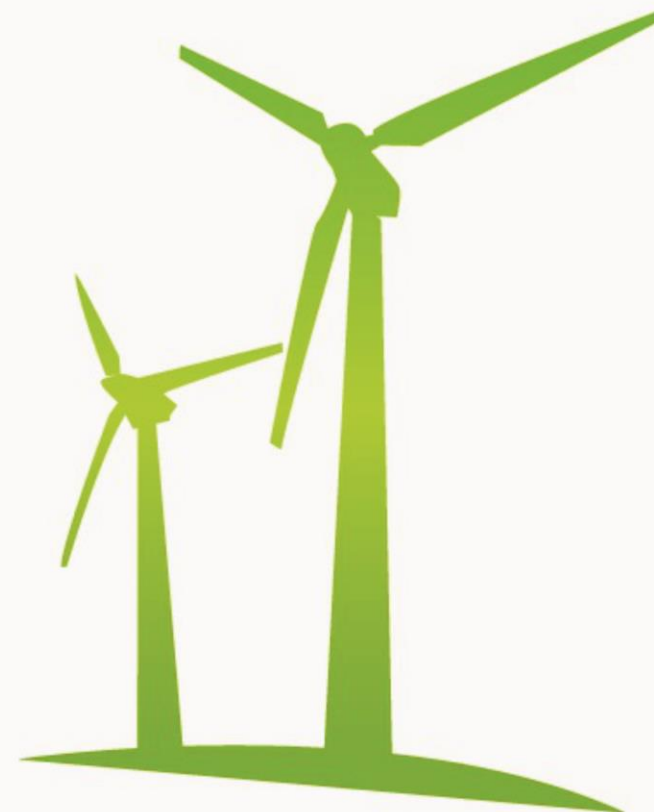
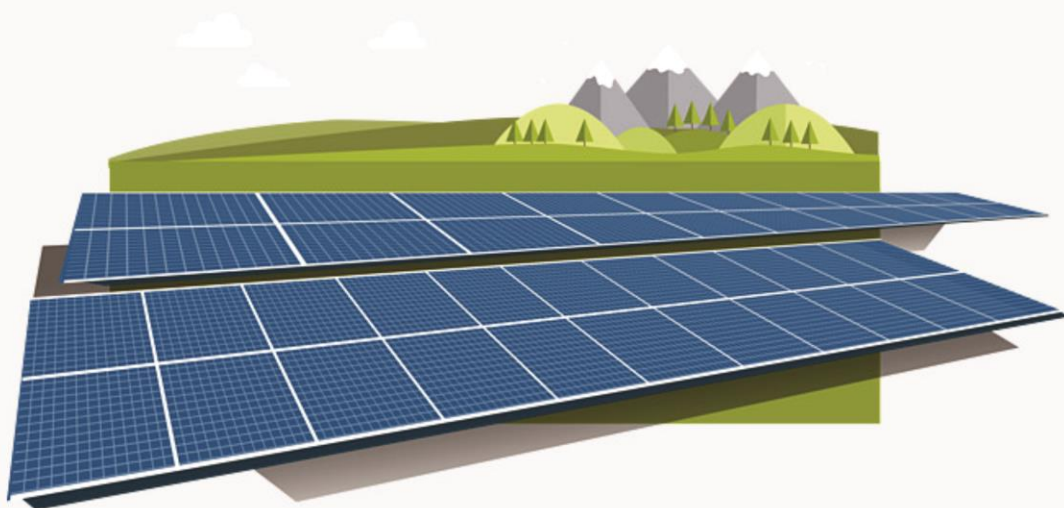


# Qualidade de Energia – ELT 448

## Aula 7 – Distorção da forma de onda

Victor Dardengo



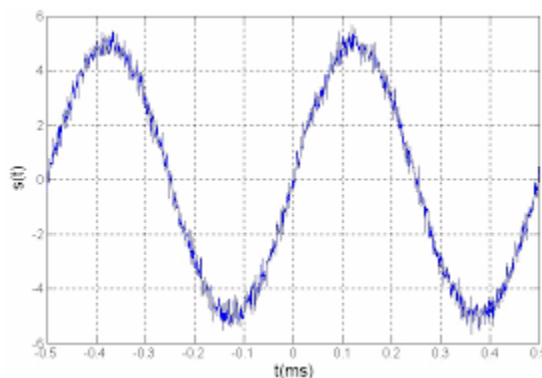
# Revisão das aulas passadas

- VTCD;
- VTLD;
- Transitórios;
- Sobretensão;
- Subtensão;
- Causas e efeitos;
- Curva de suportabilidade;
- Fator de desequilíbrio;
- Reportagens.

# Distorção da forma de onda

- Há cinco tipos principais de distorção da forma de onda:

- Nível CC;
- Inter-harmônica,;
- Distúrbio periódico de tensão;
- Ruído; e
- Harmônica



# Distorção da forma de onda – Nível CC

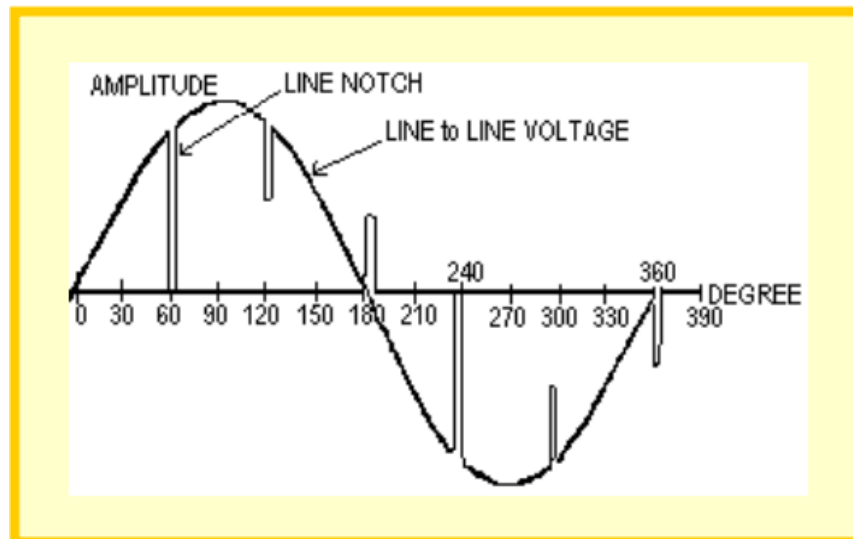
- A presença de um componente DC na tensão ou corrente em um sistema de energia AC é determinado DC offset. Este pode ocorrer devido a operação de retificadores de meia-onda.
- A presença de um componente DC na tensão ou corrente em um sistema de energia AC é determinado DC offset. Este pode ocorrer devido a operação de retificadores de meia-onda.

# Distorção 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.
- 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.

# Distorção da forma de onda – Distúrbio periódico de tensão

- 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.



# **Distorção da forma de onda – Distúrbio periódico de tensão**

- 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.



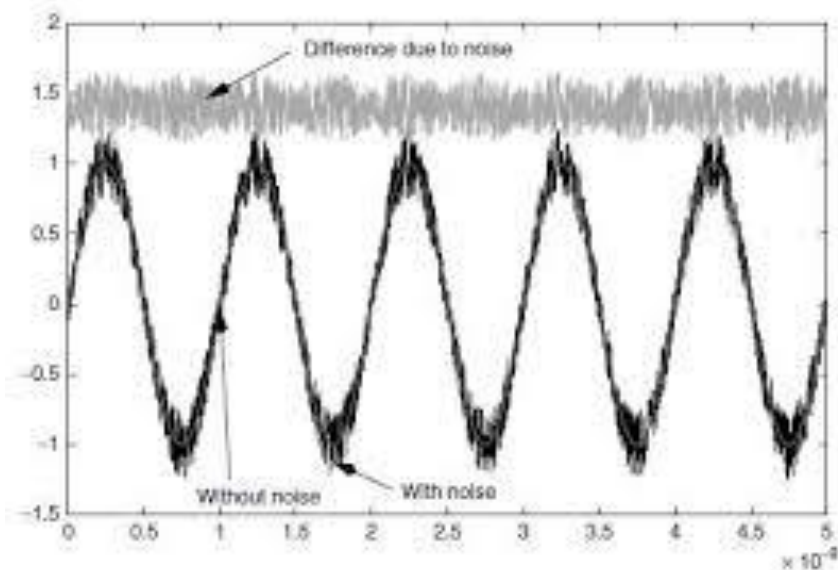
# **Distorção da forma de onda – Distúrbio periódico de tensão**

- 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.



# Distorção 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.

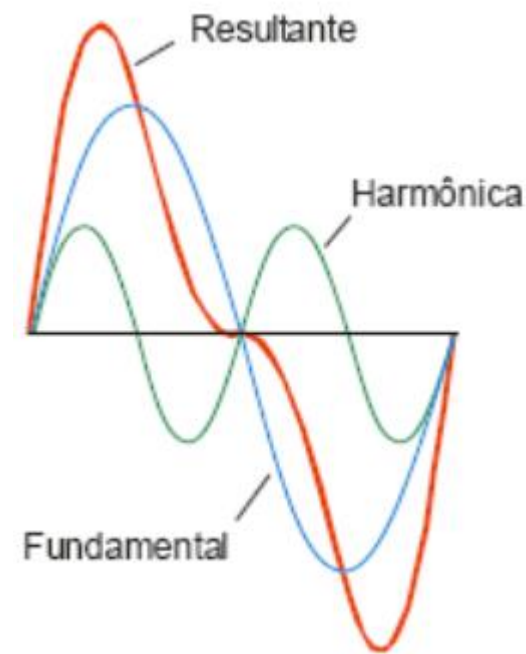


# Distorção da forma de onda – Ruído

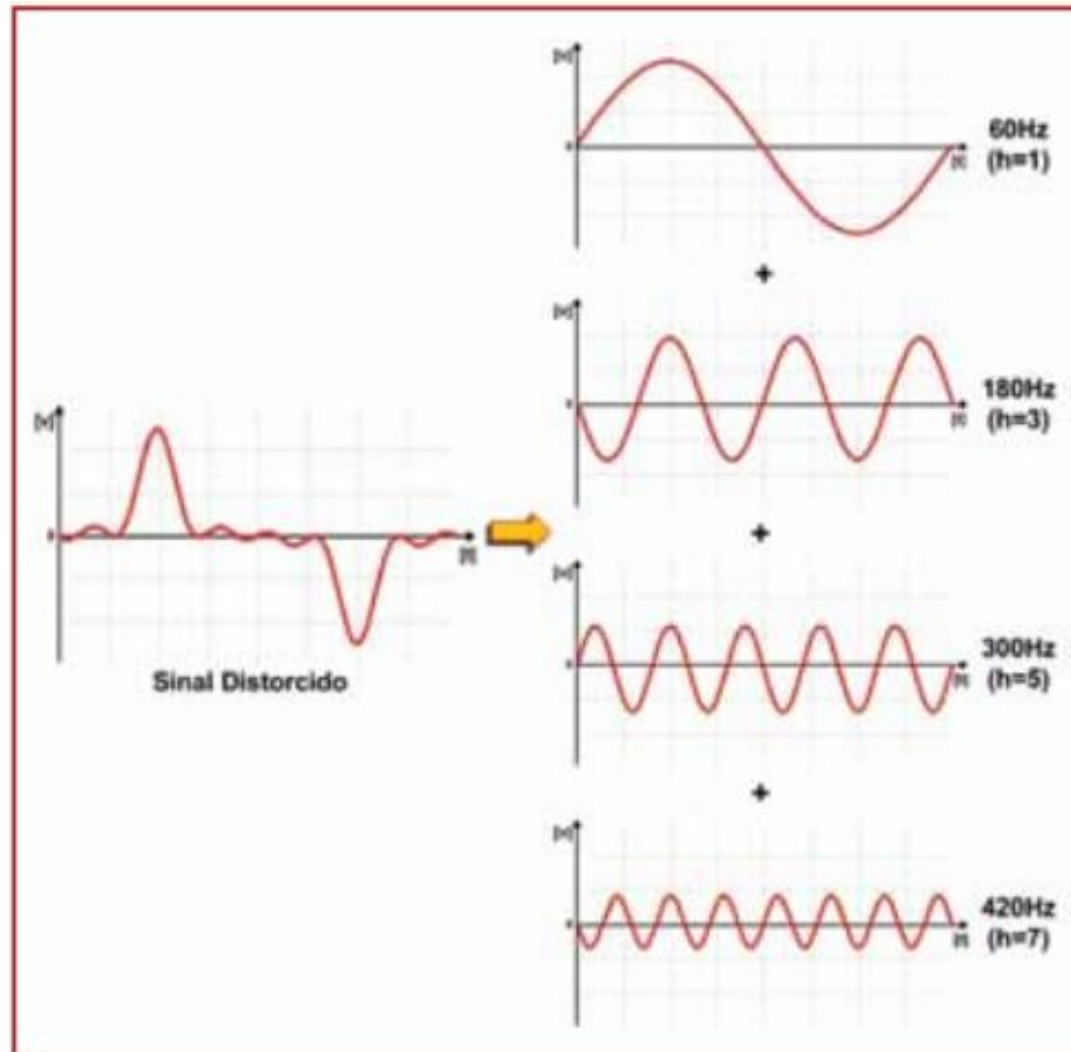
- Podem ser causados em sistemas de energia por equipamentos eletrônicos, circuitos de controle, equipamentos a arco, cargas com retificadores e fontes chaveadas e, via de regra, estão relacionados com aterramentos impróprios.
- O problema pode ser atenuado pelo uso de filtros, isolamento dos transformadores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

# Harmônicas

- As harmônicas são frequências múltiplas inteiras de uma frequência fundamental!
- As harmônicas são ordenadas de acordo com o múltiplo que dá origem à elas, sendo a harmônica fundamental de 60Hz, a 2ª harmônica de 120 Hz, a 3ª harmônica de 180 Hz e assim por diante.
- A quantidade e amplitude de cada harmônica é um dos parâmetros que usamos para medir a qualidade da energia elétrica, ou seja, quanto mais harmônicas pior é a qualidade da energia elétrica na rede!



# Harmônicas



# Harmônicas

- Existem 3 aspectos que são considerados gerias se tratando de harmônicas.
- É um fenômeno de longa duração;.
- Quanto maior a ordem da harmônica, menor sua intensidade;.
- As harmônicas de ordem ímpar são mais frequentes, de maior intensidade, gerando mais problemas.

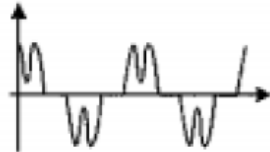
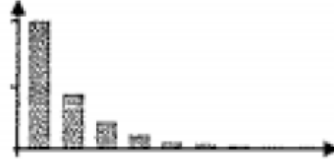


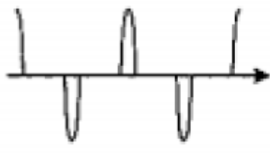
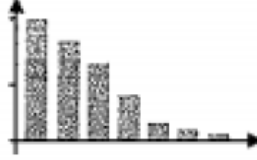
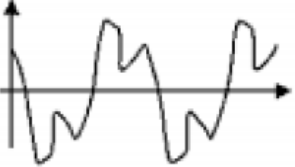
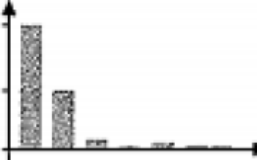
# Harmônicas

- **Como são criadas?**
- A princípio, qualquer componente que utilize energia da rede elétrica de forma não linear pode causar harmônicas! Exemplos:
  - Fontes chaveadas;
  - Lâmpadas fluorescentes ou de LED;
  - Computadores;
  - Carregadores de celular;
  - Eletrônicos em geral.



# Harmônicas

- Exemplos de formas de onda de correntes distorcidas em cargas eletrônicas.

Cargas não lineares	Forma de onda	Espectro de frequência
Acionamento de velocidade variável		
Carregador de bateria		
Processamento de dados		
Lâmpada fluorescente		



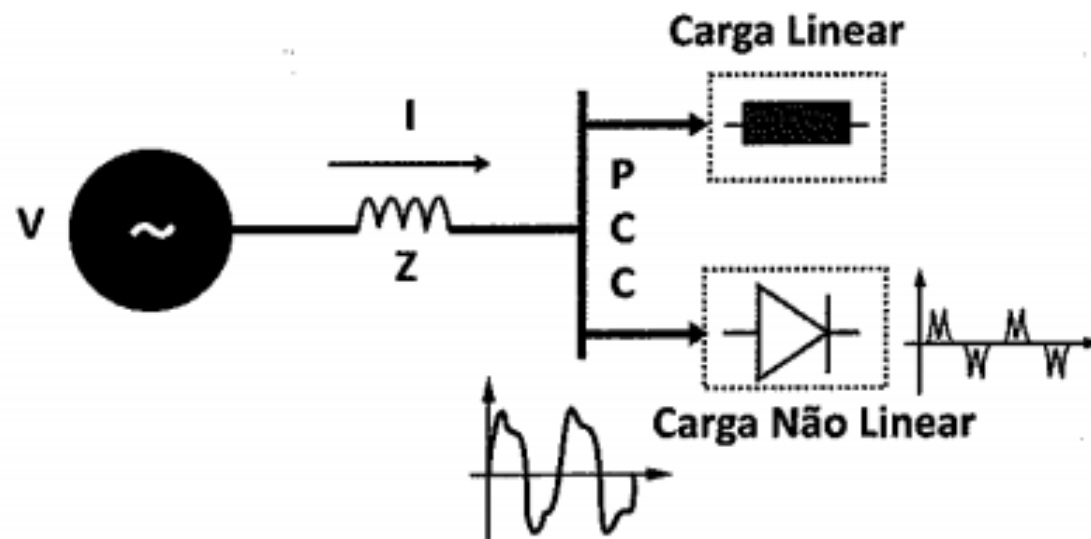
# Harmônicas

- 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.
- A natureza e a magnitude das distorções harmônicas geradas por cargas não lineares dependem de cada carga em específico



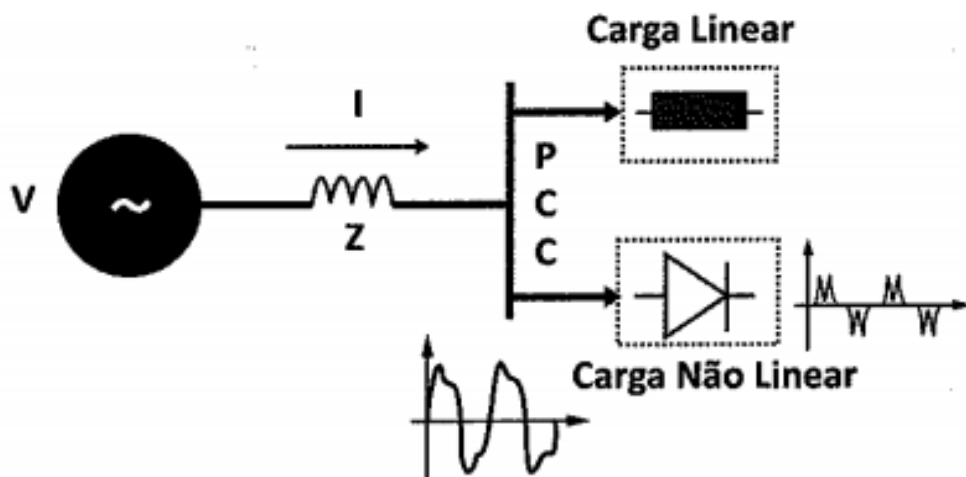
# Interação entre Carga e Fonte

- A QEE é uma via de mão dupla, visto que:
  - a qualidade da tensão de suprimento tem influência no perfil da corrente que circula na instalação; e
  - a natureza da carga pode influenciar o perfil de tensão



# Interação entre Carga e Fonte

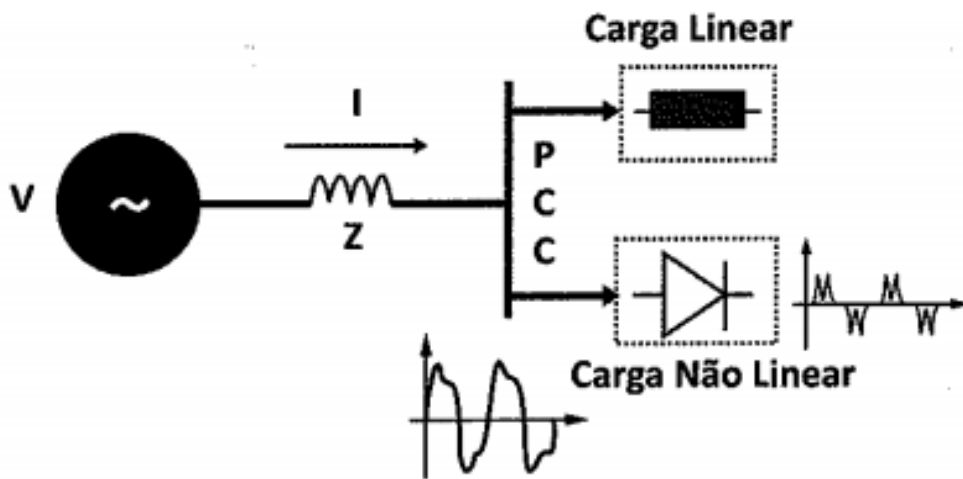
- Quando energizadas por fonte não distorcida (senoidal):
  - Cargas lineares produzem correntes não distorcidas;
  - Cargas não lineares produzem correntes distorcidas (não senoidais). Distorcem  $\Delta V_Z$  quando as correntes fluem através de  $Z$ , podendo alterar a conformidade da tensão no PCC (Ponto Comum de Conexão).



$$V_{PCC} = V - \Delta V_Z$$

# Interação entre Carga e Fonte

- 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.



$$V_{PCC} = V - \Delta V_Z$$

## Causas e efeitos

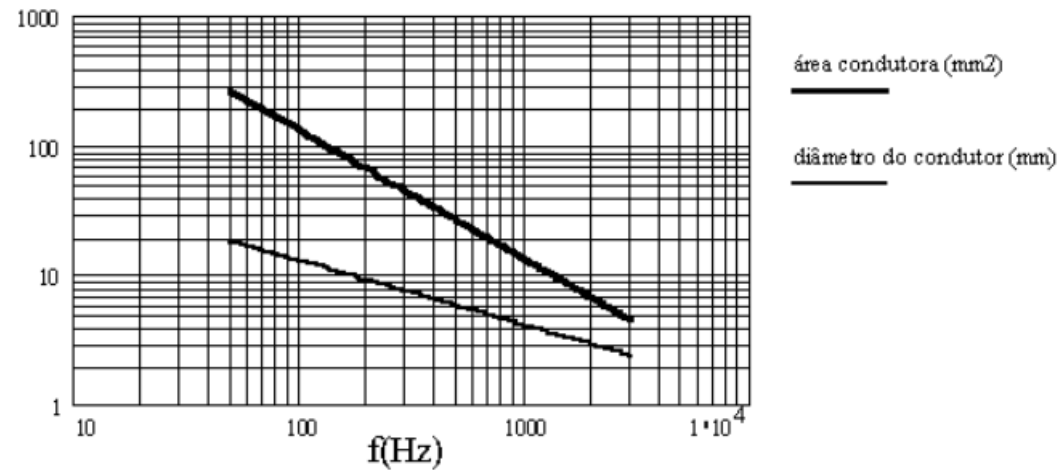
- Altos níveis de distorções harmônicas em uma instalação elétrica podem causar problemas para as redes de distribuição das concessionárias, para a própria instalação e para os equipamentos ali instalados.
- As consequências podem chegar até a parada total de importantes equipamentos na linha de produção, acarretando prejuízos econômicos. Dentre eles, de maior importância estão a perda de produtividade e de vendas devido a paradas de produção, causadas por inesperadas falhas em motores, acionamentos, fontes ou simplesmente pelo "repicar" de disjuntores.
- O efeito direto das cargas não lineares sobre a QEE é a distorção na corrente, e o indireto, a distorção na tensão.

# Causas e efeitos

- As componentes harmônicas geradas por estas cargas não lineares propagam-se pela rede elétrica, resultando em sérios danos aos equipamentos elétricos e/ou eletrônicos. 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);

# Causas e efeitos - cabos

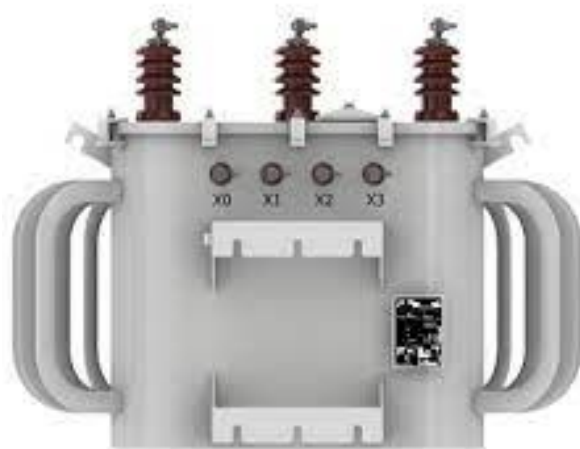
- Efeito pelicular, que restringe a secção condutora para componentes de frequência elevada;
- sobreaquecimento devido às perdas Joule; e
- maior solicitação do isolamento.
- Nível de distorção de tensão, abaixo do qual os cabos não são expressivamente afetados:  $\leq 10\%$ .





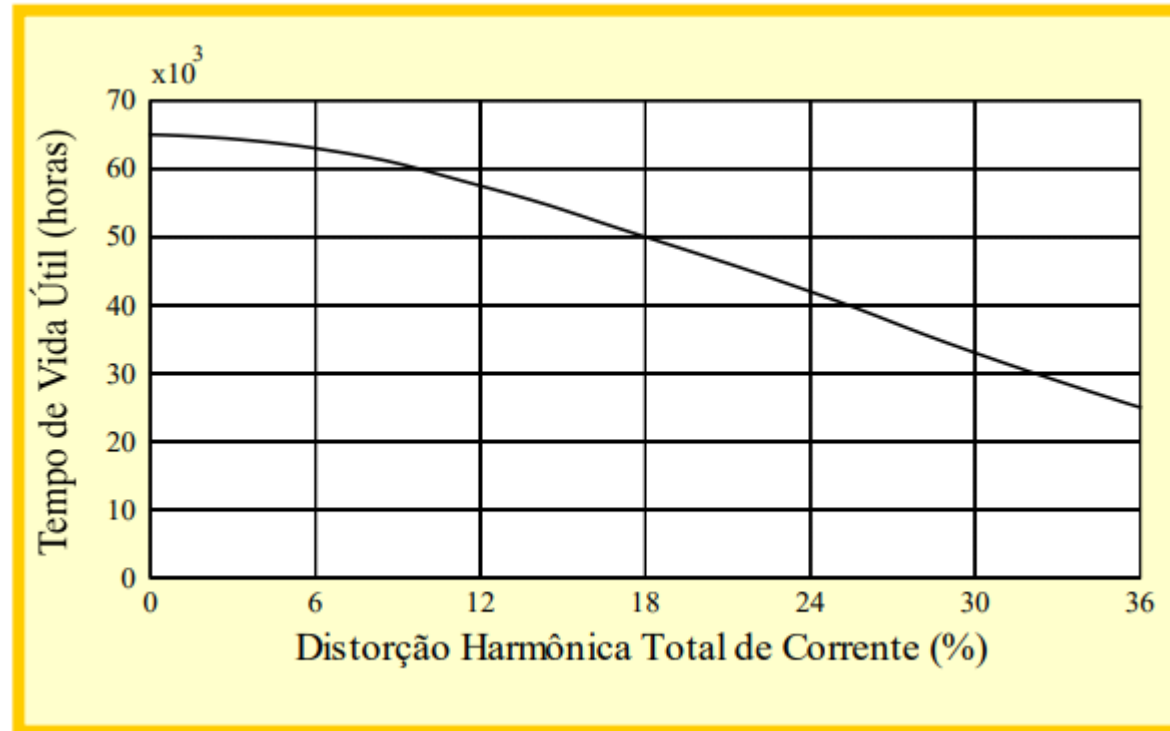
# Causas e efeitos - Transformadores

- **Sobreaquecimento** causado pelo aumento das perdas Joule, 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.



# Causas e efeitos - Transformadores

- Exemplo de influência da distorção harmônica na vida útil do transformador.



# Causas e efeitos – Motores

- 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;
- uma perda de rendimento devido ao surgimento de torques pulsantes



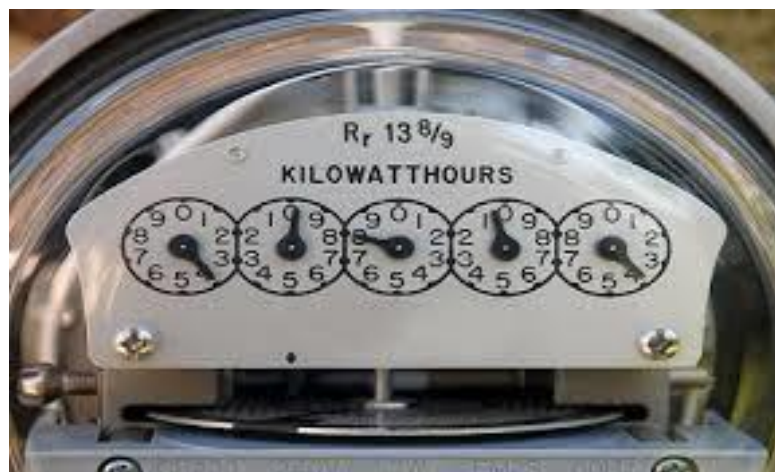
# Causas e efeitos – Motores

- 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;
- uma perda de rendimento devido ao surgimento de torques pulsantes



# Causas e efeitos – Medidores de energia

- O medidor de energia do tipo indução tem sua operação fundamentada no fenômeno da interação eletromagnética.
- Para assegurar uma operação segura dos medidores de energia, estabelece-se uma recomendação de limite de distorção apresentada por:  $\leq 20\%$

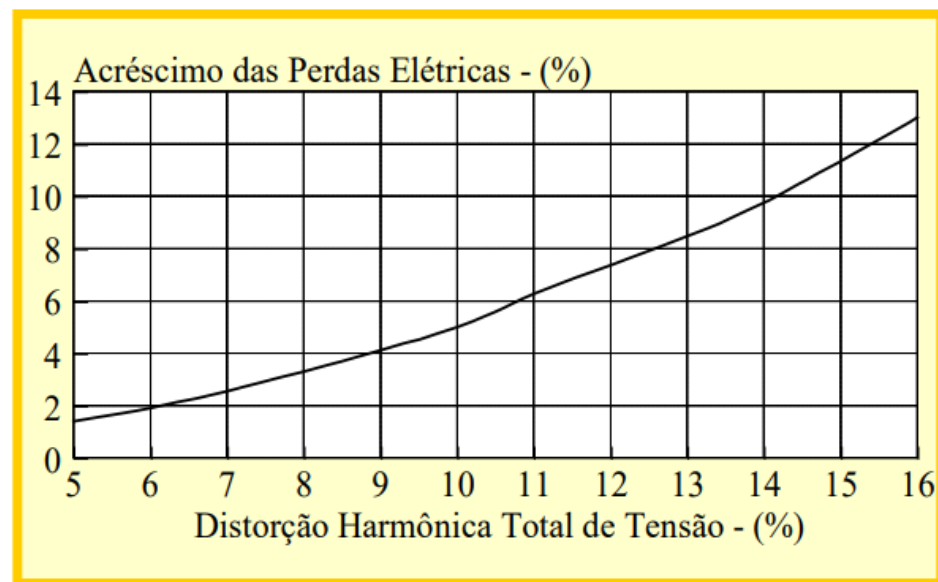


# Causas e efeitos – Dispositivos de proteção

- 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:  $\leq 5\%$ .

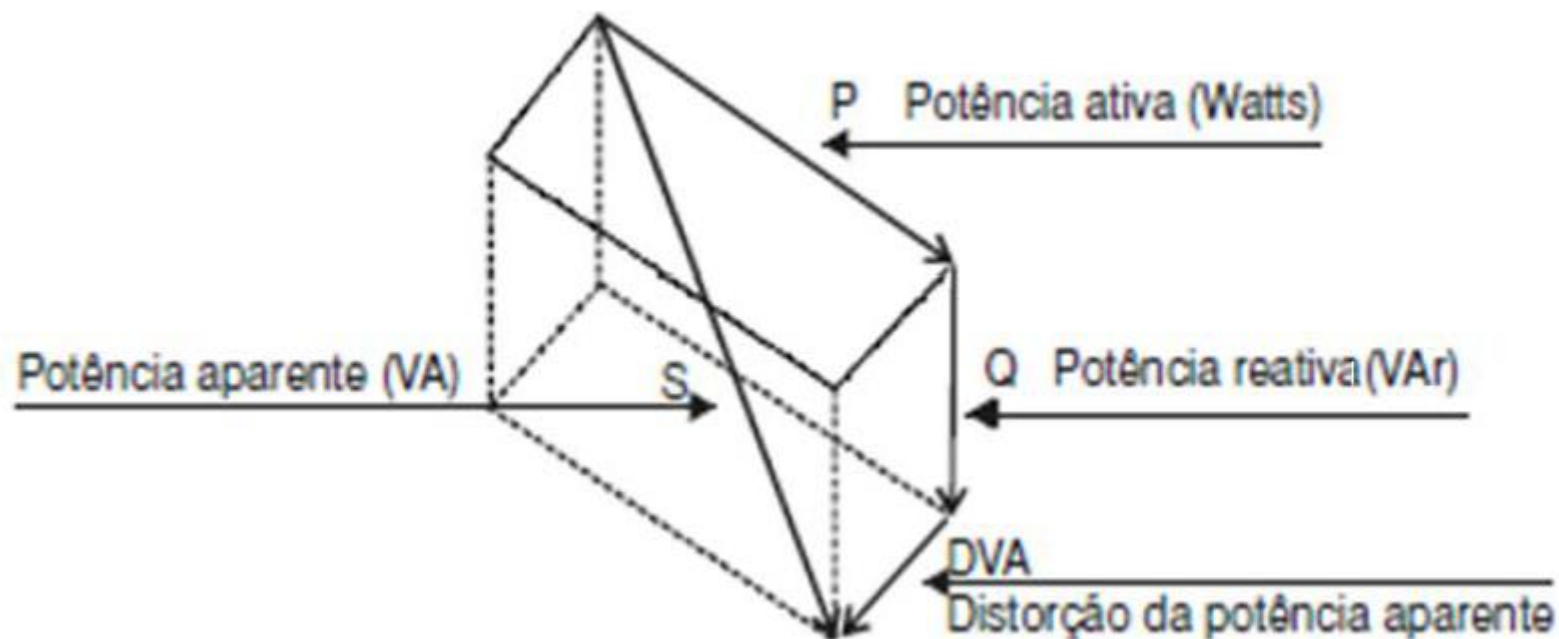
# Causas e efeitos – Motores

- 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  $3,5\%$ .
- Perdas elétricas de um motor de indução trifásico em função da distorção total de tensão.





# Tetraedro de potências



# Fator de potência

- Potência aparente: grandemente influenciada pela distorção, da tensão e/ou corrente.

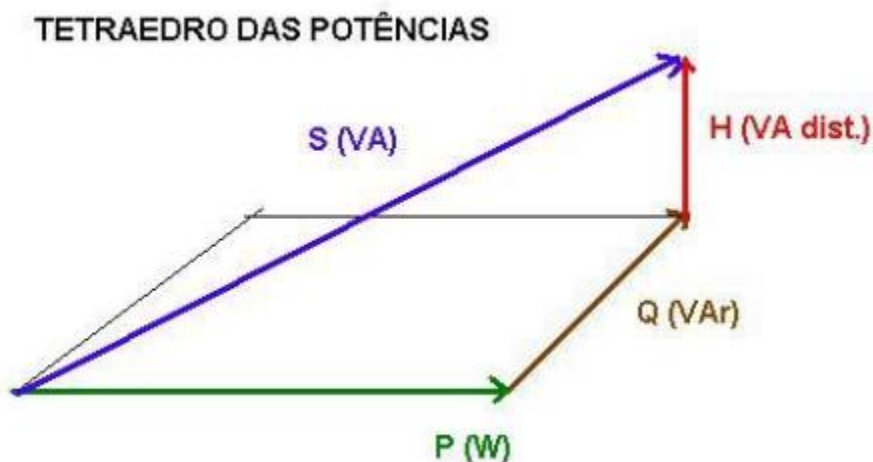
$$S = V_{rms} \cdot I_{rms}$$
$$= \left( \sqrt{V_0^2 + \sum_{k=1}^n V_{rms,k}^2} \right) \cdot \left( \sqrt{I_0^2 + \sum_{k=1}^n I_{rms,k}^2} \right)$$

- Se a distorção na tensão é desprezível:

$$S = V_{rms,1} \cdot \left( \sqrt{I_0^2 + \sum_{k=1}^n I_{rms,k}^2} \right) = V_{rms,1} \cdot \left( \sqrt{I_0^2 + I_{rms,1}^2 + I_{rms,2}^2 + \dots} \right)$$

# Fator de potência

- Atualmente as normas técnicas brasileiras regulamentam o fator de potência mínimo de uma instalação elétrica em 92% e em algumas classes de equipamentos este limite chega a 97%.
- Em consequência, na presença de harmônicas, a relação  $S^2 = P^2 + Q^2$  não é válida. Definida a potência de distorção D tal que:  $S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$



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

# Fator de potência

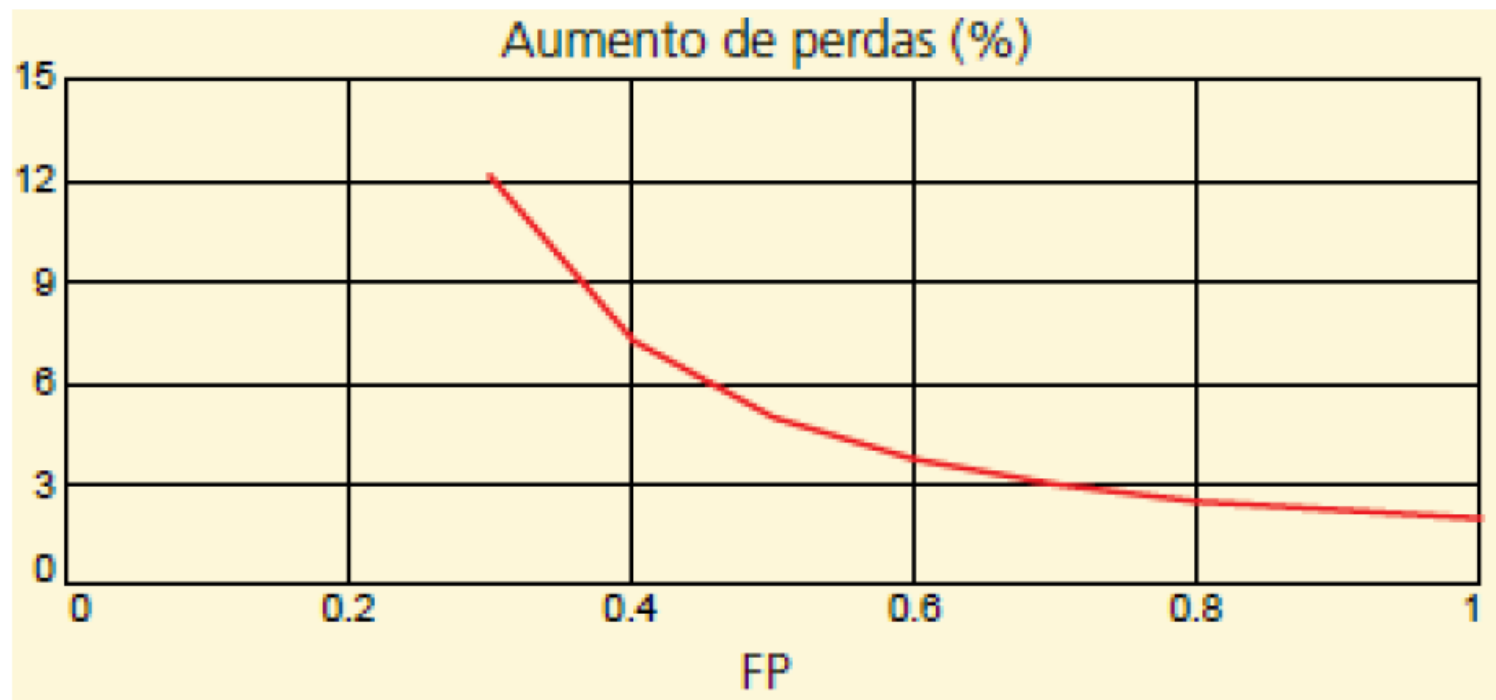
- **Potência aparente (S):** é a potência total que deve ser suprida pelo sistema alimentador. É a utilizada por exemplo, no dimensionamento do transformador e dos condutores do alimentador: Na potência S está envolvida a frequência da fonte e todas as outras frequências harmônicas geradas pela carga. P (W) e Q (var) são potências associadas a corrente na frequência fundamental (60 Hz).
- **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).**

# Fator de potência

- **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.
- **Potência reativa de distorção (H):** envolve todas as frequências harmônicas e pode ser compensada 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.

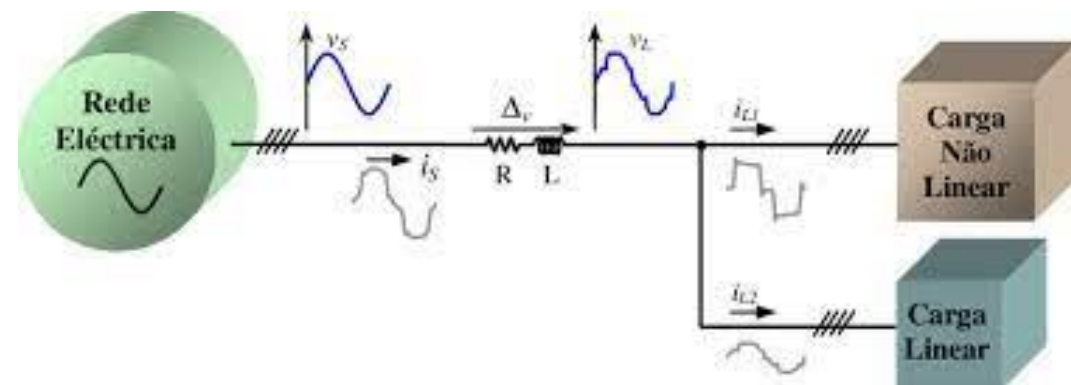
# Fator de potência

- As perdas de transmissão de energia elétrica são proporcionais ao quadrado da corrente eficaz que circula pelos condutores. Assim, para uma dada potência ativa, quanto menor for o FP, maior será a potência reativa e, conseqüentemente, a corrente pelos condutores.



# Harmônicos

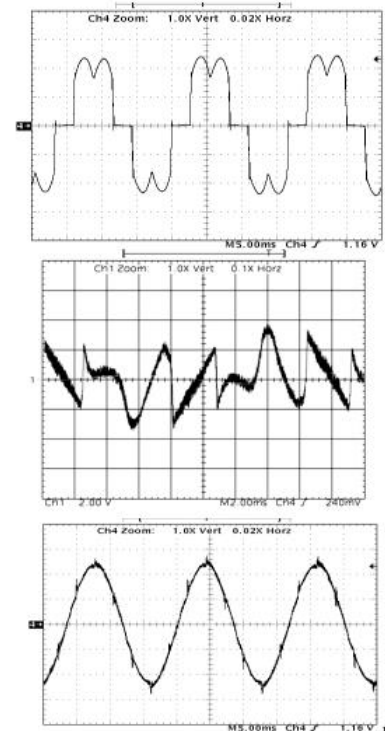
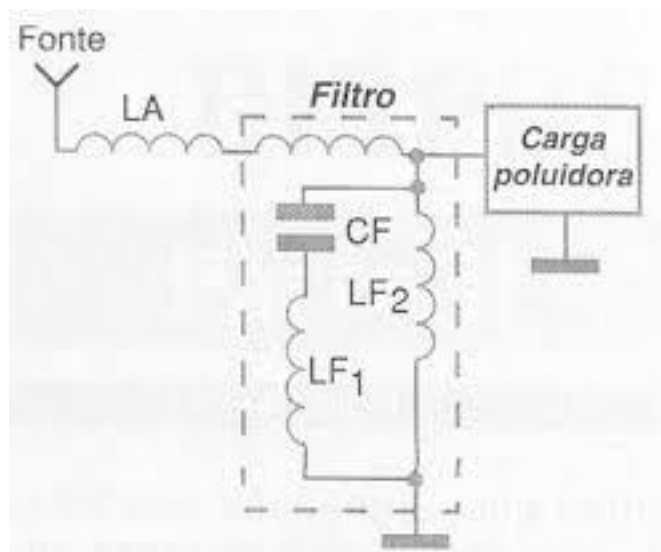
- Estudos de harmônicos são realizados para:
  - investigar o impacto de dispositivos não lineares;
  - calcular níveis de distorção harmônica;
  - determinar condições de ressonância; e
  - determinar requisitos de filtragem em uma instalação.





# Mitigação de harmônicos

- 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 sistema elétrico.



Forma de Onda  
Carga

+

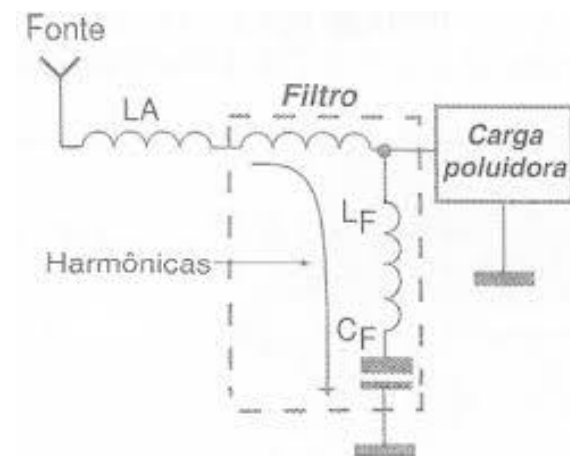
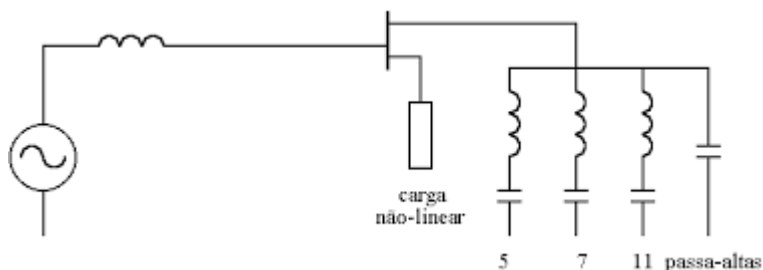
Forma de Onda  
Saída de corrente  
do Accusine

=

Forma de Onda  
Carga

# Filtros Passivos

- São constituídos basicamente de componentes R, L e C por meio 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.



# Filtros Passivos

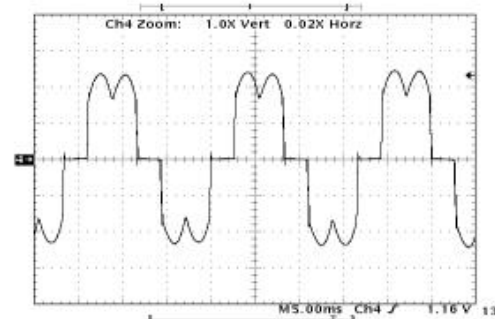
- Podem ser utilizados para a melhoria do fator de potência, fornecendo o reativo necessário ao sistema. Entretanto, existem alguns problemas relacionados à utilização destes filtros, dentre os quais se destacam:
  - o alto custo,
  - a complexidade de sintonia e;
  - a possibilidade de ressonância paralela com a impedância do sistema elétrico.



# Filtros Ativos

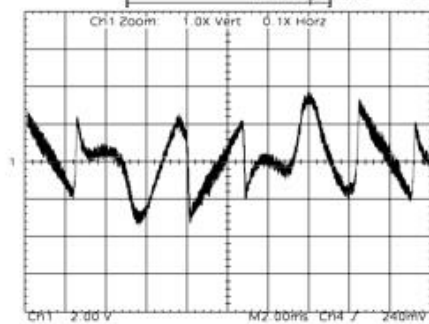
- Um circuito ativo gera e injeta correntes harmônicas com defasagem oposta àsquelas produzidas pela carga não linear. Assim, há um cancelamento das ordens harmônicas que se deseja eliminar.
- Embora bastante eficiente, este dispositivo apresenta custos elevados (superiores aos filtros passivos), o que tem limitado sua utilização nos sistemas elétricos.

# Filtros Ativos



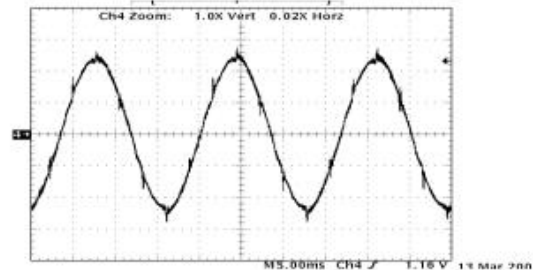
**Forma de Onda  
Carga**

+



**Forma de Onda  
Saída de corrente  
do Accusine**

=



**Forma de Onda  
Carga**



# Dúvidas?!

# Obrigado!

---

**Victor Dardengo**

GESEP - Gerência de Especialistas em Sistemas Elétricos de Potência

E-mail: [victor.dardengo@ufv.br](mailto:victor.dardengo@ufv.br)