



Aula 05 - Qualidade da energia elétrica

Prof. Dr. Mário Oleskovicz

USP/EESC/SEL

Qualidade da Energia Elétrica

- **Agenda**

- **Distorção da forma de onda**

 - Tipos de distorções da forma de onda

 - Distorção harmônica

 - Caracterização da distorção harmônica

 - Efeitos da distorção harmônica

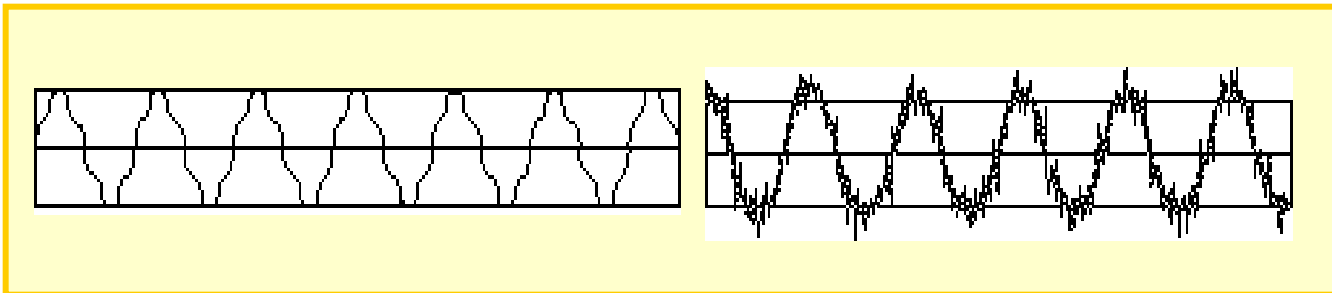


Qualidade da Energia Elétrica

Tipos de distorções da forma de onda

✓ Há cinco tipos principais de distorções da forma de onda:

- nível cc;
- inter-harmônica;
- *notching*;
- ruído; e
- harmônica.



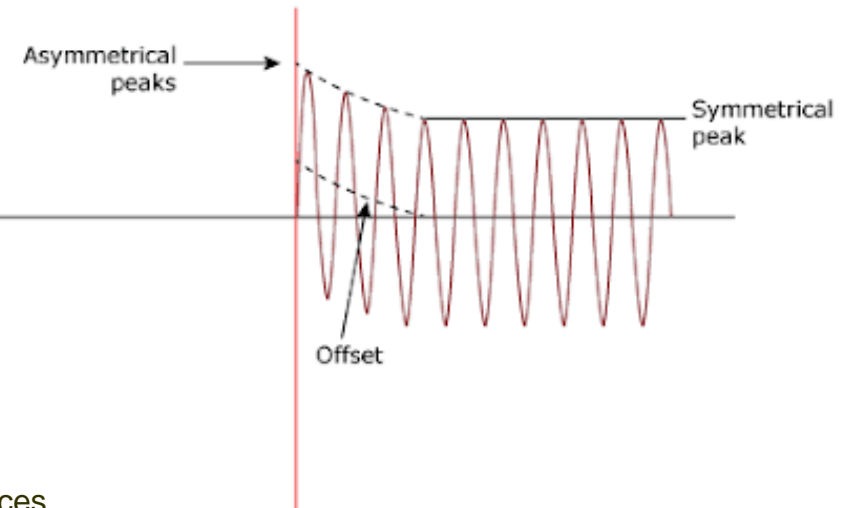
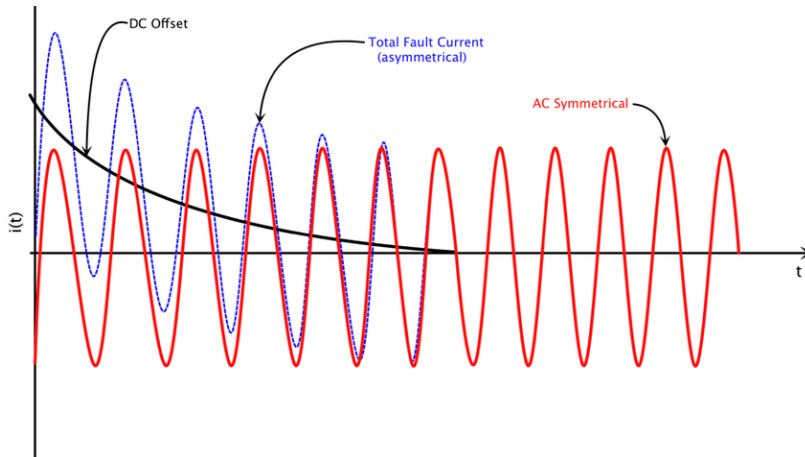
Qualidade da Energia Elétrica

Tipos de distorções da forma de onda

✓ Nível CC

A presença de um componente DC na tensão ou corrente em um sistema de energia AC é determinado **DC offset**. Este pode ocorrer devido, por exemplo, às situações de curtos-circuitos assimétricos.

FONTE: <https://relaytraining.com/what-is-dc-offset-ask-chris/>



FONTE: J. Keller and B. Kroposki. Understanding Fault Characteristics of Inverter-Based Distributed Energy Resources. Technical Report NREL/TP-550-46698 January 2010.

Qualidade da Energia Elétrica

Tipos de distorções da forma de onda

- ✓ O **DC offset** 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.

Qualidade da Energia Elétrica

Tipos de distorções da forma de onda

✓ **Inter-harmônico**

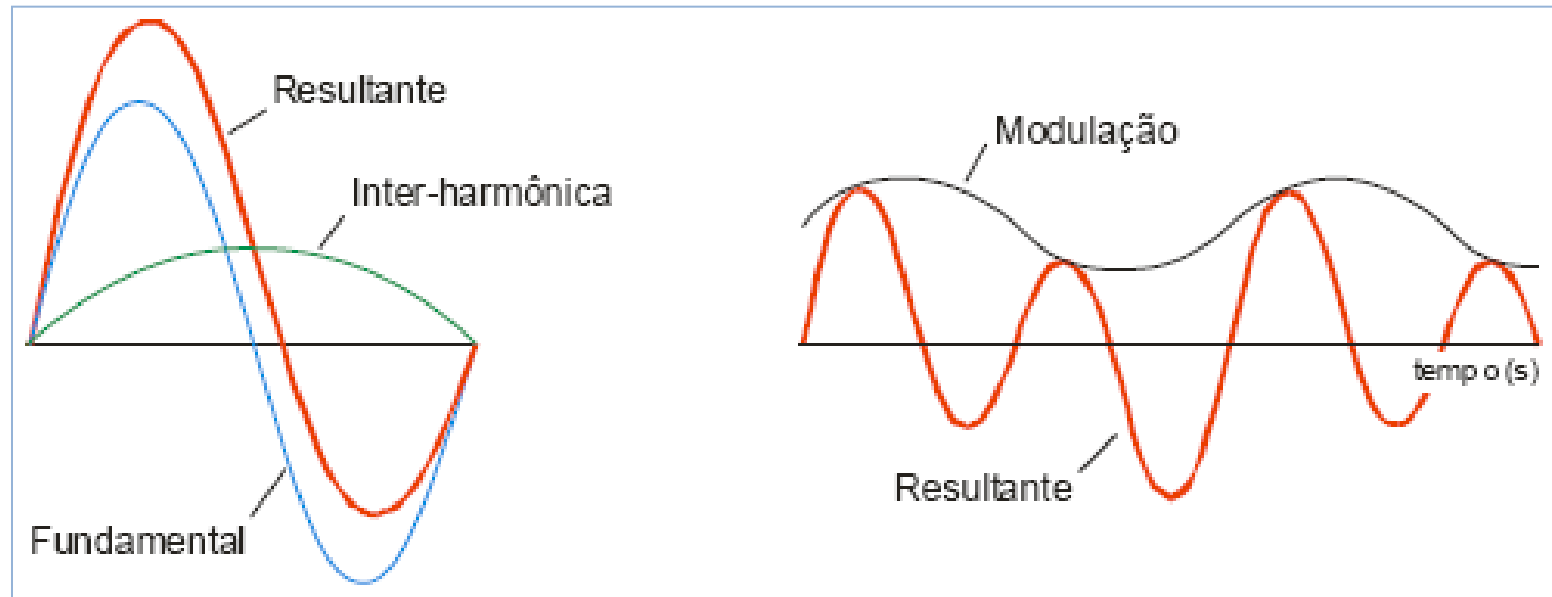
São formas de ondas de tensões e correntes que apresentam componentes de frequência que **não são múltiplos inteiros da frequência** com a qual o sistema é suprido e designado a operar.

Se $f_i/f_1 = m$, com $m \neq 0, 1, 2, 3, \dots$ então f_i é inter-harmônico.

Se $0 < f_i/f_1 < 1$, então f_i é sub-harmônico (Exemplo: flutuação de tensão).

Qualidade da Energia Elétrica

Tipos de distorções da forma de onda



Qualidade da Energia Elétrica

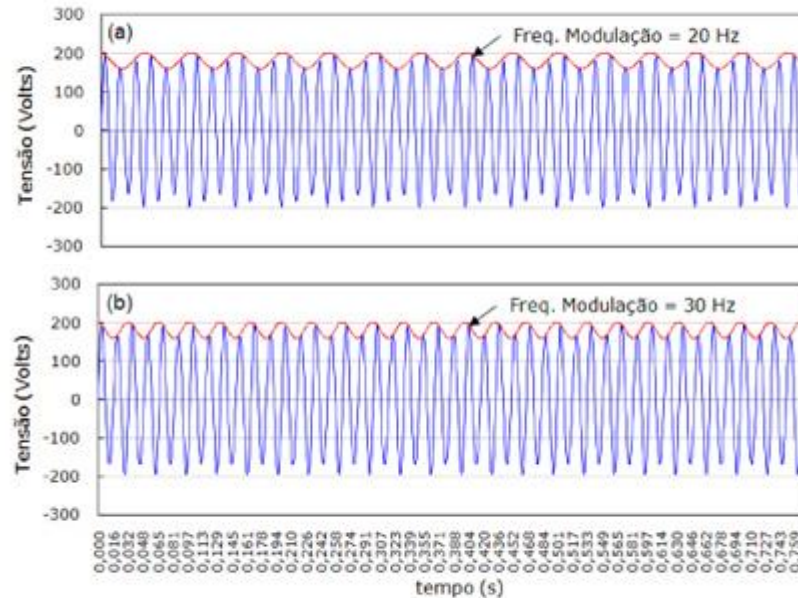


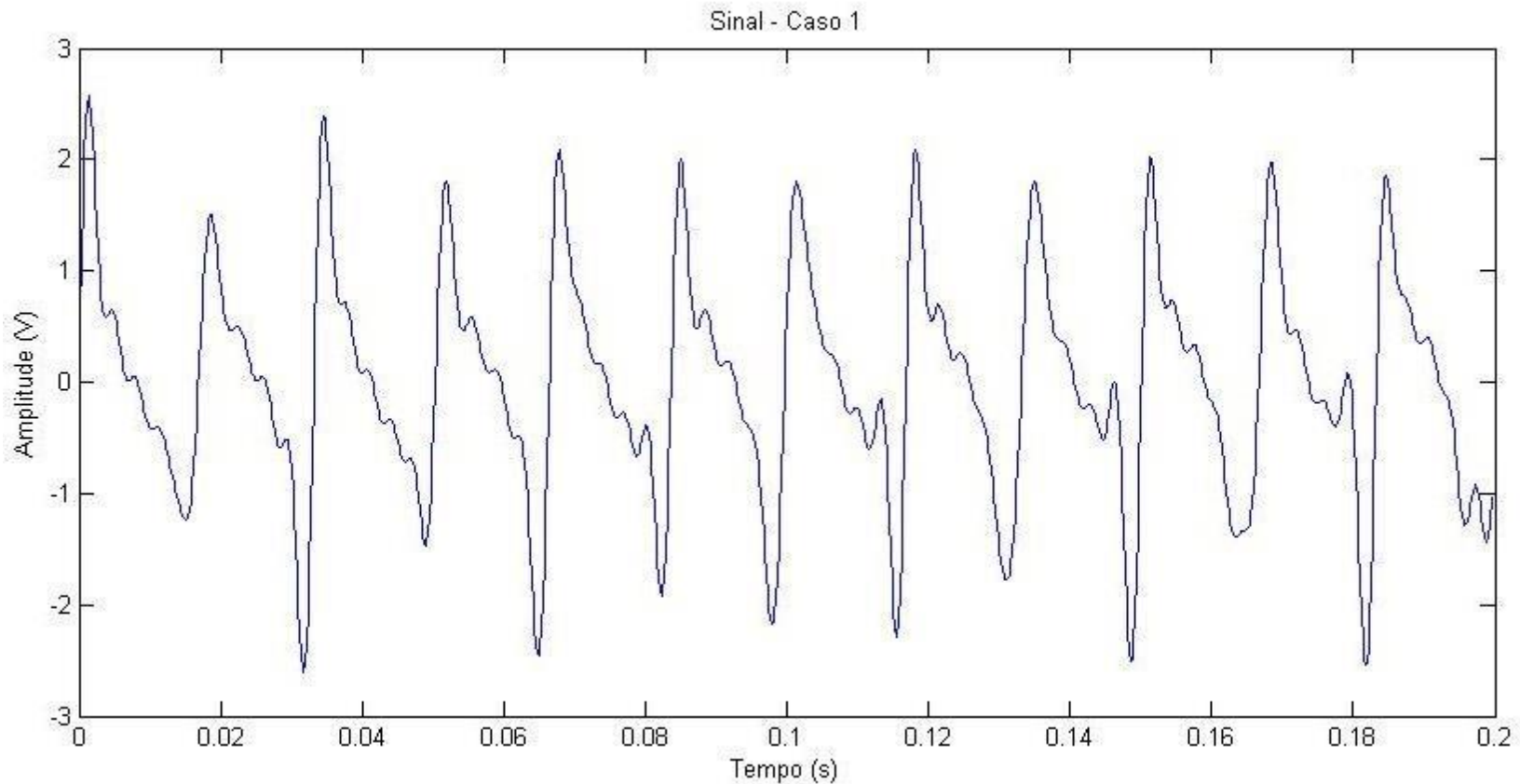
Figura 1: (a) Inter-harmônica de 80 Hz sobreposta ao sinal de tensão fundamental em 60 Hz; (b) Inter-harmônica de 90 Hz sobreposta ao sinal de tensão fundamental em 60 Hz.

FONTE: Macedo Jr., J. R. and Simonetti, S. L. Performance analysis of flickermeter in the presence of interharmonic components, Sba Controle & Automação vol. 23, no.4, Campinas July/Aug. 2012

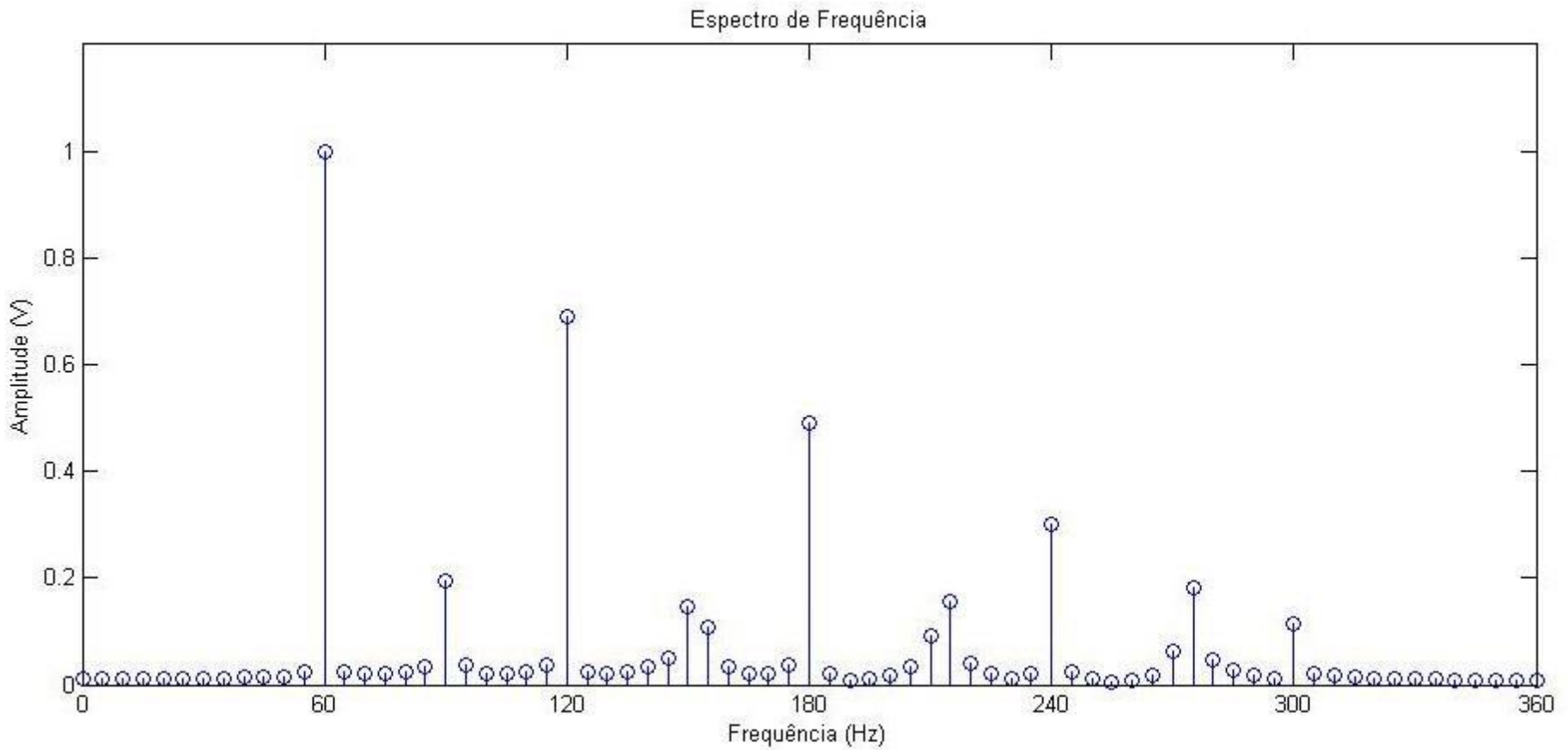
<https://doi.org/10.1590/S0103-17592012000400010>

Qualidade da Energia Elétrica

$$X = \text{sen}(2\pi \cdot 60 \cdot t) + 0.2 \cdot \text{sen}(2\pi \cdot 91 \cdot t) + 0.7 \cdot \text{sen}(2\pi \cdot 120 \cdot t) + 0.2 \cdot \text{sen}(2\pi \cdot 152.5 \cdot t) + 0.5 \cdot \text{sen}(2\pi \cdot 180 \cdot t) + 0.2 \cdot \text{sen}(2\pi \cdot 213.5 \cdot t) + 0.3 \cdot \text{sen}(2\pi \cdot 240 \cdot t) + 0.2 \cdot \text{sen}(2\pi \cdot 274 \cdot t) + 0.1 \cdot \text{sen}(2\pi \cdot 300 \cdot t)$$



Qualidade da Energia Elétrica



Espectro de frequência pela TRF para o Caso 1.

Qualidade da Energia Elétrica

Tipos de distorções da forma de onda

Podem aparecer como **frequências discretas** ou como uma **larga faixa espectral**. Podem ser encontradas em redes de diferentes classes de tensões.

As **principais fontes** são os conversores de frequência, motores de indução e equipamentos a arco.

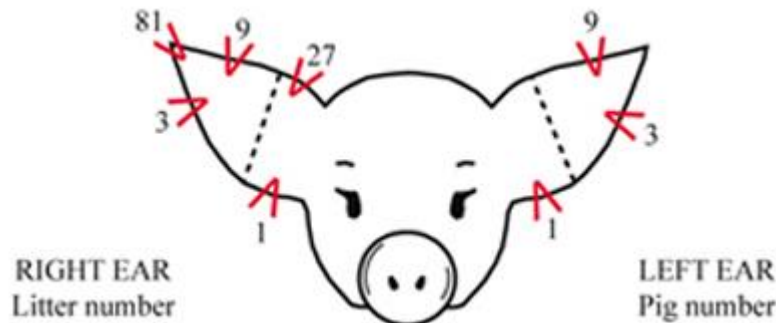
Qualidade da Energia Elétrica

Tipos de distorções da forma de onda

✓ **Notching**

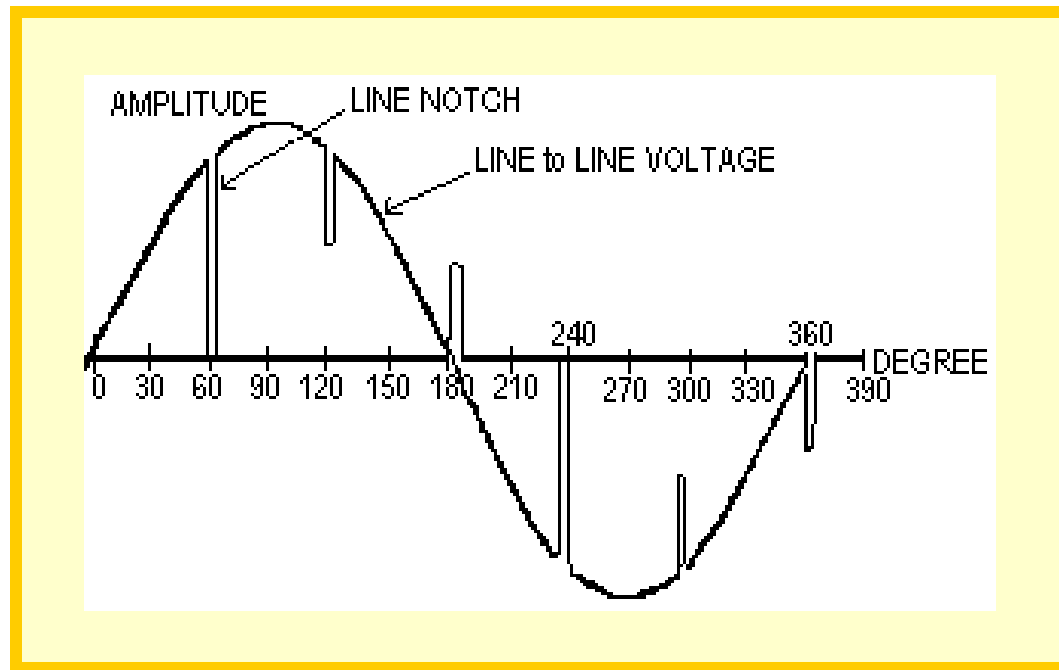
Distúrbio periódico de tensão causado pela má operação dos dispositivos eletrônicos quando a corrente é comutada de uma fase para outra.

Desde que **ocorre continuamente**, pode ser caracterizado pelo **espectro harmônico da tensão afetada**.



Qualidade da Energia Elétrica

Tipos de distorções da forma de onda



- ✓ Forma como o *notching* se manifesta, no caso de um conversor de 6 pulsos, ocorrendo a cada 60 graus. São fenômenos periódicos.

Qualidade da Energia Elétrica

- ✓ Caso a fonte de alimentação dos conversores com alta distorção harmônica de corrente possua baixa potência de curto-circuito, estará criada a situação para que estes **cortes** surjam de forma significativa e importante.
- ✓ 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.
- ✓ **Solução:** aumento da potência de curto-circuito da fonte; instalação de filtros nas cargas; ou outros dispositivos que reduzam o impacto da operação do conversor.

Qualidade da Energia Elétrica

- ✓ O fenômeno ocorre quando da operação/comutação da ponte retificadora, no instante 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.

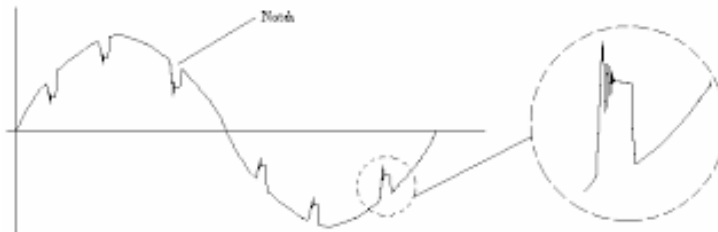


Figure 1

FONTE: LINE NOTCHING ATTENUATION.
Application Notes. Ultra-K - UK#21 uklnota1
11May1998

Qualidade da Energia Elétrica

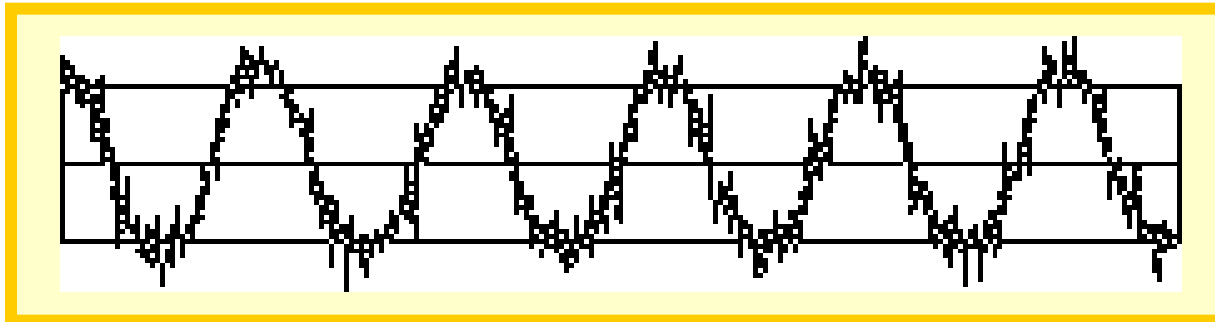
- ✓ A avaliação do fenômeno é feita pela altura (ou profundidade) e pela área do corte.
- ✓ Os limites de altura e área do corte são modelados pela IEEE 519.
- ✓ A medição por instrumentos deve considerar leituras com pelo menos 512 amostras por ciclo.
- ✓ Outras variáveis elétricas também devem ser analisadas, como, valores eficazes das correntes, correntes harmônicas, energia reativa instantânea, dentre outras, e, sobretudo se ocorreu a passagem da tensão pelo zero em instante não adequado.

Qualidade da Energia Elétrica

Tipos de distorções da forma de onda

✓ Ruído

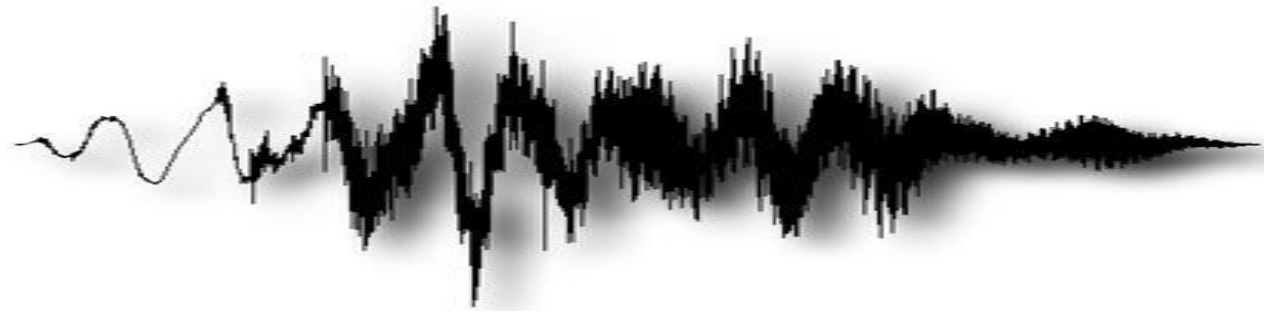
Estes podem ser definidos como **sinais elétricos não desejáveis**, com **conteúdo do espectro abaixo de 200 kHz**, superposto à tensão e corrente do sistema de energia nos condutores de fase ou obtidos sobre os condutores neutros, ou ainda, nos sinais da linha.



Qualidade da Energia Elétrica

Tipos de distorções da forma de onda

- ✓ Podem ser causados em sistemas de energia por equipamentos eletrônicos, circuitos de controle, equipamentos a arco, cargas com retificadores e fontes chaveadas e, **via de regra, estão relacionados com aterramentos impróprios.**
- ✓ O problema pode ser atenuado pelo **uso de filtros, isolamento dos transformadores e condicionadores de linha.**

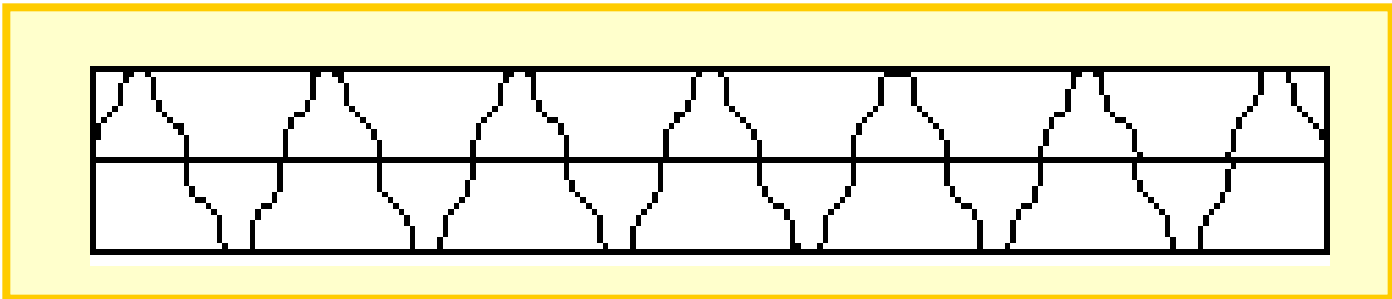


Qualidade da Energia Elétrica

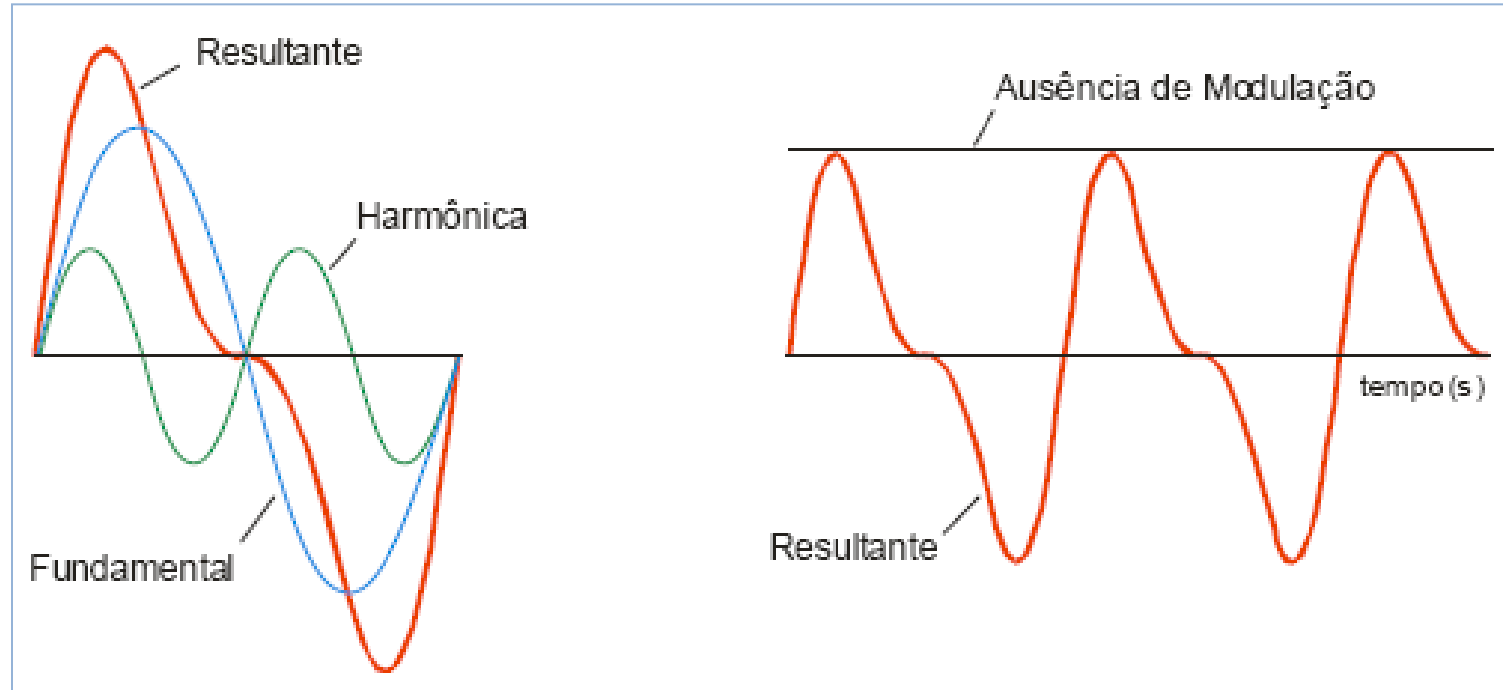
Distorção harmônica

✓ Harmônicas

Tecnicamente, um harmônico é um componente de uma **onda periódica**, cuja **frequência é um múltiplo inteiro da frequência fundamental** (no caso da energia elétrica, de 60 Hz).

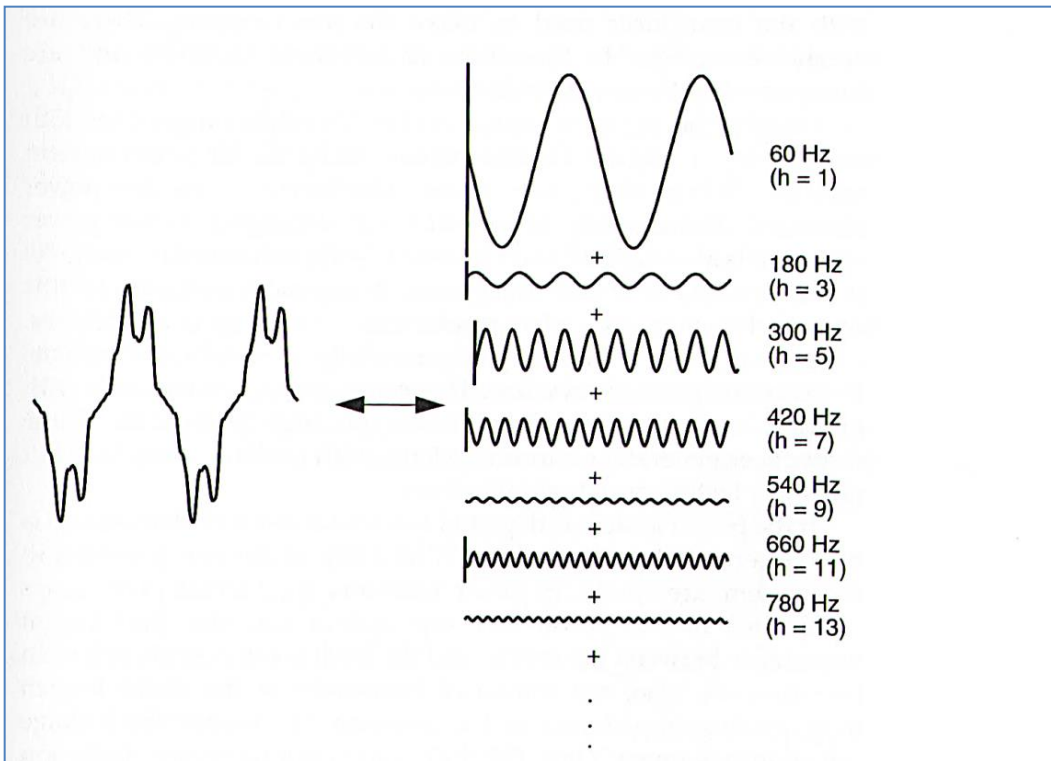


Qualidade da Energia Elétrica



Qualidade da Energia Elétrica

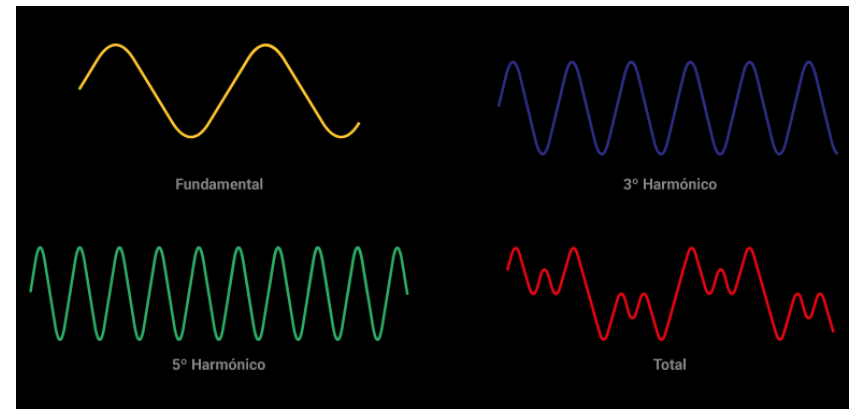
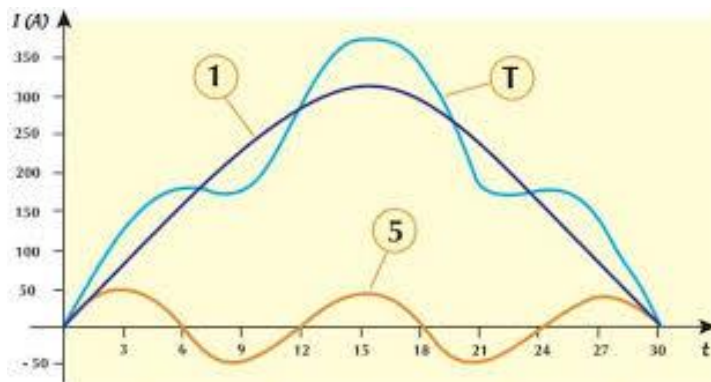
$$v(t) = V_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos k\omega t + b_k \sin k\omega t)$$



Qualidade da Energia Elétrica

Distorção harmônica

- ✓ 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** (capacitor para correção do fator de potência combinado em série com um reator).



Qualidade da Energia Elétrica

Caracterização da distorção harmônica

- ✓ A corrente solicitada caracteriza o tipo de carga:
 - natureza das cargas;
 - ponto de acoplamento comum (PAC);
 - fator de potência (fp);
 - fator de crista (fc);
 - distorção harmônica total (DHT); e
 - cargas geradoras de harmônicas.

Qualidade da Energia Elétrica

Cargas lineares equilibradas

Solicitam correntes senoidais e equilibradas (MIT em regime)

Cargas especiais

Solicitam correntes senoidais em desequilíbrio ou não senoidais equilibradas ou não

Cargas lineares não-equilibradas

(transformador monofásico em regime, etc.)

Cargas não lineares ou perturbadoras

(reatores saturáveis, retificadores, inversores, etc.)

Qualidade da Energia Elétrica

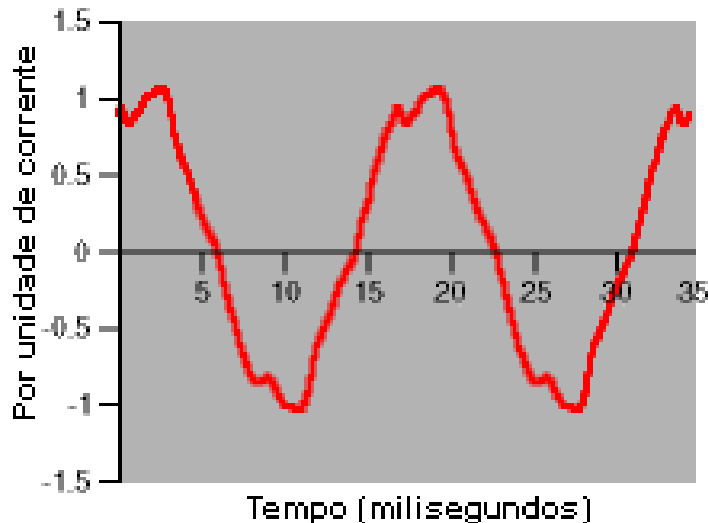
Caracterização da distorção harmônica

- ✓ **“A crescente utilização de equipamentos eletrônicos em instalações elétricas, para acionamento de motores, condicionamento de energia, iluminação e também os computadores pessoais, tem uma relação direta com o aumento na distorção harmônica da corrente e da tensão.**
- ✓ **Isto é devido em grande parte, à topologia construtiva da fonte de alimentação destes equipamentos, que na maioria dos casos, emprega retificadores com filtro capacitivo no lado DC.”**

Qualidade da Energia Elétrica

Caracterização da distorção harmônica

- ✓ 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:



- as **harmônicas** que geralmente **causam problemas** são as **componentes de número ímpar**; e
- a magnitude da corrente harmônica diminui com o aumento da frequência (???)

Qualidade da Energia Elétrica

Caracterização da distorção harmônica



- ✓ Dentre os problemas causados por harmônicas, estão a **perda de produtividade** e de **vendas** devido a paradas na produção, causadas **por falhas em motores, acionamentos, fontes**, ou simplesmente, pelo “**repicar**” dos disjuntores.

Qualidade da Energia Elétrica

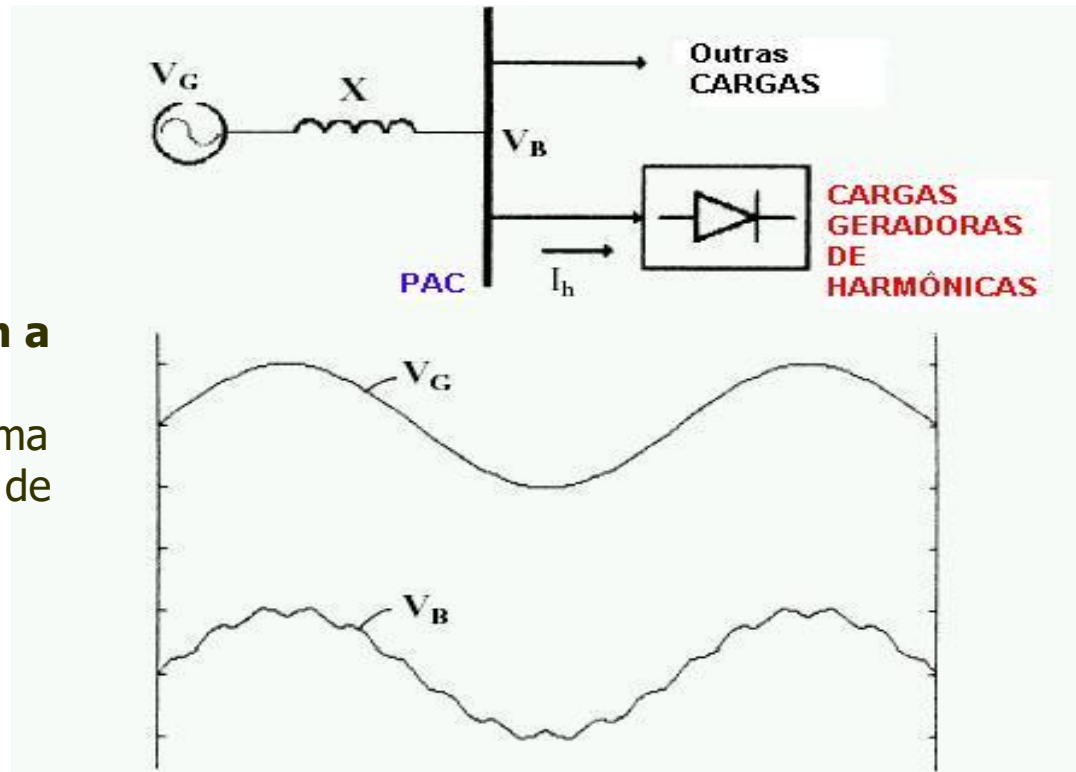
Caracterização da distorção harmônica

- ✓ Alguns problemas associados às distorções harmônicas:
 - baixo fator de potência;
 - interferências eletromagnéticas;
 - aquecimento excessivo em transformadores;
 - sobrecorrentes em bancos de capacitores; e
 - erros em equipamentos de medição e controle, etc.

Qualidade da Energia Elétrica

Caracterização da distorção harmônica: PAC

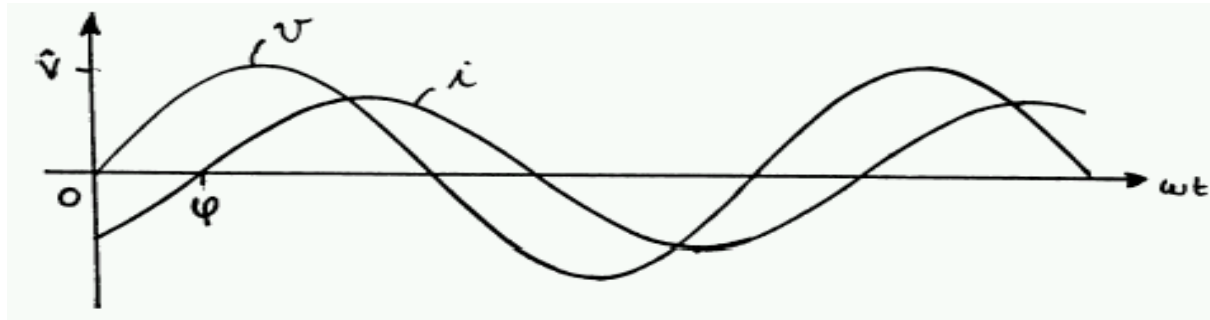
✓ A interação de uma corrente não-senoidal consumida por uma carga geradora de harmônicas, com a reatância do sistema alimentador, dá origem à uma tensão distorcida no Ponto de Acoplamento Comum - PAC.



Qualidade da Energia Elétrica

Caracterização da distorção harmônica: fp

- ✓ **1ª Situação** - Sistema operando com tensão e corrente senoidais (isentas de distorções):



Qualidade da Energia Elétrica

Caracterização da distorção harmônica: fp

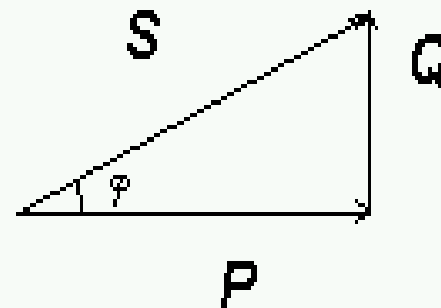
Potência ativa: $P = V_{ef} I_{ef} \cos \Theta$ (W)

Potência reativa: $Q = V_{ef} I_{ef} \text{sen} \Theta$ (var)

Potência aparente: $S = V_{ef} I_{ef}$ (VA)

Fator de potência: $fp = \frac{P}{S} = \frac{V_{ef} I_{ef} \cos \Theta}{V_{ef} I_{ef}} = \cos \Theta$

Triângulo de potências:

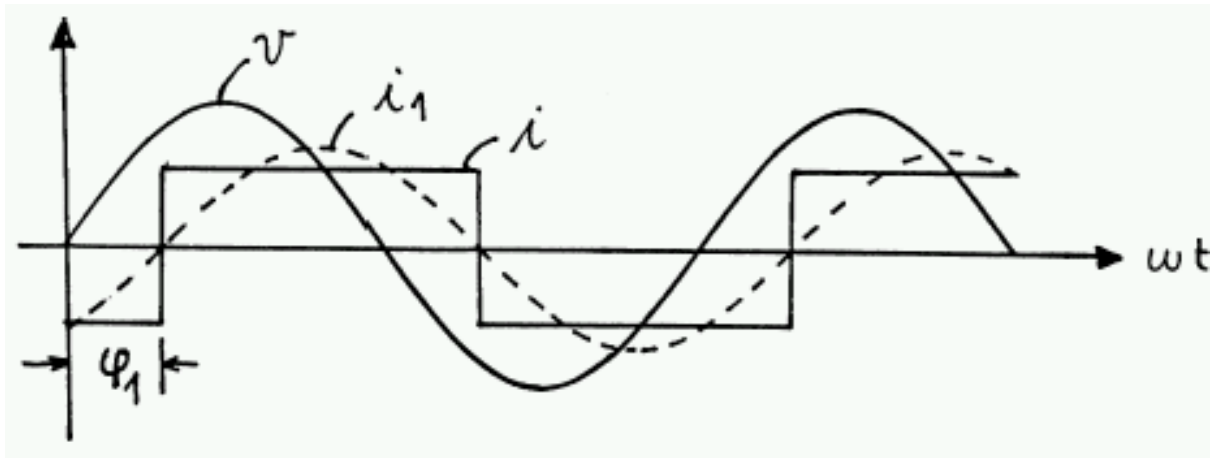


$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Qualidade da Energia Elétrica

Caracterização da distorção harmônica: fp

- ✓ **2ª Situação** – Sistema operando com uma tensão de alimentação senoidal e uma carga geradora de harmônicas que solicita uma corrente não-senoidal:



Qualidade da Energia Elétrica

Caracterização da distorção harmônica: fp

$$\text{Potência ativa: } P = V_{ef} I_{1ef} \cos \Theta_1$$

Onde I_{1ef} é o valor eficaz (RMS) da componente fundamental da corrente de carga e θ_1 é o ângulo de defasagem entre a tensão da fonte e a componente fundamental da corrente de carga.

A componente fundamental da corrente tem a mesma frequência da tensão senoidal da fonte.

A potência ativa envolve apenas a frequência da fonte (frequência fundamental: 60 Hz).

Qualidade da Energia Elétrica

Caracterização da distorção harmônica: fp

Potência reativa fundamental: $Q = V_{ef} I_{1ef} \text{sen}\Theta_1$

Esta **potência reativa fundamental** pode ser compensada através de capacitores (BCs) e também **envolve somente a frequência da fonte**.

✓ Corrente eficaz total solicitada pela carga:

$$I_{ef} = \sqrt{I_{1ef}^2 + I_{3ef}^2 + I_{5ef}^2 + I_{7ef}^2 + \dots}$$

Qualidade da Energia Elétrica

Caracterização da distorção harmônica: fp

Potência aparente:

$$S = V_{ef} I_{ef}$$

$$S^2 = V_{ef}^2 I_{ef}^2 = V_{ef}^2 \left[I_{1ef}^2 + \sum_3^n I_{nef}^2 \right]$$

$$S^2 = V_{ef}^2 I_{1ef}^2 + V_{ef}^2 \sum_3^n I_{nef}^2$$

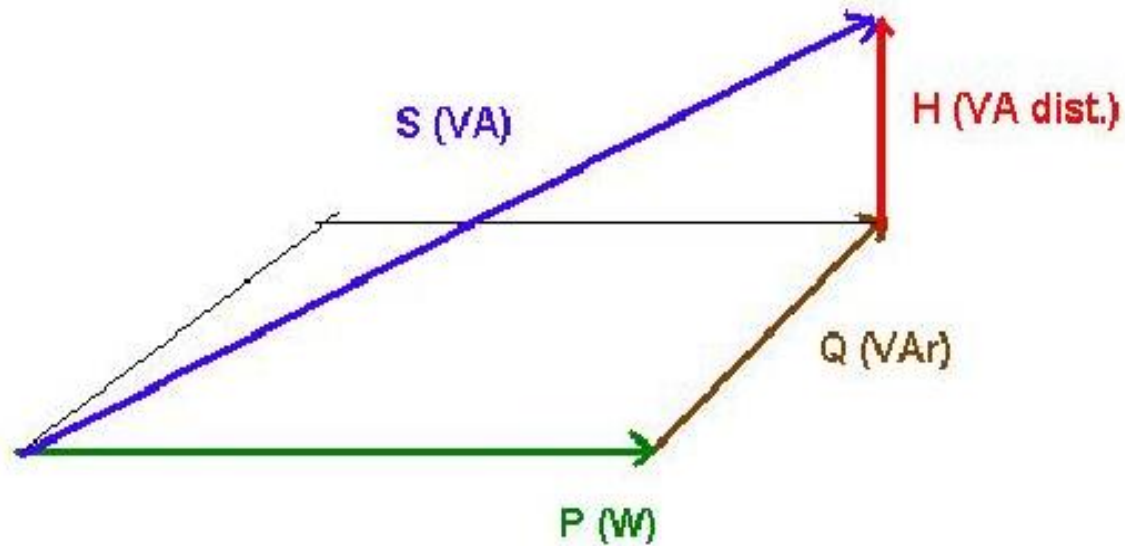
$$S^2 = V_{ef}^2 I_{1ef}^2 \cos^2 \Theta_1 + V_{ef}^2 I_{1ef}^2 \sin^2 \Theta_1 + V_{ef}^2 \sum_3^n I_{nef}^2$$

$$S^2 = P^2 + Q^2 + H^2$$

Qualidade da Energia Elétrica

Caracterização da distorção harmônica: f_p

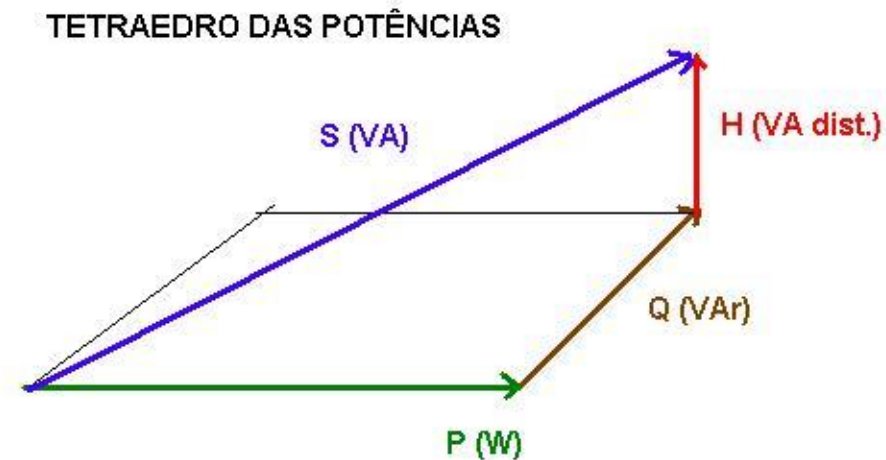
Tetraedro de potências:



Qualidade da Energia Elétrica

Caracterização da distorção harmônica: fp

- ✓ P (W) e Q (var) são potências associadas a corrente na frequência fundamental (60 Hz).
- ✓ H (VA distorcida) é associada as correntes de frequências harmônicas.



Qualidade da Energia Elétrica

Caracterização da distorção harmônica: fp

$$fp = \frac{P}{S} = \frac{V_{ef} I_{1ef} \cos \Theta_1}{V_{ef} I_{ef}}$$

$$fp = \frac{I_{1ef}}{I_{ef}} \cos \Theta_1$$

Fator de deslocamento = $\cos \Theta_1$

Fator de distorção = $\frac{I_{1ef}}{I_{ef}}$

Qualidade da Energia Elétrica

Caracterização da distorção harmônica: fp

- ✓ **Potência aparente (S):** é a potência total que deve ser suprida pelo sistema alimentador. É a utilizada por exemplo, no dimensionamento do transformador e dos condutores do alimentador: **Na potência S está envolvida a frequência da fonte e todas as outras frequências harmônicas geradas pela carga.**
- ✓ **Potência ativa (P):** é a potência útil que é efetivamente transformada em energia mecânica (motores), energia luminosa (lâmpadas) ou calor (fornos), por exemplo. **A potência P envolve apenas a frequência da fonte (fundamental).**

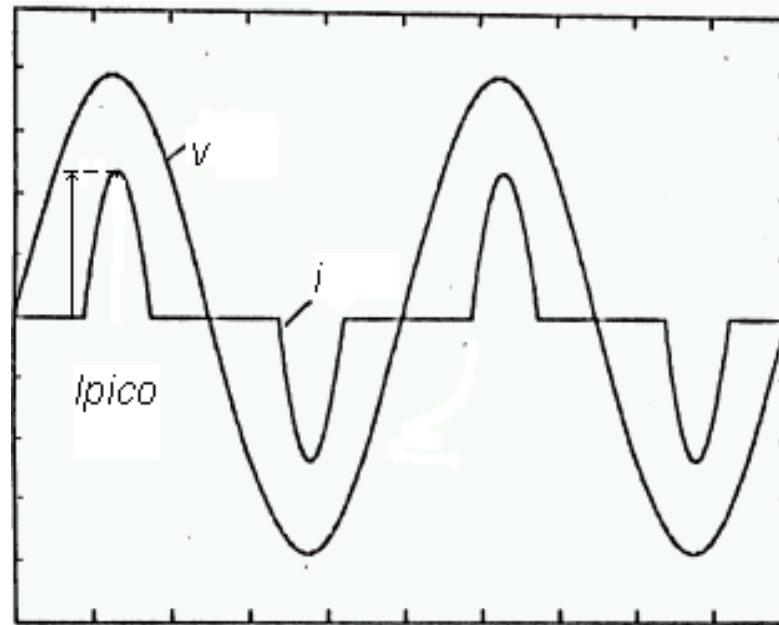
Qualidade da Energia Elétrica

Caracterização da distorção harmônica: fp

- ✓ **Potência reativa fundamental (Q):** é aquela necessária para a criação dos campos elétricos e magnéticos dos equipamentos, tais como capacitores, reatores e motores elétricos. **A potência Q também envolve apenas a frequência da fonte** e pode ser compensada pelo emprego de capacitores (compensação do fator de deslocamento).
- ✓ **Potência reativa de distorção (H):** envolve todas as frequências harmônicas e pode ser compensada (fator de distorção) através de filtros passivos (por exemplo, filtro *shunt* RLC série) sintonizados na frequência que se deseja minimizar. Uma alternativa para a eliminação de componentes harmônicas é a construção de um filtro ativo de potência que é um inversor com projeto especialmente concebido.

Qualidade da Energia Elétrica

Caracterização da distorção harmônica: f_c



- ✓ Tensão e corrente típicas de um PC

Qualidade da Energia Elétrica

Caracterização da distorção harmônica: f_c

- ✓ Para uma **onda senoidal** pura:

$$f_c = \frac{I_{pico}}{I_{ef}}$$

$$I_{ef} = \frac{I_{pico}}{\sqrt{2}}$$

$$f_c = \sqrt{2} = 1,4142$$

Qualidade da Energia Elétrica

Caracterização da distorção harmônica: DHT

- ✓ Para quantificação do grau de distorção presente na tensão e/ou corrente, lança-se mão da ferramenta matemática conhecida por **Série de Fourier**.
- ✓ Conhecidos os valores de tensões e/ou correntes harmônicas presentes no sistema, utiliza-se de um procedimento para expressar o **conteúdo harmônico** de uma forma de onda.
- ✓ **Distorção Harmônica Total - DHT**

Qualidade da Energia Elétrica

Caracterização da distorção harmônica: DHT

$$DHV_T = \sqrt{\frac{\sum_{n>1}^{n_{\text{máx}}} V_n^2}{V_1^2}} 100(\%)$$

DHV_T é a Distorção Harmônica Total de Tensão

DHI_T é a Distorção Harmônica Total de Corrente

V_n é o valor eficaz da tensão de ordem *n*

I_n é o valor eficaz da corrente de ordem *n*

V₁ é o valor eficaz da tensão fundamental

I₁ é o valor eficaz da corrente fundamental

n é a ordem da componente harmônica

Qualidade da Energia Elétrica

Caracterização da distorção harmônica: DHT

$$DHV_I = \frac{V_n}{V_1} 100(\%)$$

$$DHI_I = \frac{I_n}{I_1} 100(\%)$$

DHV_I = Distorção Harmônica Individual de Tensão

DHI_I = Distorção Harmônica Individual de Corrente

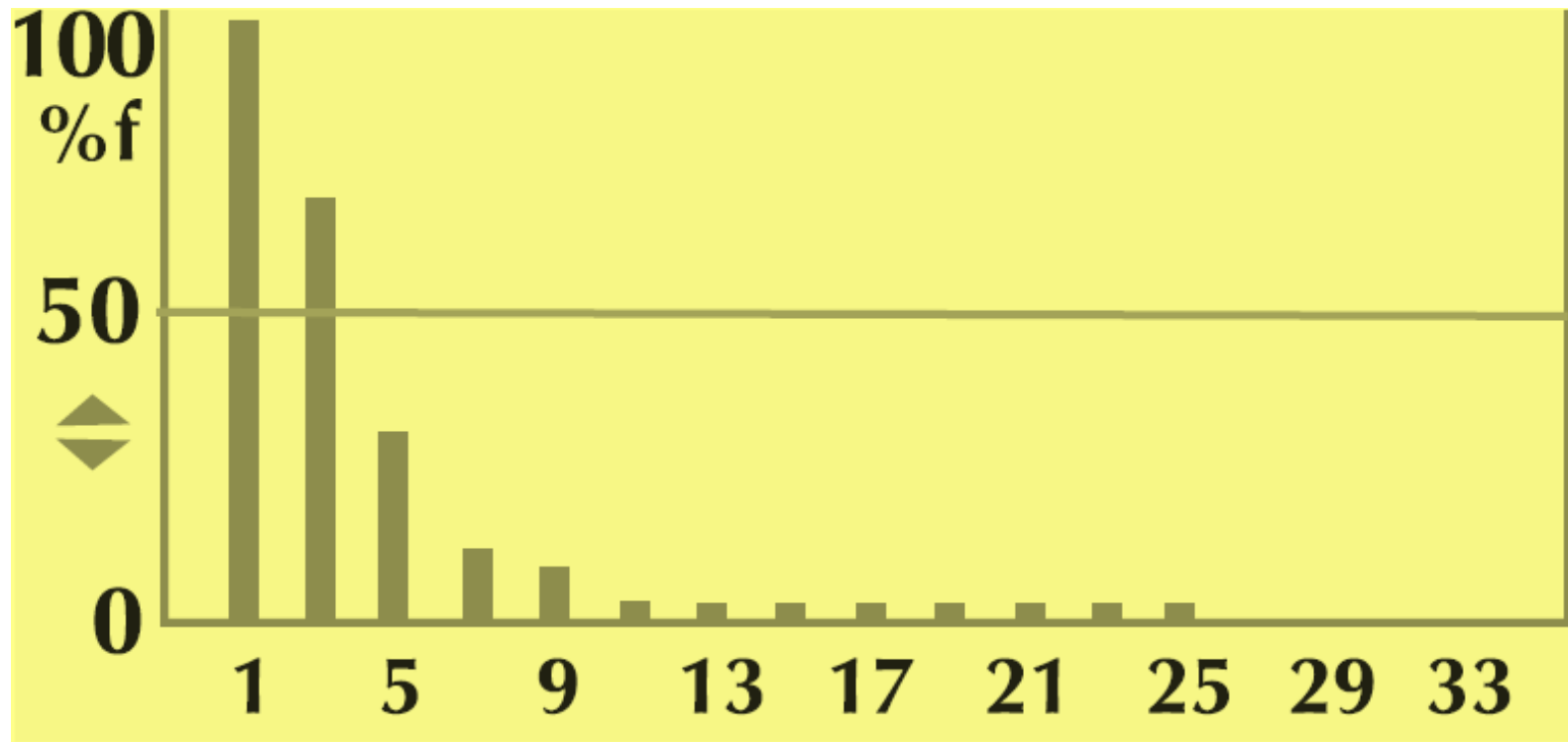
Qualidade da Energia Elétrica

Caracterização da distorção harmônica: DHT

- ✓ Para fins práticos, geralmente, as **harmônicas de ordens elevadas (acima da 50ª ordem)**, são desprezíveis para análises em sistemas elétricos de potência (???)
- ✓ PRODIST (2017): análise de, pelo menos, até a 40ª ordem harmônica.

Qualidade da Energia Elétrica

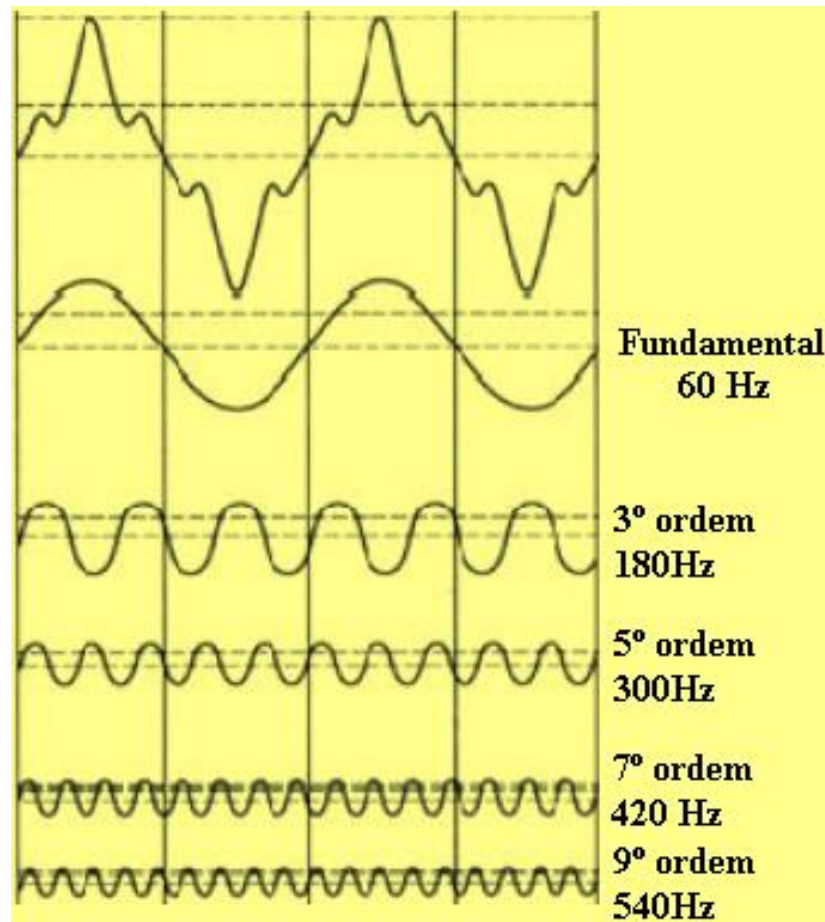
Efeitos da distorção harmônica: decomposição por *Fourier*



(???)

Qualidade da Energia Elétrica

Efeitos da distorção harmônica: decomposição por *Fourier*



Qualidade da Energia Elétrica

Efeitos da distorção harmônica

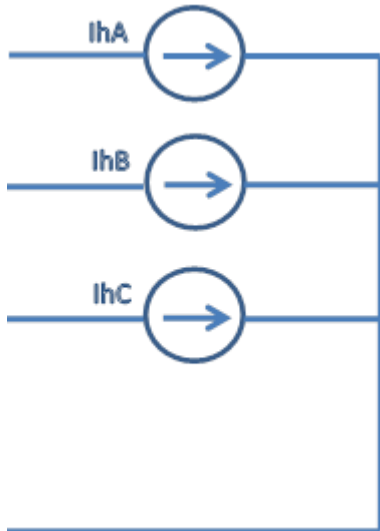
- ✓ **Pares ($n = 2, 4, 6, \dots$):** pode existir se a corrente tiver um valor médio (em alimentação CA – não dever existir).
- ✓ **Ímpares ($n = 3, 5, 7, \dots$):** características de uma alimentação CA.
- ✓ **Não características:** por exemplo 7,5 Hz (sub-harmônica) é par ou é ímpar?

Qualidade da Energia Elétrica

Efeitos da distorção harmônica: sequência das componentes

- ✓ **Direta:** mesma sequência da alimentação. Por exemplo a 7^a componente harmônica (420 Hz) no MIT caracteriza um torque direto.
- ✓ **Inversa:** contrária em relação à direta. Por exemplo a 5^a componente harmônica (300 Hz) no MIT caracteriza um torque reverso.
- ✓ **Zero ou homopolar:** por exemplo a 3^a componente harmônica (180 Hz) que circula pelo neutro (Y a 4 fios) e dentro do delta no MIT que não produz torque.

Análise da distorção harmônica para determinar o seu comportamento no sistema elétrico



Sequência de fase positiva (+)	$i_{1A} = I_{1A} \text{sen}(wt - \phi_{11})$ $i_{1B} = I_{1B} \text{sen}(wt - \phi_{12} - 120^\circ)$ $i_{1C} = I_{1C} \text{sen}(wt - \phi_{13} + 120^\circ)$
$\phi_{11} = \phi_{12} = \phi_{13} = \phi_n$	
Sequência de fase negativa (-)	$i_{2A} = I_{2A} \text{sen}2(wt - \phi_2)$ $i_{2A} = I_{2A} \text{sen}(2wt - 2\phi_2)$ $i_{2B} = I_{2B} \text{sen}2(wt - \phi_2 - 120^\circ) = I_{2B} \text{sen}(2wt - 2\phi_2 - 240^\circ)$ $i_{2B} = I_{2B} \text{sen}(2wt - 2\phi_2 + 120^\circ)$ $i_{1C} = I_{2C} \text{sen}2(wt - \phi_2 + 120^\circ) = I_{2C} \text{sen}(2wt - 2\phi_2 + 240^\circ)$ $i_{1C} = I_{2C} \text{sen}(2wt - 2\phi_2 - 120^\circ)$
Sequência de fase zero (0)	$i_{3A} = I_{3A} \text{sen}3(wt - \phi_3)$ $i_{3A} = I_{3A} \text{sen}(3wt - 3\phi_3)$ $i_{3B} = I_{3B} \text{sen}3(wt - \phi_3 - 120^\circ) = I_{3B} \text{sen}(3wt - 3\phi_3 - 360^\circ)$ $i_{3B} = I_{3B} \text{sen}(3wt - 3\phi_3)$ $i_{3C} = I_{3C} \text{sen}3(wt - \phi_3 + 120^\circ) = I_{3C} \text{sen}(3wt - 3\phi_3 + 360^\circ)$ $i_{3C} = I_{3C} \text{sen}(3wt - 3\phi_3)$

Qualidade da Energia Elétrica

Efeitos da distorção harmônica: sequência das componentes

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

Qualidade da Energia Elétrica

Efeitos da distorção harmônica

✓ Cabos

- **sobreaquecimento** devido às perdas *Joule*; e
- maior solicitação do **isolamento**.

Nível de distorção de tensão, abaixo do qual os cabos não são expressivamente afetados: $\leq 10\%$



Qualidade da Energia Elétrica

Efeitos da distorção harmônica

✓ Transformadores

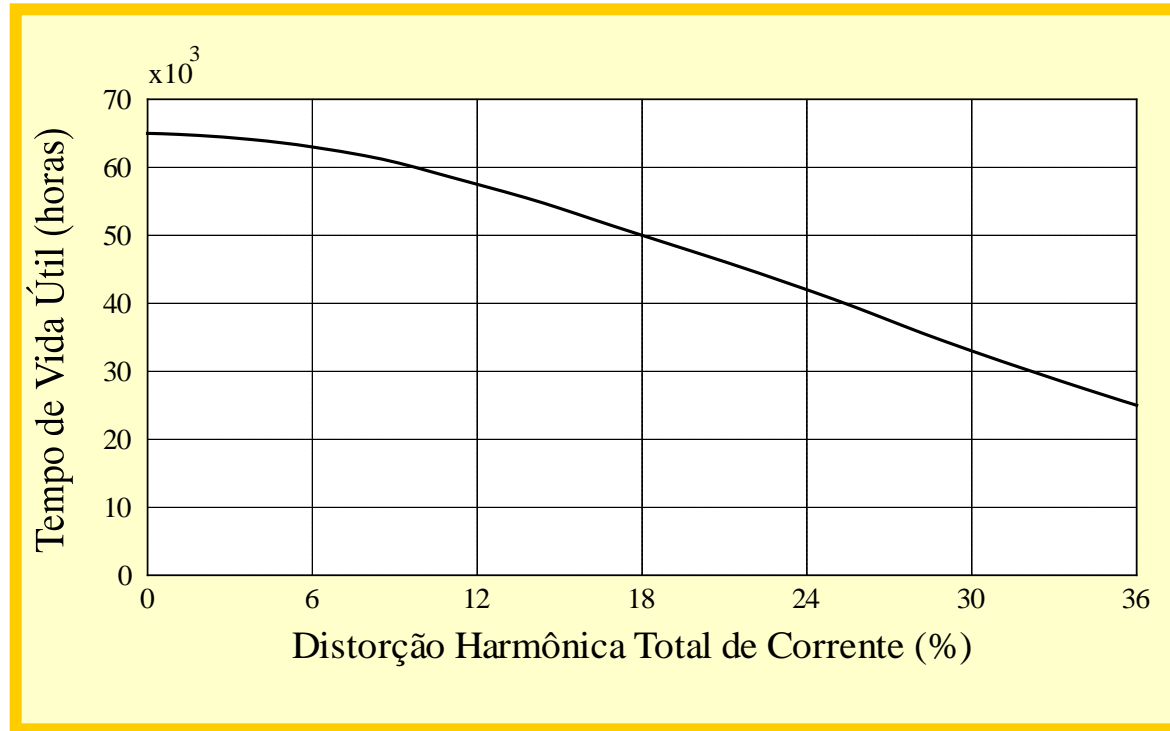
- **sobreaquecimento** causado pelo aumento das perdas *Joulicas*, além de intensificar as fugas tradicionalmente manifestadas nos **isolamentos**.

Este aumento das perdas faz com que a **vida útil** seja reduzida, uma vez que a **degradação do material isolante** no interior ocorrerá de forma mais acentuada.



Qualidade da Energia Elétrica

Efeitos da distorção harmônica: transformadores



- ✓ Vida útil de um transformador em função da distorção harmônica de corrente.

Qualidade da Energia Elétrica

Efeitos da distorção harmônica:

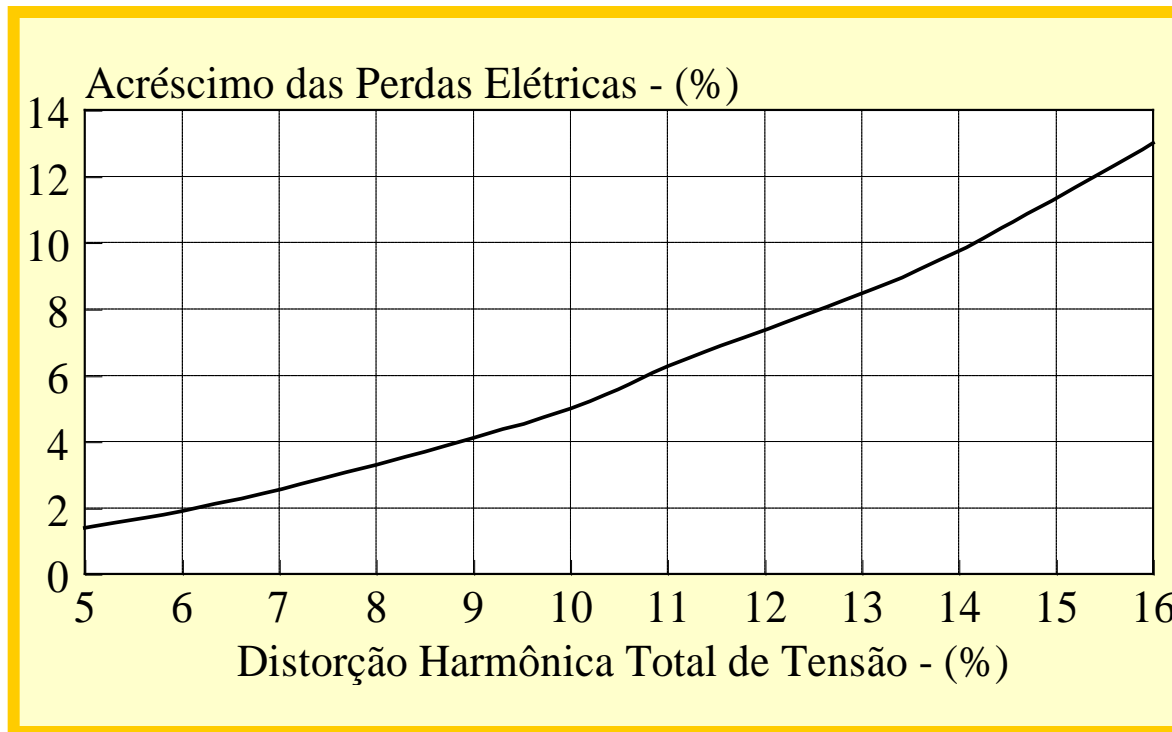
- ✓ **Motores de indução**
 - **sobreaquecimento** de seus enrolamentos

Este **sobreaquecimento** faz com que ocorra uma **degradação do material isolante** que pode levar a uma **condição de curto-circuito** por **falha no isolamento**.



Qualidade da Energia Elétrica

Efeitos da distorção harmônica: motores de indução



- ✓ Perdas elétricas de um motor de indução trifásico em função da distorção total de tensão.

Qualidade da Energia Elétrica

Efeitos da distorção harmônica: motores de indução

- ✓ 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**.
- ✓ Os motores de indução, de acordo com o seu porte e impedância de sequência negativa, **possuem um grau de imunidade aos harmônicos de: $\leq 1,3\%$ a $3,5\%$**

Qualidade da Energia Elétrica

Efeitos da distorção harmônica

✓ Máquinas síncronas

Pelo fato de estarem **localizadas distantes dos centros consumidores**, unidades geradoras, responsáveis por grandes blocos de energia, **não sofrem de forma acentuada as consequências dos harmônicos injetados no sistema.**

Qualidade da Energia Elétrica

Efeitos da distorção harmônica: máquinas síncronas



Dentre os 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.

Qualidade da Energia Elétrica

Efeitos da distorção harmônica: máquinas síncronas

- ✓ O grau de imunidade das máquinas síncronas aos efeitos de harmônicos é função do porte da máquina e da impedância de sequência negativa. Esta condição pode ser assegurada quando: **$\leq 1,3\%$ a $2,4\%$**

Qualidade da Energia Elétrica

Efeitos da distorção harmônica

✓ Banco de capacitores

Em redes elétricas distorcidas podem ser originadas **condições de ressonância**, caracterizando uma **sobretensão nos terminais das unidades capacitivas**:

- **degradação do isolamento das unidades capacitivas** e, em casos extremos, uma **completa danificação dos capacitores**.

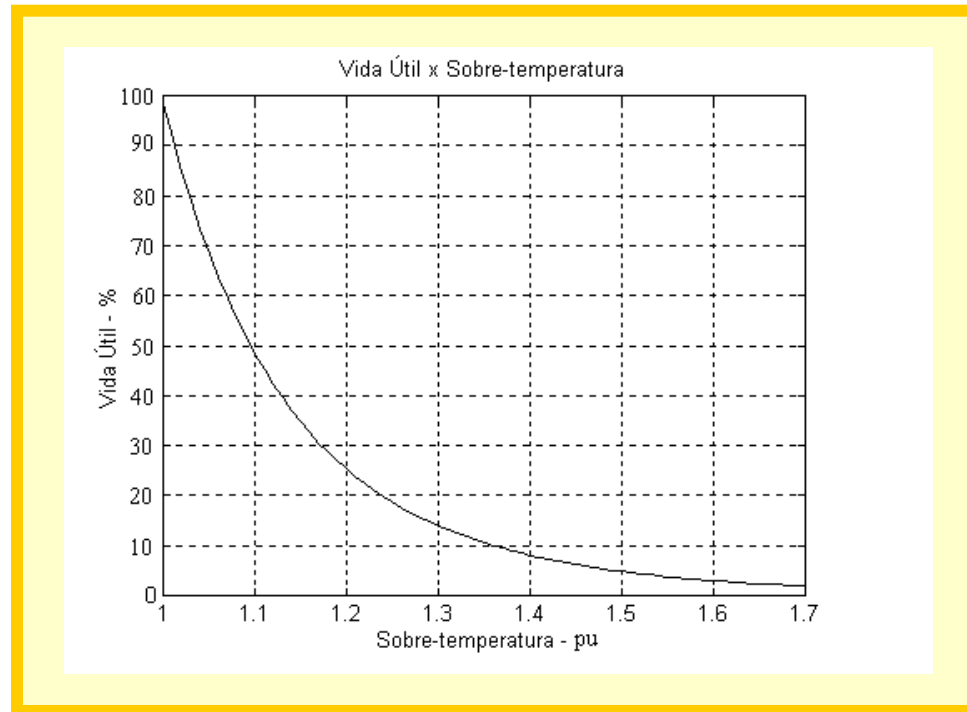
Qualidade da Energia Elétrica

Efeitos da distorção harmônica: BCs

- ✓ Mesmo que não seja caracterizado 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.

Qualidade da Energia Elétrica

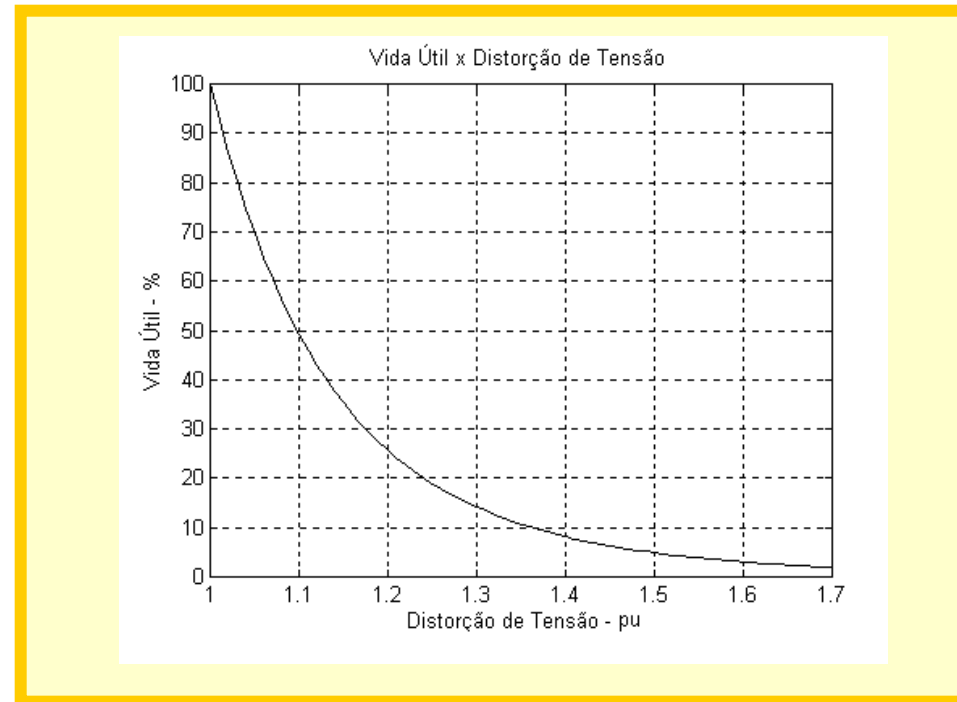
Efeitos da distorção harmônica: BCs



Vida útil *versus* sobreaquecimento em capacitores.

Qualidade da Energia Elétrica

Efeitos da distorção harmônica: BCs



✓ Vida útil *versus* distorção de tensão em capacitores.

Qualidade da Energia Elétrica

Efeitos da distorção harmônica

✓ Medidores de energia

O medidor de energia do tipo indução tem sua operação fundamentada no fenômeno da interação eletromagnética.

O conjugado motor do medidor, associado ao registro de energia, é obtido em função da interação entre uma corrente “ I ” e um fluxo “ ϕ ”, este último oriundo da tensão aplicada ao medidor.



Qualidade da Energia Elétrica

Efeitos da distorção harmônica: medidores de energia

- ✓ Para assegurar uma **operação segura dos medidores de energia**, estabelece-se uma recomendação de limite de distorção apresentada por: **$\leq 20\%$**



Qualidade da Energia Elétrica

Efeitos da distorção harmônica

✓ Dispositivos de proteção

Estes dispositivos, quando submetidos a sinais distorcidos, **podem atuar de maneira incorreta**, não retratando a real condição operacional do sistema.

Uma recomendação para o limite de operação de relés quando submetidos a sinais distorcidos é de: **$\leq 5\%$**

Qualidade da Energia Elétrica

Efeitos da distorção harmônica

- ✓ Diante de tantos problemas causados por harmônicos, torna-se necessário **tomar medidas preventivas** ou **corretivas**, no sentido de **reduzir** ou **eliminar os níveis harmônicos** presentes nos barramentos e linhas de um complexo elétrico.

Qualidade da Energia Elétrica

Efeitos da distorção harmônica

- ✓ Dentre as principais técnicas utilizadas destacam-se:

Filtros passivos: constituídos de componentes R , L e C através dos quais obtêm-se os filtros sintonizados e amortecidos (alto custo, complexidade de sintonia e ressonância paralela).

Filtros ativos: gera e injeta correntes harmônicas com defasagem oposta àquelas produzidas pela carga não linear.

Qualidade da Energia Elétrica

Comentários finais

- ✓ Importância de uma análise e diagnóstico da QE elétrica:

Determinar: **causas e consequências**

Apresentar: **medidas técnicas e economicamente viáveis**

Qualidade da Energia Elétrica

olesk@sc.usp.br

Fone: 016 3373 8142

Muito obrigado pela atenção!