



# Aula 07 - Qualidade da energia elétrica

Prof. Dr. Mário Oleskovicz

USP/EESC/SEL

# *Qualidade da Energia Elétrica*

- **Agenda**

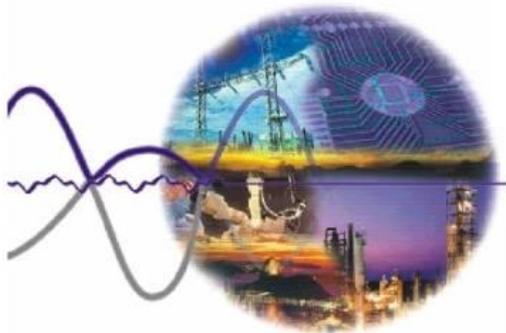
- **Distorção da forma de onda**

  - Tipos de distorções da forma de onda

  - Distorção harmônica

  - Caracterização da distorção harmônica

  - Efeitos da distorção harmônica

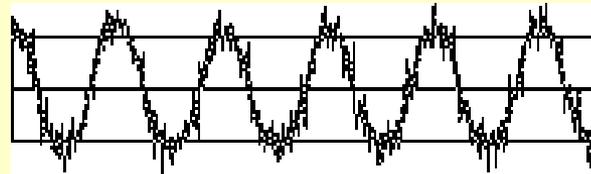
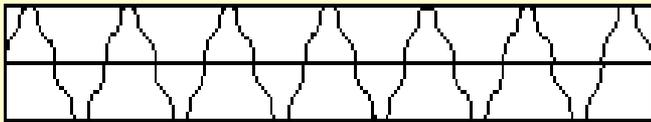


# Qualidade da Energia Elétrica

## 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 a operação de retificadores de meia-onda.

# *Qualidade da Energia Elétrica*

## Tipos de distorções da forma de 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.

# Qualidade da Energia Elétrica

Tipos de distorções da forma de onda

✓ **Inter-harmônico**

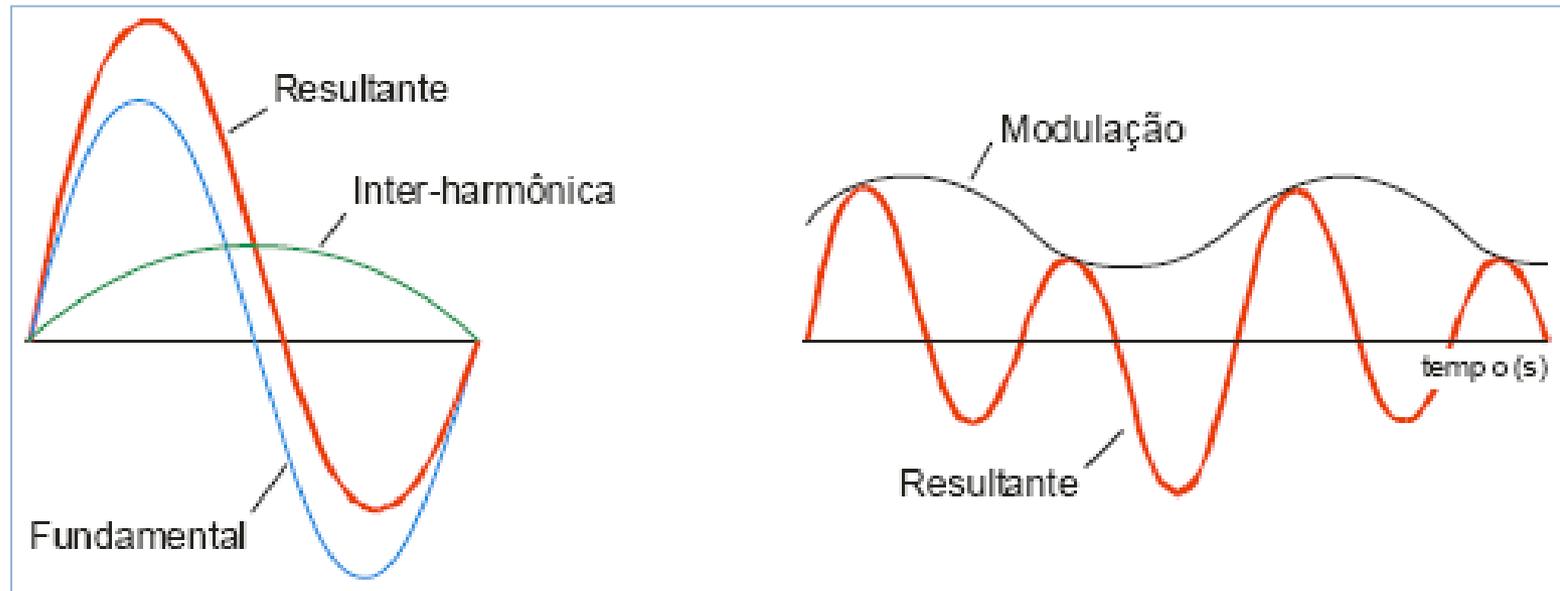
São formas de ondas de tensões e correntes que apresentam componentes de frequência que **não são múltiplos inteiros da frequência** com a qual o sistema é suprido e designado a operar.

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).**

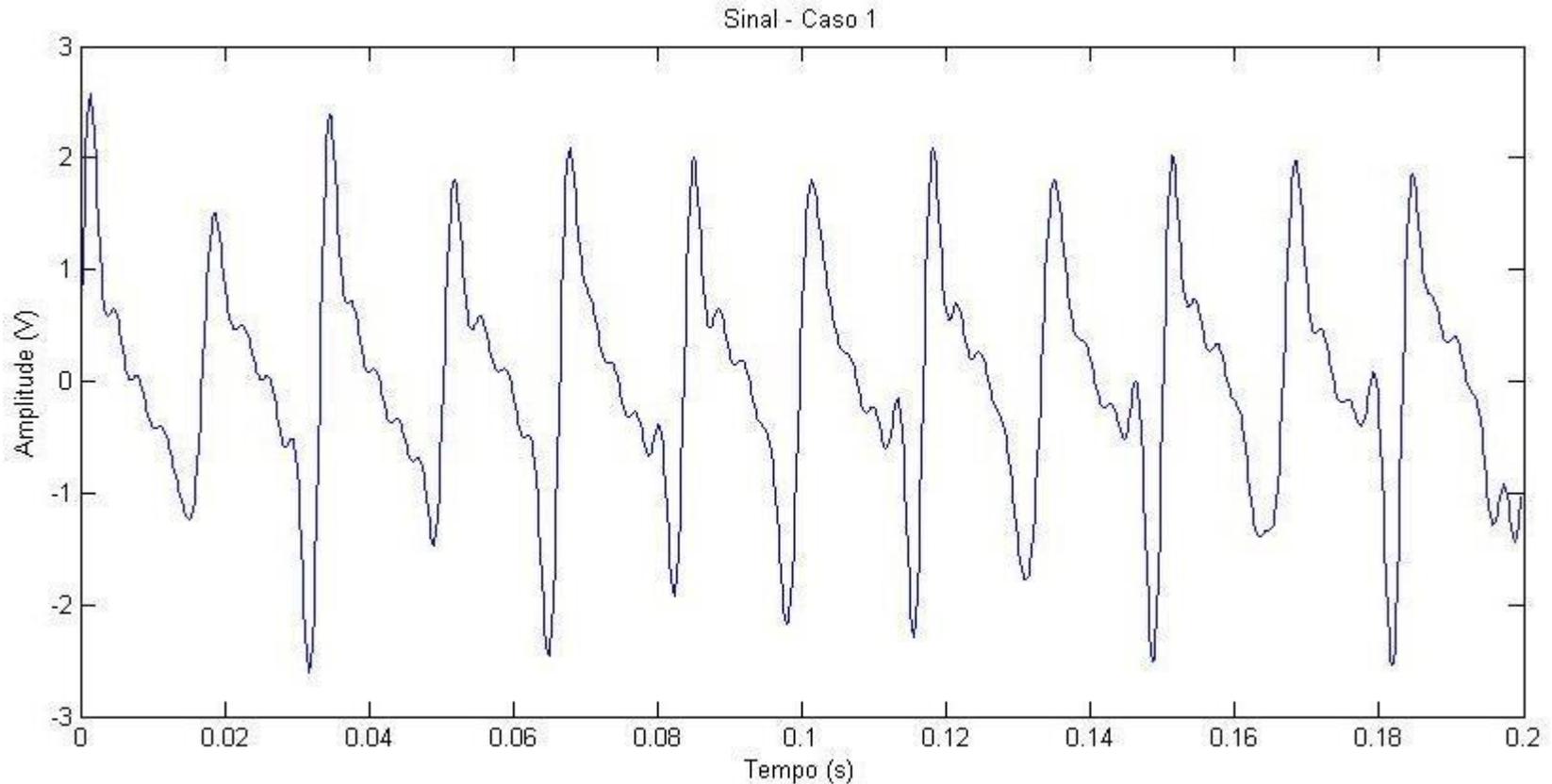
# Qualidade da Energia Elétrica

Tipos de distorções da forma de onda

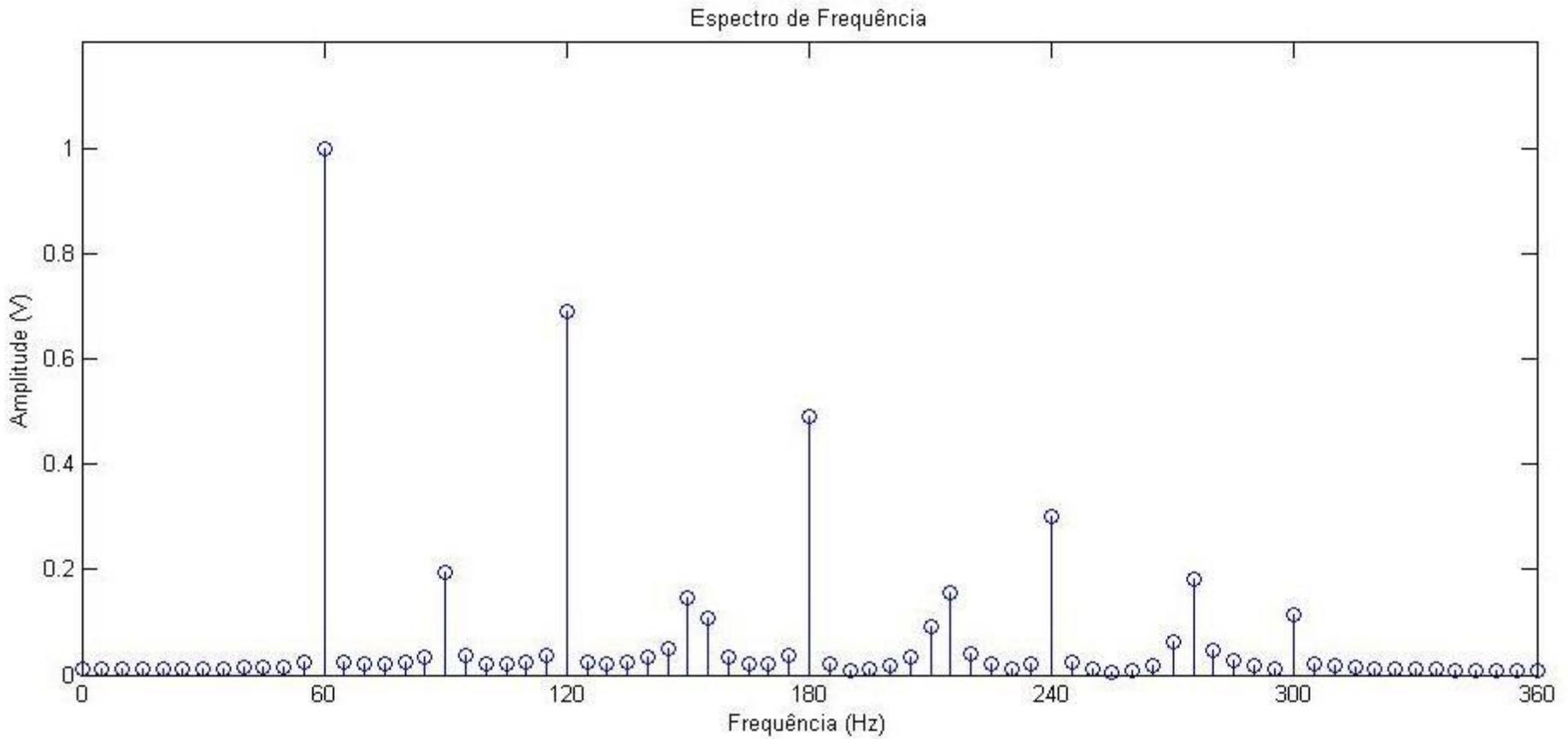


# Qualidade da Energia Elétrica

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



# 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

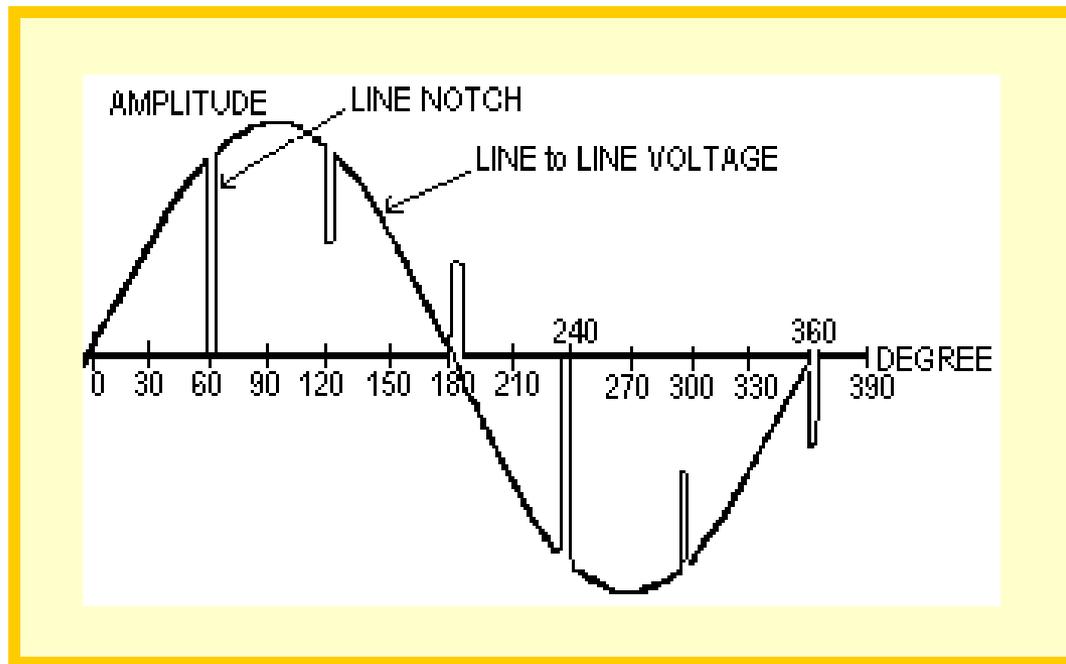
✓ **Notching**

**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



- ✓ A forma de como o *notching* se manifesta.

# 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.
- ✓ No caso de um conversor de seis pulsos, a cada  $60^\circ$  do ciclo da tensão haverá um corte.

# *Qualidade da Energia Elétrica*

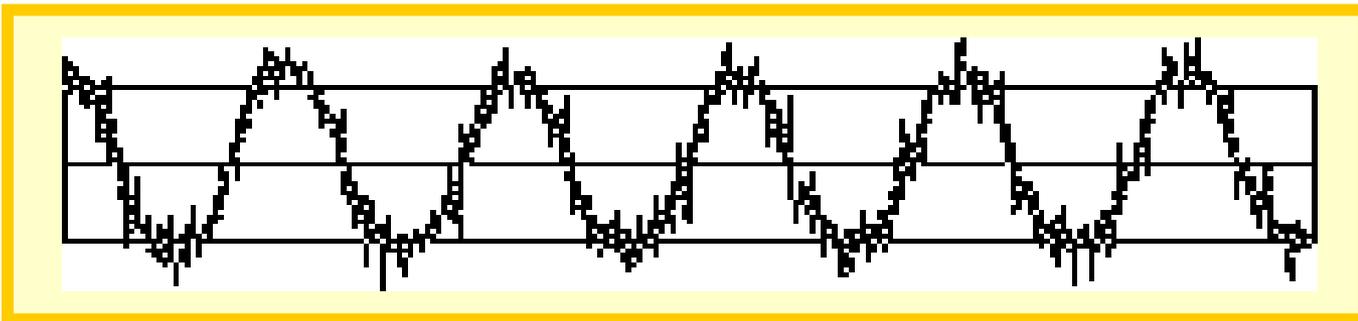
- ✓ A avaliação do fenômeno é feita pela altura (ou profundidade) e pela área do corte.
- ✓ Os limites de altura e área do corte são modelados pela IEEE 519.
- ✓ A medição por instrumentos deve considerar leituras com pelo menos 512 amostras por ciclo.
- ✓ Outras variáveis elétricas também devem ser 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

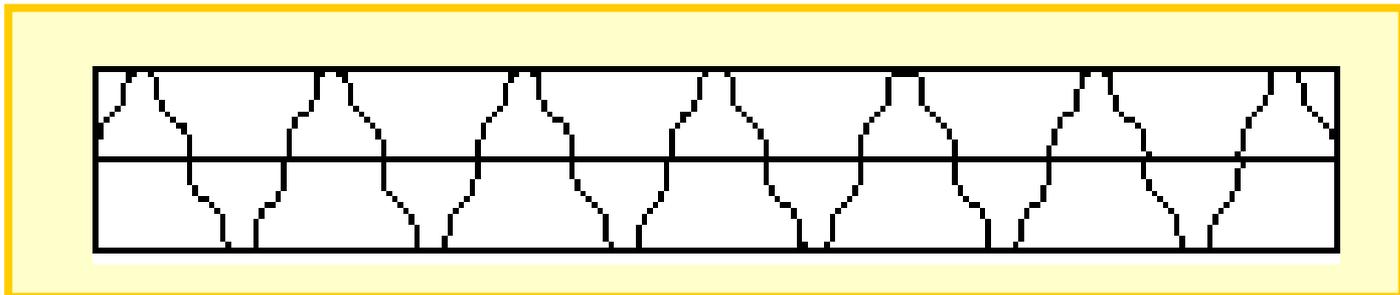
- ✓ Podem ser causados em sistemas de energia por equipamentos eletrônicos, circuitos de controle, equipamentos a arco, cargas com retificadores e fontes chaveadas e, **via de regra, estão relacionados com aterramentos impróprios.**
- ✓ O problema pode ser atenuado pelo **uso de filtros, isolamento dos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

# Qualidade da Energia Elétrica

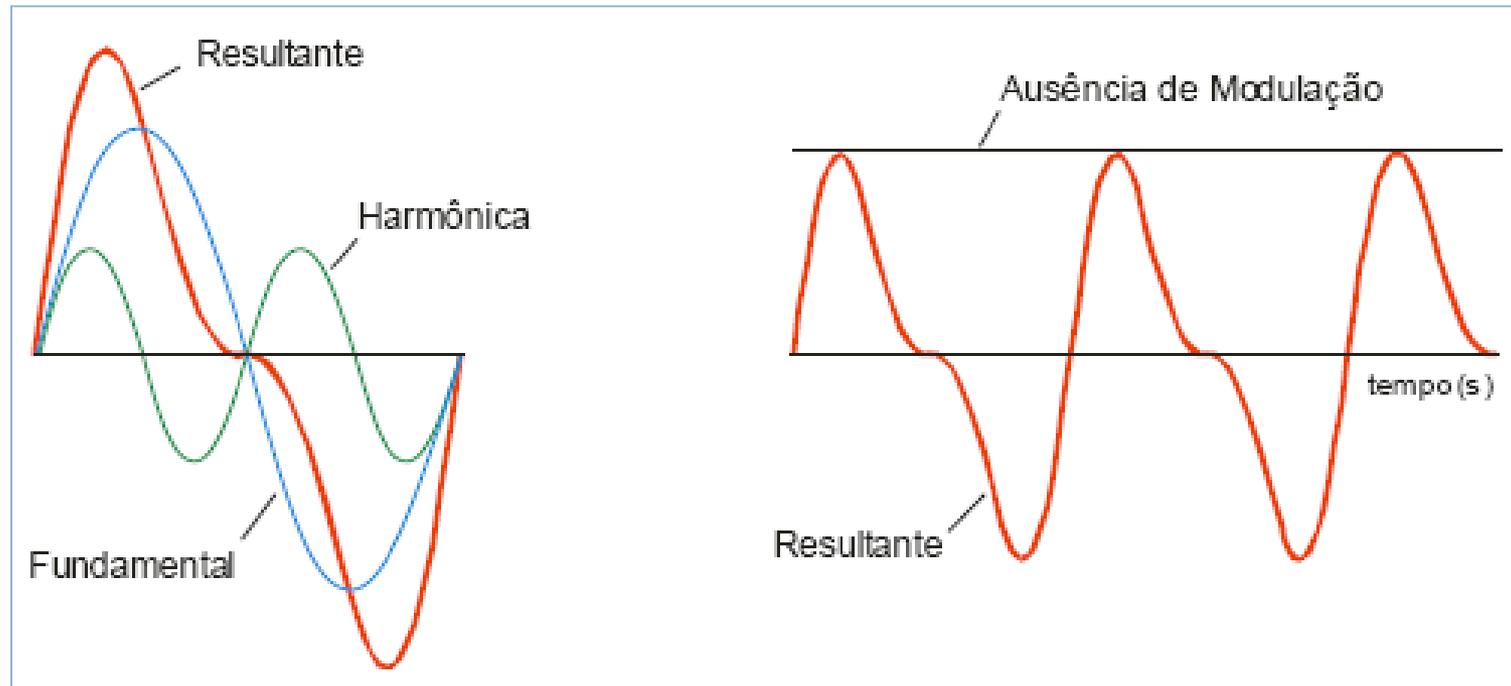
## Distorção harmônica

### ✓ 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).

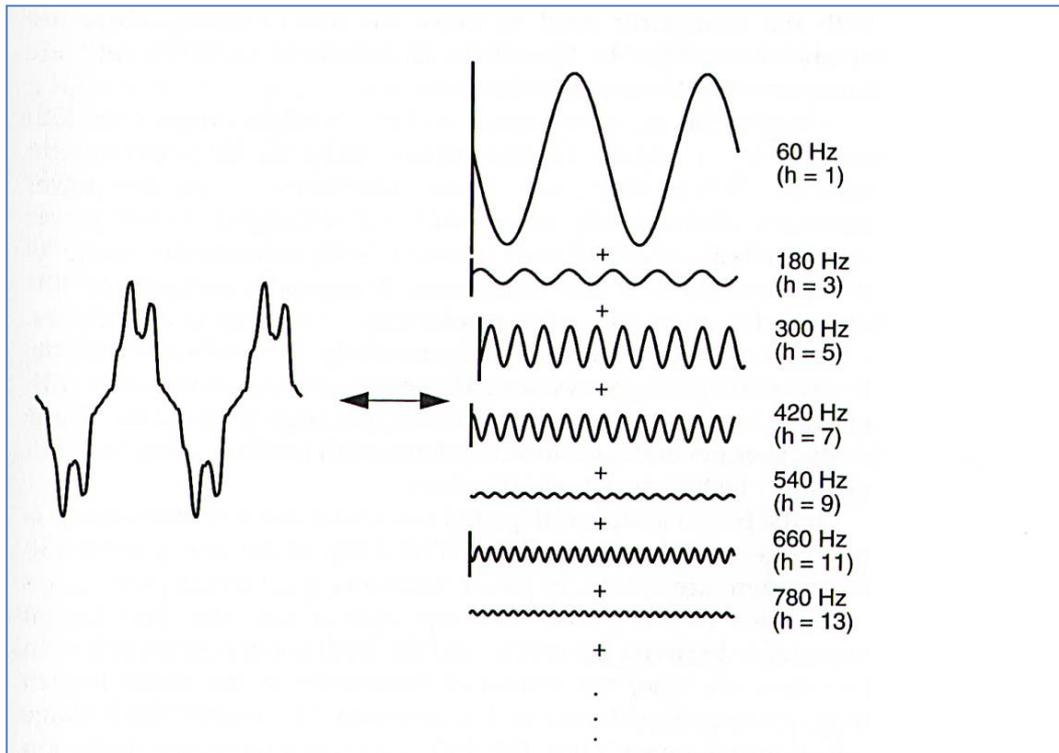


# Qualidade da Energia Elétrica



# 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*

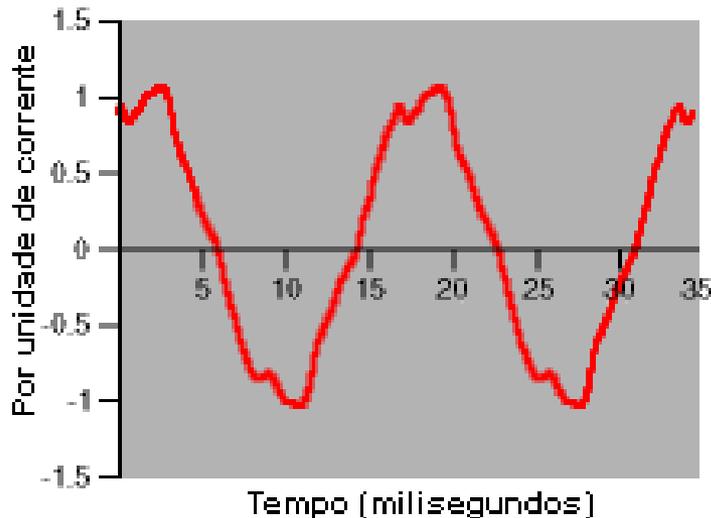
## Caracterização da distorção harmônica

- ✓ **“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*

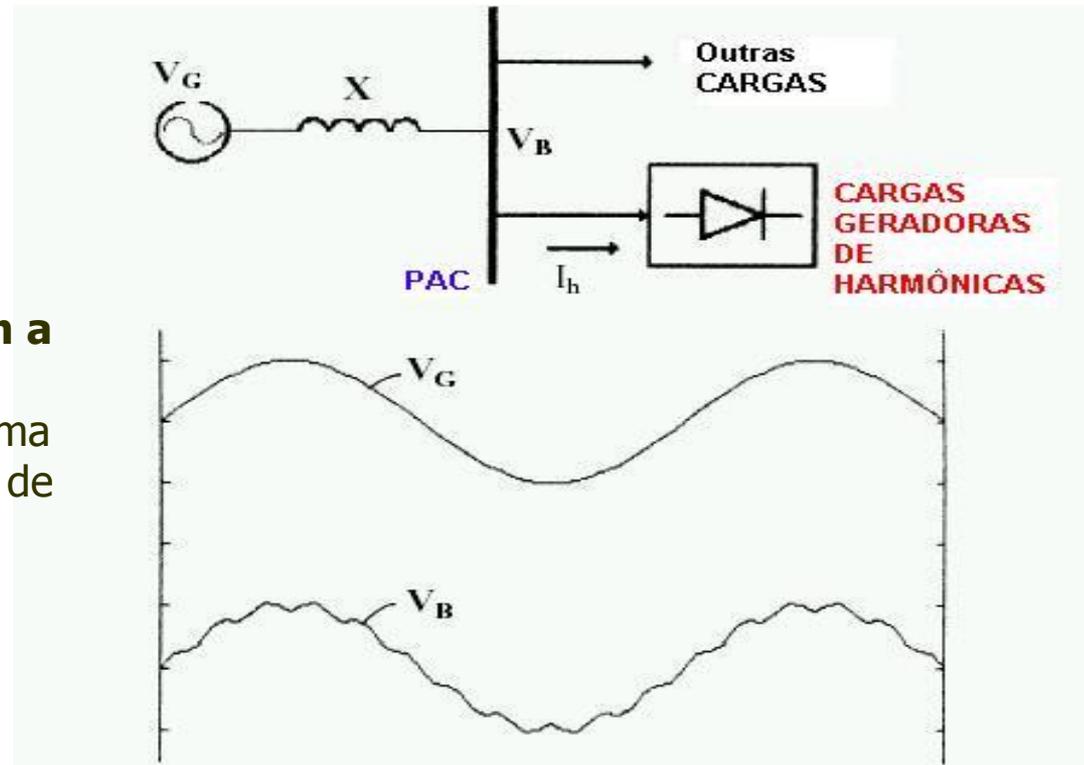
## Caracterização da distorção harmônica

- ✓ 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

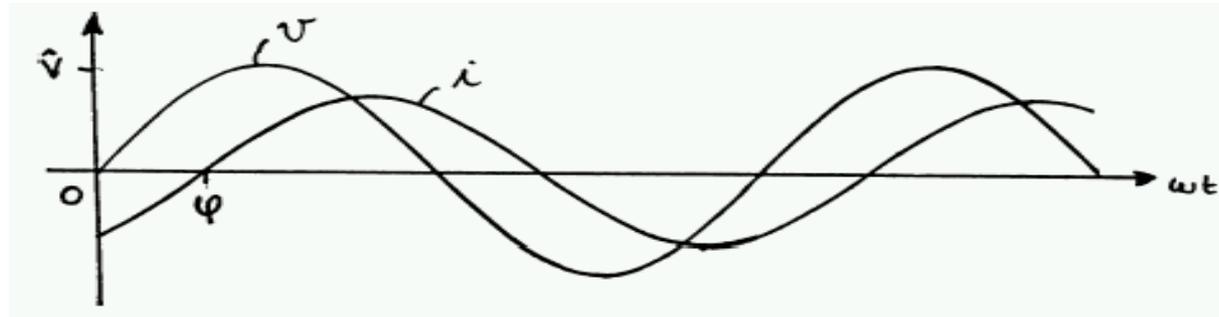
✓ A interação de uma corrente não-senoidal consumida por uma carga geradora de harmônicas, com a reatância do sistema alimentador, dá origem à uma tensão distorcida no Ponto de Acoplamento Comum - PAC.



# 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

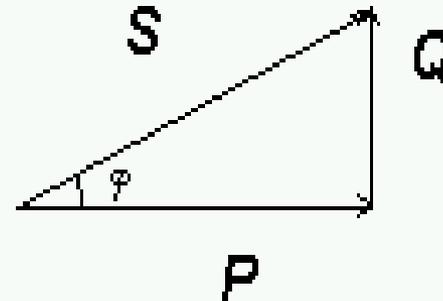
Potência ativa:  $P = V_{ef} I_{ef} \cos \Theta$  (W)

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:

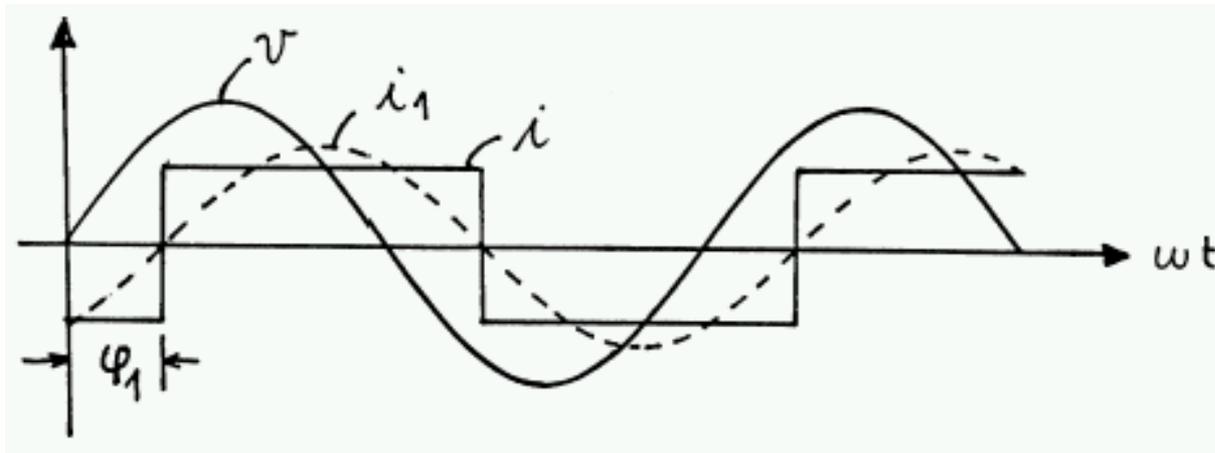


$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

# 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  $\theta_1$  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:

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

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

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

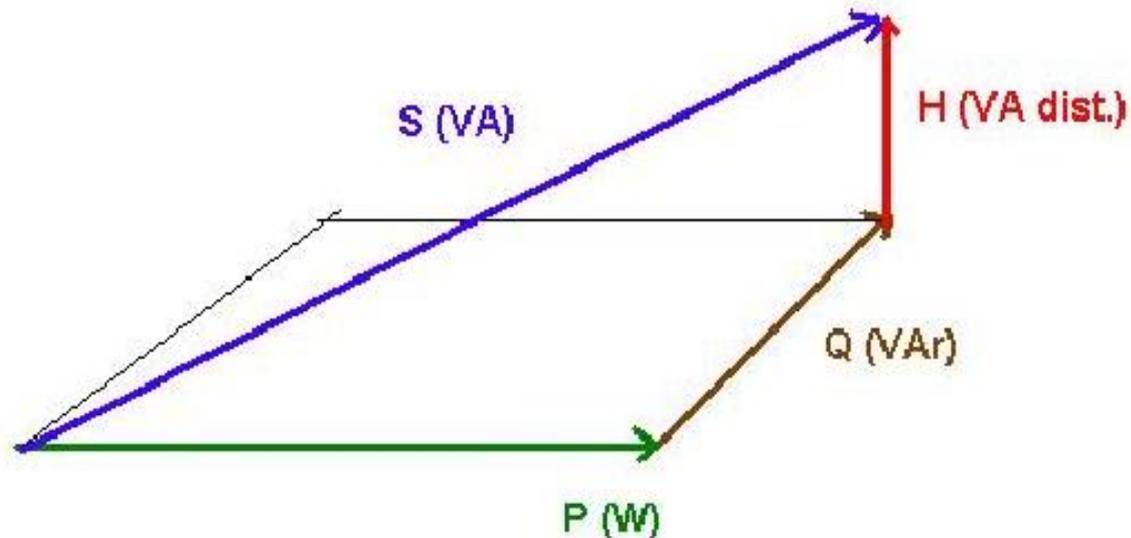
$$S^2 = V_{ef}^2 I_{1ef}^2 \cos^2 \Theta_1 + V_{ef}^2 I_{1ef}^2 \sin^2 \Theta_1 + V_{ef}^2 \sum_3^n I_{nef}^2$$

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

# Qualidade da Energia Elétrica

Caracterização da distorção harmônica:  $f_p$

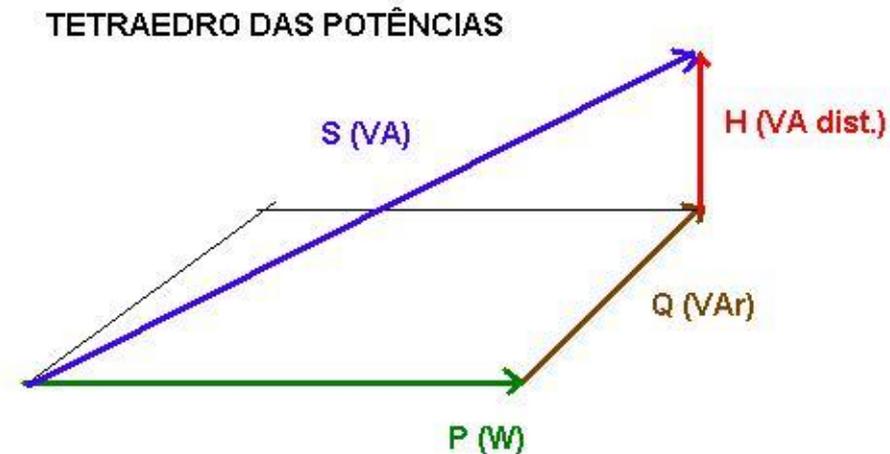
Tetraedro de potências:



# 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:  $f_p$

- ✓ **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).**

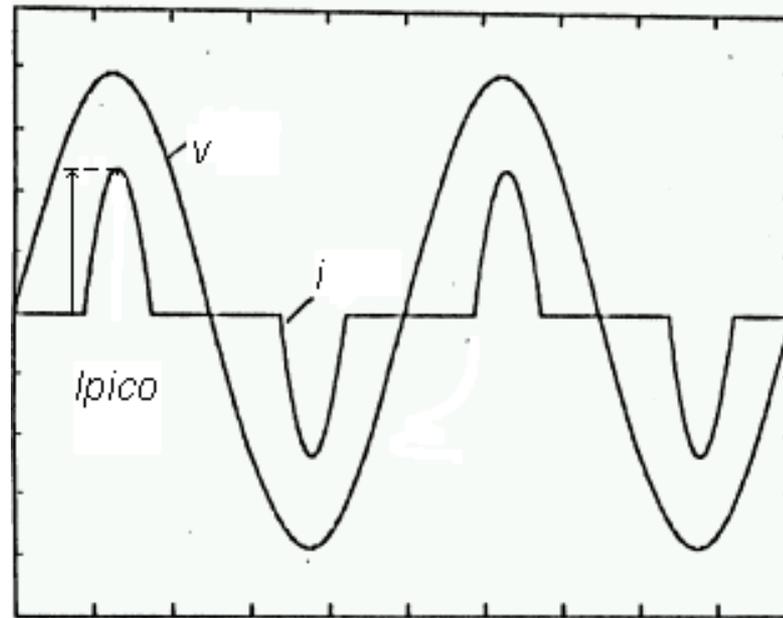
# Qualidade da Energia Elétrica

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:  $fc$

- ✓ Para uma **onda senoidal** pura:

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

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

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

# 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

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

**DHV<sub>T</sub>** é a Distorção Harmônica Total de Tensão

**DHI<sub>T</sub>** é a Distorção Harmônica Total de Corrente

**V<sub>n</sub>** é o valor eficaz da tensão de ordem *n*

**I<sub>n</sub>** é o valor eficaz da corrente de ordem *n*

**V<sub>1</sub>** é o valor eficaz da tensão fundamental

**I<sub>1</sub>** 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

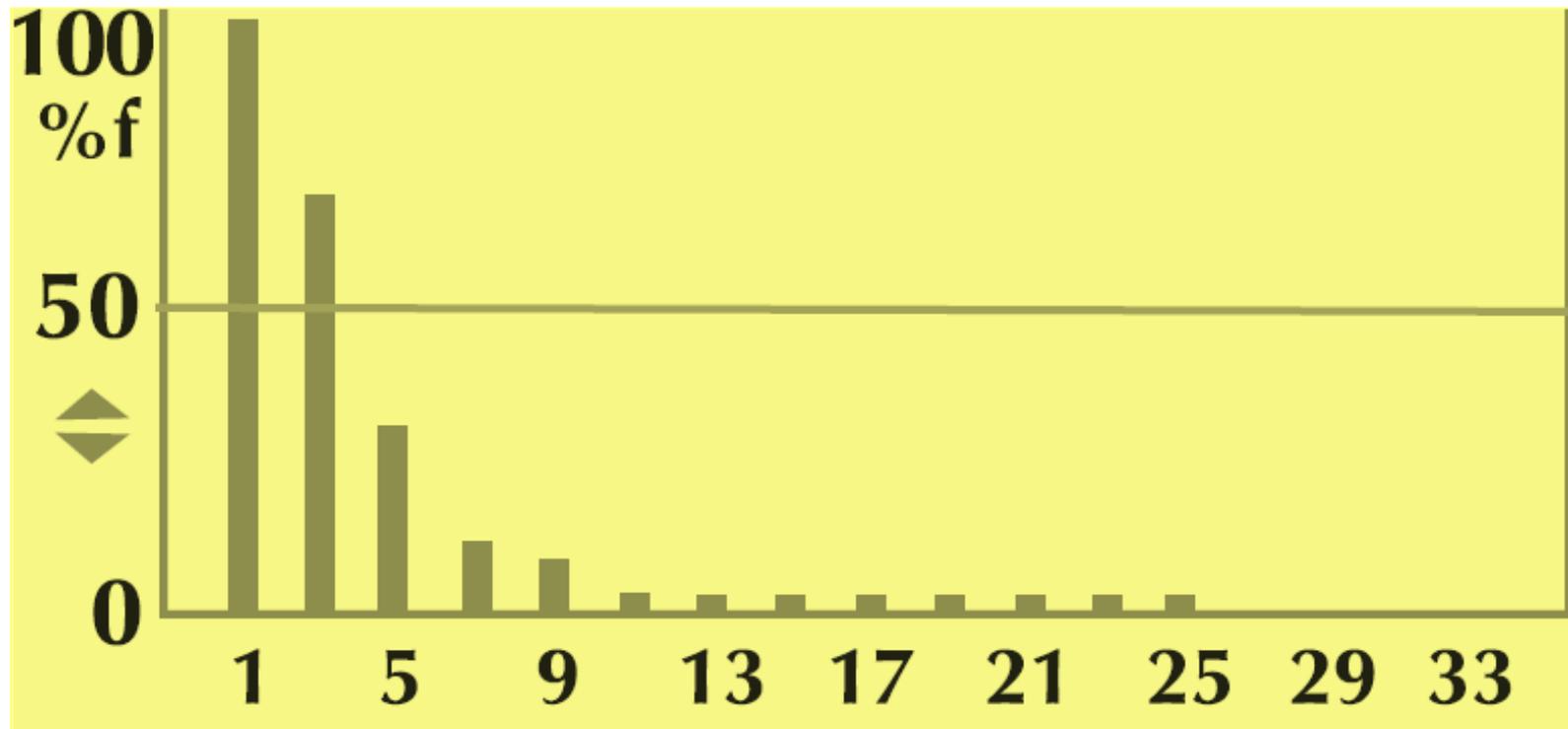
# Qualidade da Energia Elétrica

## 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

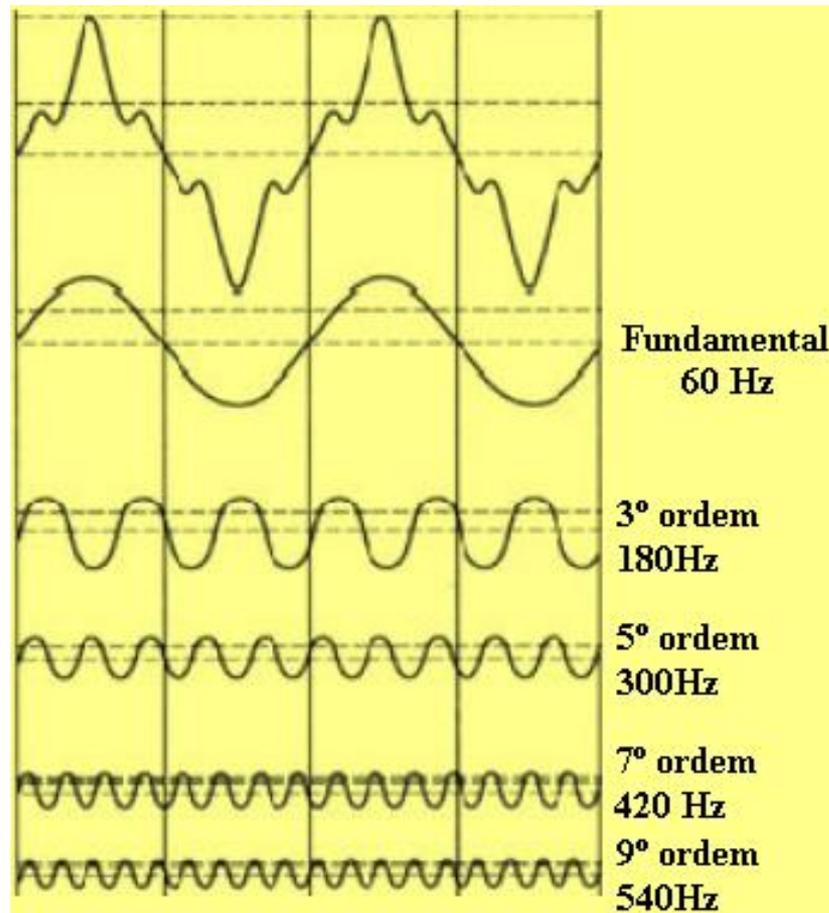
Efeitos da distorção harmônica: decomposição por *Fourier*



(???)

# Qualidade da Energia Elétrica

Efeitos da distorção harmônica: decomposição por *Fourier*



# Qualidade da Energia Elétrica

## Efeitos da distorção harmônica

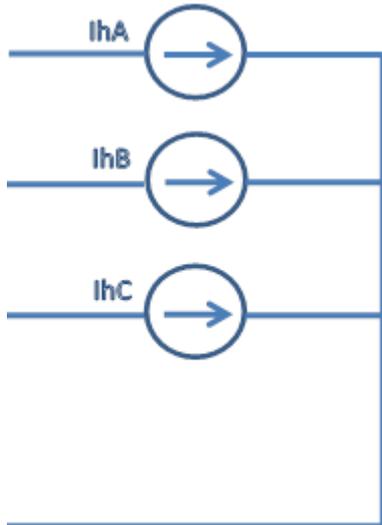
- ✓ **Pares ( $n = 2, 4, 6, \dots$ ):** pode existir se a corrente tiver um valor médio (em alimentação CA – não dever existir).
- ✓ **Ímpares ( $n = 3, 5, 7, \dots$ ):** características de uma alimentação CA.
- ✓ **Não características:** por exemplo 7,5 Hz (sub-harmônica) é par ou é ímpar?

# Qualidade da Energia Elétrica

Efeitos da distorção harmônica: sequência das componentes

- ✓ **Direta:** mesma sequência da alimentação. Por exemplo a 7<sup>a</sup> componente harmônica (420 Hz) no MIT caracteriza um torque direto.
- ✓ **Inversa:** contrária em relação à direta. Por exemplo a 5<sup>a</sup> componente harmônica (300 Hz) no MIT caracteriza um torque reverso.
- ✓ **Zero ou homopolar:** por exemplo a 3<sup>a</sup> 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<br><b>positiva (+)</b>     | $i_{1A} = I_{1A} \text{sen}(wt - \phi_{11})$ $i_{1B} = I_{1B} \text{sen}(wt - \phi_{12} - 120^\circ)$ $i_{1C} = I_{1C} \text{sen}(wt - \phi_{13} + 120^\circ)$   |
| $\phi_{11} = \phi_{12} = \phi_{13} = \phi_n$ |  |
| Sequência de fase<br><b>negativa (-)</b>     | $i_{2A} = I_{2A} \text{sen}2(wt - \phi_2)$ $i_{2A} = I_{2A} \text{sen}(2wt - 2\phi_2)$ $i_{2B} = I_{2B} \text{sen}2(wt - \phi_2 - 120^\circ) = I_{2B} \text{sen}(2wt - 2\phi_2 - 240^\circ)$ $i_{2B} = I_{2B} \text{sen}(2wt - 2\phi_2 + 120^\circ)$ $i_{1C} = I_{2C} \text{sen}2(wt - \phi_2 + 120^\circ) = I_{2C} \text{sen}(2wt - 2\phi_2 + 240^\circ)$ $i_{1C} = I_{2C} \text{sen}(2wt - 2\phi_2 - 120^\circ)$ |
| Sequência de fase<br><b>zero (0)</b>         | $i_{3A} = I_{3A} \text{sen}3(wt - \phi_3)$ $i_{3A} = I_{3A} \text{sen}(3wt - 3\phi_3)$ $i_{3B} = I_{3B} \text{sen}3(wt - \phi_3 - 120^\circ) = I_{3B} \text{sen}(3wt - 3\phi_3 - 360^\circ)$ $i_{3B} = I_{3B} \text{sen}(3wt - 3\phi_3)$ $i_{3C} = I_{3C} \text{sen}3(wt - \phi_3 + 120^\circ) = I_{3C} \text{sen}(3wt - 3\phi_3 + 360^\circ)$ $i_{3C} = I_{3C} \text{sen}(3wt - 3\phi_3)$                         |

# 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

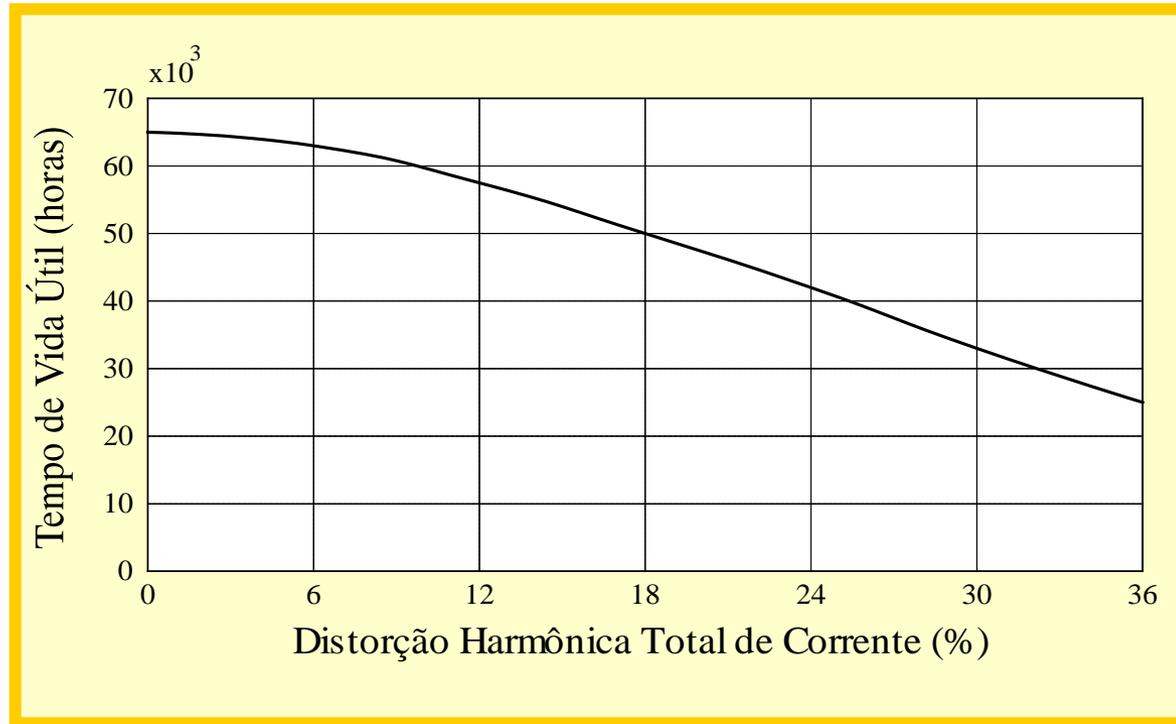
- **sobreaquecimento** causado pelo aumento das perdas *Joulicas*, além de intensificar as fugas tradicionalmente manifestadas nos **isolamentos**.

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



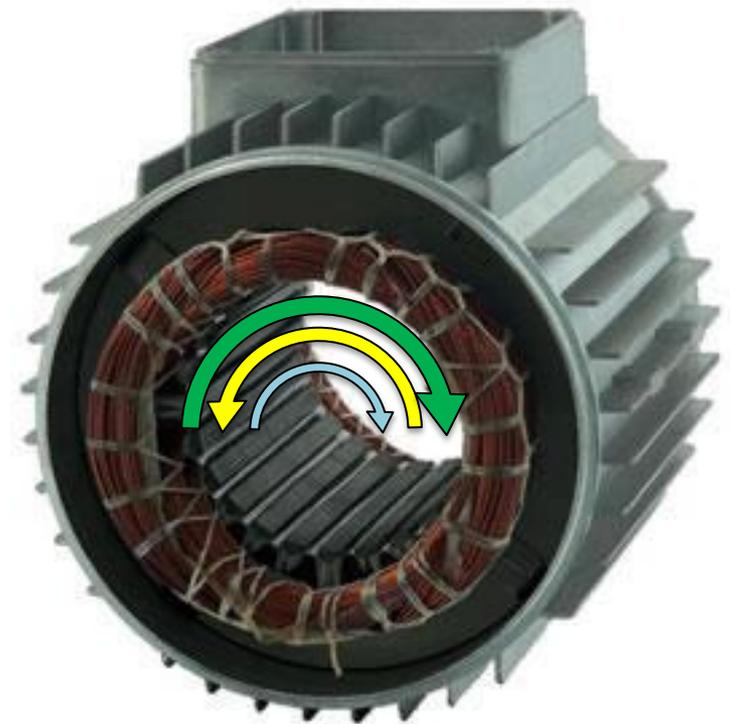
- ✓ Vida útil de um transformador em função da distorção harmônica de corrente.

# Qualidade da Energia Elétrica

Efeitos da distorção harmônica:

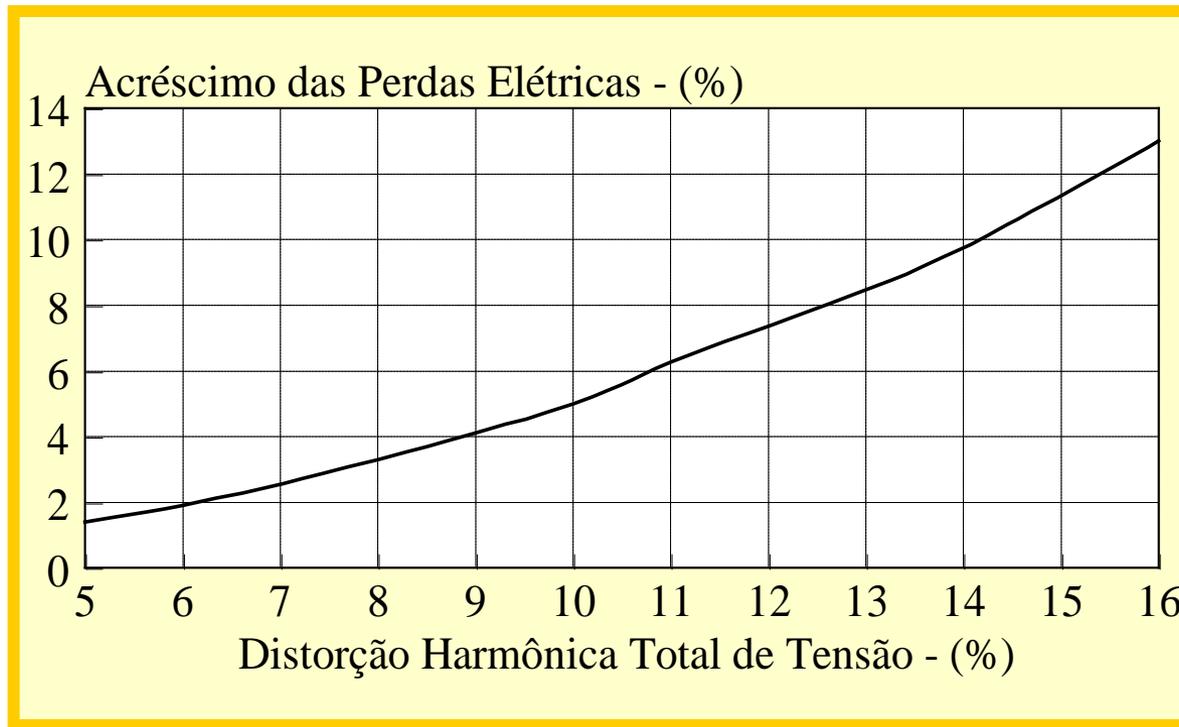
- ✓ **Motores de indução**
  - **sobreaquecimento** de seus enrolamentos

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**.

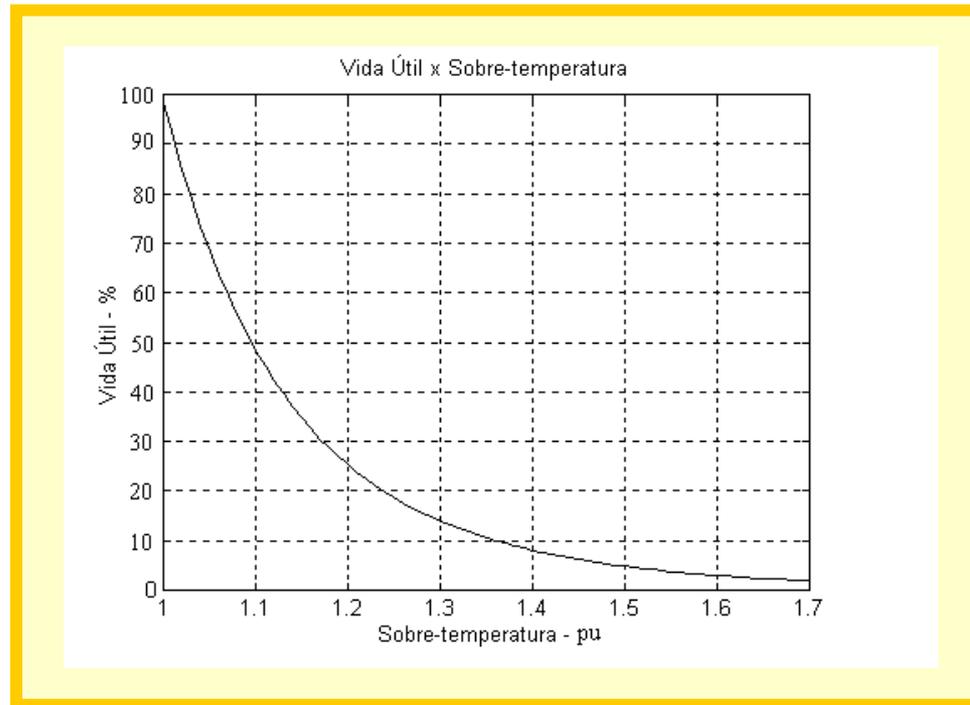
# Qualidade da Energia Elétrica

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

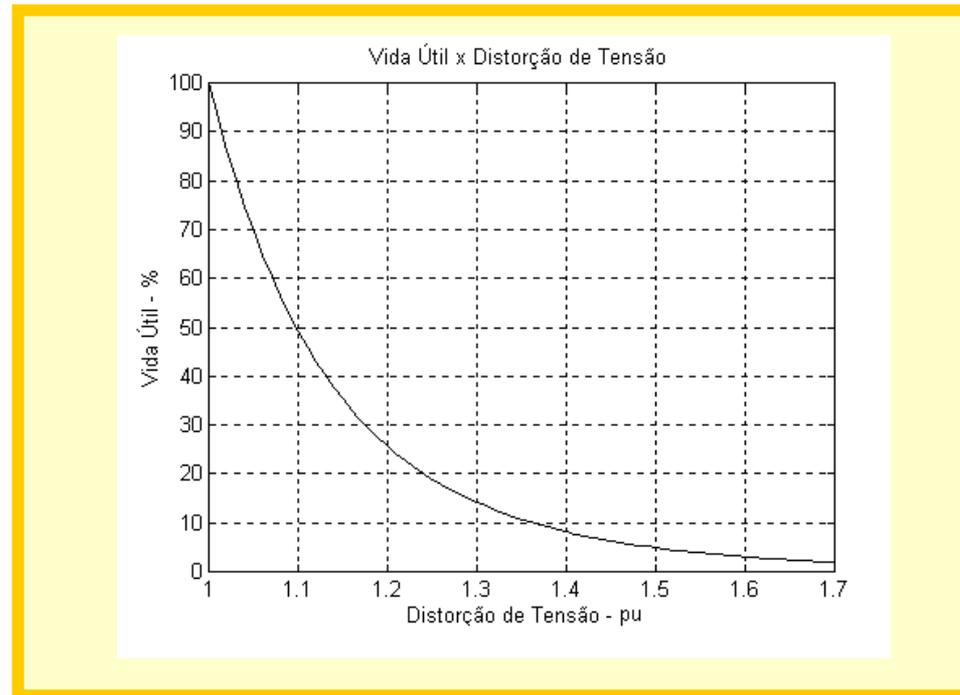
Efeitos da distorção harmônica: BCs



Vida útil *versus* sobreaquecimento em capacitores.

# Qualidade da Energia Elétrica

Efeitos da distorção harmônica: BCs



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

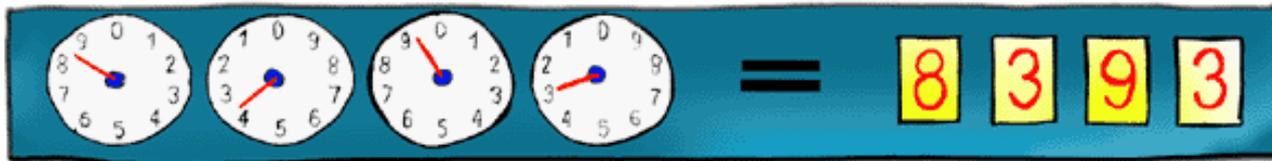
# Qualidade da Energia Elétrica

## Efeitos da distorção harmônica

### ✓ Medidores de energia

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

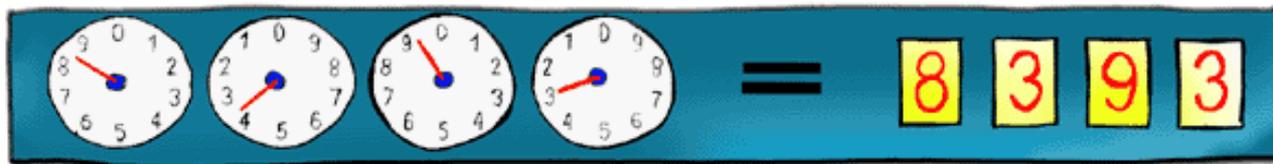
O conjugado motor do medidor, associado ao registro de energia, é obtido em função da interação entre uma corrente “ $I$ ” e um fluxo “ $\phi$ ”, este último oriundo da tensão aplicada ao medidor.



# 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](mailto:olesk@sc.usp.br)

Fone: 016 3373 8142

Muito obrigado pela atenção!