

TE 991
Tópicos em
Qualidade de
energia Elétrica

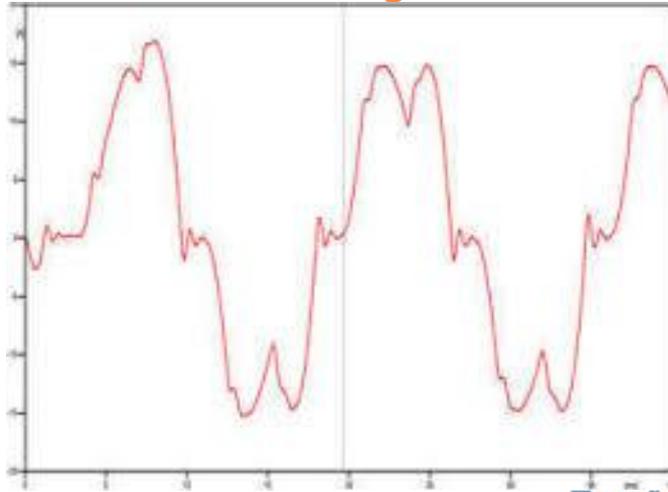
Cap. 5 – Distorções
da forma de onda

Prof. Mateus Duarte
Teixeira

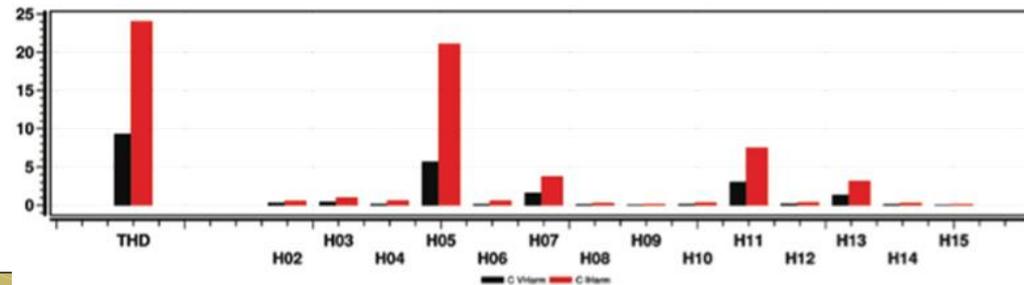
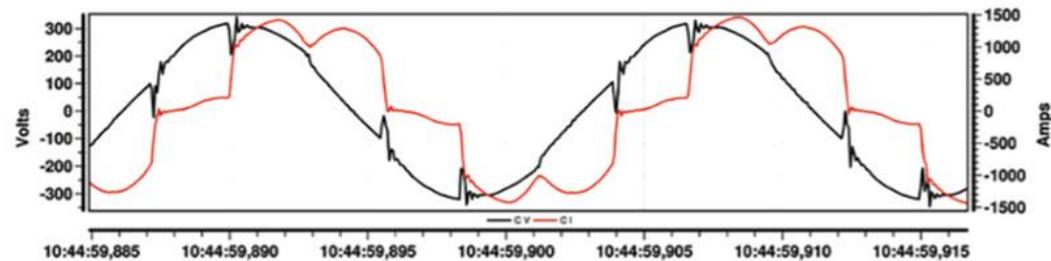
1. Definição

“Distorção da forma de onda é o desvio, em regime permanente, da forma de onda da corrente e/ou tensão em relação ao sinal senoidal puro”

1. Definição



Tensão x Corrente – Motor DC



1. Definição

- São basicamente cinco os principais tipos de distorção de forma de onda:
 - DC offset;
 - Cortes de tensão;
 - Ruídos;
 - Interharmônicos;
 - Harmônicos.

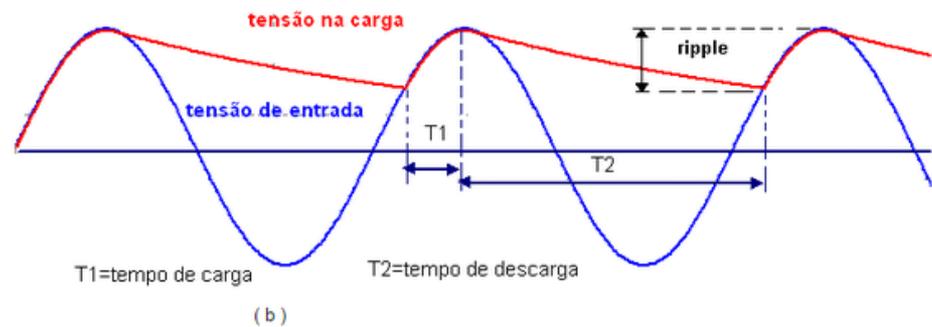
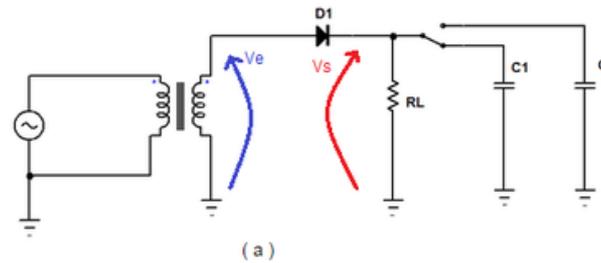
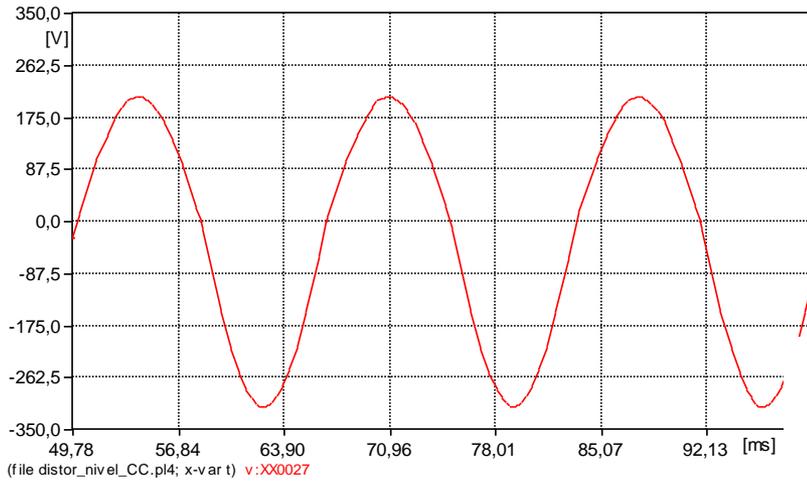
1. Definição

- A principal causa das distorções deve-se à utilização de equipamentos eletrônicos alimentados pela rede elétrica, tais como computadores, impressoras, eletroeletrônicos, reatores para lâmpadas de descarga, controladores eletrônicos para uma enorme variedade de cargas industriais, etc.
- Quase todos os equipamentos eletrônicos, com alimentação monofásica ou trifásica, incorporam um circuito retificador à sua entrada, seguido de um conversor comutado do tipo CC-CC ou CC-CA. Um dos tipos de retificadores mais utilizados em equipamentos de baixa potência é o retificador monofásico de onda completa com filtro capacitivo, que possui uma corrente de entrada altamente distorcida.

2. DC Offset

- A presença de tensão DC ou corrente DC em sistemas AC é denominada de DC offset ou nível CC. Este fenômeno pode ocorrer como resultado de perturbações geomagnéticas ou devido ao efeito da retificação de meia onda.
- O nível CC em redes de corrente alternada pode levar à saturação de transformadores, resultando em perdas adicionais e redução da vida útil. Pode também causar corrosão eletrolítica dos eletrodos de aterramento e de outros conectores.

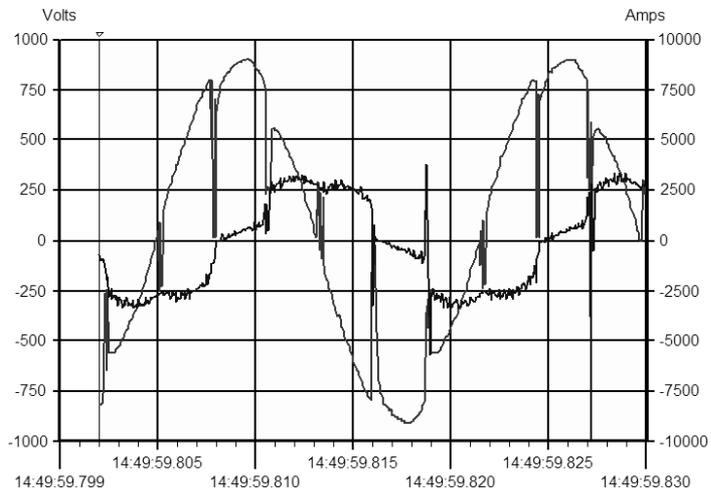
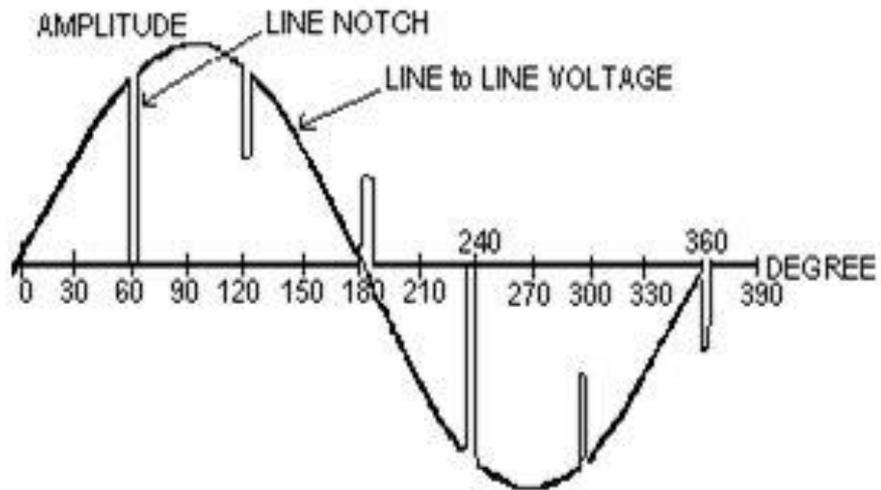
2. DC Offset



3. Cortes de Tensão

- Os cortes de tensão, também conhecido como notches ou notching é um distúrbio periódico na tensão, causado pela má operação dos dispositivos eletrônicos quando a corrente é comutada de uma fase para outra. Durante este período há um momentâneo curto circuito entre duas fases levando a tensão próxima a zero tanto quanto é permitido pelas impedâncias do sistema.
- Caso a fonte de alimentação destes conversores possua baixa potência de curto, estará criada a situação para que estes cortes surjam de forma significativa e importante. Em outras palavras, os “notches” estarão presentes quanto maior for o conteúdo harmônico do conversor (corrente distorcida) e quanto menor for a potência de curto da fonte que o alimenta.

- O fenômeno é explicado e pode ser facilmente entendido quando da operação/comutação da ponte retificadora, no instante em que os elementos estáticos são manobrados ou comutados durante cada um dos ciclos entre as três fases. Estas manobras podem ser interpretadas como curtos-circuitos instantâneos entre as fases em que ocorre a comutação, causando os cortes da forma de onda de tensão da fonte de alimentação. No caso de um conversor de seis pulsos, a cada 60° do ciclo da tensão haverá um corte.
- Como ocorre a cada ciclo, o fenômeno é considerado como periódico.
- A avaliação do fenômeno é feita pela “altura” (ou profundidade) e pela área do corte.



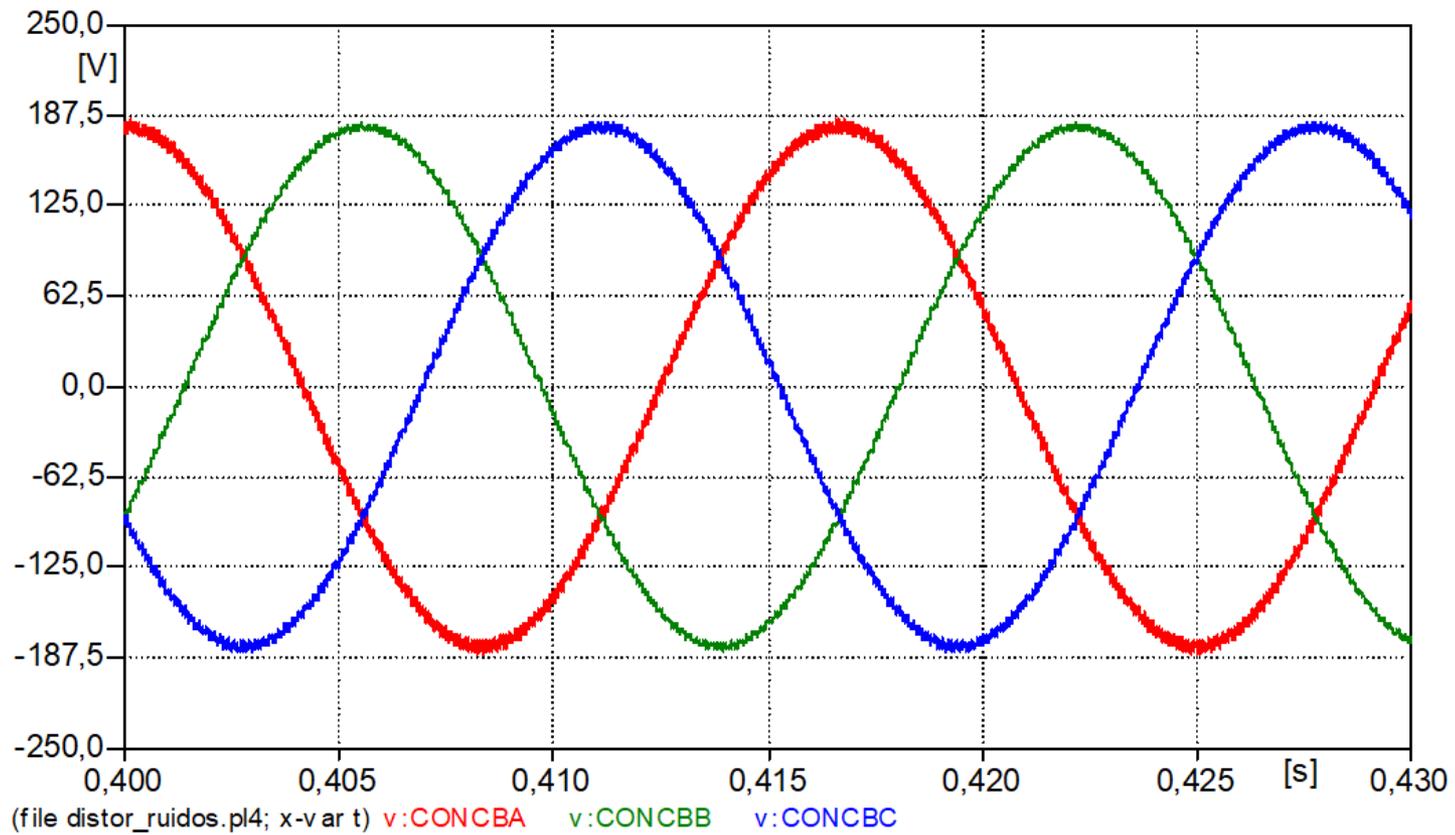
Solução:

- Em caso da ocorrência de operação irregular, as soluções poderão estar vinculadas à fonte (aumento da potência de curto-circuito) ou à carga com a instalação de filtros ou outros dispositivos que reduzam o impacto da operação do conversor. A substituição do próprio conversor poderá ainda ser proposta.

4. Ruídos

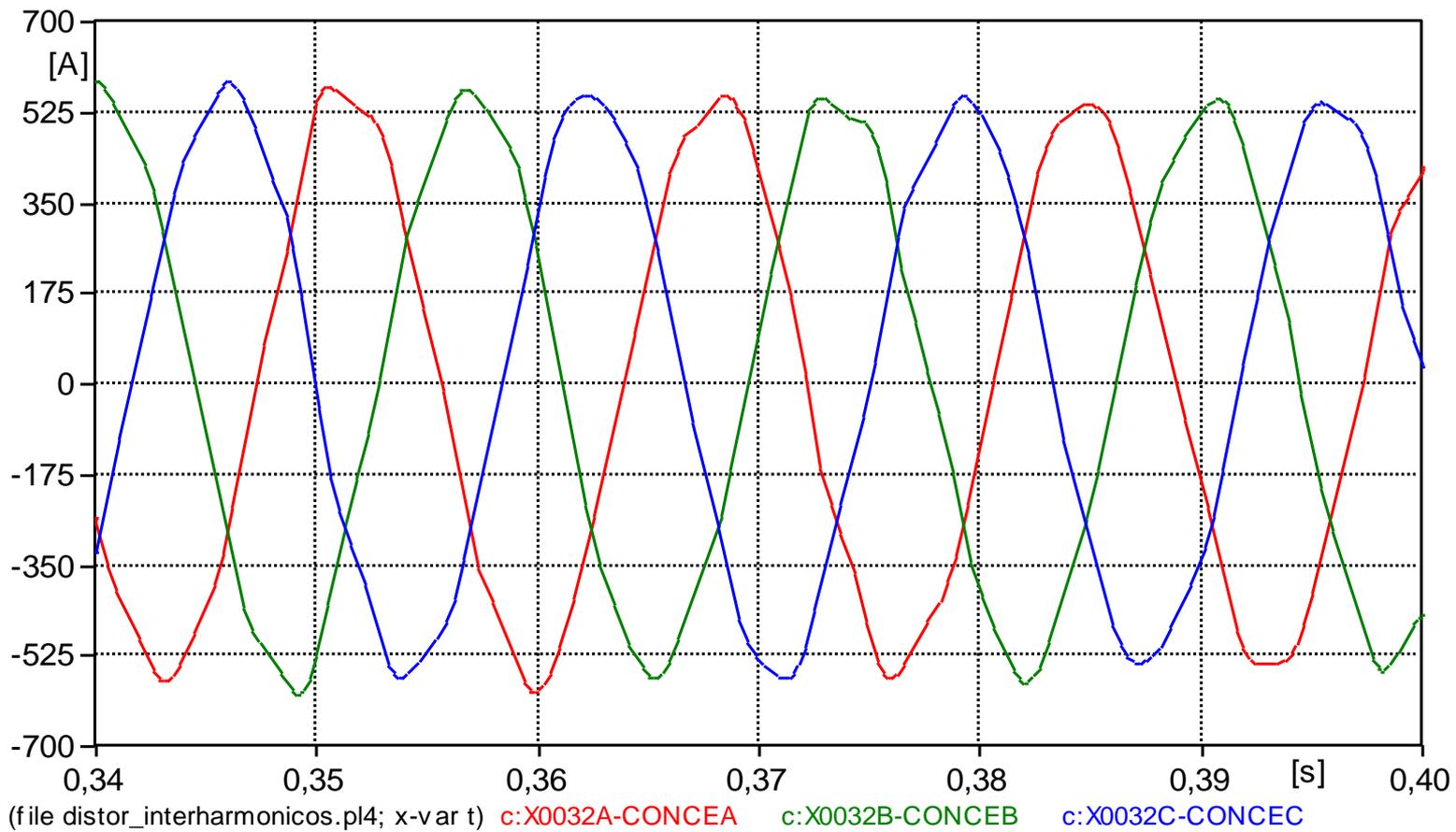
- Ruídos são sinais elétricos não desejáveis com um conteúdo do espectro abaixo de 200 kHz, superposto à tensão e corrente do sistema de energia, nos condutores de fase ou obtidos sobre os condutores neutros, ou ainda, nos sinais da linha.
- Pode ser causados em sistemas de energia por equipamentos eletrônicos, circuitos de controle, equipamentos a arco, cargas com retificadores de estado sólido e fontes chaveadas e, geralmente estão relacionados com aterramentos impróprios. O problema pode ser atenuado pelo uso de filtros, isolamento dos transformadores e condicionadores de linha.
- Os ruídos afetam o desempenho da operação de dispositivos eletrônicos tais como: microcomputadores e controladores programáveis.

- A faixa de frequência e a amplitude depende da fonte que produz o ruído e das características do sistema. A amplitude típica é menor que 1% da tensão fundamental.
- O problema pode ser minimizado utilizando-se filtros e transformadores isoladores, dentre outros.



5. Interharmônicos

- São formas de ondas de tensões e correntes que apresentam componentes de frequência que não são múltiplos inteiros da frequência com a qual o sistema é suprido e designado a operar (50 ou 60 Hz). As principais fontes são os conversores de frequência estáticos, cicloconversores, motores de indução e equipamentos a arco.
- Os efeitos deste fenômeno não são bem conhecidos, mas admite-se que os mesmos podem afetar a transmissão de sinais Carrier (portadores), induzirem flicker (flutuação) visual no display de equipamentos como tubos de raios catódicos e nível CC.

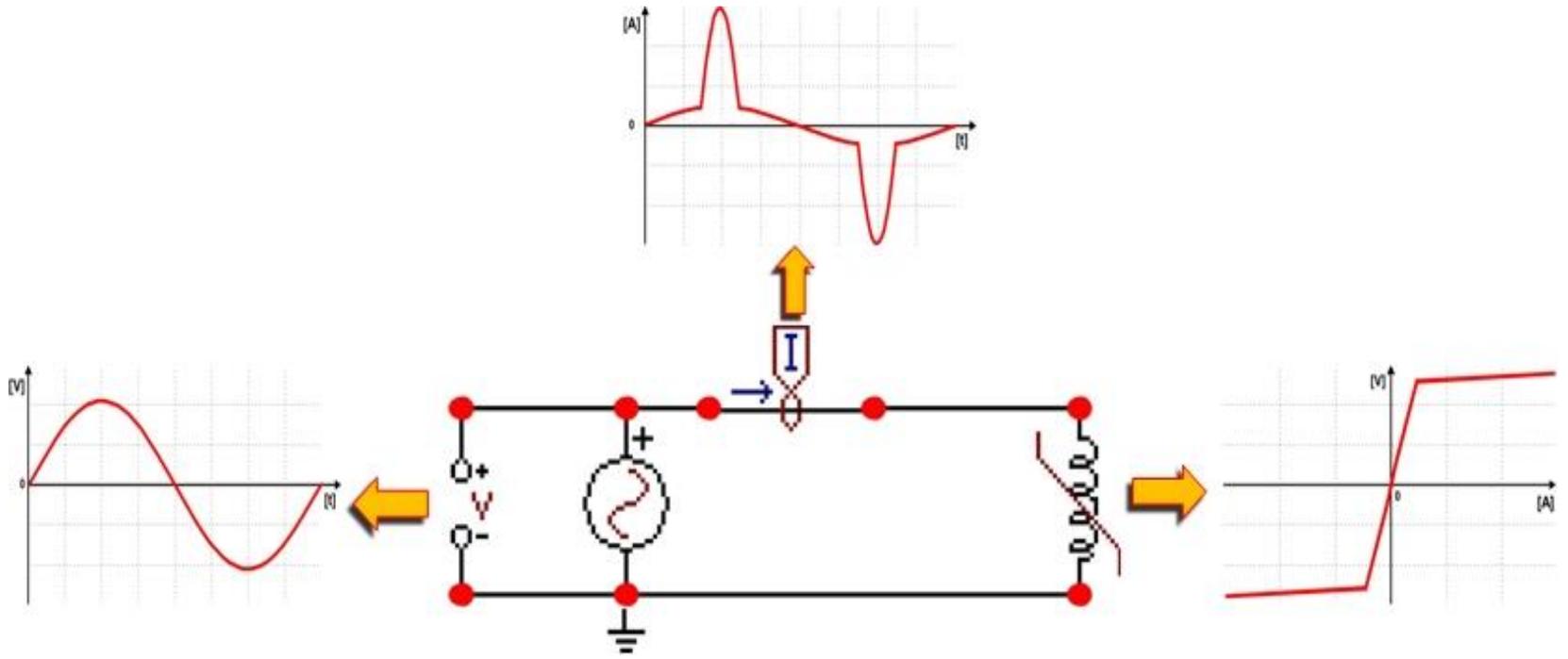


6. Harmônicos

Conceitos Gerais

- Dentre os distúrbios de qualidade da energia, os harmônicos encontram-se numa posição de destaque.
- De fato, em se tratando de um sistema elétrico, as tensões de suprimento às instalações consumidoras devem, por contrato, serem perfeitamente senoidais. No entanto, as tensões e as correntes encontram-se distorcidas.
- Este desvio é usualmente expresso em termos das distorções harmônicas de tensão e corrente, e normalmente causadas pela operação de cargas com características não-lineares.

- As correntes se propagam pelo sistema elétrico provocando distorções de tensão e ocasionando aquecimentos anormais em transformadores, banco de capacitores, condutores neutros, motores de indução, interferências em equipamentos eletrônicos de controle, comunicação, microcomputadores, etc.
- A magnitude da distorção de tensão depende, basicamente, da impedância equivalente vista pela carga não linear ou fonte de corrente harmônica e da corrente suprida pela mesma. Deve-se reconhecer que a carga não exerce controle sobre os níveis de distorção de tensão. Conseqüentemente, uma mesma carga poderá resultar em distorções de tensão diferentes, dependendo da sua localização no sistema elétrico.



- O efeito direto das cargas não lineares sobre a QEE é a distorção na corrente, e o indireto, a distorção na tensão. A distorção na tensão é propagada, assim como as correntes harmônicas que circularão por cargas lineares alimentadas por tais tensões.
- A palavra “harmônico” tem origem na área de acústica e de instrumentos musicais, com significado de múltiplo inteiro ou componentes de um tom, subtons e sobretons. Na engenharia, o termo “harmônico” ou “harmônica” é usado indistintamente.
- Harmônico é um componente de uma onda periódica cuja frequência é um múltiplo inteiro da frequência fundamental (no caso da energia elétrica brasileira, de 60 Hz).

- Harmônicos são fenômenos contínuos, e não devem ser confundidos com fenômenos de curta duração, os quais duram apenas alguns ciclos. Estas perturbações no sistema podem normalmente ser eliminadas com a aplicação de filtros de linha (supressores de transitórios). Um filtro de harmônicos é essencialmente um capacitor para correção do fator de potência, combinado em série com um reator (indutor).
- A natureza e a magnitude das distorções harmônicas geradas por cargas não lineares dependem de cada carga em específico, mas duas generalizações podem ser assumidas:
 - Os harmônicos que causam problemas geralmente são os componentes de números ímpares; e
 - A magnitude da corrente harmônica diminui com o aumento da frequência.

- Dentre os principais efeitos causados, em termos gerais, podem ser citados:
 - Má operação de equipamentos eletrônicos, de controle, de proteção, de medição e outros;
 - Sobretensões gerando comprometimento da isolação e da vida útil do equipamento;
 - Sobrecorrentes ocasionando efeitos térmicos nocivos aos equipamentos;
 - Interferências em sistemas de comunicação (principalmente sinais de rádio);
 - Efeitos sobre a Resistência dos Condutores Elétricos.

Série de Fourier

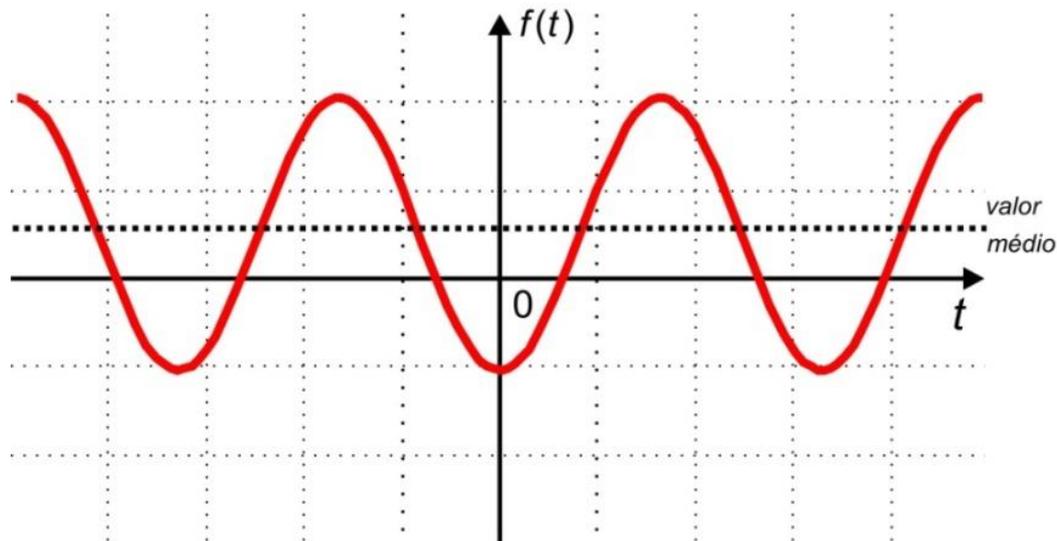
- Para a quantificação do grau de distorção presente na tensão e/ou corrente, lança-se mão da ferramenta matemática conhecida por série de Fourier. As vantagens de se usar a série de Fourier para representar formas de onda distorcidas é que, cada componente harmônica pode ser analisada separadamente e, a distorção final é determinada pela superposição das várias componentes constituintes do sinal distorcido. A série de Fourier é calculada pela seguinte Expressão:

$$f(\omega t) = \underbrace{A_0}_{\substack{\text{valor médio} \\ \text{ou CC}}} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\underbrace{(A_n \times \cos(n \times \omega t))}_{\text{termos em seno}} + \underbrace{(A_n \times \cos(n \times \omega t))}_{\text{termos em co-seno}} \right]$$

- O primeiro termo das séries em seno e co-seno é denominado de componente fundamental. Esta componente representa o termo de menor frequência necessário para representar uma determinada função, e também tem a mesma frequência que a forma de onda original. Portanto o termo fundamental tem que constar em qualquer representação em séries de Fourier. Outros termos com frequências de ordem maior (frequências múltiplas da fundamental) são denominadas termos harmônicos.

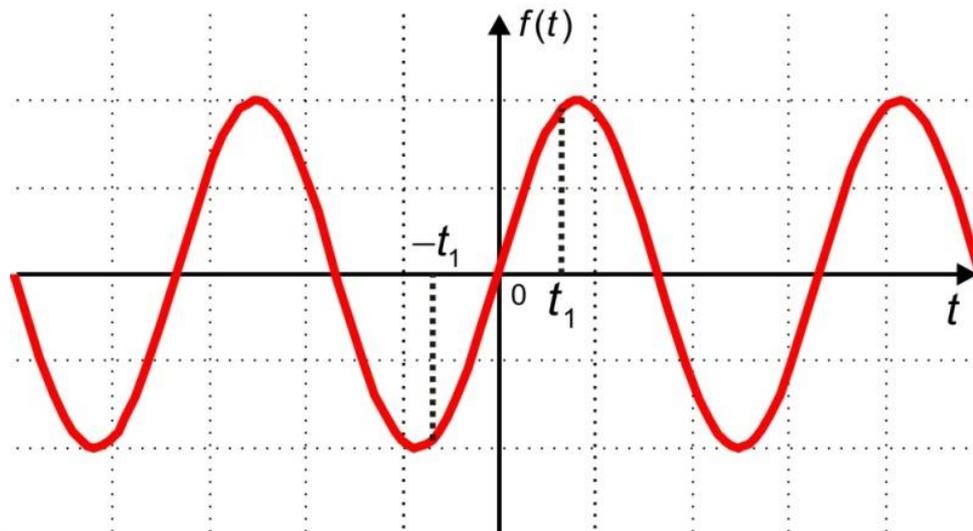
Valor Médio: A_0

- Se as áreas acima e abaixo do eixo horizontal forem iguais, ou seja, se a forma de onda for simétrica em relação ao eixo horizontal, o termo constante não estará presente na representação da forma de onda em série de Fourier.



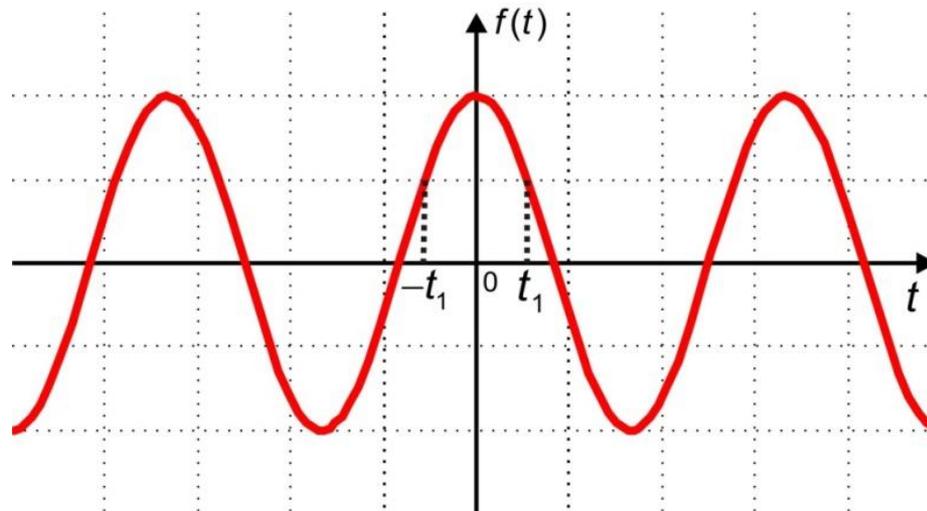
Funções Ímpares (Simetria Central)

- Se o sinal analisado for uma função ímpar (simetria central), isto é, quando o valor de uma função para t é o negativo da função para $-t$. Para formas de onda desse tipo, todos os parâmetros em co-seno tendem ao infinito. As formas de onda com simetria central podem ser descritas completamente usando apenas o termo do valor médio e os termos em seno da série de Fourier.



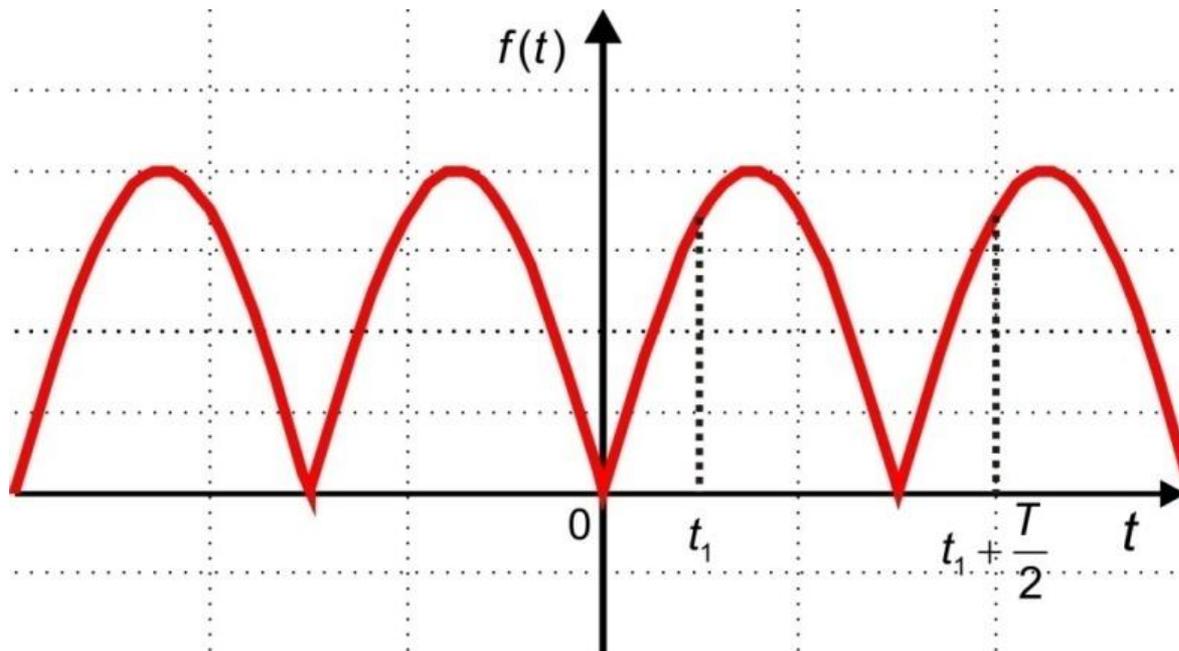
Funções Pares (Simetria Axial)

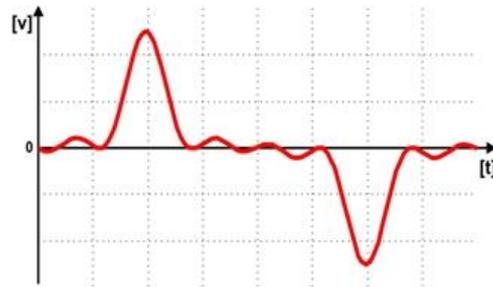
- Quando o valor de uma função para t é igual ao valor da função de $-t$, dizemos que uma função é par ou possui simetria axial. O valor da função em t_1 é igual ao valor em $-t_1$. Para formas de onda desse tipo, todos os parâmetros em seno tendem ao infinito. As formas de onda com simetria axial podem ser descritas completamente usando apenas o termo do valor médio e os termos em co-seno da série de Fourier.



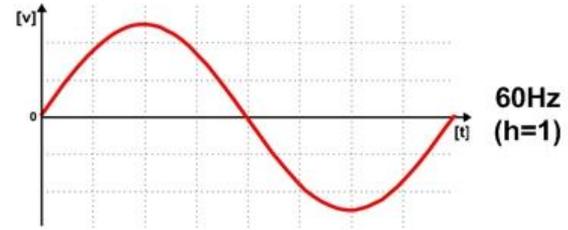
Simetria de Meio Ciclo

- Quando uma função apresenta simetria de meio ciclo os harmônicos ímpares em seno e co-seno são nulos.

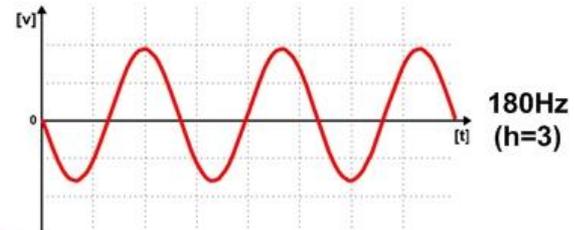




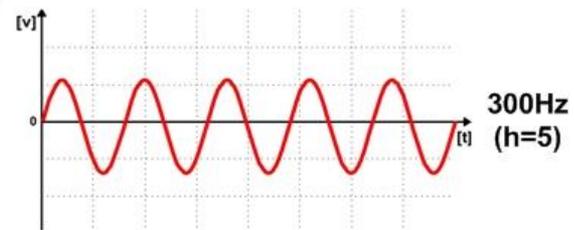
Sinal Distorcido



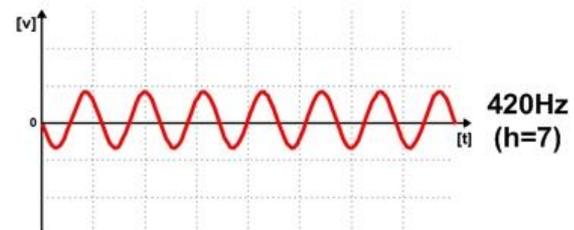
+

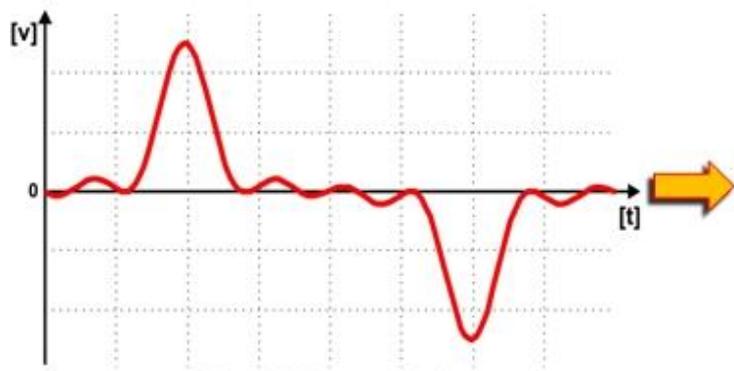


+

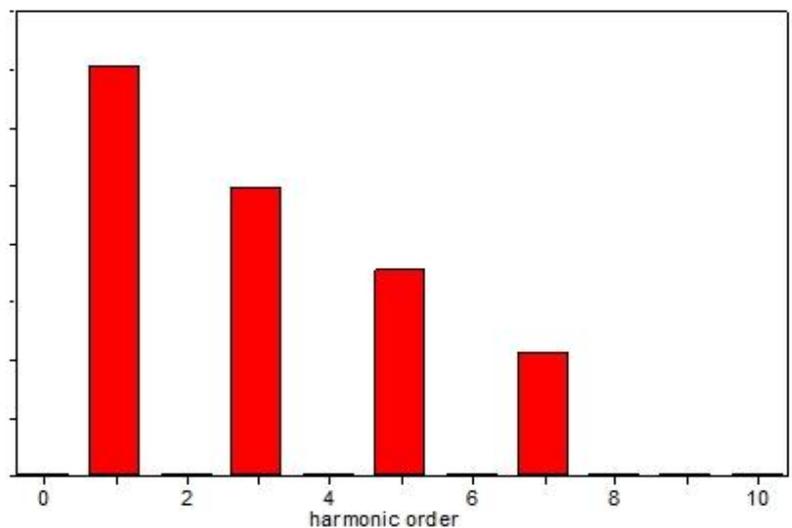


+





Sinal Distorcido



Espectro Harmônico

Exercício:

○ Montar no excel as seguintes formas de onda para o período de 1 ciclo:

a) $V_1 = 127 \text{ V}; V_2 = 30 \text{ V}$

b) $V_1 = 127 \text{ V}; V_3 = 30 \text{ V}$

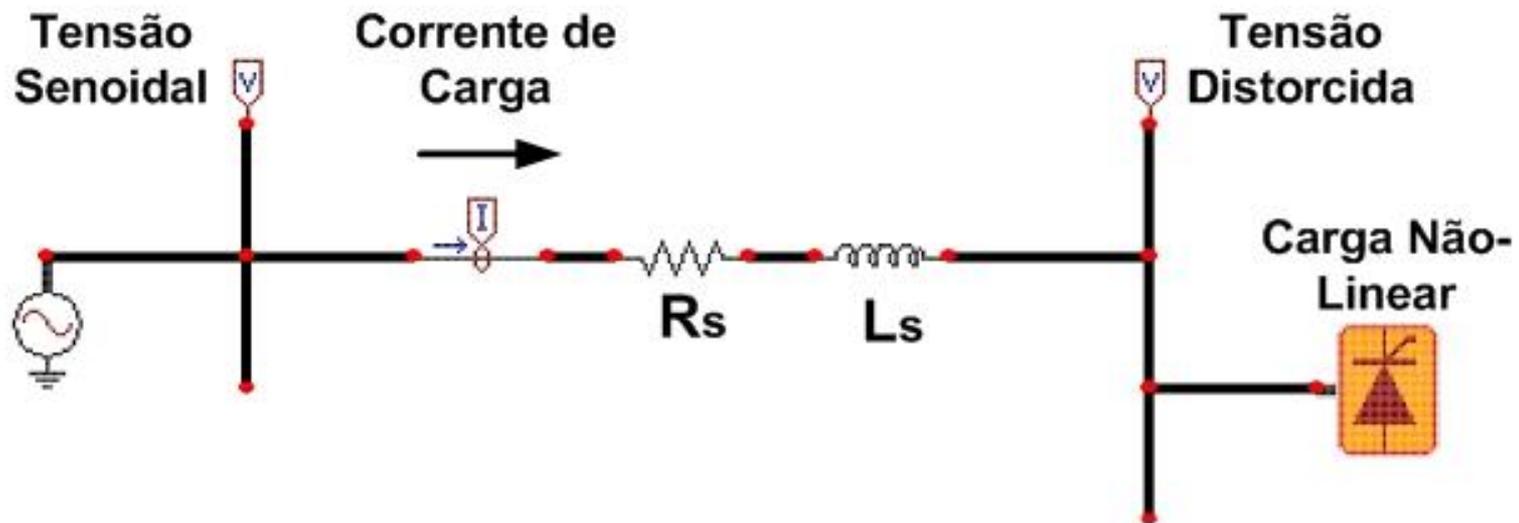
c) $V_1 = 127 \text{ V}; V_2 = 30 \text{ V}; V_3 = 30 \text{ V}$

d) $V_1 = 127 \text{ V}; V_3 = 10 \text{ V}; V_5 = 30 \text{ V}$

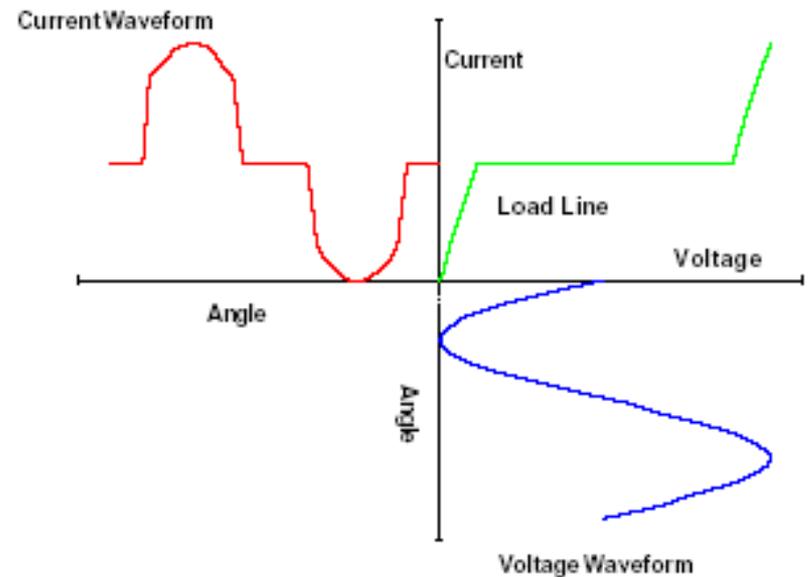
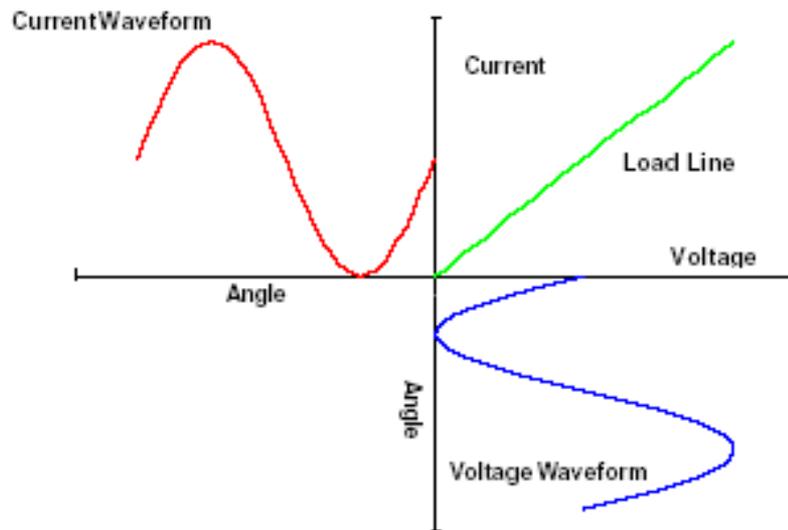
e) $V_1 = 127 \text{ V}; V_3 = 10 \text{ V}; V_5 = 30 \text{ V}; V_7 = 15 \text{ V}$

Distorções Harmônicas

- A distorção harmônica de tensão é o resultado da corrente harmônica circulando através da impedância série (linear) do sistema elétrico. Para cada frequência harmônica, há uma queda de tensão de mesma frequência, resultando, desta forma, na distorção da tensão na barra.



- Um dispositivo não linear é equipamento que não produz uma corrente senoidal quando lhe é aplicada uma tensão senoidal. Esses equipamentos são classificados em três importantes categorias:
 - Dispositivos a arco: Fornos a arco, máquinas de solda, etc.;
 - Dispositivos saturados: transformadores, reatores, etc.;
 - Equipamentos de eletrônica de potência: conversores, retificadores, etc.



- A distorção harmônica para as formas de onda das correntes de um circuito trifásico equilibrado podem ser dadas por:

$$i_a(\omega t) = I_1 \text{sen}(\omega t) + I_2 \text{sen}2(\omega t) + \\ + I_3 \text{sen}3(\omega t) + I_4 \text{sen}4(\omega t) + \\ + I_5 \text{sen}5(\omega t) + \dots$$

$$i_b(\omega t) = I_1 \text{sen}(\omega t - 120^\circ) + I_2 \text{sen}2(\omega t - 120^\circ) + \\ + I_3 \text{sen}3(\omega t - 120^\circ) + I_4 \text{sen}4(\omega t - 120^\circ) + \\ + I_5 \text{sen}5(\omega t - 120^\circ) + \dots$$

$$i_c(\omega t) = I_1 \text{sen}(\omega t + 120^\circ) + I_2 \text{sen}2(\omega t + 120^\circ) + \\ + I_3 \text{sen}3(\omega t + 120^\circ) + I_4 \text{sen}4(\omega t + 120^\circ) + \\ + I_5 \text{sen}5(\omega t + 120^\circ) + \dots$$

- A partir das equações, conclui-se que, cada componente harmônica apresenta uma característica própria em relação a sequência de fase da componente fundamental.

Ordem	Frequência (Hz)	Seqüência
1	60	+
2	120	-
3	180	0
4	240	+
5	300	-
6	360	0
n	$n * 60$	—

Distorção Harmônica Total e Individual

- Comumente, as componentes harmônicas são medidas na forma de “distorções”, e quantificadas como Distorção Harmônica Total (DHT) ou *Total Harmonic Distortion* (THD), que pode ser usada para as formas de onda de tensão e de corrente, com a seguinte expressão:

$$DHT_v\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h^2}}{V_1} \times 100$$

$$DHT_i\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} I_h^2}}{I_1} \times 100$$

Distorção Harmônica Total e Individual

- Para expressar a distorção individual provocada pelas componentes harmônicas, ou índices de Distorção Harmônica Individual, definidos pela relação do valor da componente harmônica pelo valor da componente fundamental:

$$DHI_v \% = \frac{V_h}{V_1} \times 100$$

$$DHI_i \% = \frac{I_h}{I_1} \times 100$$

Distorção Harmônica Total e Individual

- Devido ao fato de que as correntes variam muito de valor em um sistema, deve ser destacado que uma carga, operando com uma pequena corrente pode ter uma componente fundamental de valor baixo e, conseqüentemente, uma THD alta.
- Apesar disso, por se tratar de uma corrente total de baixo valor, a mesma poderá não ser um problema para o sistema. Assim recomenda-se calcular o THD para as correntes, usando para a componente fundamental nominal da carga e não a componente fundamental do momento da amostragem.

Distorção Harmônica Total e Individual

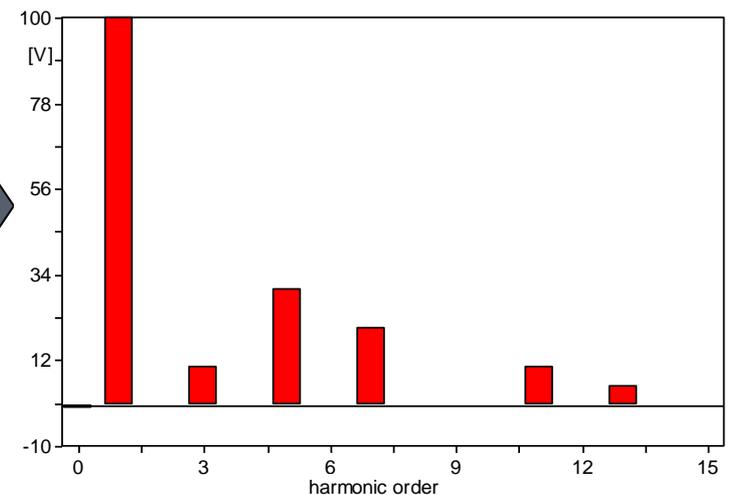
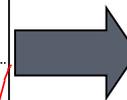
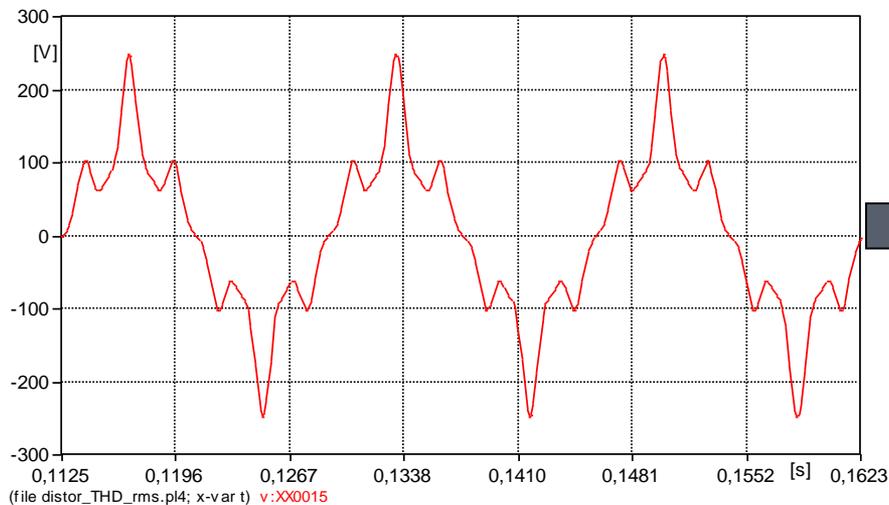
- O valor eficaz da onda total não é a soma das componentes individuais, mas sim a raiz quadrada da soma dos quadrados, conforme a seguir mostrado.

$$rms = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{\max}} M_h^2} = M_1 \times \sqrt{1 + THD^2}$$

Distorção Harmônica Total e Individual

- Como exemplo, considere um sinal distorcido com as seguintes características:

Tensão Harmônica	Valor rms	Tensão Harmônica	Valor rms
V_1	100	V_7	20
V_3	10	V_{11}	10
V_5	30	V_{13}	5



Distorção Harmônica Total e Individual

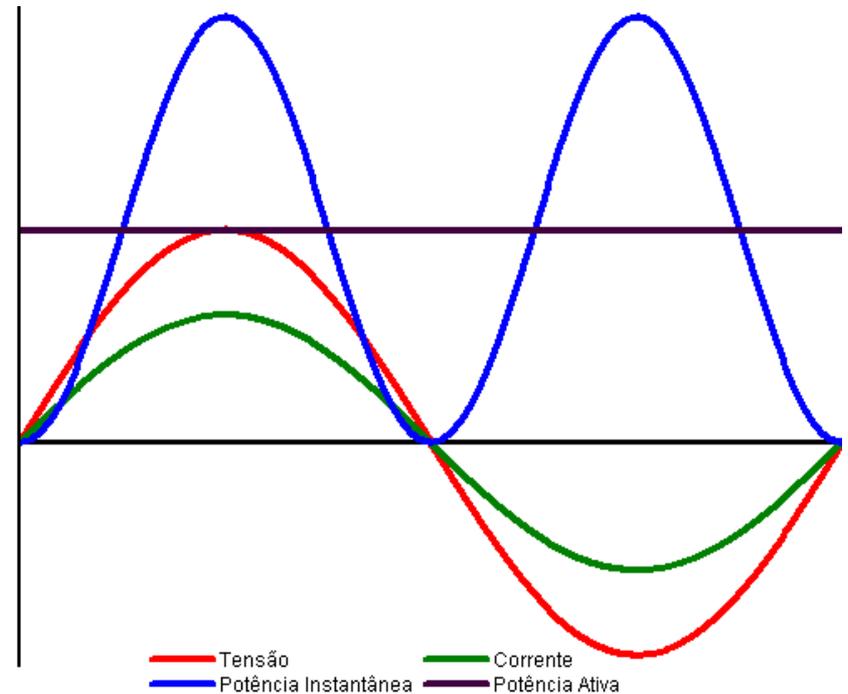
$$DHT_v \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h^2}}{V_1} \times 100 = \frac{\sqrt{(10^2 + 30^2 + 20^2 + 10^2 + 5^2)}}{100} \times 100 = 39,05\%$$

$$rms = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{\max}} M_h^2} = \sqrt{(100^2 + 10^2 + 30^2 + 20^2 + 10^2 + 5^2)} = 100 \times \sqrt{1 + 0,3905^2} = 107,35V$$

Potências na presença de harmônicos

- Potência Ativa (P), W - Potência que efetivamente realiza trabalho, ou seja, é transformada em calor, movimento, luz, etc.

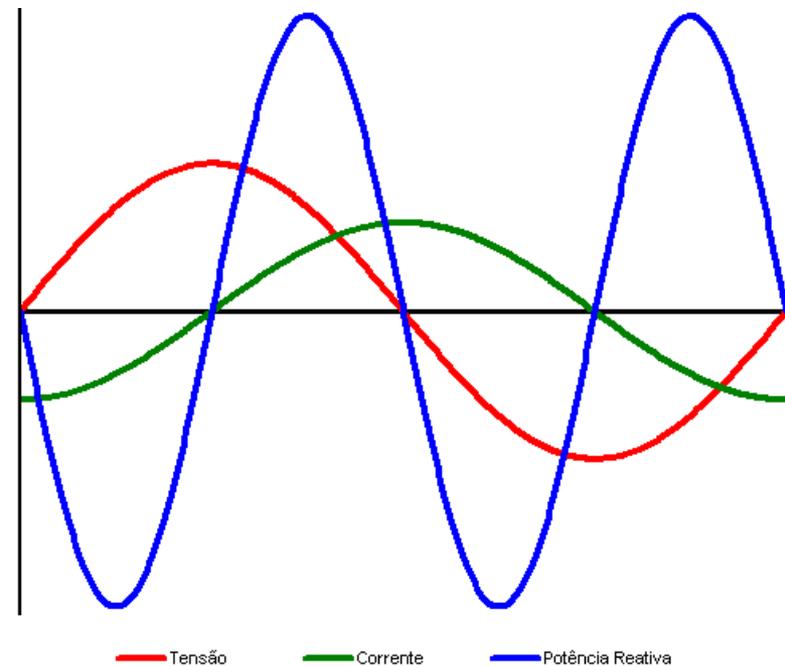
$$P_1 = V_1 \cdot I_1 \cdot \cos\theta_1$$



Potências na presença de harmônicos

- Potência Reativa (Q), Var - Responsável pela criação e manutenção dos campos eletromagnéticos, indispensável ao funcionamento de motores, transformadores, etc.

$$Q_1 = V_1 \cdot I_1 \cdot \text{sen}\theta_1$$



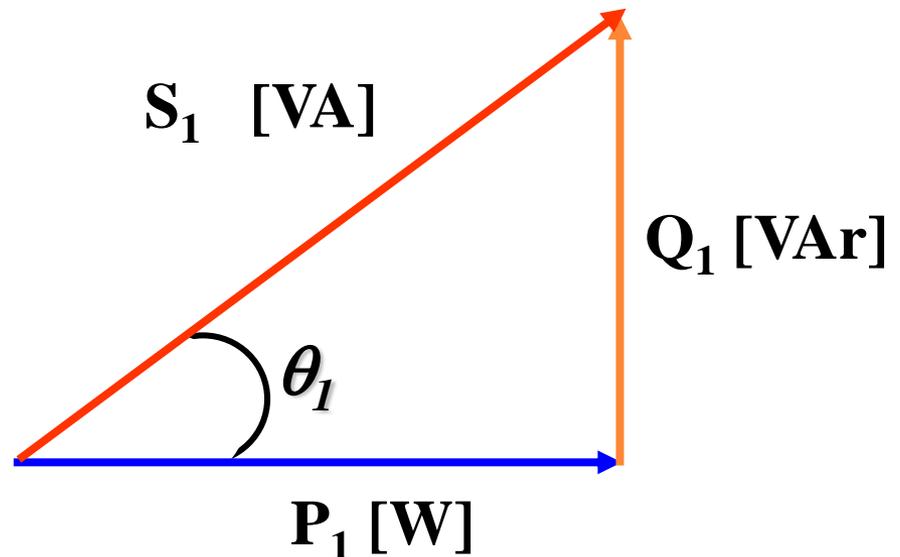
Potências na presença de harmônicos

- Potência Aparente (S), VA - Representa a composição das potências ativa e reativa, responsável pelo carregamento e capacidade térmica dos equipamentos

Triângulo de potências

$$\dot{S}_1 = P_1 + jQ_1 = \dot{V}_1 \dot{I}_1^*$$

$$S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} = V_1 \cdot I_1$$



Potências na presença de harmônicos

- Fator de Potência (FP), pu - Relação entre a potência ativa e a potência aparente. Indica a eficiência de utilização da energia transformada em trabalho

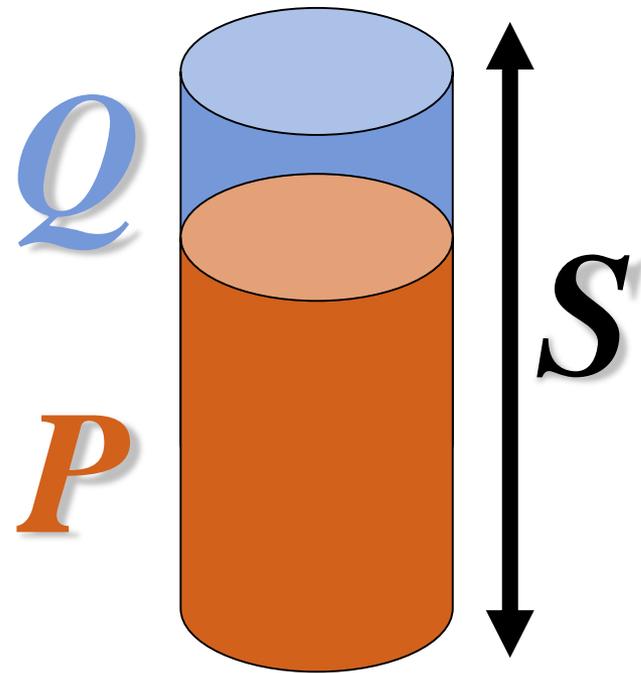
$$FP = \frac{P}{S}$$

$$FP_1 = \frac{P_1}{S_1} = \cos\theta_1$$

Pode ser:

⇒ Indutivo (carga indutiva);

⇒ Capacitivo (carga capacitiva).



Potências na presença de harmônicos

- Lembrando:

Tensão Eficaz:
$$V = \sqrt{V_1^2 + \sum_2^{\infty} V_h^2}$$

Corrente Eficaz:
$$I = \sqrt{I_1^2 + \sum_2^{\infty} I_h^2}$$

Potências na presença de harmônicos

Pot. Ativa $P = V_1 I_1 \cos \theta_1 + \sum_{h=2}^{\infty} V_h I_h \cos \theta_h$

Pot. Reativa $Q = V_1 I_1 \text{sen } \theta_1 + \sum_{h=2}^{\infty} V_h I_h \text{sen } \theta_h$

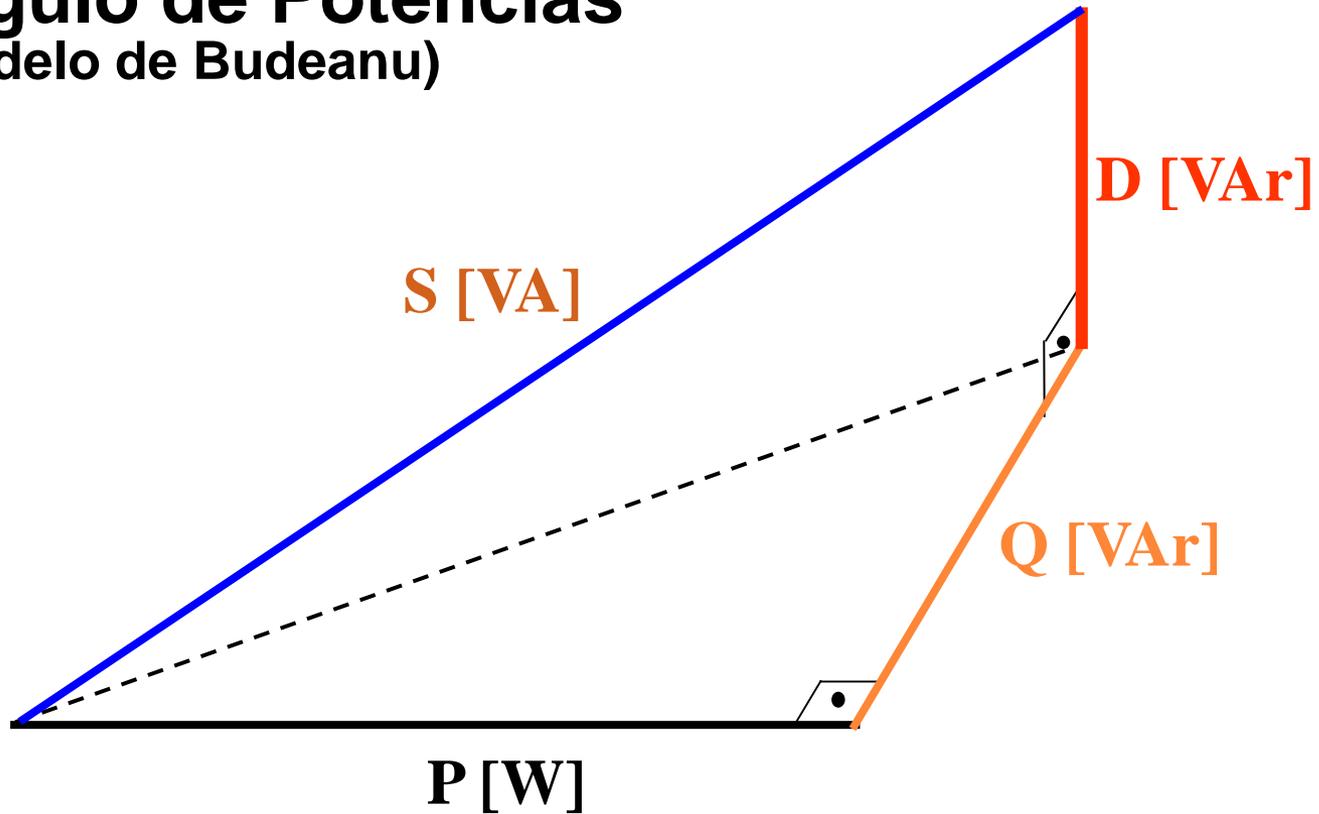
Pot. Aparente $S = V_{ef} \cdot I_{ef} = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$

Pot. de Distorção
(*distortion voltamperes*)

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}$$

Potências na presença de harmônicos

Triângulo de Potências (Modelo de Budeanu)

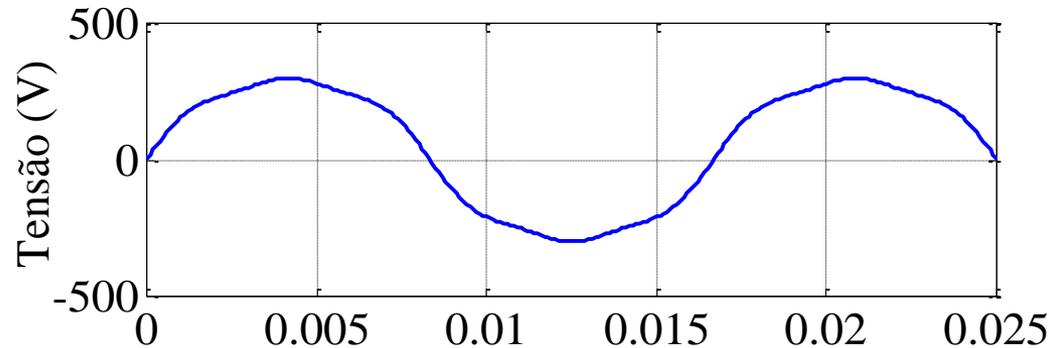


Potências na presença de harmônicos

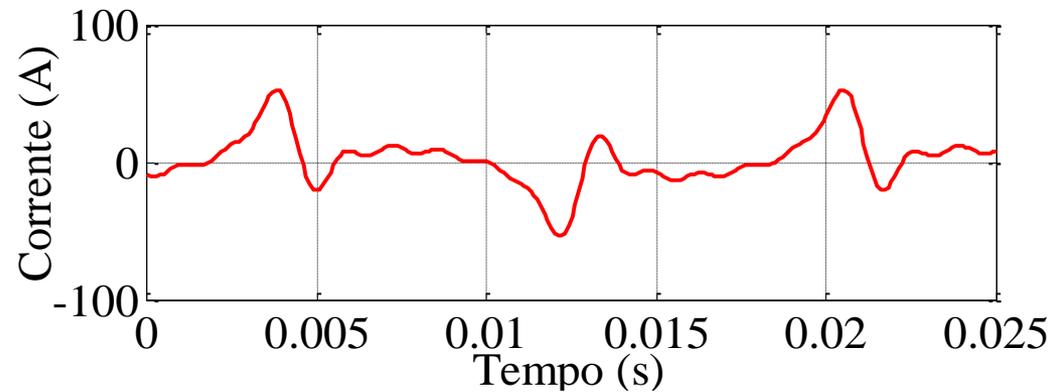
$$FP = \frac{P}{S} = \frac{V_1 I_1 \cos \theta_1 + \sum_{h=2}^{\infty} V_h I_h \cos \theta_h}{V_{ef} \cdot I_{ef}}$$

$$FP_1 = \frac{P}{S} = \frac{V_1 I_1 \cos \theta_1}{V_1 \cdot I_1} = \cos \theta_1$$

Potências na presença de harmônicos



$V_{ef} = 221,1 \text{ V}$
 $THD_V = 10,4\%$



$I_{ef} = 17,9 \text{ A}$
 $THD_I = 122,5\%$

Potências na presença de harmônicos

$$v(t) = 311 \operatorname{sen}(\omega t) + 28 \operatorname{sen}(3\omega t) + 16 \operatorname{sen}(5\omega t)$$

$$i(t) = 16 \operatorname{sen}(\omega t - 6^\circ) + 13,8 \operatorname{sen}(3\omega t - 115^\circ) + 11,2 \operatorname{sen}(5\omega t + 65^\circ) + 7,2 \operatorname{sen}(7\omega t - 120^\circ) + 3,5 \operatorname{sen}(9\omega t + 48^\circ) + 2,2 \operatorname{sen}(11\omega t - 154^\circ)$$

$$P_1 = V_1 I_1 \cos \theta_1 = 220 * 11,3 * \cos(6^\circ) = 2,47 \text{ kW}$$

$$P = V_1 I_1 \cos \theta_1 + V_3 I_3 \cos \theta_3 + V_5 I_5 \cos \theta_5 = 2,43 \text{ kW}$$

$$Q_1 = V_1 I_1 \operatorname{sen} \theta_1 = 0,26 \text{ kVAr}$$

$$Q = V_1 I_1 \operatorname{sen} \theta_1 + V_3 I_3 \operatorname{sen} \theta_3 + V_5 I_5 \operatorname{sen} \theta_5 = 0,354 \text{ kVAr}$$

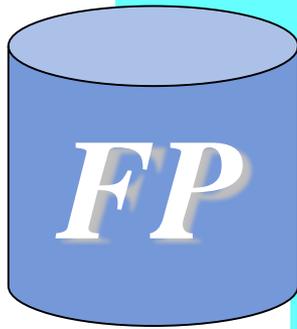
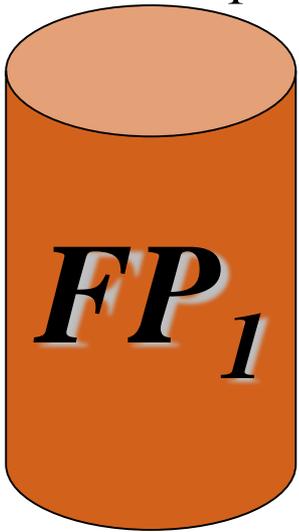
Potências na presença de harmônicos

$$S_1 = V_1 I_1 = 2,49 \text{ kVA}$$

$$S = \sqrt{\sum_{h=1}^5 V_h^2} \cdot \sqrt{\sum_{h=1}^{11} I_h^2} = 3,96 \text{ kVA}$$

$$FP_1 = \frac{P_1}{S_1} = 0,99$$

$$FP = \frac{P}{S} = 0,61$$



$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} = 3,1 \text{ kVAr}$$

Considerações

- Para fins práticos, geralmente, os componentes harmônicos de ordens elevadas (acima da 50ª ordem, dependendo do sistema) são desprezíveis para análises de sistemas de potência. Apesar de poderem causar interferência em dispositivos eletrônicos de baixa potência, elas usualmente não representam perigo.
- Quanto aos limites estabelecidos para tensões harmônicas, no Brasil, o ONS, através do Submódulo 2.8 (Padrões de Desempenho da Rede Básica), oferecem níveis tanto para as ordens ímpares como, também, para as componentes pares.

Considerações

Tabela 5 – Limites globais inferiores de tensão em porcentagem da tensão fundamental

V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
ÍMPARES		PARES		ÍMPARES		PARES	
ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)
3, 5, 7	5%			3, 5, 7	2%		
		2, 4, 6	2%			2, 4, 6	1%
9, 11, 13	3%			9, 11, 13	1,5%		
		≥8	1%			≥8	0,5%
15 a 25	2%			15 a 25	1%		
≥27	1%			≥27	0,5%		
DTHTS95% = 6%				DTHTS95% = 3%			

Cargas geradoras de harmônicos

Três grupos básicos, a saber:

1. Cargas de conexão direta ao sistema:
 - Motores de corrente alternada;
 - Transformadores alimentadores;
 - Circuitos de iluminação com lâmpadas de descarga (como as multi vapor metálico: mercúrio e sódio);
 - Fornos a arco, etc.

Cargas geradoras de harmônicos

2. Cargas conectadas através de conversores:
 - Motores de corrente contínua controlada por retificadores;
 - Motores de indução controlados por inversores com comutação forçada;
 - Motores síncronos controlados por cicloconversores (conversão estática direta CA/CA em uma dada frequência para outra frequência inferior);
 - Fornos de indução de alta frequência, etc.

Cargas geradoras de harmônicos

3. Reguladores:

- Fornos de indução controlados por reatores saturados;
- Cargas de aquecimento controladas por tiristores;
- Velocidade dos motores CA controlados por tensão de estator;
- Reguladores de tensão a núcleo saturado;
- Computadores;
- Eletrodomésticos com fontes chaveadas, etc.

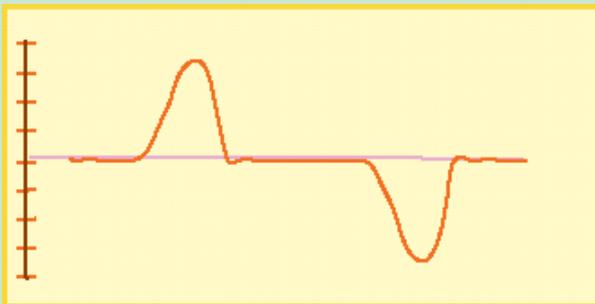
Cargas monofásicas com fonte ponte retificadora (eletrodomésticos, etc.)

CARGAS TIPO RCD

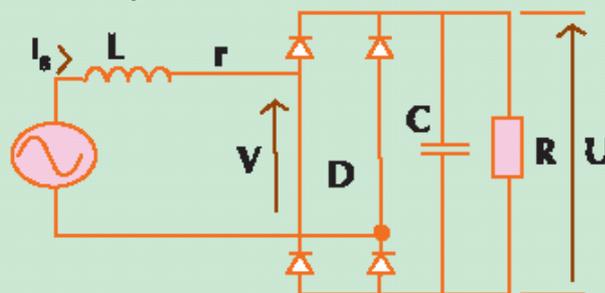
- Cargas monofásicas micro e mini informática
- Geradores de grandes correntes harmônicas de ordens ímpares H3 a H15

CORRENTE I_g ABSORVIDA

$S=8,5\text{kVA}$ $F_c=2,4$ $\text{THDI}=93\%$

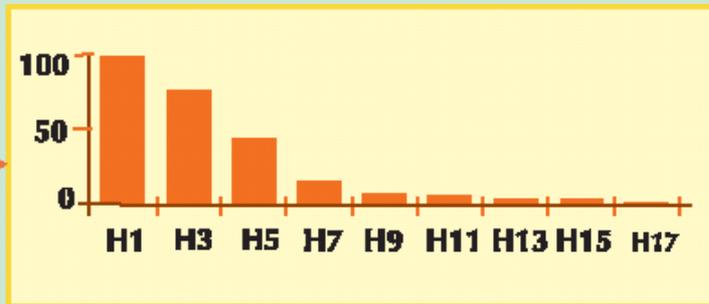


ESQUEMA TÍPICO



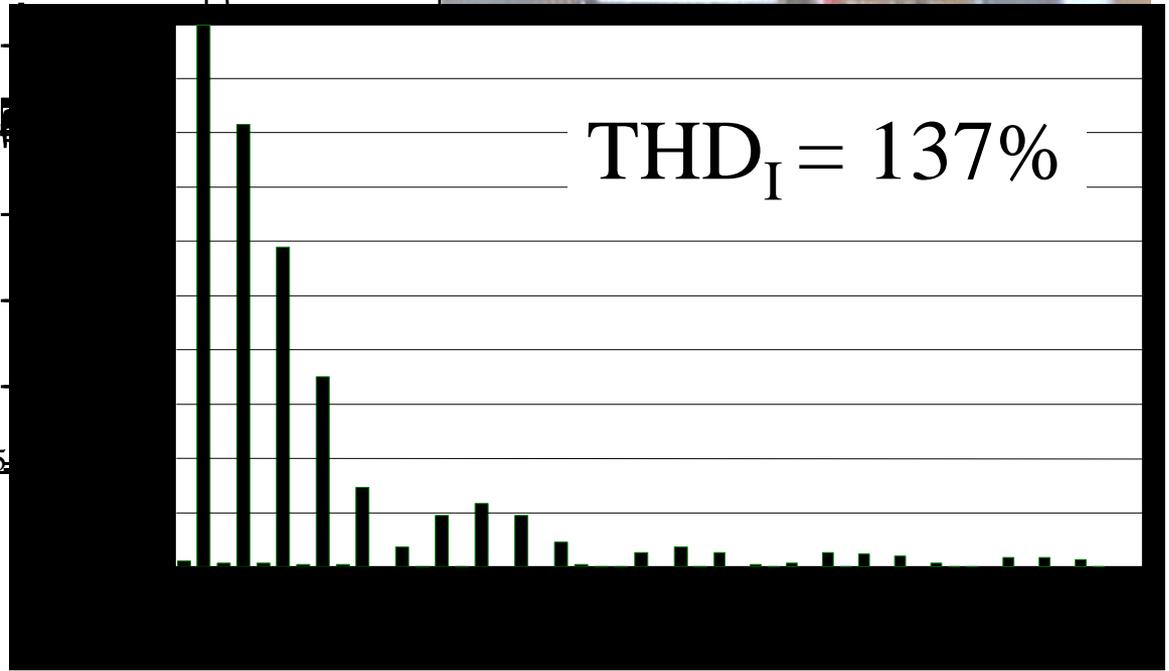
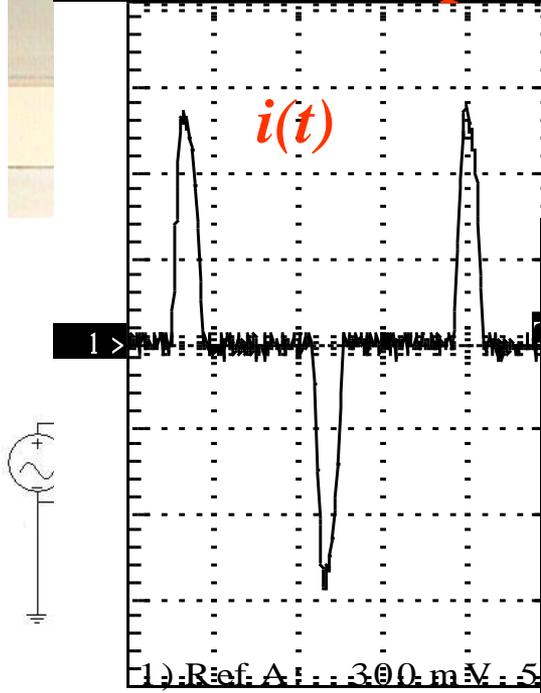
ESPECTRO HARMÔNICO

78% H3, 44% H5, 17% H7, ...



Cargas monofásicas com fonte ponte retificadora

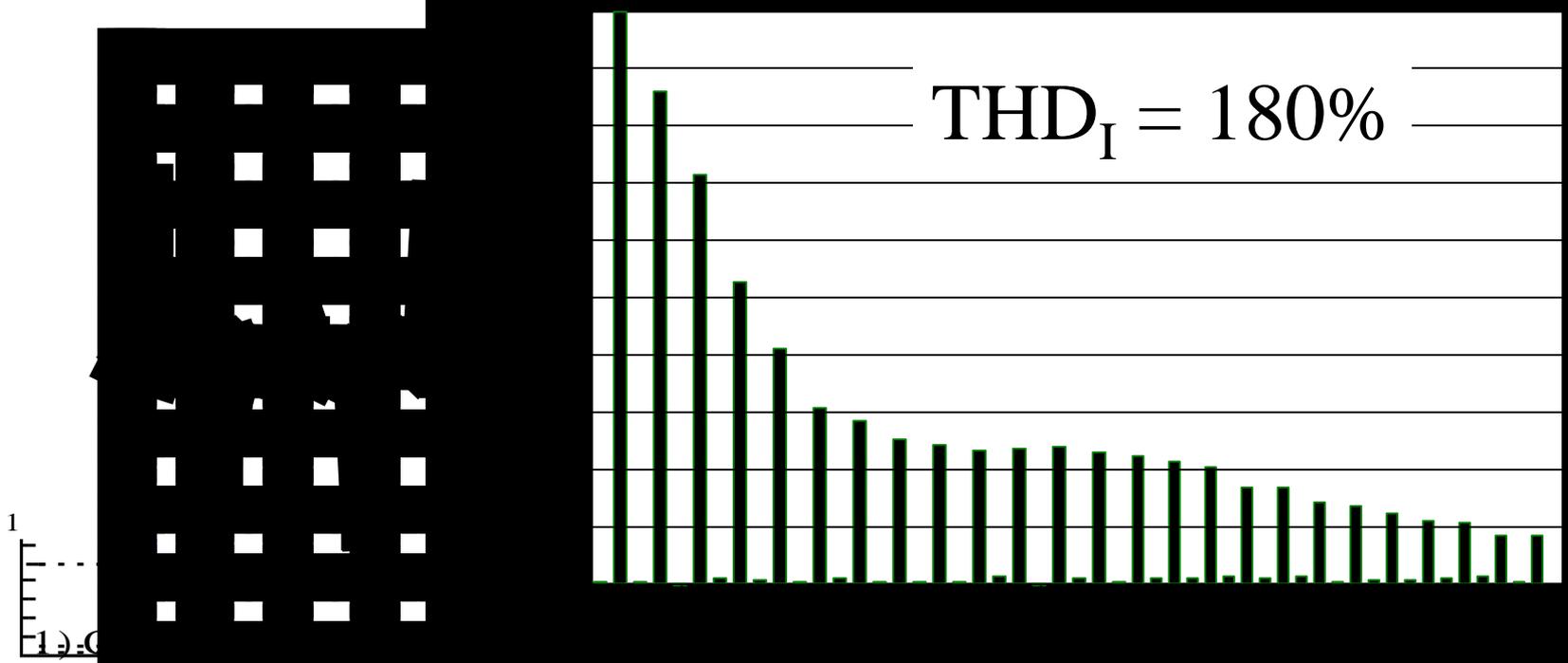
Corrente de alimentação do microcomputador (lado CA)



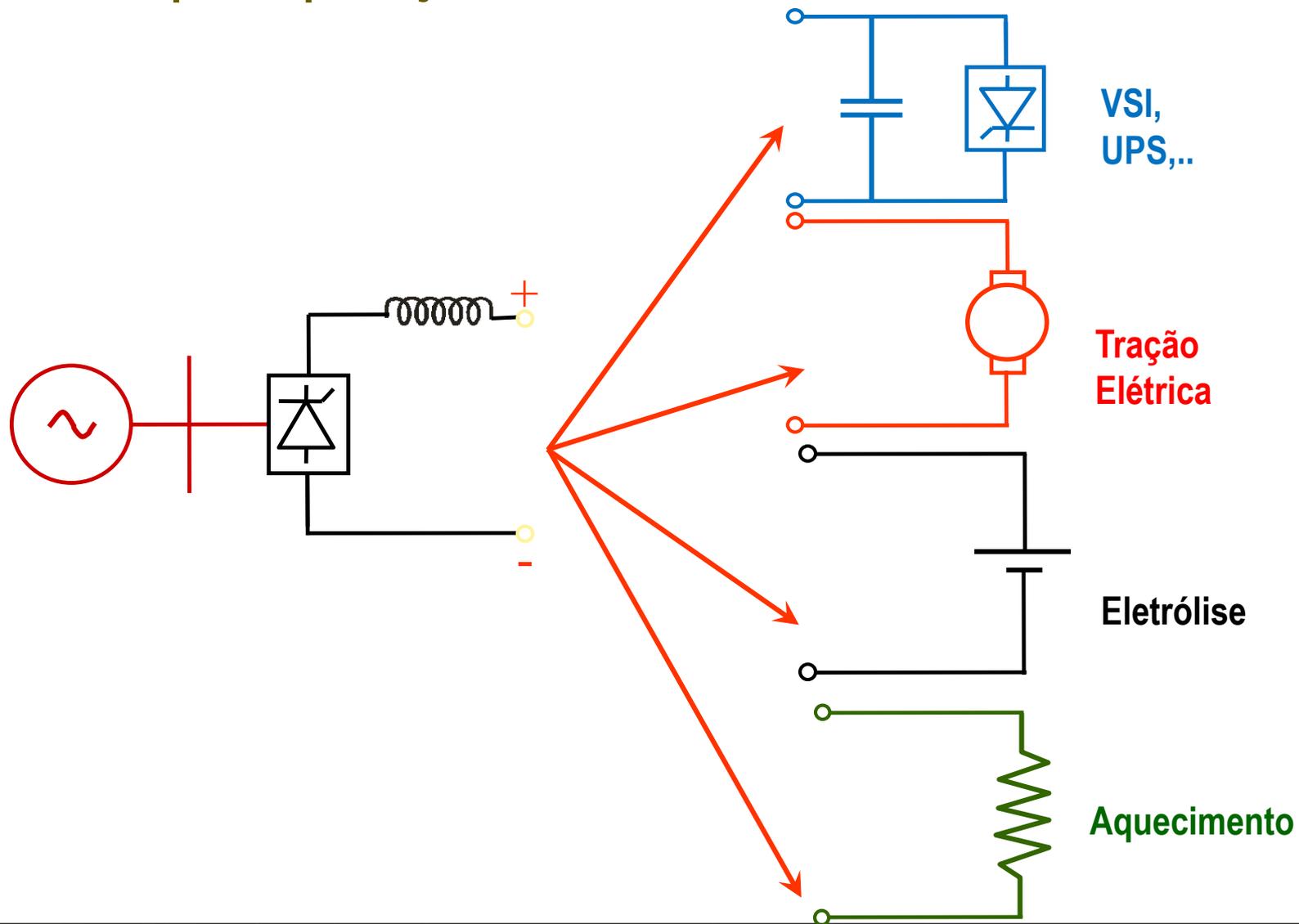
Cargas monofásicas com fonte ponte retificadora (eletrodomésticos, etc.)



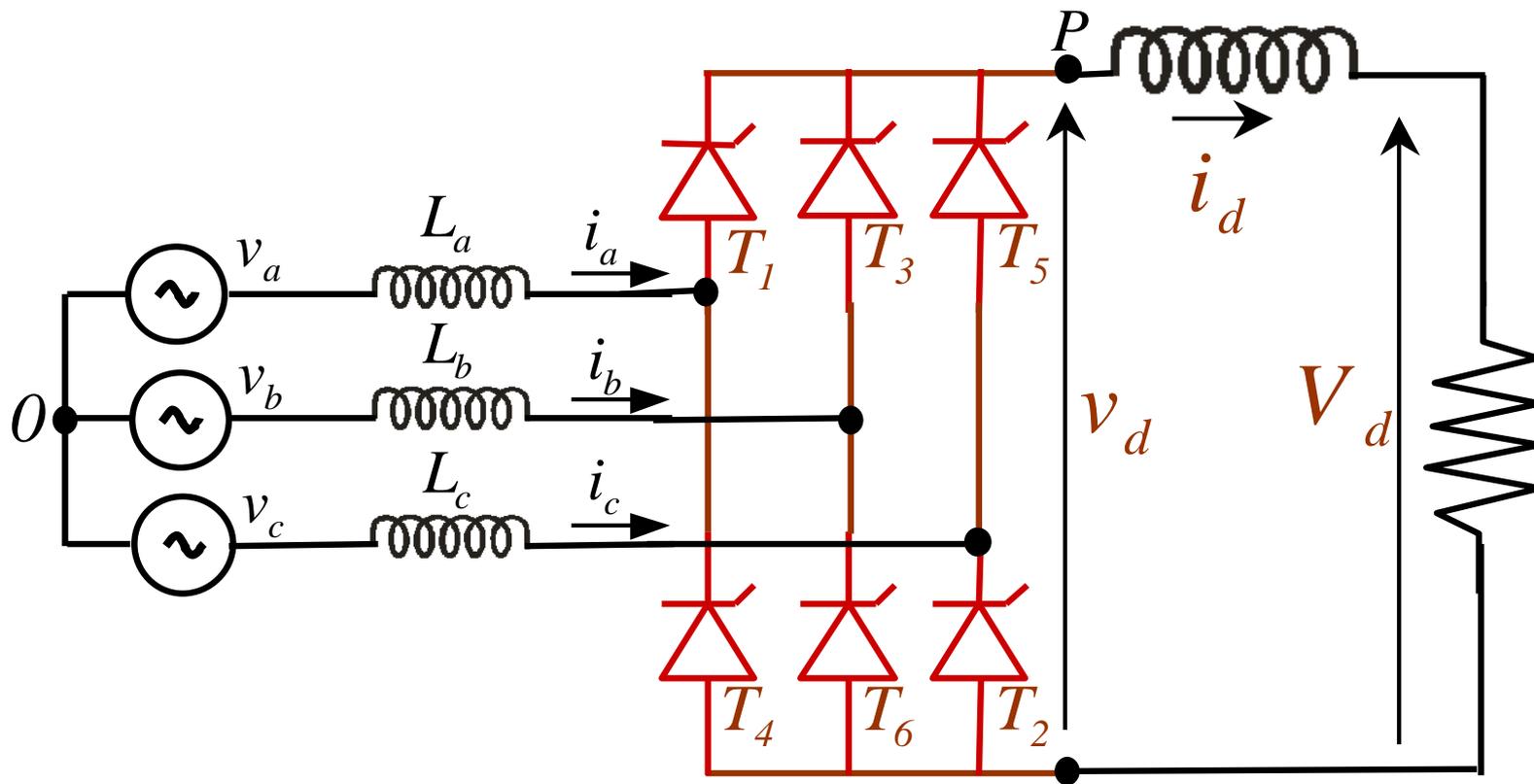
Corrente de alimentação da LFC 15 W



Principais Aplicações da Ponte Retificadora Trifásica



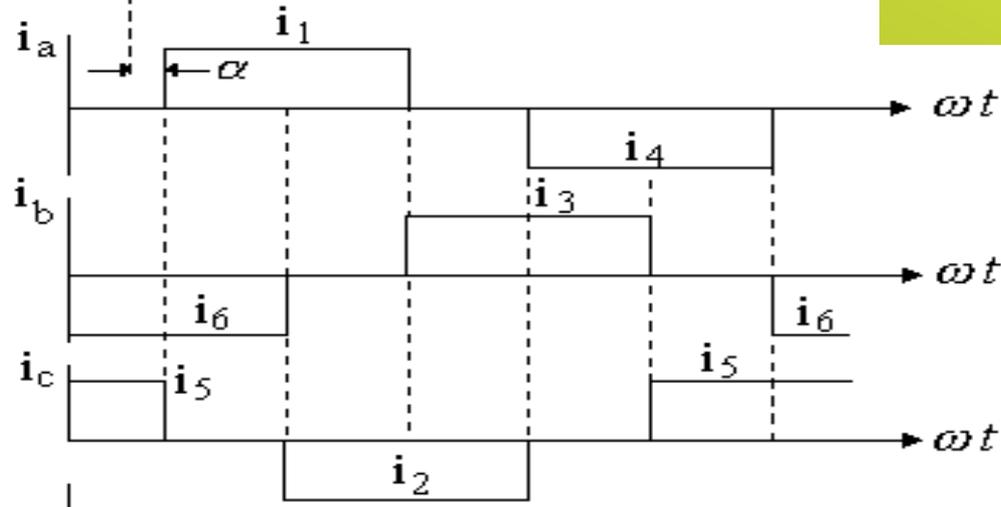
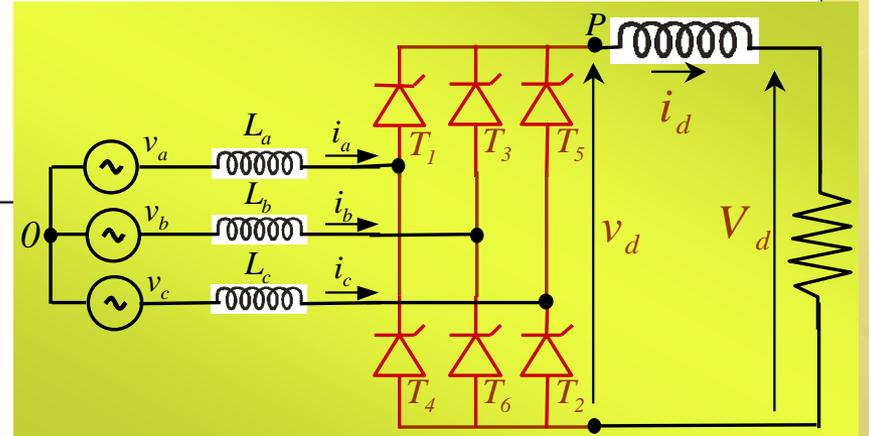
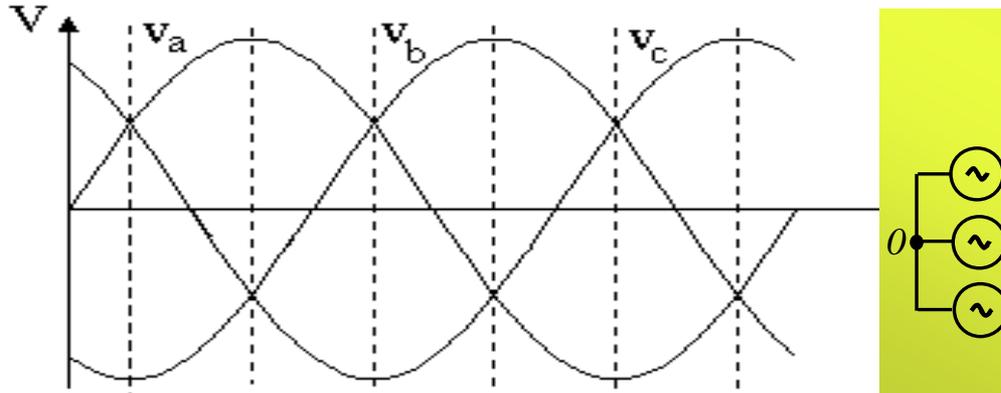
Arranjo Trifásico



Condições Ideais de Operação de um Retificador

- Alimentação trifásica equilibrada em magnitude e ângulo de fase;
- Alimentação sem distorções;
- Frequência da rede de suprimento constante;
- Sistema de disparo com pulsos igualmente espaçados em 60° ;
- Reator de alisamento com características infinitas.

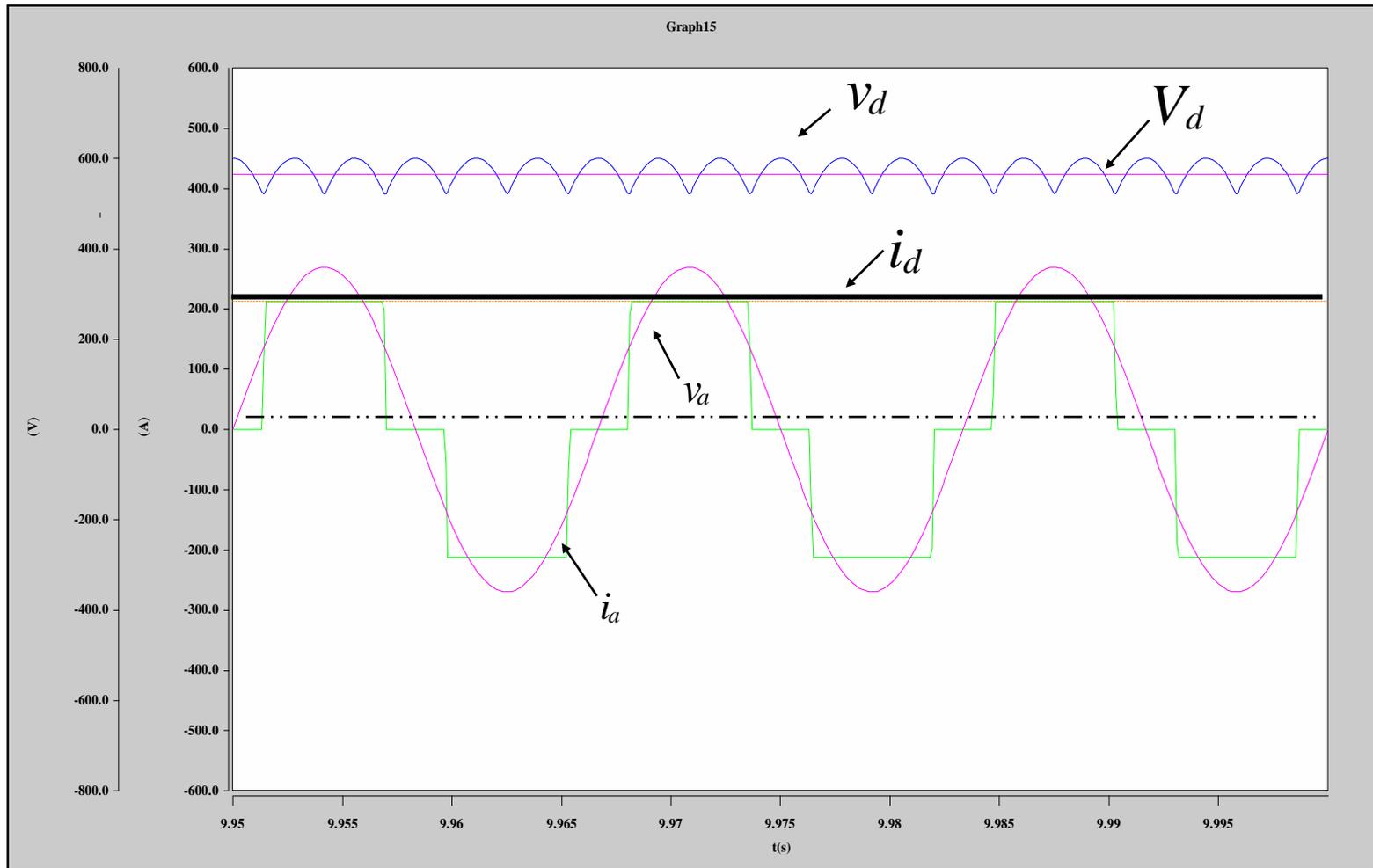
Formas de Ondas das Correntes e Chaves em Condução



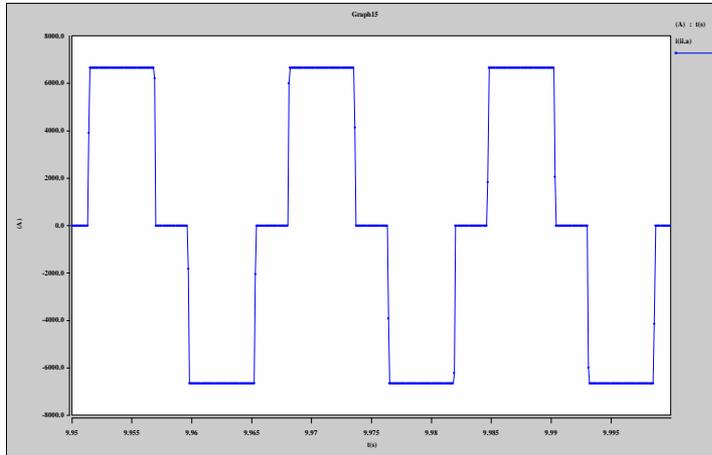
Ch6	Ch1	Ch1	Ch3	Ch4	Ch4
Ch5	Ch6	Ch2	Ch2	Ch3	Ch5

Chaves semicondutoras em condução

Formas de Ondas das Correntes e Chaves em Condução

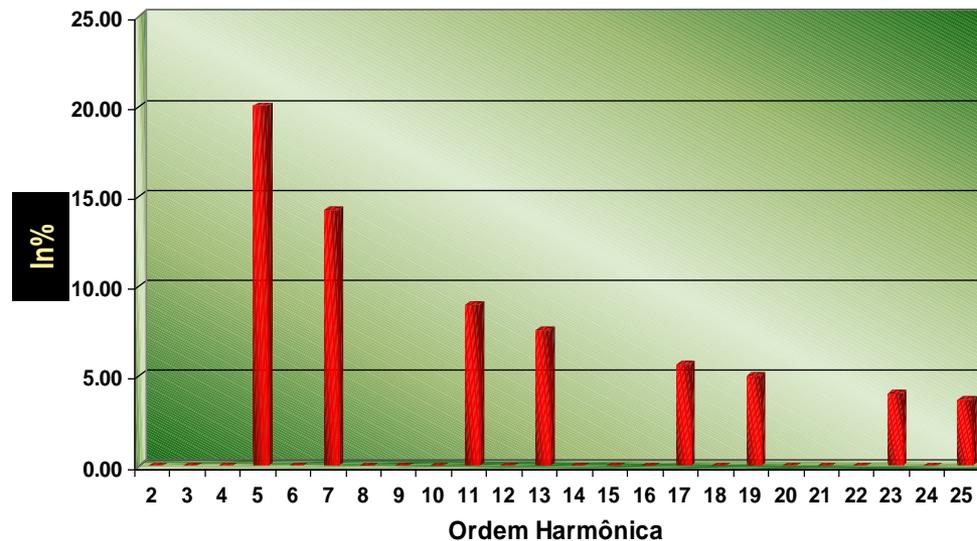


Formas de Ondas das Correntes e Chaves em Condução



Corrente de
Linha

Espectro
Harmônico



Constatações:

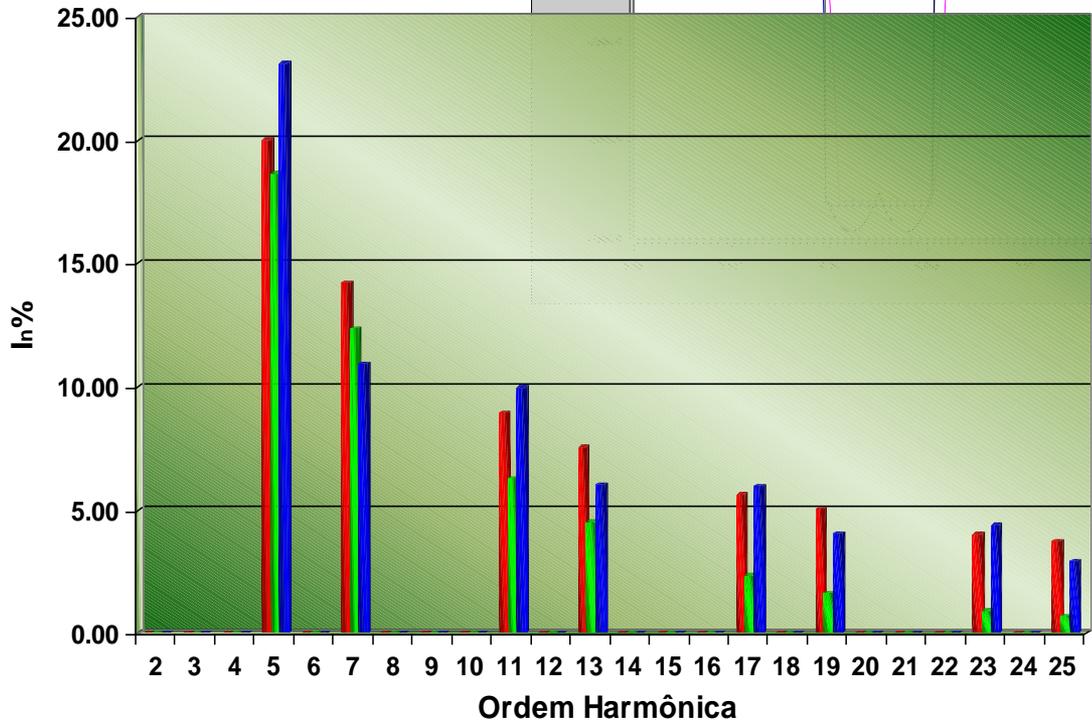
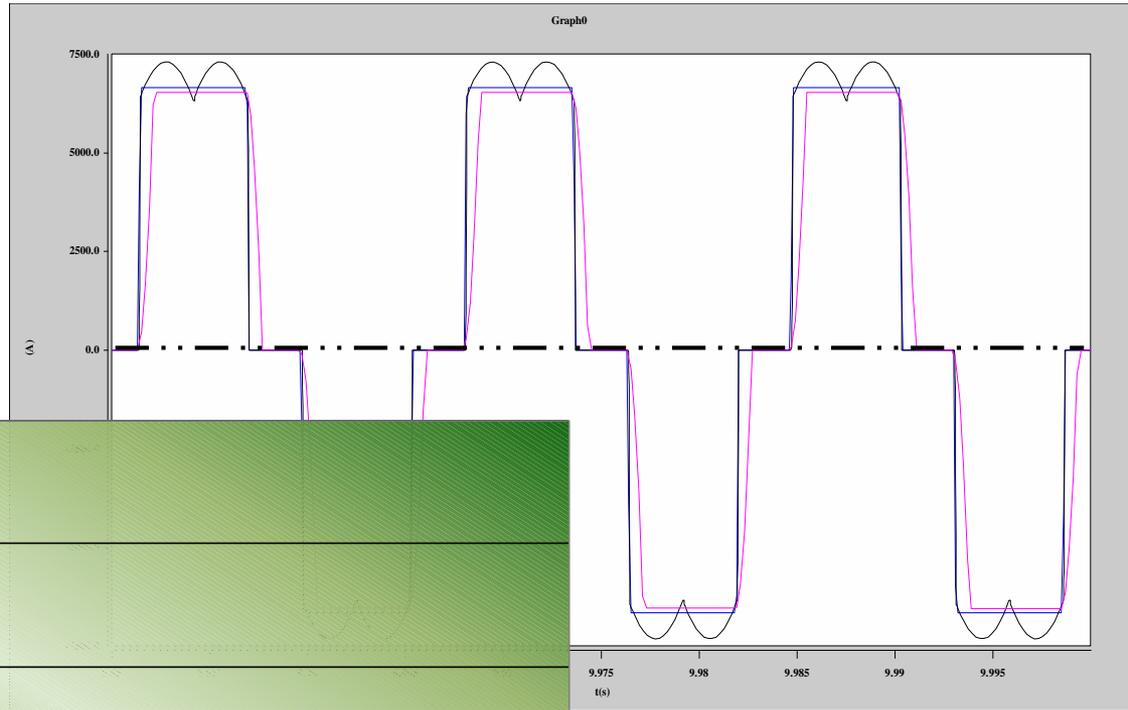
$$I_1 = \frac{\sqrt{6}I_d}{\pi}$$

$$I_n = \frac{I_1}{n}$$

$$n = 5, 7, 11, 13, \dots$$

$$n = 6k \pm 1$$

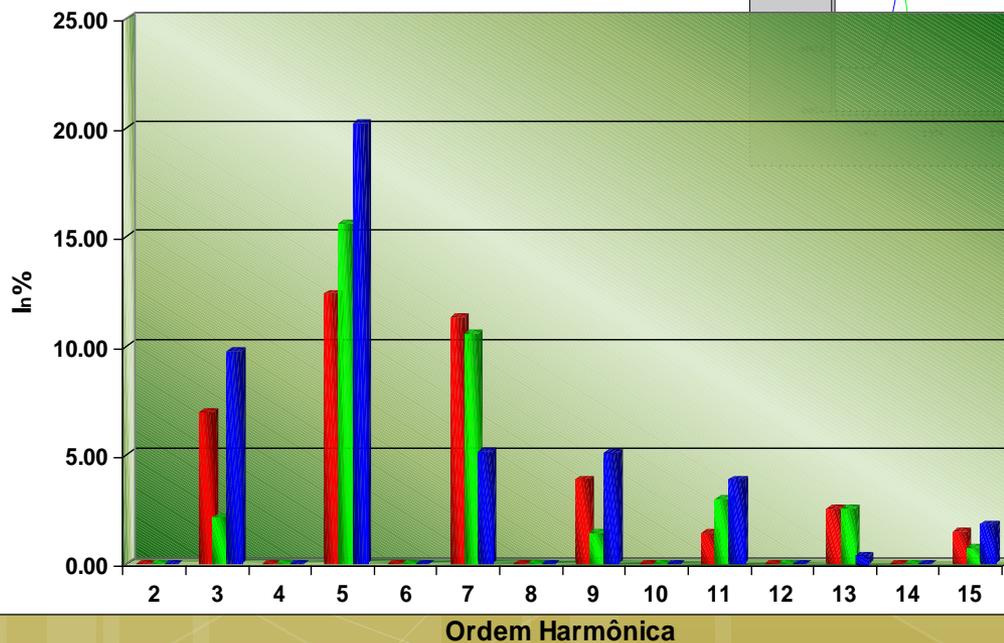
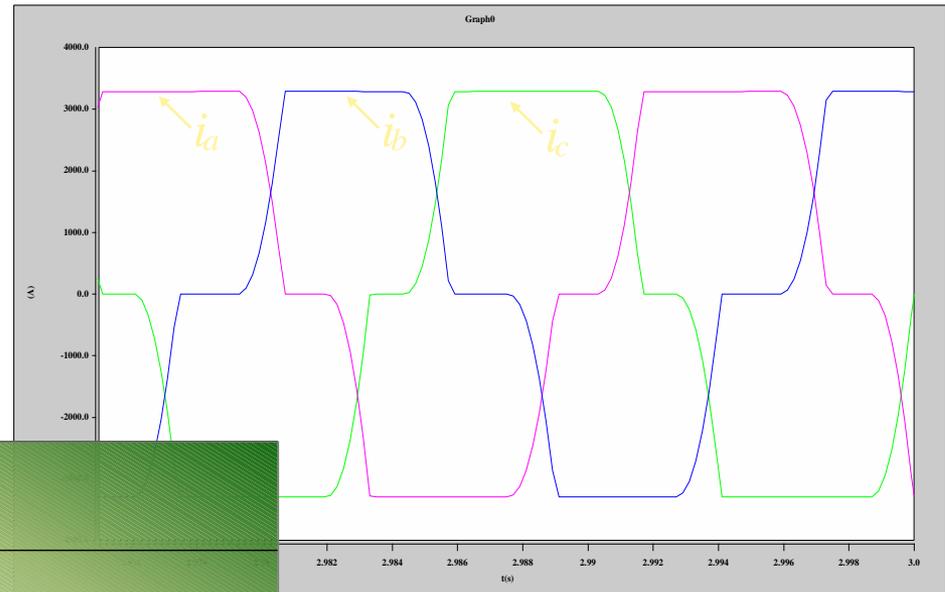
Constatações:



- $\mu = 0^\circ$
- $\mu \neq 0^\circ$
- $\mu = 0^\circ$

Condições Não-Ideais (Deseq. das tensões de suprimento em 10%) com $\alpha = 0^\circ$, $\mu \neq 0^\circ$ e $L_d \rightarrow \infty$

Correntes de Linha do Retificador



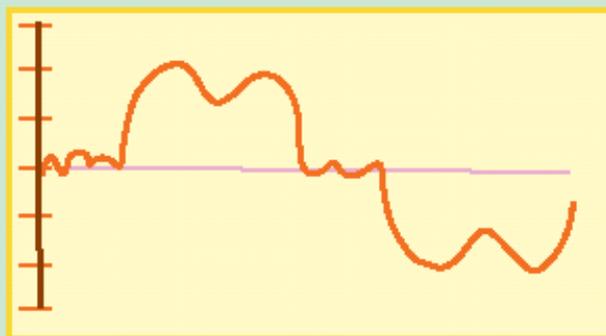
Espectro Harmônico

Ponte Retificadora Trifásica

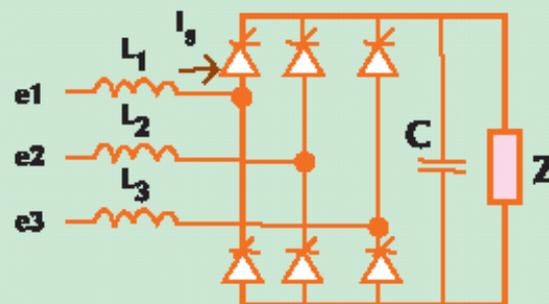
RETIFICADORES / CARREGADORES

- Cargas trifásicas
- Tipo Ponte de Graetz controlada
- Gerador de grandes correntes harmônicas de ordens 5, 7, 11 e 13

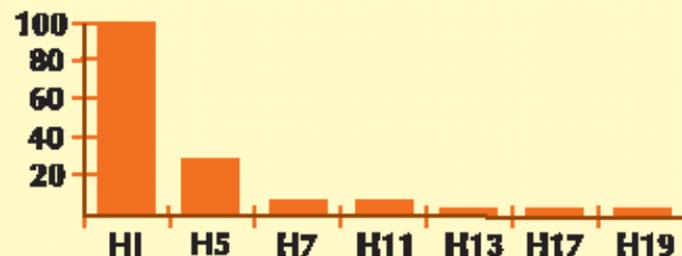
CORRENTE I_g ABSORVIDA
 $S=122\text{kVA}$ $F_c=1,5$ $\text{THDI}=30\%$



ESQUEMA TÍPICO



ESPECTRO HARMÔNICO
28% H5, 5% H7, 6% H11, ...



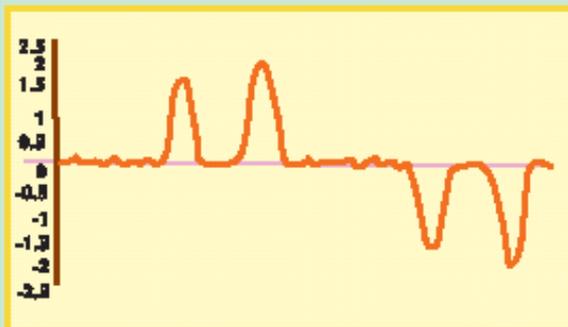
Conversor de Frequência

VARIADORES DE VELOCIDADE

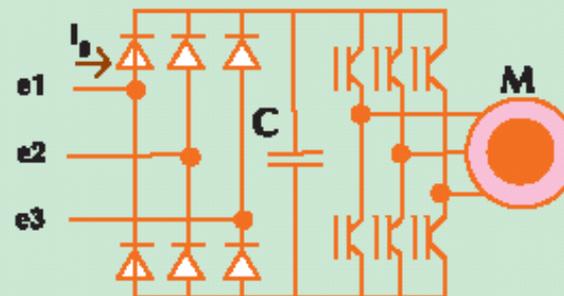
- Cargas trifásicas
- Absorvem grandes correntes harmônicas de ordens 5, 7, 11 e 13

CORRENTE I_s ABSORVIDA

$S=23\text{kVA}$ $F_c=2,8$ $\text{THDI}=124\%$

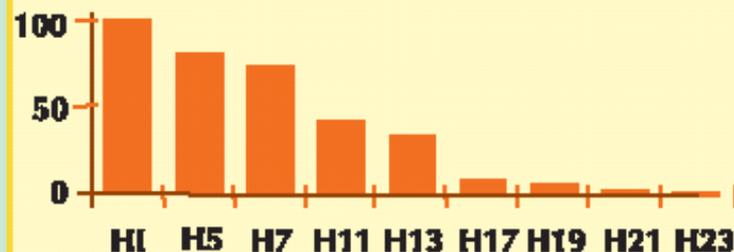


ESQUEMA TÍPICO

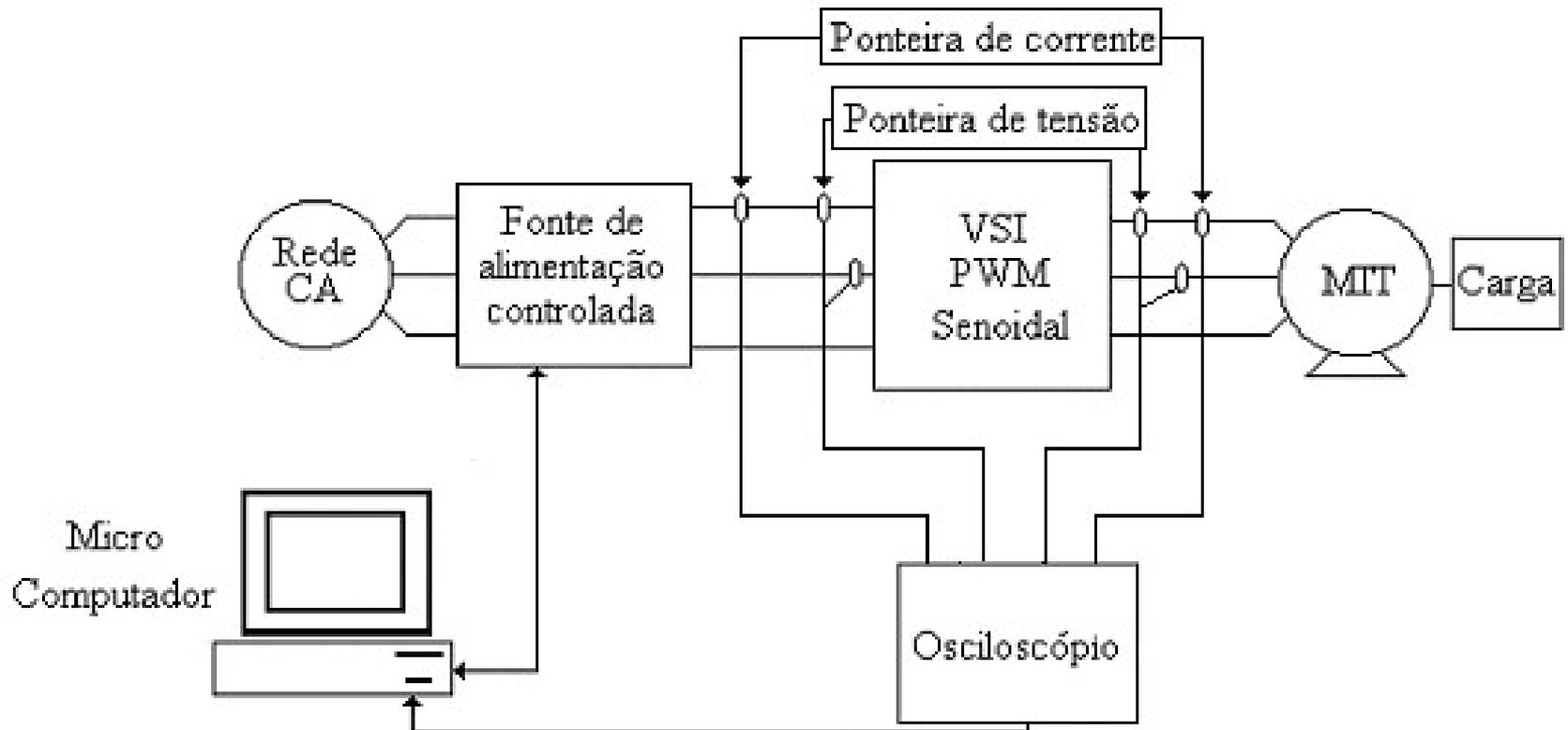


• ESPECTRO HARMÔNICO

81% H5, 74% H7, 42% H11,...



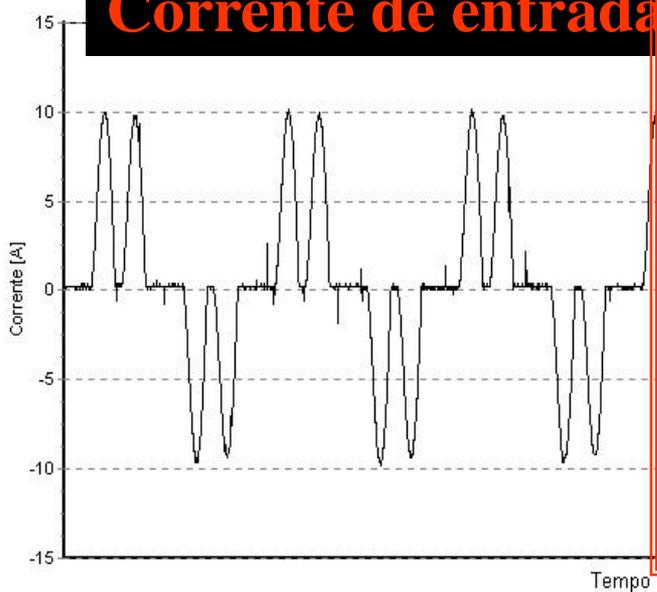
Conversor VSI - PWM Acionando MIT



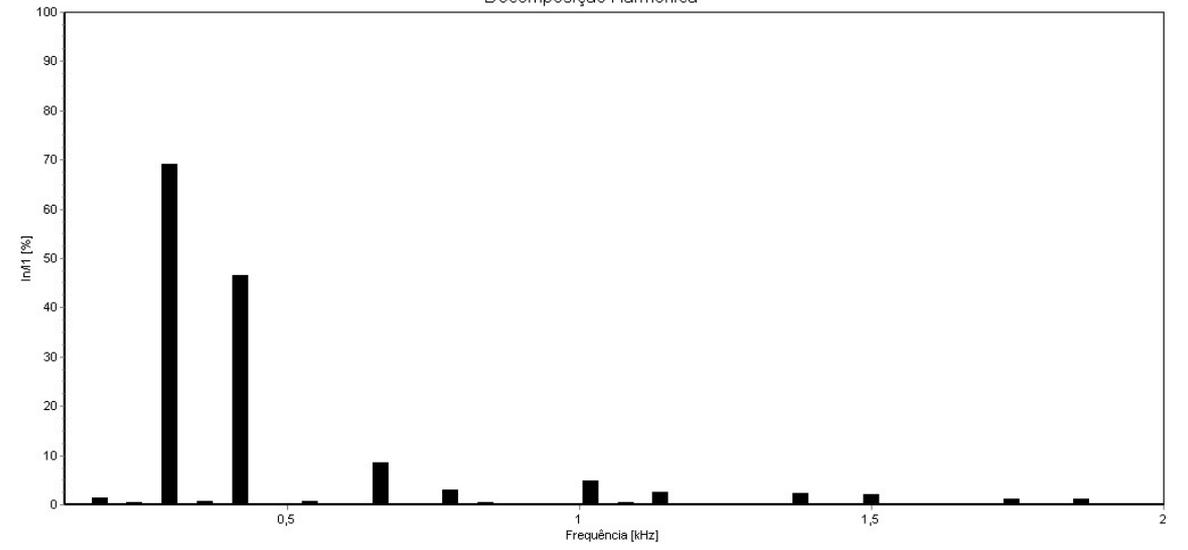
Conversor VSI - PWM Acionando MIT



Corrente de entrada

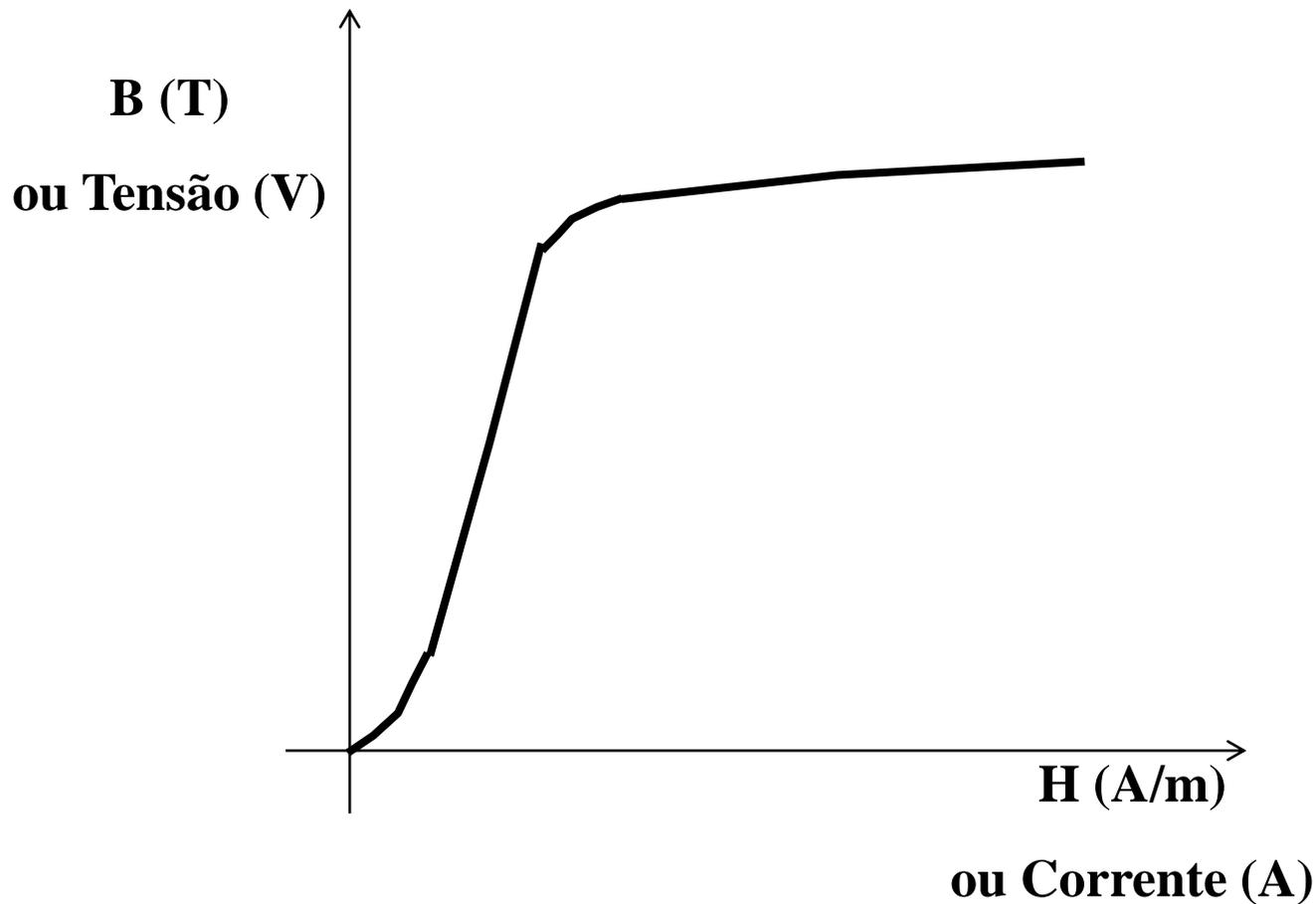


Decomposição Harmônica



Equipamentos Saturáveis

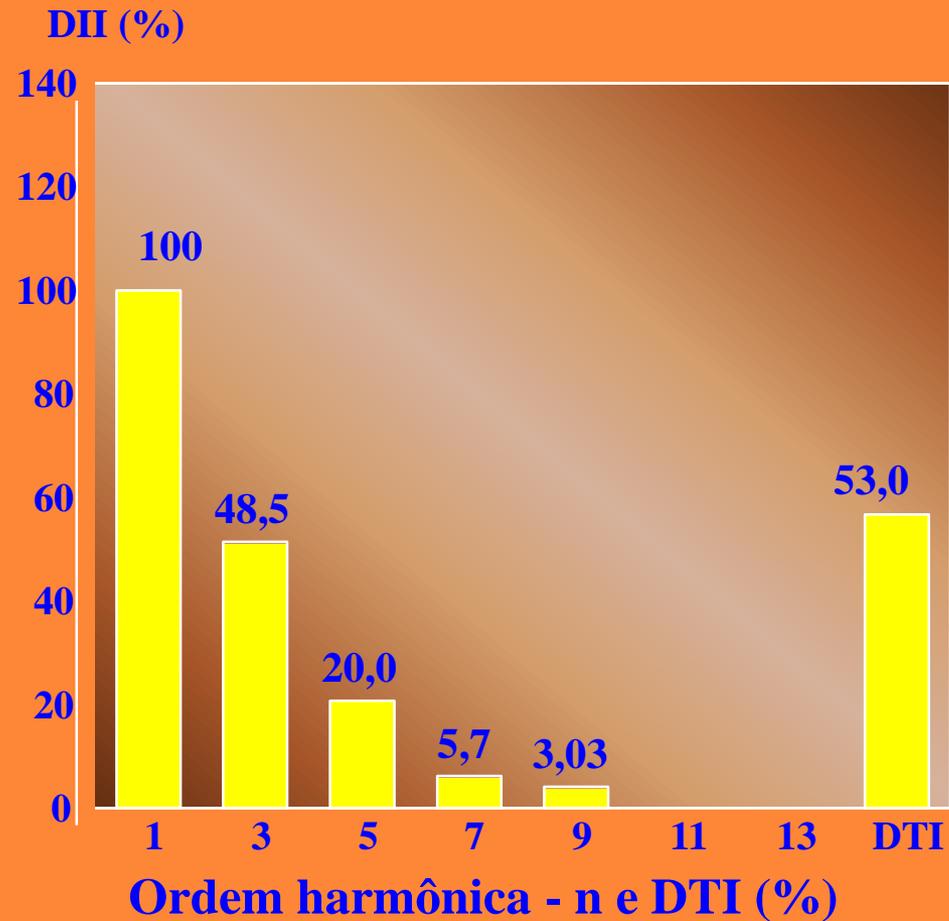
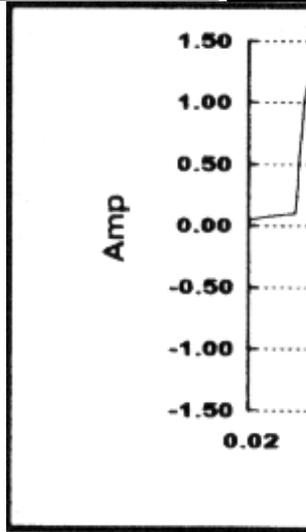
(transformadores, motores, reatores com núcleo de ferro)



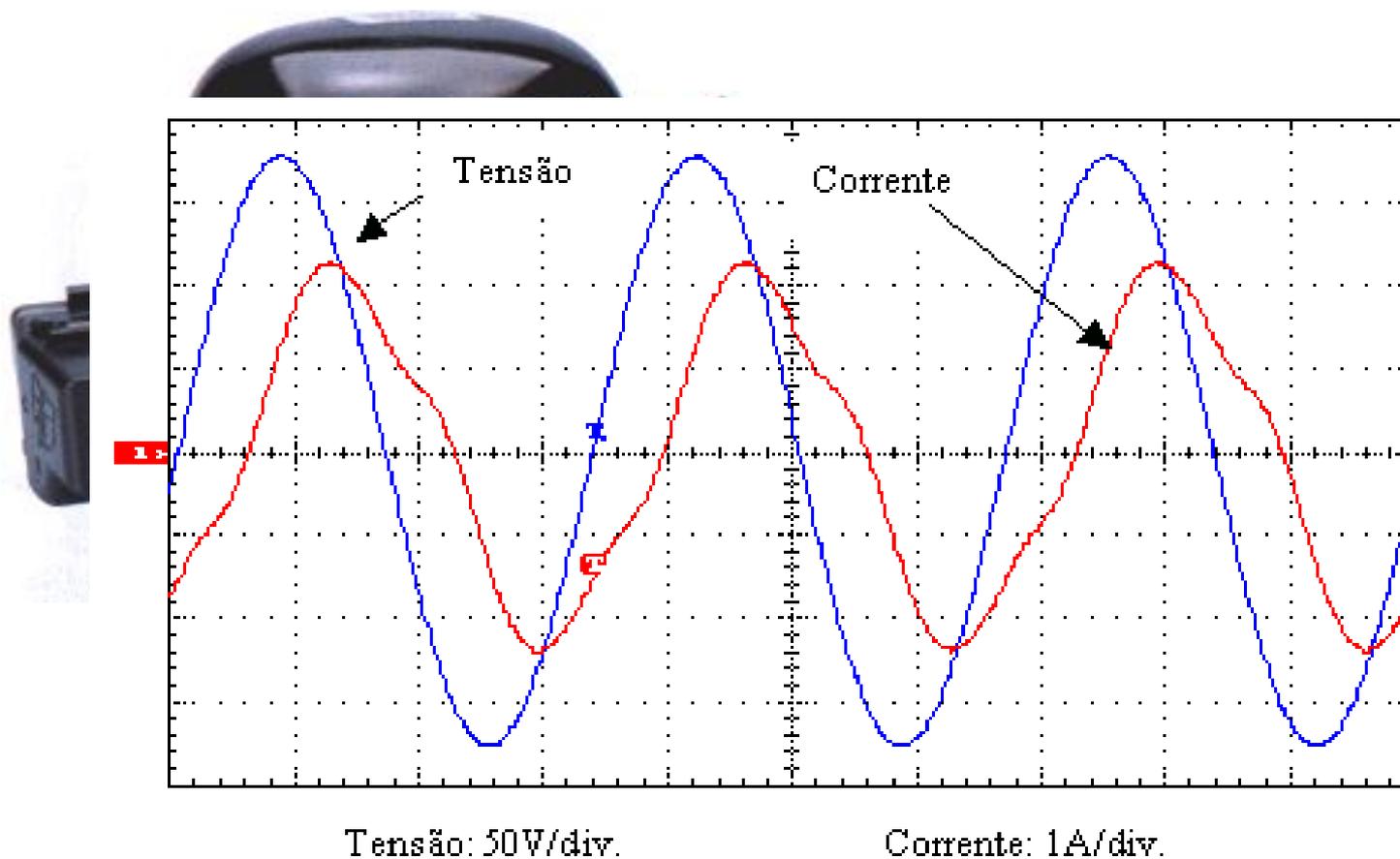
Equipamentos Saturáveis



- Corrente de magnetização.
- Sistemas de distribuição = efeitos cumulativos (centenas de transformadores). Mais notável durante no final da madrugada.



Compressor refrigeradores



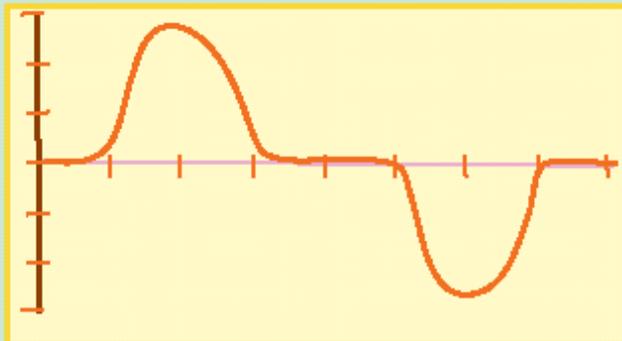
Máquinas de Solda

MÁQUINA DE SOLDAR

- Cargas monofásicas
- Corrente rica em harmônicas
- Duração entre 20 e 50 períodos

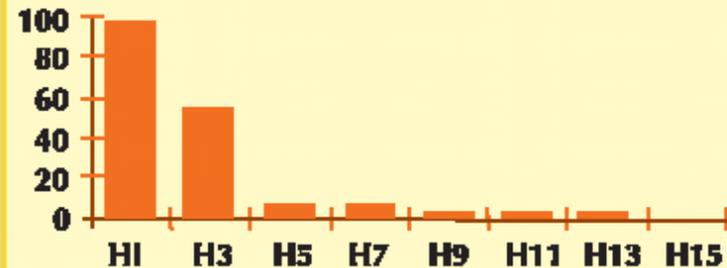
CORRENTE I_s ABSORVIDA

$I_s=341A$ $F_c=1,92$ THDI=58%



ESPECTRO HARMÔNICO

56% H3, 9% H5, 9% H7



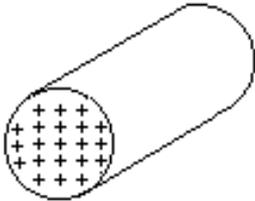
Efeitos das Distorções Harmônicas

Os efeitos podem ser divididos em três grandes grupos. Nos dois primeiros estariam enquadrados, os problemas de perda da vida útil de transformadores, máquinas rotativas, bancos de capacitores, etc. No terceiro grupo estariam englobadas questões diversas que poderiam se traduzir numa operação errônea ou na falha completa de um equipamento. Nesta categoria estariam incluídos efeitos como: torques oscilatórios nos motores CA, erros nas respostas de equipamentos, aumento ou diminuição do consumo de kWh, etc.

Cabos

- Quando um condutor é percorrido por uma corrente elétrica, este fica submetido a dois fenômenos: o efeito pelicular ou skin e o efeito de proximidade. O resultado é o aumento das perdas elétricas nos condutores.
- O efeito pelicular é o resultado da indutância própria do condutor que não é uniforme através da secção reta do condutor. A manifestação do efeito pelicular conduz a uma redução da área útil de condução elétrica do condutor e, em face disto, um aumento da resistência elétrica.

Cabos



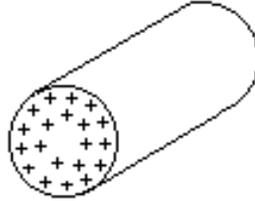
Área = A

Corrente = I (CC)

contínua

R_0

<



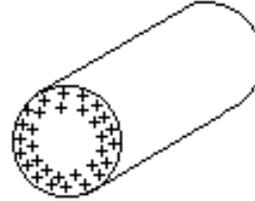
Área = A

Corrente = I (ef.)

frequência = 60Hz

R_1

<



Área = A

Corrente = I (ef.)

frequência = 660Hz

R_{11}

Frequência [Hz]	Relação entre Resistência CA/CC
60	1,01
300	1,21
420	1,35
660	1,65

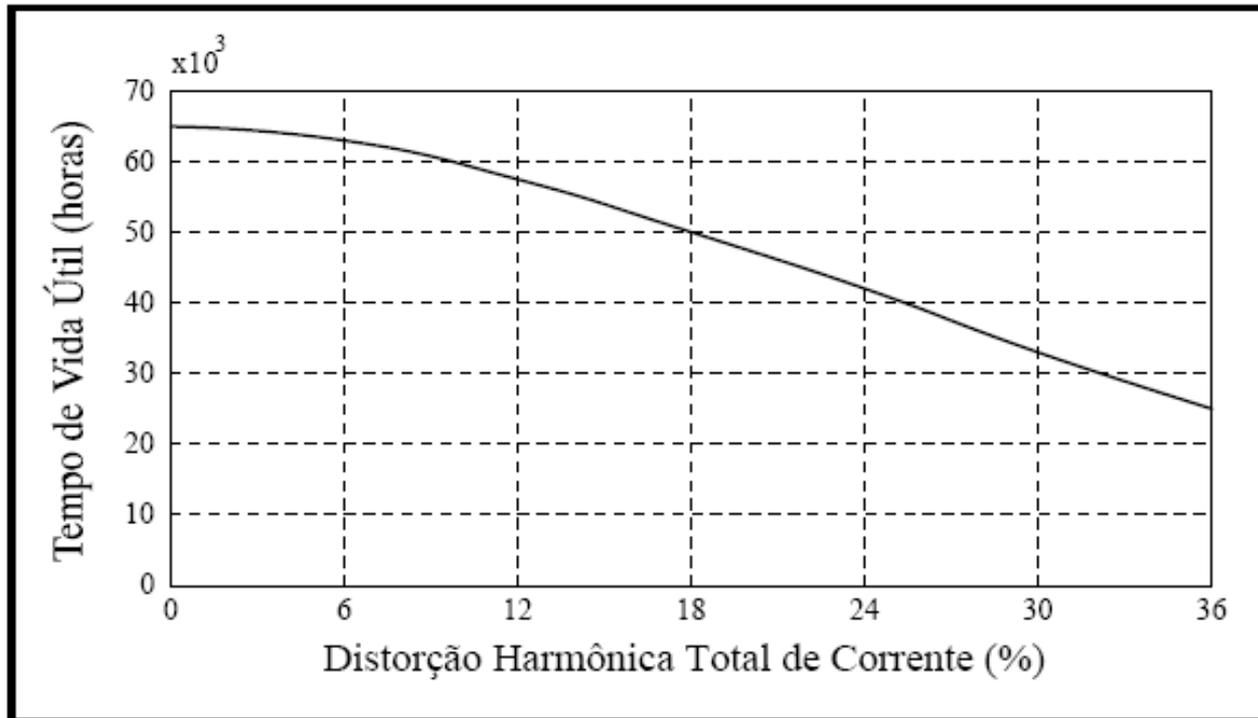
Cabos

- De uma forma geral, os seguintes efeitos são constatados quando da presença de correntes harmônicas circulando pelos cabos elétricos:
 - Variação da resistência com a frequência;
 - Acréscimo das perdas no cabo;
 - Aumento da temperatura;
 - Aumento das perdas implica que poderá ter a condução da corrente nominal do cabo;
 - Com a sobrecarga térmica devido às distorções harmônicas, teremos a diminuição da vida útil do cabo;
 - Aumento da resistência devido harmônicos provoca uma atenuação nos efeitos de ressonância;

Transformadores

- Em geral, os efeitos das harmônicas de correntes nos transformadores são:
 - Aumento de perdas joules nos enrolamentos;
 - Perdas devido a correntes parasitas nos enrolamentos. Essas perdas aumentam com o quadrado da frequência da corrente;
 - Perdas no núcleo;
 - Possíveis ressonâncias entre os enrolamentos do transformador e as capacitâncias das linhas ou bancos de capacitores;
 - A existência de componente contínua de corrente levará o transformador a se sobreaquecer e, também, a saturar o seu núcleo rapidamente;
 - Em geral, um transformador que esteja submetido a uma distorção de corrente superior a 5% deverá ser operado abaixo da sua potência nominal, operação conhecida como “derating”.

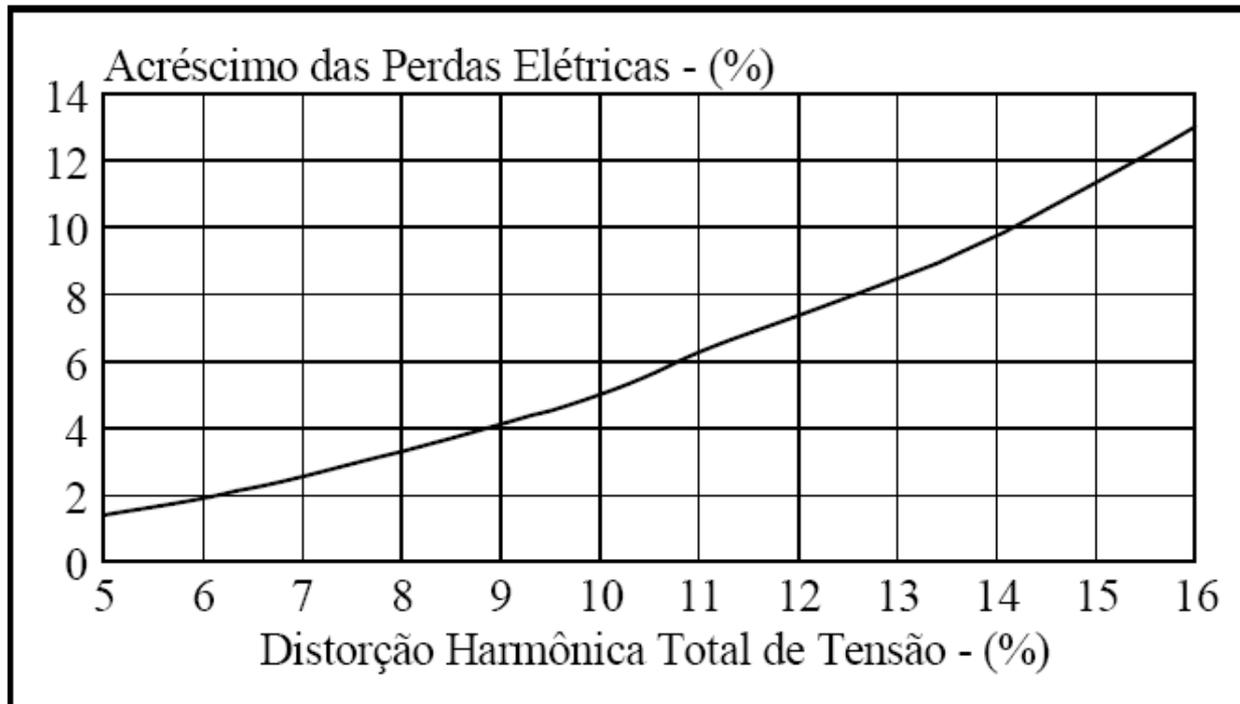
Transformadores



Motores de Indução

- Um motor de indução, operando sob alimentação distorcida, pode apresentar de forma semelhante ao transformador, um sobreaquecimento de seus enrolamentos. Este sobreaquecimento faz com que ocorra uma degradação do material isolante que pode levar a uma condição de curto-circuito por falha do isolamento;
- Em relação à análise de desempenho de um motor de indução submetido a tensões harmônicas, verifica-se uma perda de rendimento e qualidade do serviço, devido ao surgimento de torques pulsantes. Estes podem causar uma fadiga do material, ou em casos extremos, para altos valores de torques oscilantes, interrupção do processo produtivo, principalmente em instalações que requerem torques constantes como é o caso de bobinadeiras na indústria de papel-celulose e condutores elétricos.

Motores de Indução



Máquinas Síncronas

- As máquinas síncronas são muito mais sensíveis a tensões distorcidas que os motores de indução. Isso ocorre porque, com tensões distorcidas no estator, correntes harmônicas são induzidas no rotor, o qual é projetado para suportar correntes alternadas apenas na partida. Os grandes geradores síncronos são usualmente equipados com alarmes e/ou relés contra corrente de sequência negativa;
- Outro aspecto associado às componentes harmônicas está no efeito de oscilações mecânicas envolvendo a combinação turbina-gerador. Essas oscilações podem ser produzidas pela interação entre os harmônicos de corrente e o campo magnético na frequência fundamental;

Máquinas Síncronas

- Em geral, em sistemas industriais dotados de geração própria, que operam em paralelo com a concessionária, tem sido verificada uma série de anomalias no que se refere à operação das máquinas síncronas. Dentre estes efeitos destacam-se:
 - Sobreaquecimento das sapatas polares, causado pela circulação de correntes harmônicas nos enrolamentos amortecedores;
 - Torques pulsantes no eixo da máquina; e
 - Indução de tensões harmônicas no circuito de campo, que comprometem a qualidade das tensões geradas.

Correntes harmônicas de 3ª ordem

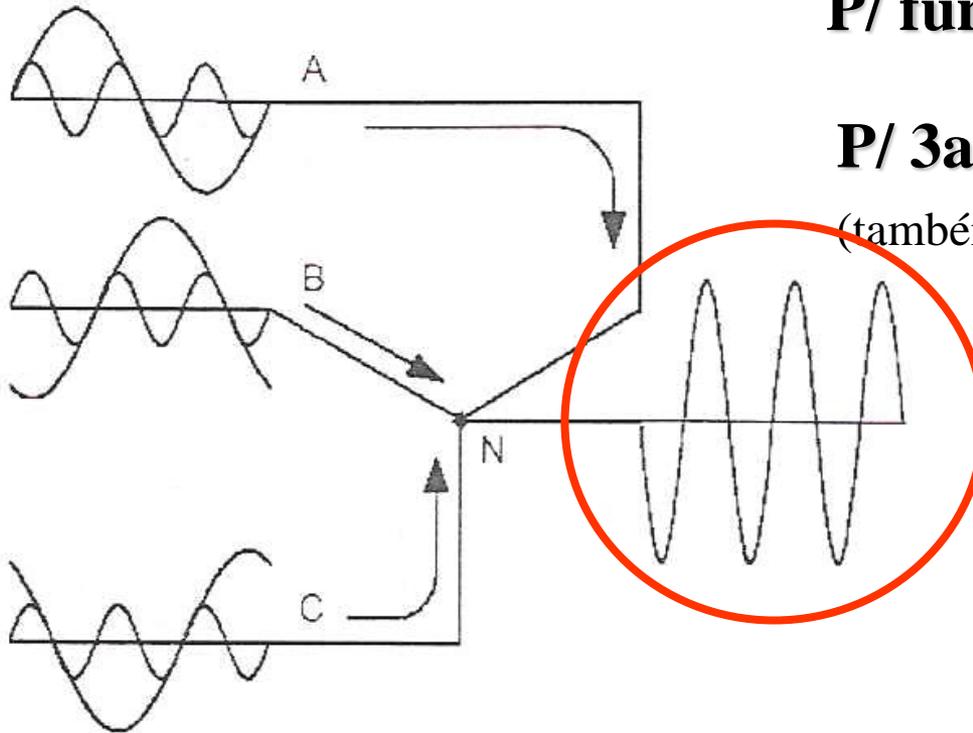
- Seja um sistema trifásico balanceado e distorcido, as correntes em cada fase, e suas respectivas componentes harmônicas de ordens ímpares:

$$i_a(\omega t) = I_1 \text{ sen } (\omega t) + I_3 \text{ sen } (3\omega t) + I_5 \text{ sen } (5\omega t) + I_7 \text{ sen } (7\omega t) + \dots$$

$$i_b(\omega t) = I_1 \text{ sen } (\omega t - 120^\circ) + I_3 \text{ sen } (3\omega t - 360^\circ) + I_5 \text{ sen } (5\omega t + 120^\circ) + I_7 \text{ sen } (7\omega t - 120^\circ) + I_9 \text{ sen } (9\omega t - 360^\circ) \dots$$

$$i_c(\omega t) = I_1 \text{ sen } (\omega t + 120^\circ) + I_3 \text{ sen } (3\omega t + 360^\circ) + I_5 \text{ sen } (5\omega t - 120^\circ) + I_7 \text{ sen } (7\omega t + 120^\circ) + I_9 \text{ sen } (9\omega t + 360^\circ) \dots$$

Correntes harmônicas de 3ª ordem



P/ fundamental: $i_{a1} + i_{b1} + i_{c1} = 0$

P/ 3a harm. : $i_{a3} + i_{b3} + i_{c3} = 3I_3$

(também p/ 9ª harm, 15ª, etc.)

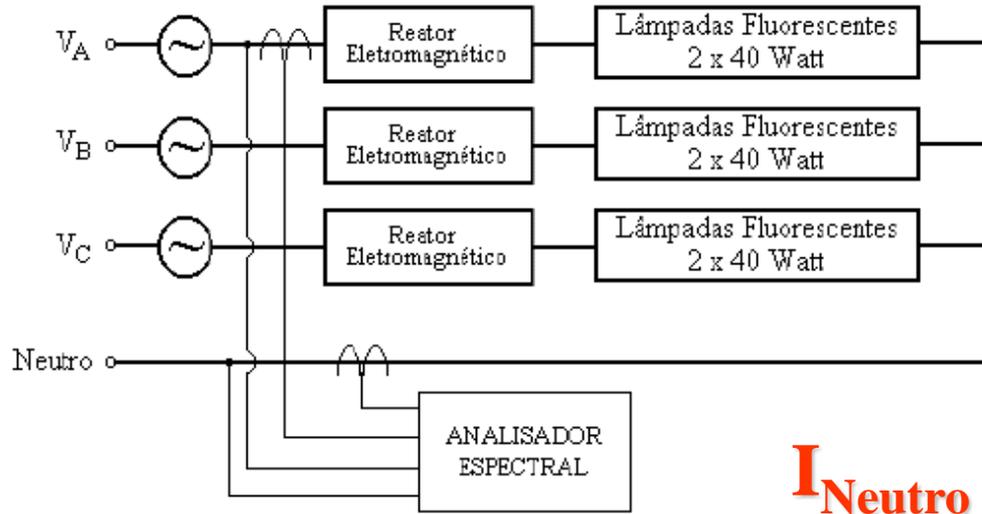
I_{Neutro}

Sistema em Y equilibrado:

Soma das correntes de linha fundamentais = zero.

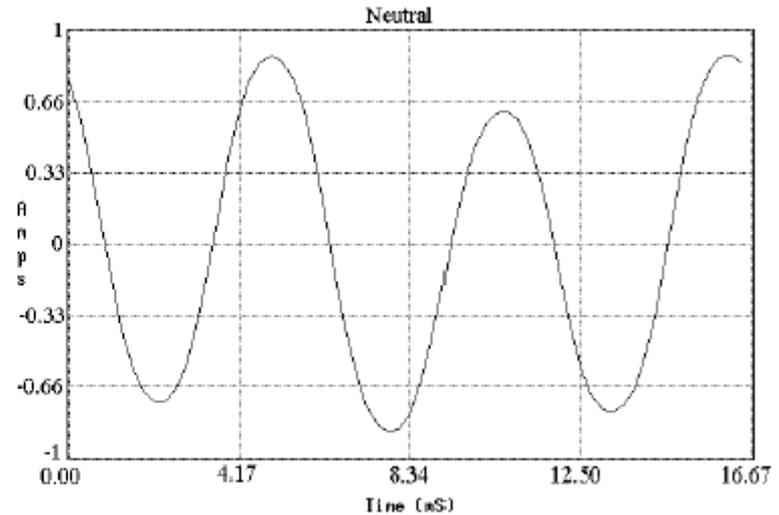
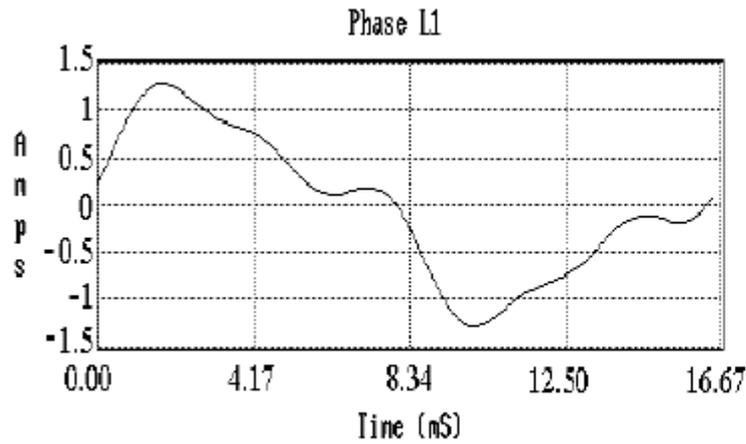
$I_{\text{Neutro}} = 3 \times$ corrente de linha de 3a harm.

Correntes harmônicas de 3ª ordem



I_{fase A}

I_{Neutro}



Correntes harmônicas de 3ª ordem

- A corrente pelo condutor neutro pode resultar nos problemas:
 - Sobrecarga no condutor, corrente neutro $>$ corrente de fase;
 - Interferência telefônica;
 - Aumento da tensão neutro-terra.
- Exemplos de soluções:
 - Aumento da bitola do condutor neutro;
 - Instalação de um condutor neutro adicional (duplicação);
 - Instalação de filtro harmônico de sequência zero junto a c/ carga ou em quadros de distribuição;
 - Instalação de transformadores isoladores.

PREVER NO PROJETO!

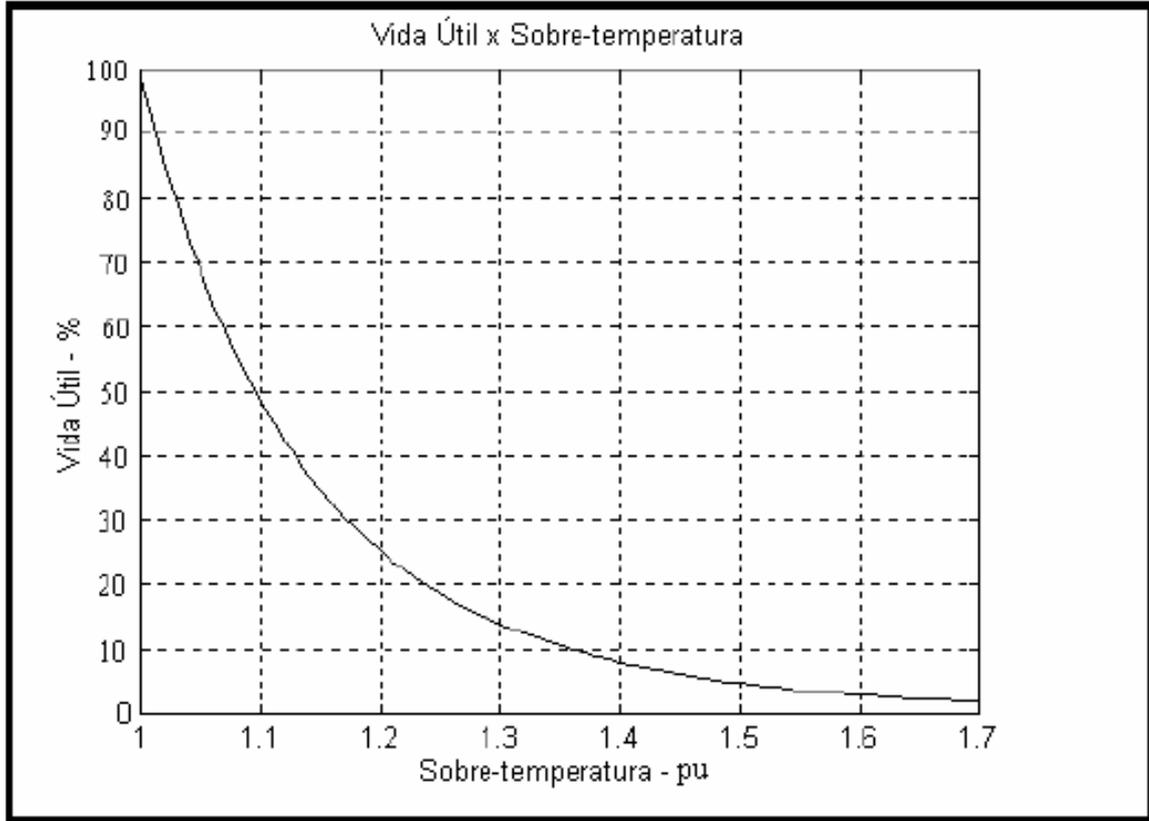
Bancos de Capacitores

- Bancos de capacitores instalados em redes elétricas distorcidas podem originar condições de ressonância, caracterizando uma sobretensão nos terminais das unidades capacitivas;
- Em decorrência desta sobretensão, tem-se uma degradação do isolamento das unidades capacitivas, e em casos extremos, uma completa danificação dos capacitores;
- Mesmo que não seja caracterizada uma condição de ressonância, um capacitor constitui-se um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas, estando, portanto, constantemente sobrecarregado, sujeito a sobreaquecimento excessivo, podendo até ocorrer uma atuação da proteção, sobretudo dos relés térmicos.

Bancos de Capacitores

- A alteração da tensão senoidal de 60 Hz, para um sinal distorcido, altera o campo elétrico entre as placas, o qual, sofrendo acréscimos em magnitude e frequência, poderá resultar até mesmo no rompimento do dielétrico. Quando isto ocorre, a corrente de fuga é substancialmente incrementada, o que implica em intensificações das descargas parciais e, conseqüentemente, a deterioração do dielétrico;
- Adicionalmente, a presença de correntes distorcidas nos bancos de capacitores provoca um sobreaquecimento nos condutores e conexões entre as unidades capacitivas.

Bancos de Capacitores



Bancos de Capacitores

- Segundo as normas, os capacitores de potência devem atender às seguintes condições de operação:
 - Suportar um valor eficaz de tensão \square 110% da sua tensão nominal;
 - Admitir um valor máximo de tensão \square 120% do valor de pico da tensão nominal;
 - Admitir uma operação contínua com uma corrente de fase cujo valor eficaz seja de no máximo 180% do valor nominal;
 - Valor máximo da potência reativa de operação menor que 135% dos valores nominais.
- Estes aspectos visam preservar os capacitores contra:
 - Fadiga (“stress”) do isolamento e redução da vida útil;
 - Sobreaquecimento;
 - Sobrecargas.

Bancos de Capacitores

- Resumidamente as consequências dos harmônicos nos capacitores são:
- **Tensão:** Ao dimensionar a espessura do dielétrico do capacitor, procura-se impor um isolamento entre as placas de modo a garantir uma baixa corrente de fuga. Entretanto, ao se elevar o nível de tensão no dielétrico, eleva-se o nível desta corrente de fuga, estabelecendo um caminho propício para a sua circulação. Tal caminho, uma vez estabelecido, tenderá a manter sua característica de baixo isolamento. Para eliminar tal efeito, após a sua ocorrência, é necessário que o valor de tensão no dielétrico seja abaixado até que a corrente de fuga assuma novamente seu valor nominal. Na existência de harmônicos, a alteração da forma de onda de tensão pode causar um aumento no valor de pico da mesma. Tal aumento pode levar o nível de descargas parciais a valores destrutivos.

Bancos de Capacitores

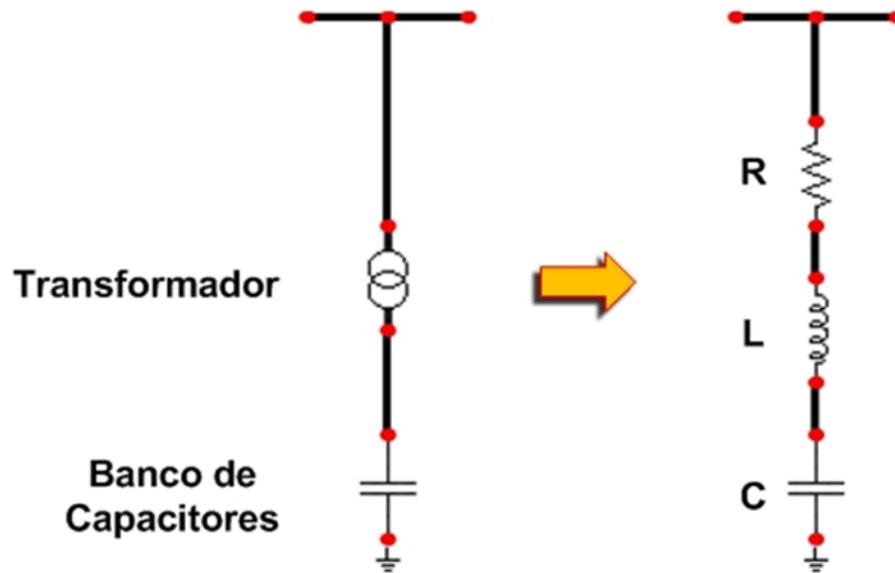
- **Corrente:** Com o acréscimo de corrente devido aos harmônicos, haverá sobreaquecimento nos condutores e placas. Tal aquecimento tenderá a se localizar nos pontos de conexão “terminais-placa”, o que fisicamente representa a parte lateral (bordas) do elemento capacitivo. Este aquecimento tenderá a criar uma instabilidade molecular na região do dielétrico a ela adjacente, facilitando a proliferação de efeito de descarga parcial, e enfraquecendo o poder do isolamento da mesma;

Ressonância Série e Paralela

- Fisicamente uma ressonância ocorre à uma frequência particular, quando uma reatância indutiva se equipara numericamente a uma reatância capacitiva adjacente. Se as duas reatâncias vistas do ponto de injeção da fonte harmônica estão em série, então uma baixa impedância será detectada. Se, por outro lado, as duas reatâncias se encontram em paralelo, a denominada impedância equivalente será bastante alta. Se a conexão do circuito é série ou paralela, isto dependerá do ponto de vista do local de injeção do sinal harmônico, assim como, da configuração do sistema e da carga.

Ressonância Série

- A ressonância série é empregada deliberadamente para o projeto de filtros, de forma que um caminho paralelo de baixa impedância seja oferecido para o escoamento das correntes harmônicas.



$$Z(\omega) = R + j \left[\omega L - \frac{1}{\omega C} \right]$$

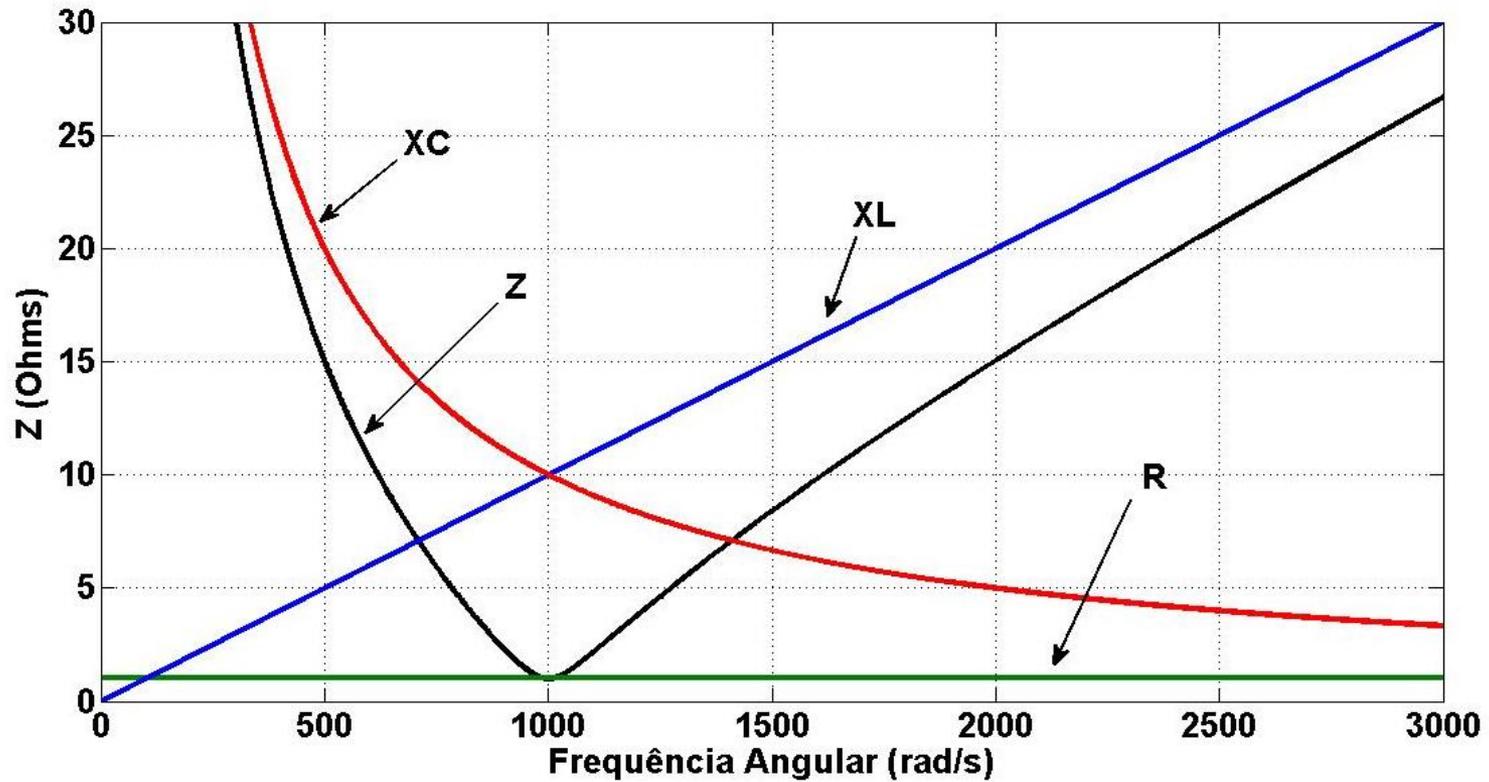
$$\left[\omega L - \frac{1}{\omega C} \right] = 0$$

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 2\pi f_o$$

Ressonância Série

- Dentro do acima exposto, as seguintes observações podem ser obtidas:
 - Na ressonância Z passa pelo seu menor valor, que é igual a R ;
 - O circuito, na ressonância, se comporta como puramente resistivo;
 - À esquerda de f_0 a impedância Z , tem característica capacitiva, e a direita, indutiva;
 - Tendo em vista os resultados obtidos, o circuito tem a tendência de “atrair” as correntes cujas frequências sejam próximas a f_0 .

Ressonância Série



Ressonância Paralela

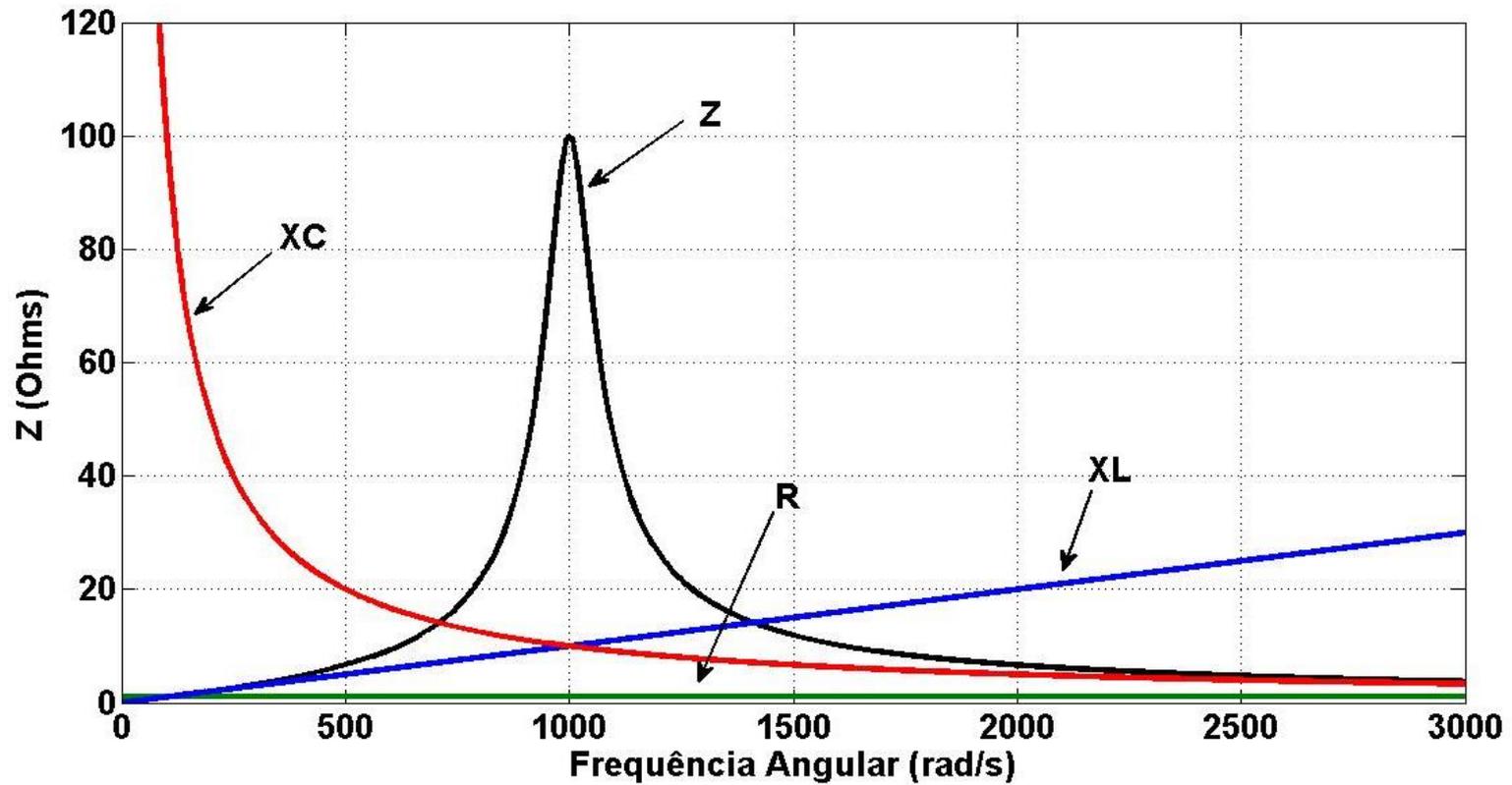
- Quanto à ressonância paralela, a indutância e a capacitância vistas pela fonte geradora de harmônicos estão conectadas em paralelo. Embora não representado, o efeito da resistência própria do indutor é de reduzir a impedância do circuito paralelo de um valor infinito para um valor finito. Da mesma forma, o efeito de uma resistência em paralelo com a combinação LC é de proporcionar um caminho adicional para a circulação da corrente harmônica gerada pela fonte, e desta forma, causar uma redução da tensão harmônica que aparece junto aos terminais da carga.

$$Y = G + j(B_C - B_L) \quad \longrightarrow \quad B_C = B_L$$

Ressonância Paralela

- As seguintes observações podem ser obtidas:
 - Na ressonância, a admitância do circuito é mínima, ou seja, a impedância é máxima;
 - Disto resulta que, um circuito paralelo ressonante, dificulta o caminho da corrente que possui uma frequência igual a da ressonância;
 - Na ressonância, a admitância e a impedância apresentam característica resistiva;
 - Para frequência abaixo da ressonância o circuito tem predominância indutiva e a para frequências acima, capacitivas.

Ressonância Paralela



Mitigação de Harmônicos

- Filtros passivos: constituídos basicamente de componentes R, L e C através dos quais se obtêm os filtros sintonizados e amortecidos. Estes filtros são instalados geralmente em paralelo com o sistema supridor, proporcionando um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas. Podem ser utilizados para a melhoria do fator de potência, fornecendo o reativo necessário ao sistema. Entretanto, existem alguns problemas relacionados à utilização destes filtros, dentre os quais se destacam: o alto custo, a complexidade de sintonia e a possibilidade de ressonância paralela com a impedância do sistema elétrico;

Mitigação de Harmônicos

- Filtros ativos: um circuito ativo gera e injeta correntes harmônicas com defasagem oposta àquelas produzidas pela carga não linear. Assim, há um cancelamento das ordens harmônicas que se deseja eliminar. Embora bastante eficiente este dispositivo apresente custos elevados (superiores aos filtros passivos), o que tem limitado a sua utilização nos sistemas elétricos;
- Compensadores eletromagnéticos; e
- Moduladores CC.

Procedimentos Básicos de Estudos de Harmônicos

- Determinar os objetivos do estudo. Isto é muito importante para se ter um foco na investigação. Por exemplo, o objetivo pode ser identificar a causa e a solução de um determinado problema. Outro objetivo poderia ser determinar se uma expansão na planta elétrica com a instalação de novos equipamentos como inversores de frequência e bancos de capacitores trariam problemas relacionados a harmônicos;
- Se o sistema for complexo, deveria ser feita uma simulação computacional prévia baseada nos dados de equipamentos e cargas elétricas. Realizar medições em sistemas elétricos complexos pode demandar muito tempo de trabalho, equipamentos e condições de operação da planta para se obter resultados confiáveis. Para estes sistemas, as simulações podem direcionar a realização das medições para os pontos do sistema onde realmente podem existir problemas;

Procedimentos Básicos de Estudos de Harmônicos

- Realizar medições das condições harmônicas existentes, caracterizando as fontes de correntes harmônicas e as distorções de tensão nos barramentos do sistema;
- Calibrar os modelos computacionais baseado nas medições;
- Investigar as novas condições do sistema ou os problemas existentes;
- Desenvolver soluções (filtros, etc.) e investigar as possíveis interações adversas dessas soluções com o sistema. Também devem ser conferido o desempenho dessas soluções frente a variáveis do sistema;
- Após a instalação da solução proposta, realizar novas medições a fim de se verificar a correta operação do sistema.