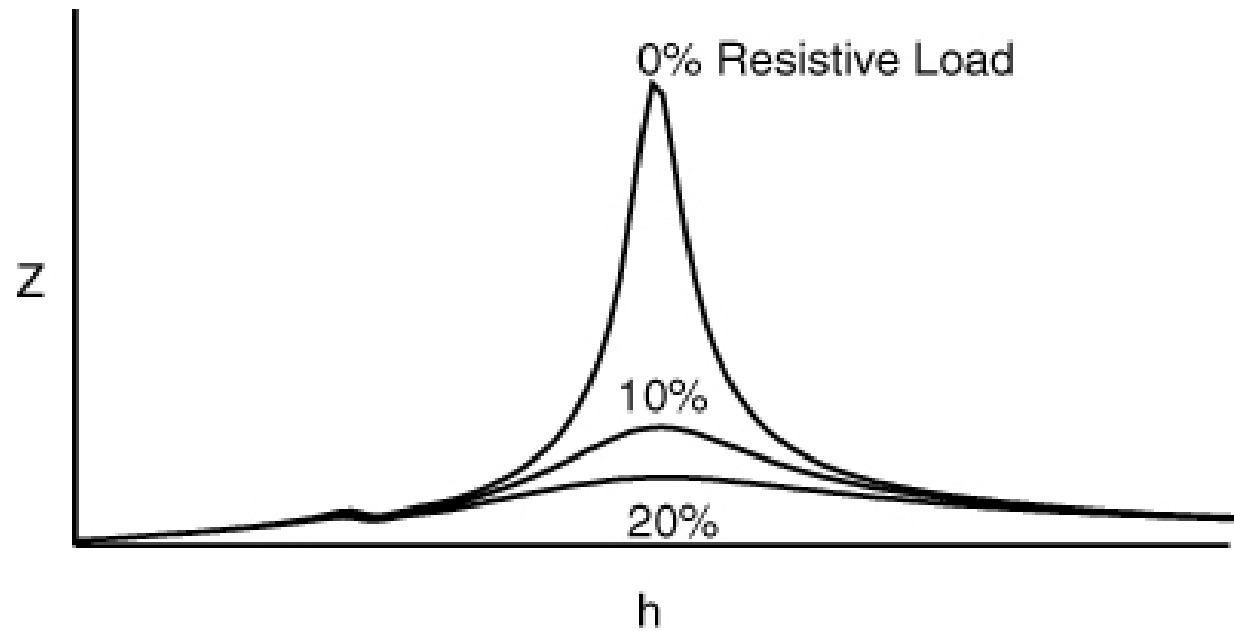
Ressonância série



Impactos dos problemas de ressonância paralela e série

- ◆ Falhas em capacitores
- ◆ Queima de fusíveis
- ◆ Alta distorção de tensão pode impactar cargas, como por exemplo aquecimento de motores
- ◆ Altas correntes em transformadores - sobreaquecimento.

Efeitos da Resistência e Cargas Resistivas



Interharmônicos

- ◆ Frequências interharmônicas são frequências entre duas frequências harmônicas adjacentes
- ◆ Uma fonte de interharmônicas é o uso conversores eletrônicos, capazes de produzir distorção de corrente em toda uma gama de frequências, ou seja, frequências características e não características

Interharmônicos

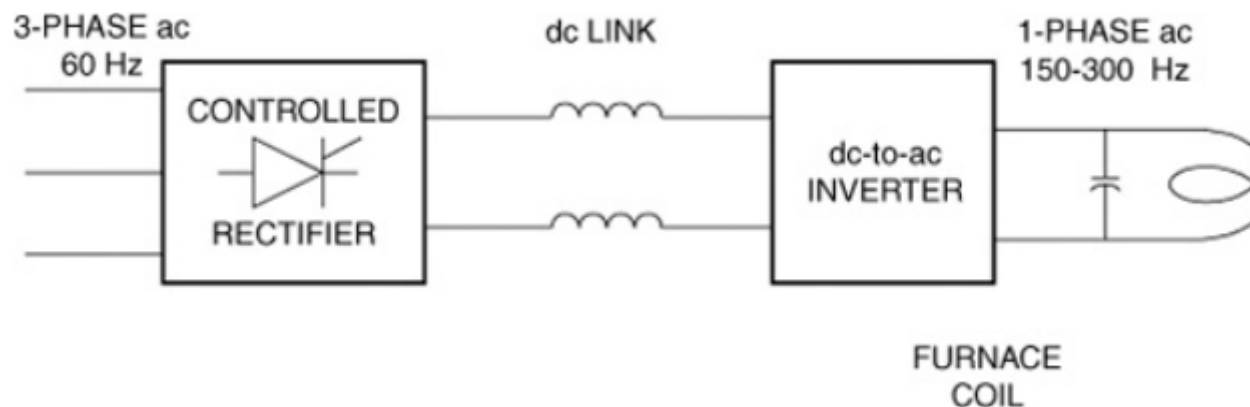
Forno a indução para fusão de metais



- A frequência na bobina de fusão varia para combinar com o tipo de material sendo fundido e a quantidade de material no forno
- A bobina do forno e o capacitor formam um circuito ressonante e o ciclo de vazamento CC para CA

Interharmônicos

Forno a indução para fusão de metais



- A indutância da bobina varia dependendo do tipo, temperatura e quantidade de material conforme o forno completa um ciclo para outro, como de um ciclo de fusão a vazamento
- Esta situação resulta em uma frequência operacional variável para o forno
- A faixa típica de frequências para fornos de indução é 150 a 1200 Hz

Interharmônicos

