GESTÃO DE ENERGIA ELÉCTRICA

João Martins (jf.martins@fct.unl.pt)

Faculdade de Ciências e Tecnologia

(MIEEC + MERCEUS)

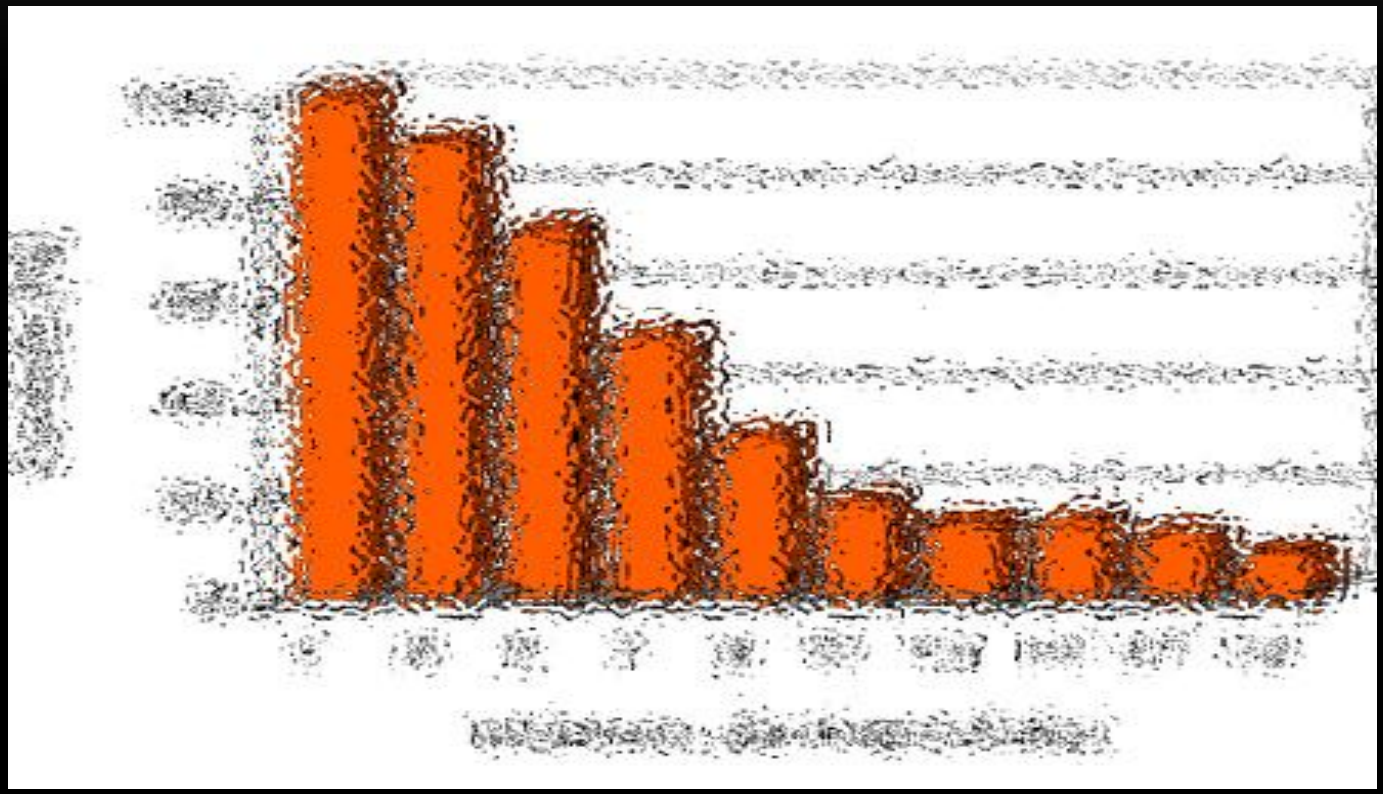
Qualidade da energia

- Potências
- Compensação clássica do fator de potência
- Distorção harmónica e fator de potência

Objetivos

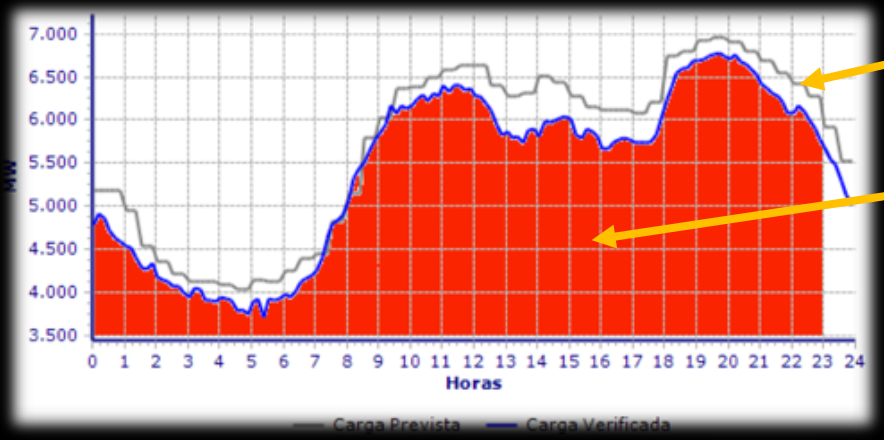
- Perceber a causa, influencia e impactos das harmónicas
- Calcular as várias potências envolvidas nos sistemas elétricos

POTÊNCIAS



O QUE É A ENERGIA ELÉTRICA?

- Um **Sistema de Energia Elétrica** fornece energia aos consumidores que a utilizam, assegurando o nível de potência necessário à alimentação dos seus equipamentos.
- A energia e a potência são faturados separadamente, pois os custos para disponibilizar uma e outra são diferentes.



Potência [W]

Energia [Wh]

$$P = \frac{dE}{dt}$$

$$E = \int P\,dt$$

Fonte: REN (28/01/2011)

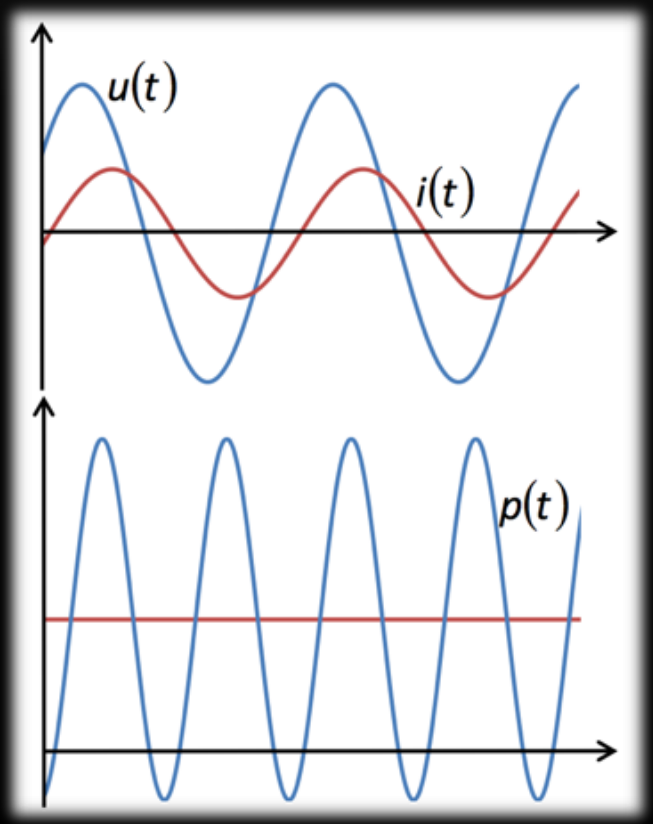
O QUE É A ENERGIA ELÉTRICA?

Energia Ativa é a energia elétrica que é possivel transformar noutra forma de energia.

Num sistema em corrente alternada, a **Energia Reativa** corresponde à energia elétrica cativa transmitida continuamente entre os diversos campos elétricos e magnéticos associados à operação do sistema elétrico e a todos os aparelhos a ele ligados.

NÃO PRODUZ TRABALHO ÚTIL

POTÊNCIA ELÉTRICA



$$u = \sqrt{2}U\sin(\omega t)$$

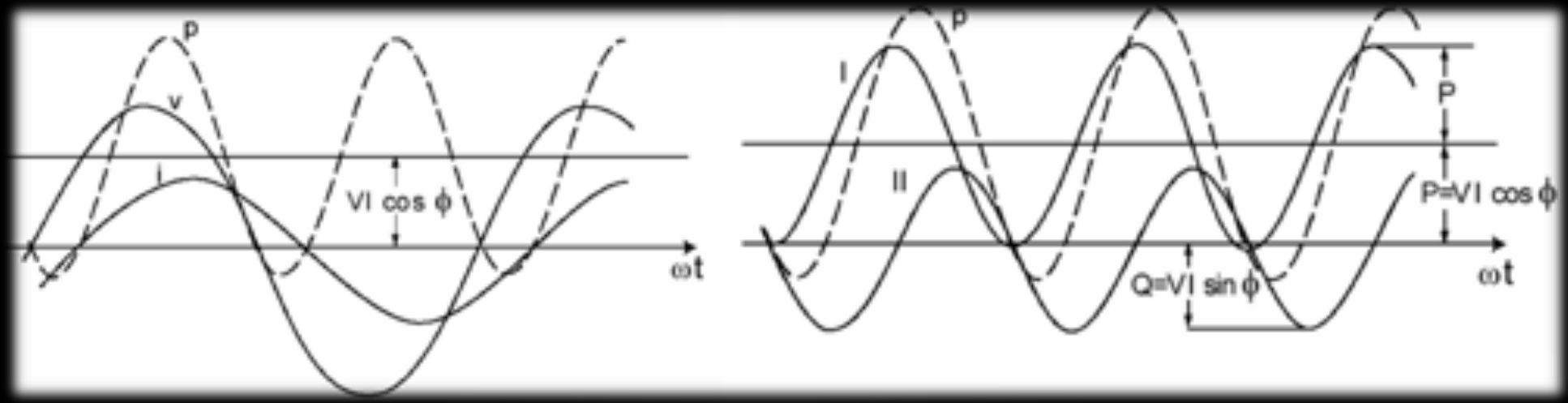
$$i = \sqrt{2}I\sin(\omega t - \varphi)$$

$$p = u \times i$$

POTÊNCIA INSTANTÂNEA

$$p = ui = 2UI\sin(\omega t)\sin(\omega t - \varphi) = UI\cos\varphi - UI\cos(2\omega t - \varphi)$$

$$p = \underbrace{UI\cos\varphi\left(1 - \cos(2\omega t)\right)}_{I} - \underbrace{UI\sin\varphi\sin(2\omega t)}_{II}$$



Fonte: Sucena Paiva

POTÊNCIA ATIVA E REATIVA

$$P = UI\cos\varphi \quad Potência\ Activa$$

$$Q = UI\sin\varphi \quad Potência\ \mathrm{Re}activa$$

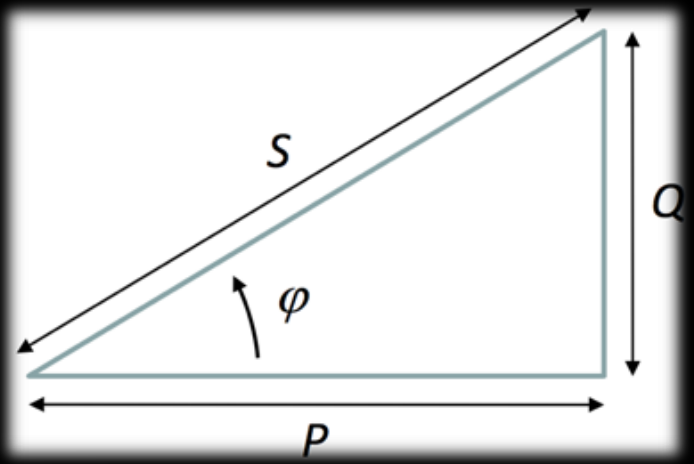
$$p = \underbrace{UI\cos\varphi\left(1 - \cos\left(2\omega t\right)\right)}_{I} - \underbrace{UI\sin\varphi\sin\left(2\omega t\right)}_{II}$$

$$p = P\left(1 - \cos\left(2\omega t\right)\right) - Q\sin\left(2\omega t\right)$$

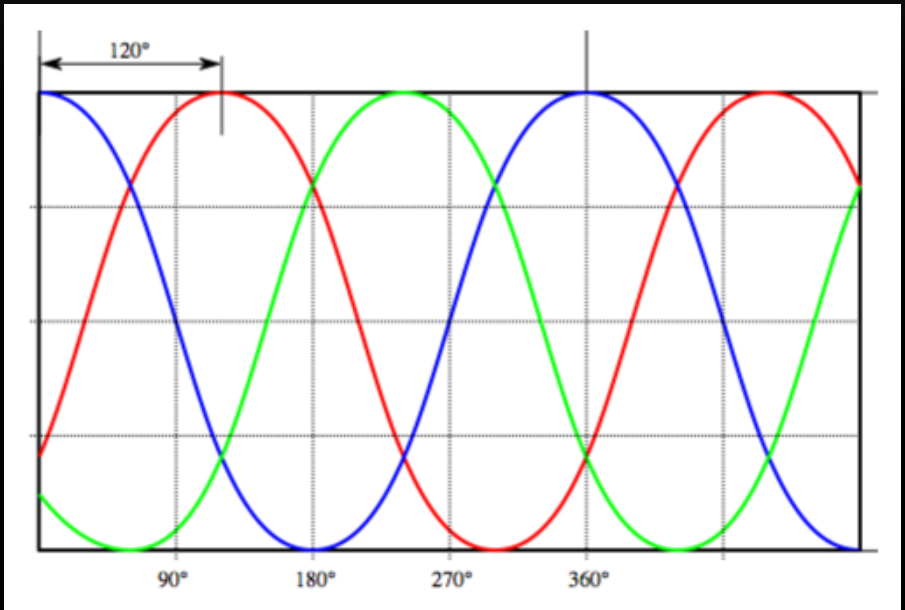
POTÊNCIA APARENTE E COMPLEXA

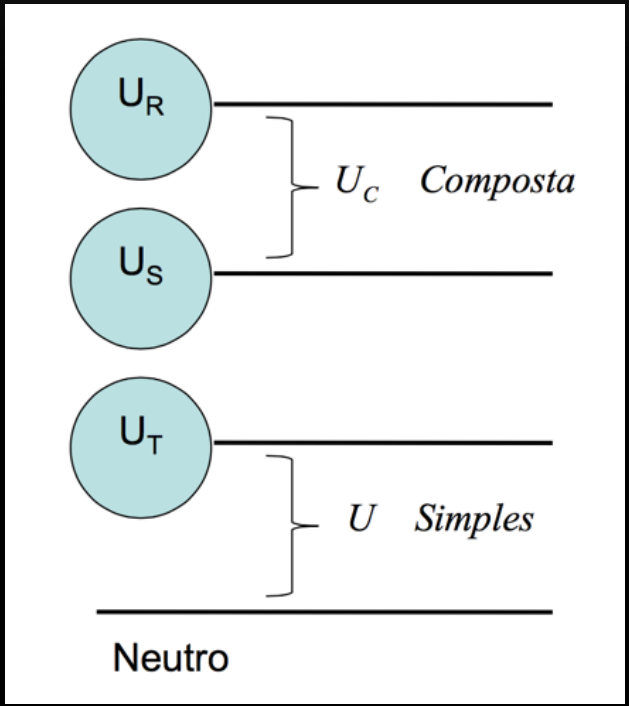
$$S^2 = P^2 + Q^2 \qquad Potência\ Aparente$$

$$S = P + jQ \qquad Potência\ Complexa$$



SISTEMAS TRIFÁSICOS

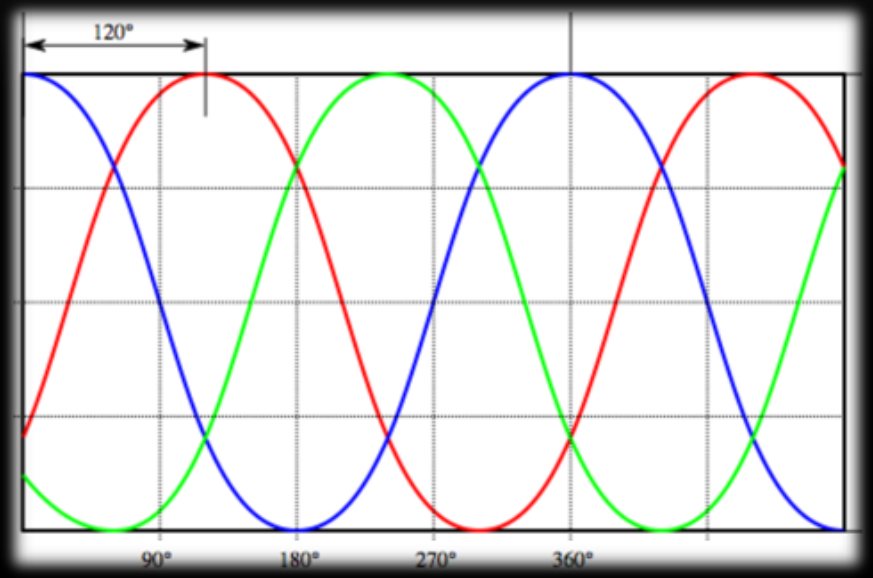




$$U_C = \sqrt{3}U$$

$$400 = \sqrt{3} \times 230$$

POTÊNCIA TRIFÁSICA



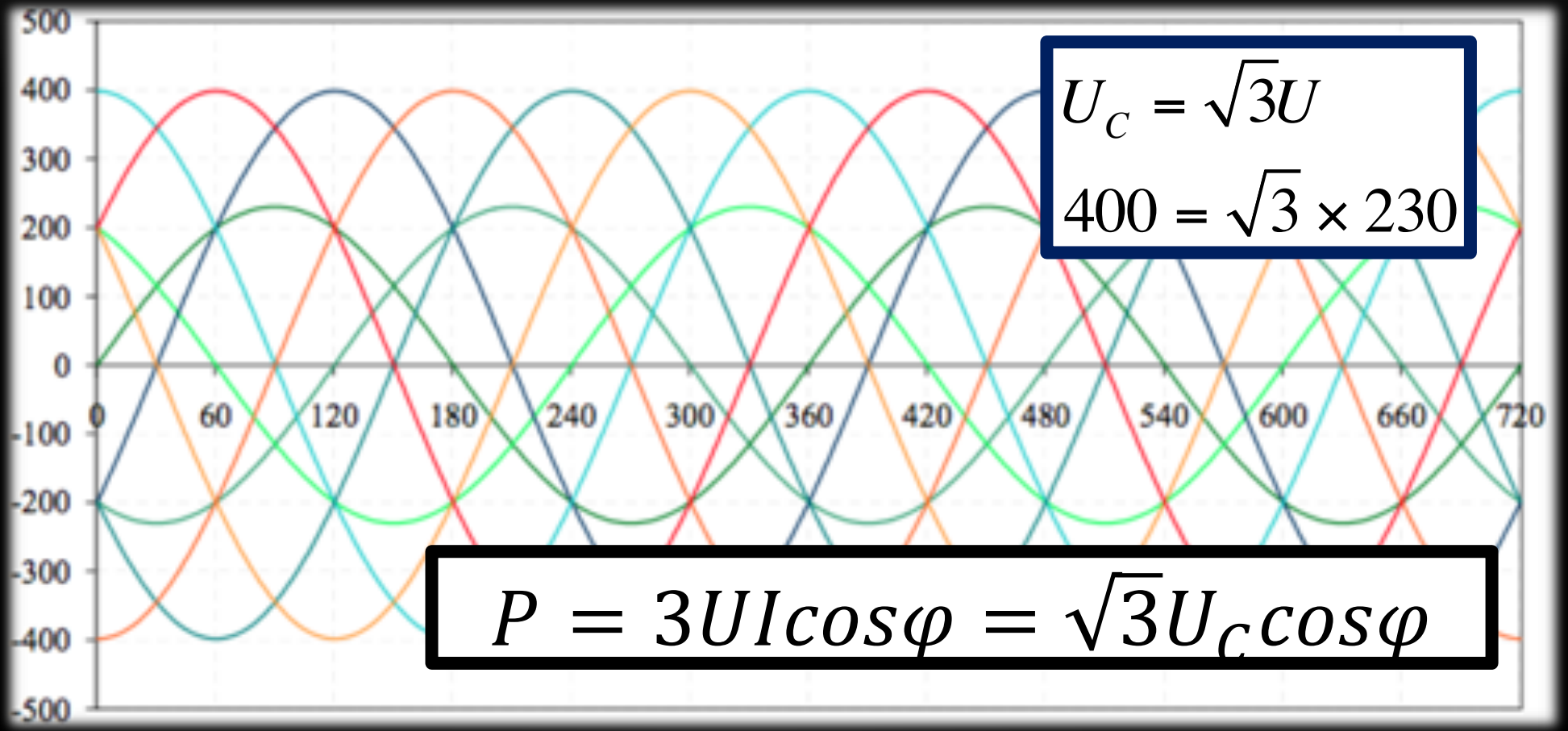
$$p = u_R i_R + u_S i_S + u_T i_T$$

$$p = 3UI\cos\varphi$$

$$\begin{cases} u_R = \sqrt{2}U\sin(\omega t) \\ u_S = \sqrt{2}U\sin\left(\omega t - {}^{2\pi}/_{3}\right) \\ u_T = \sqrt{2}U\sin\left(\omega t - {}^{4\pi}/_{3}\right) \end{cases}$$

$$\begin{cases} i_R = \sqrt{2}I\sin(\omega t) \\ i_S = \sqrt{2}I\sin\left(\omega t - {}^{2\pi}/_{3}\right) \\ i_T = \sqrt{2}I\sin\left(\omega t - {}^{4\pi}/_{3}\right) \end{cases}$$

POTÊNCIA TRIFÁSICA

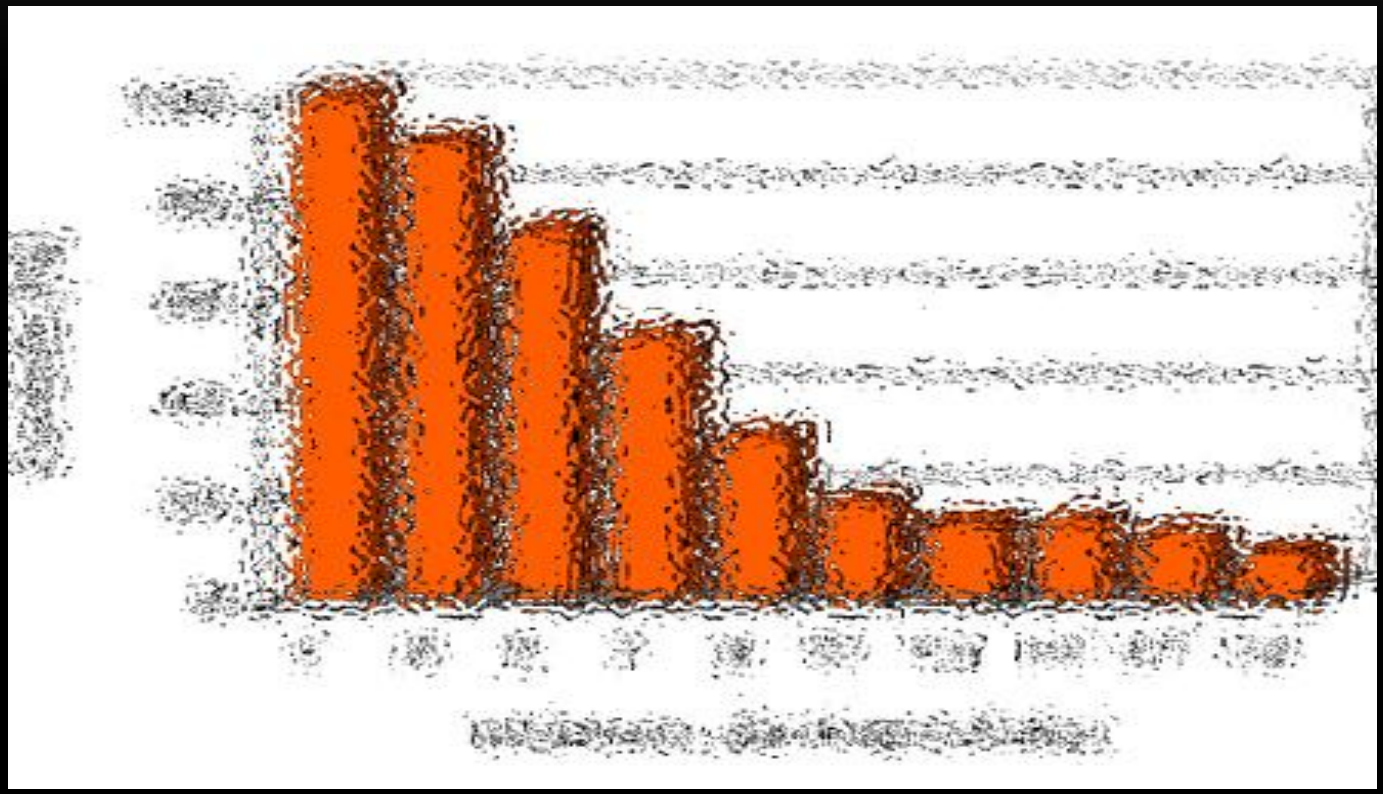


$$U_C = \sqrt{3}U$$

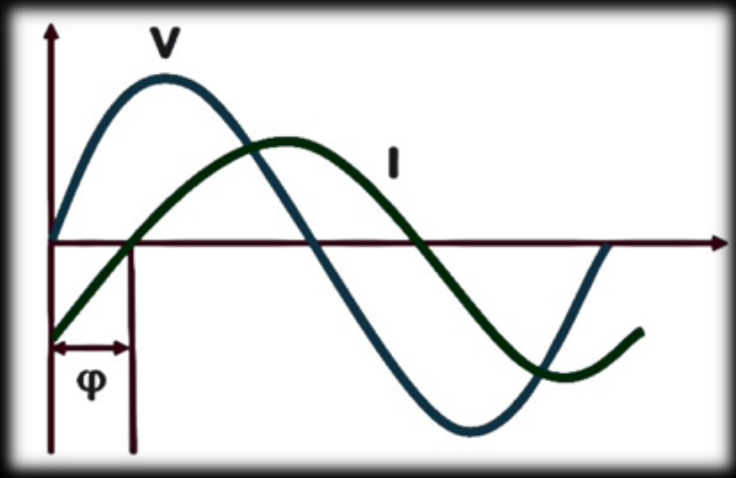
$$400 = \sqrt{3} \times 230$$

$$P = 3UIcos\varphi = \sqrt{3}U_C cos\varphi$$

COMPENSAÇÃO CLÁSSICA DO FATOR DE POTÊNCIA



POTÊNCIAS

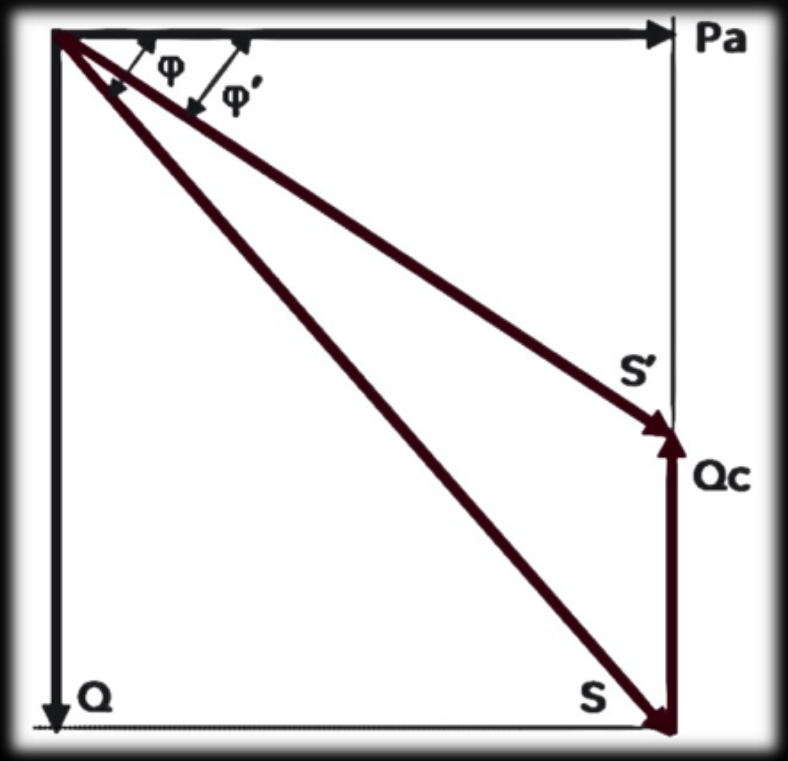


$$S = \sqrt{3}UI$$

$$P = \sqrt{3}UIcos\varphi$$

$$Q = \sqrt{3}UIsin\varphi$$

COMPENSAÇÃO POR UTILIZAÇÃO DE BATERIAS DE CONDENSADORES



$$Q_C = P(tan\varphi - tan\varphi')$$



VANTAGENS DA COMPENSAÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

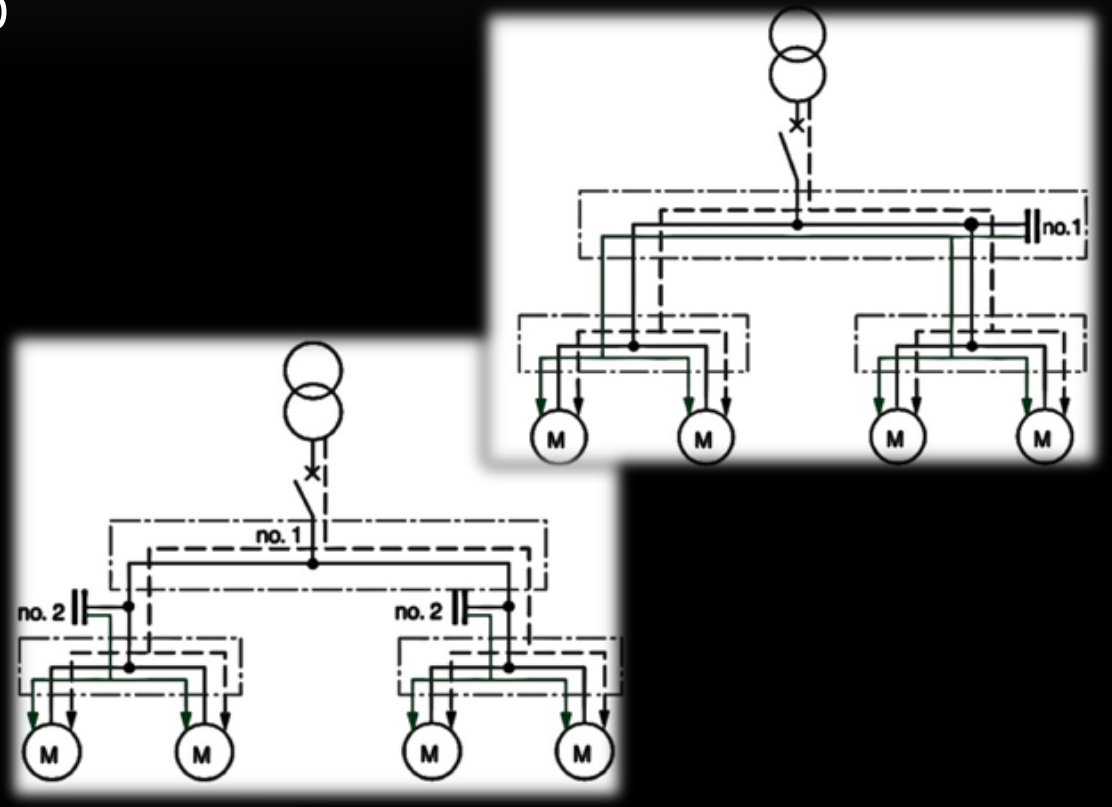
- Reduz sobrecargas (evita instalar novo transformador...)
- Reduz perdas e potência aparente
- Reduz riscos de falha e aumenta o tempo de vida útil dos equipamentos
- Reduz a fatura da energia elétrica
- Reduz a seção dos cabos elétricos
- Aumenta a qualidade do processo (variações de energia reativa podem provocar variações de tensão)

COMPENSAÇÃO POR UTILIZAÇÃO DE BATERIAS DE CONDENSADORES

- Tipos de compensação
  - **Fixa**, por utilização de um banco de condensadores fixo
  - **Automática**, por utilização de relé varimétrico e número de escalões fixo
  - **Dinâmica**, para cargas com grande flutuação de energia reativa

COMPENSAÇÃO POR UTILIZAÇÃO DE BATERIAS DE CONDENSADORES

- Modos de compensação
  - **Global**
  - **Por setor**
  - **Local / Individual**



COMPENSAÇÃO POR UTILIZAÇÃO DE BATERIAS DE CONDENSADORES

- **Global**
  - O banco de condensadores está ligado ao barramento principal do QGBT
  - As correntes continuam a ter caracter indutivo em todas as canalizações da instalação (estas não podem ser reduzidas em seção)
- **Vantagens**
  - Reduz as penalidades tarifárias
  - Reduz a potência parente total
  - Alivia o transformador (caso exista)

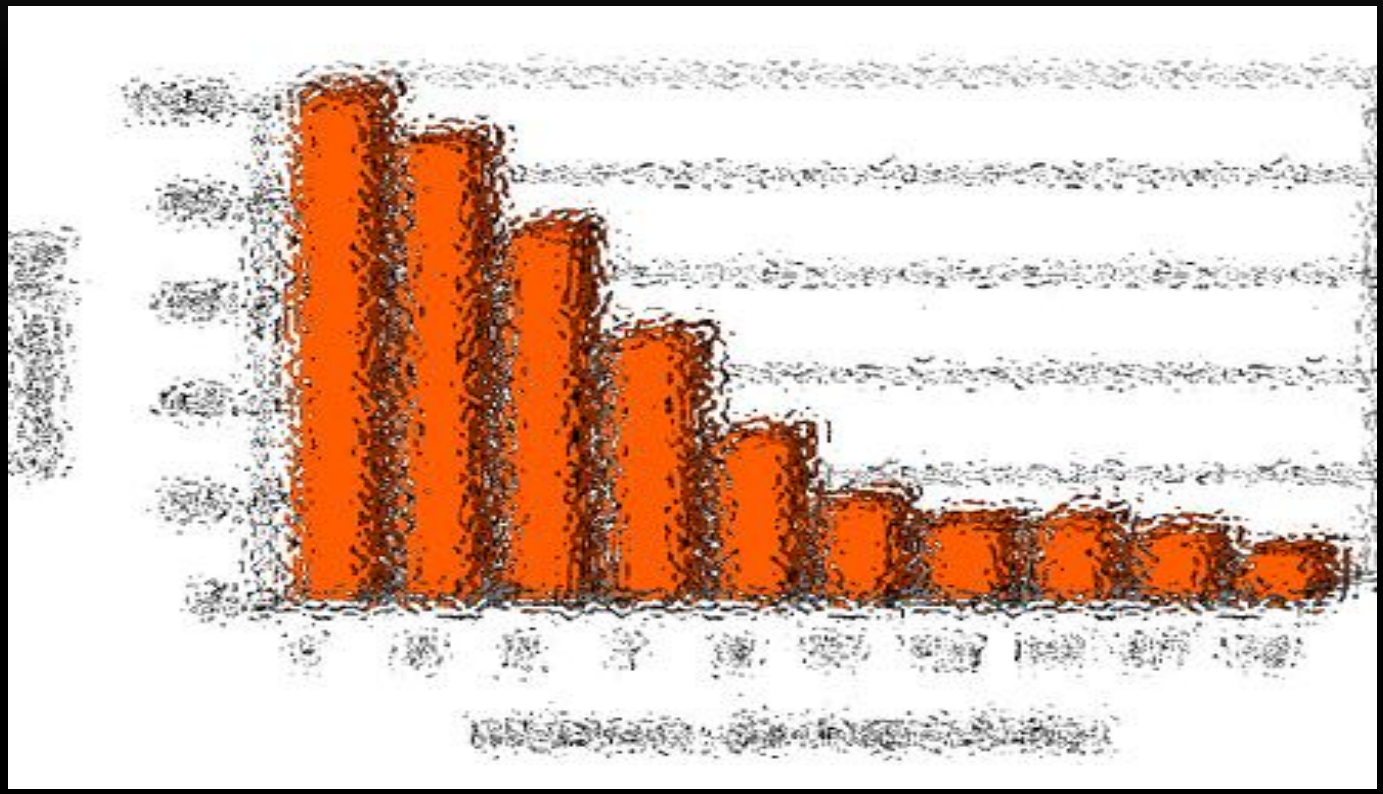
COMPENSAÇÃO POR UTILIZAÇÃO DE BATERIAS DE CONDENSADORES

- **Por setor**
  - Os bancos de condensadores estão ligados aos barramentos dos quadros de distribuição (principais)
  - As canalizações principais são as grandes beneficiadas
  - As correntes continuam a ter caracter indutivo nas canalizações secundárias da instalação (estas não podem ser reduzidas em seção)
  - Podem surgir problemas de sobrecompensação (provocando sobretensões) perante variações bruscas de carga
- **Vantagens**
  - Reduz as penalidades tarifárias
  - Reduz a potência parente total
  - Alivia o transformador (caso exista)
  - Reduz a seção das canalizações principais com a consequente redução de perdas

COMPENSAÇÃO POR UTILIZAÇÃO DE BATERIAS DE CONDENSADORES

- **Local / Individual**
  - Os bancos de condensadores são ligados diretamente aos terminais da carga (motores, fornos...)
  - Utiliza-se quando a potência de uma determinada carga é muito grande, quando comparada com o resto da instalação
  - Não existem reduções significativas no caráter indutivo das correntes
- **Vantagens**
  - Reduz as penalidades tarifárias
  - Reduz a potência parente total
  - Alivia o transformador (caso exista)
  - Reduz a seção das canalizações que alimenta a carga em cause, com a consequente redução de perdas

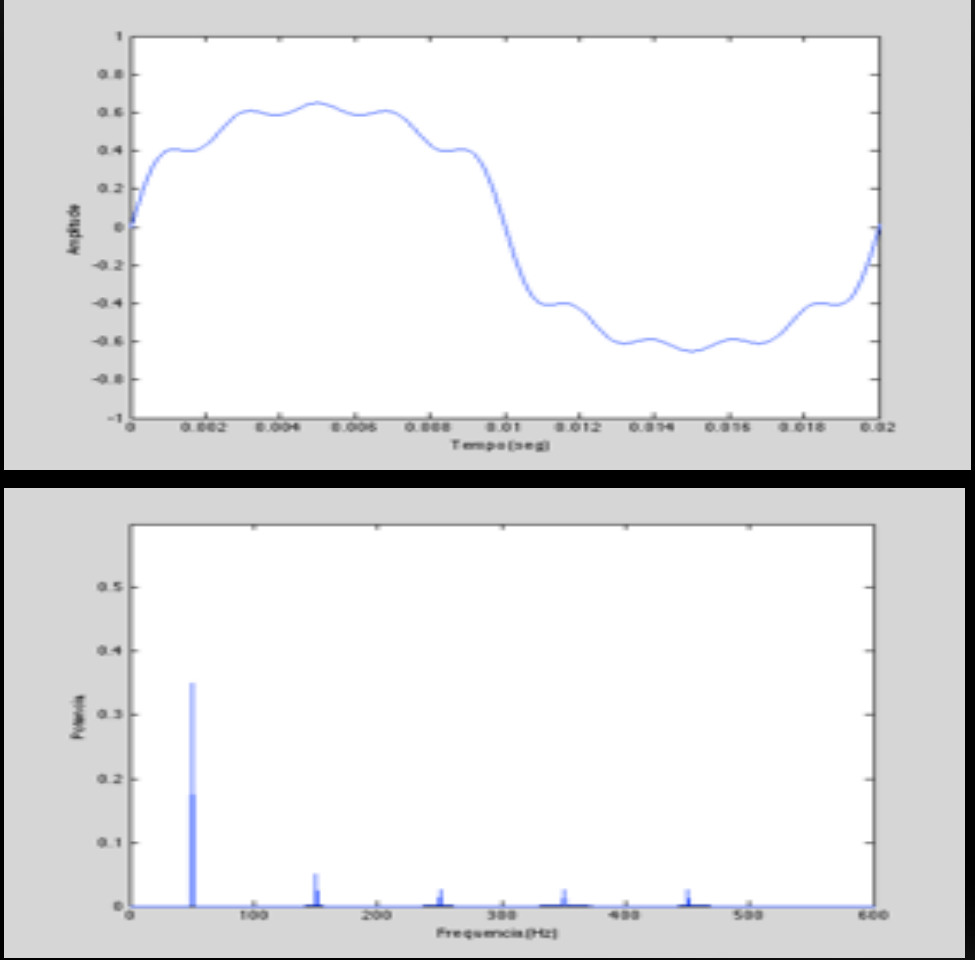
DISTORÇÃO HARMÓNICA E FATOR DE POTÊNCIA



INFLUÊNCIA DA DISTORÇÃO HARMÓNICA NO FATOR DE POTÊNCIA

As harmónicas de tensão e corrente originadas por cargas não lineares, dão origem a perdas de potência adicionais. Deste modo, existe um impacto negativo no sistema de produção, transporte e distribuição de energia eléctrica, assim como, nas próprias cargas que se encontram ligadas a este sistema.

DISTORÇÃO HARMÓNICA



As harmónicas de tensão e corrente originadas por cargas não lineares, dão origem a perdas de potência adicionais. Deste modo, existe um impacto negativo no sistema de produção, transporte e distribuição de energia elétrica, assim como, nas próprias cargas que se encontram ligadas a este sistema.

DISTORÇÃO HARMÓNICA

Algumas consequências:

- Aumento das perdas no ferro dos transformadores
- Possíveis sobretensões em condensadores
- Aumento das perdas em cabos
- Perturbações na bobine de disparo de disjuntores
- Atuação intempestiva de relés
- Aumento das perdas no cobre em motores
- Existência de binários oscilatórios em motores e consequente fadiga mecânica

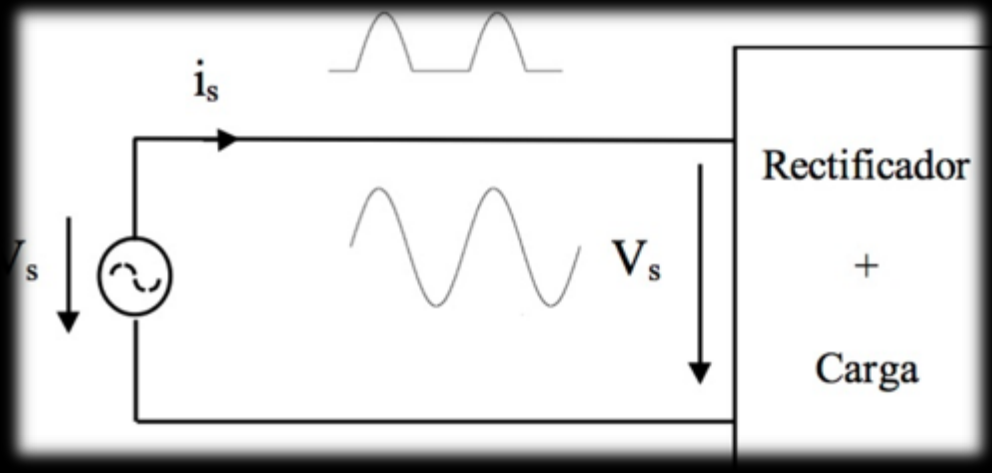
DISTORÇÃO HARMÓNICA

Potência ativa

Potência reativa

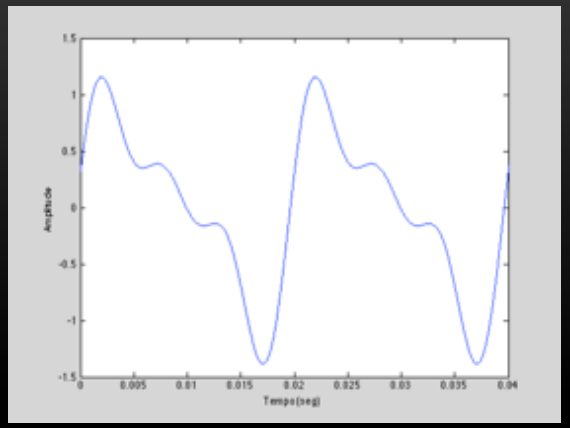
Potência aparente

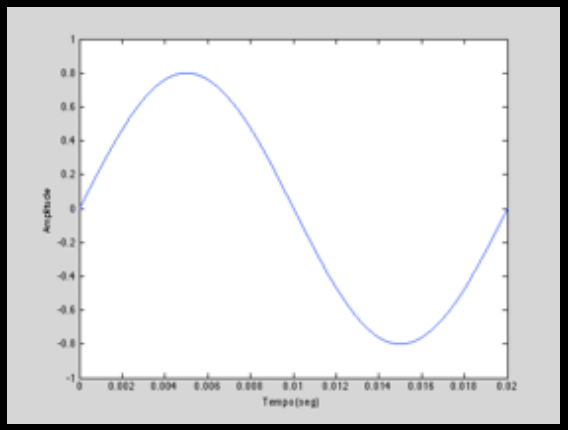
Potência deformante

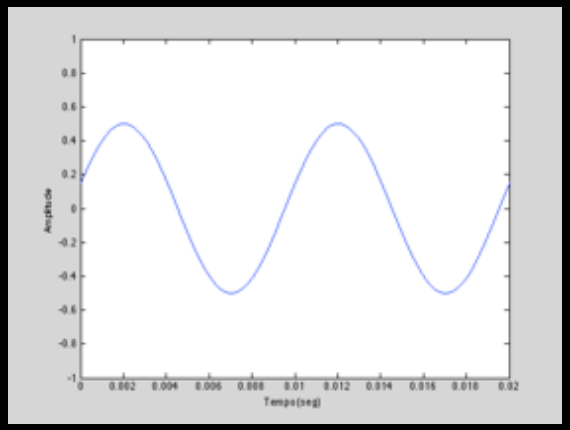


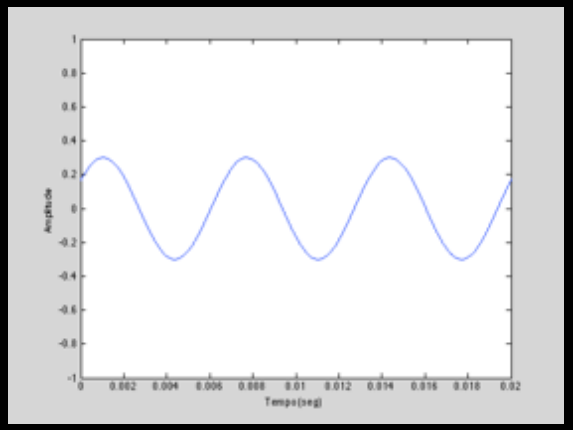
POTÊNCIA ATIVA

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T v(\omega t)\, i(\omega t)\, d\omega t$$









$$v(\omega t) = \sqrt{2}V_{ef}\sin(\omega t) \qquad i = i_{med} + i_1 + i_2 + i_3 + \cdots$$

$$i(\omega t) = I_{med} + \sqrt{2}I_{1ef}\sin(\omega t - \varphi_1) + \sqrt{2}I_{2ef}\sin(2\omega t - \varphi_2) + \sqrt{2}I_{3ef}\sin(3\omega t - \varphi_3) + \cdots$$

POTÊNCIA ATIVA

$$P = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} 2V_{ef}\, I_{med}\sin(\omega t)\,dt +$$

Zero...

$$+\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} 2V_{ef}\, I_{1ef}\sin(\omega t)\sin(\omega t-\varphi_1)\,d\omega t +$$

$$V_{ef}I_{1ef}\cos(\varphi_1)$$

$$+\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} 2V_{ef}\, I_{2ef}\sin(\omega t)\sin(2\omega t-\varphi_1)\,d\omega t +$$

$$+\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} 2V_{ef}\, I_{3ef}\sin(\omega t)\sin(3\omega t-\varphi_1)\,d\omega t +$$

Zero...

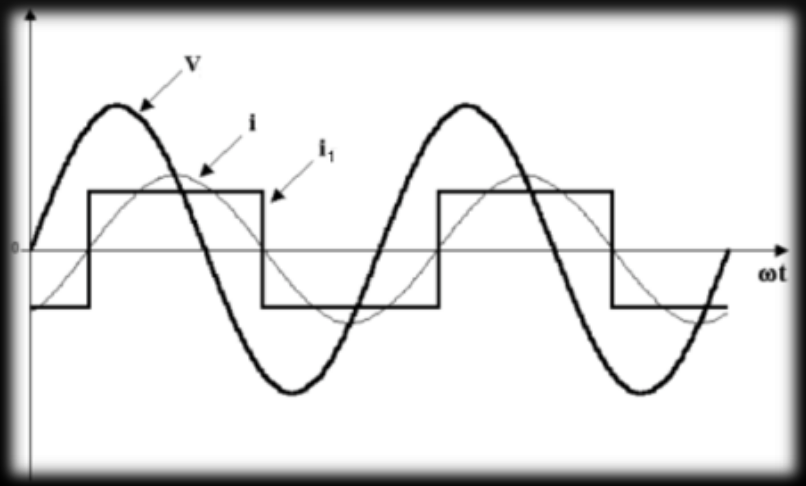
$$+\cdots$$

POTÊNCIA REATIVA E APARENTE

$$P = V_{ef} I_{1ef} \cos(\varphi_1)$$

$$Q = V_{ef} I_{1ef} \sin(\varphi_1)$$

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



$$I_{ef} = \sqrt{I_{med}{}^2 + I_{1ef}{}^2 + I_{2ef}{}^2 + I_{3ef}{}^2 + \cdots}$$

$$S = \sqrt{(V_{ef} I_{med})^2 + (V_{ef} I_{1ef})^2 + (V_{ef} I_{2ef})^2 + (V_{ef} I_{3ef})^2 + \cdots}$$

POTÊNCIA DEFORMANTE E FATOR DE POTÊNCIA

$$\left(V_{ef} I_{1ef}\right)^2 = P^2 + Q^2$$

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

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

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

$$\lambda = \frac{V_{ef} I_{1ef} \cos(\varphi_1)}{V_{ef} I_{ef}} = \frac{I_{1ef}}{I_{ef}} \cos(\varphi_1)$$

O fator de potência só é igual a cos φ quando a tensão e a corrente forem ambas alternadas sinusoidais.

FATOR DE POTÊNCIA

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

O fator de potência representa a percentagem da potência que realmente é utilizada para gerar trabalho. Assim, um FP = 0,2 significa que apenas 20% da potência total entregue ao sistema é utilizado para gerar trabalho.

O valor ideal do fator de potência é a unidade (FP = 1).

TAXA DE DISTORÇÃO HARMÓNICA (THD)

$$THD_I = \sqrt{\frac{I_{ef}^2 - I_{1ef}^2}{I_{ef}^2}} \times 100\% = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_{kef}^2}}{I_{1ef}} \times 100\%$$

Se não existir distorção na forma de onda da corrente, ou seja, não existirem harmónicas de ordem superior à fundamental então a taxa de distorção harmónica será nula (situação ideal).

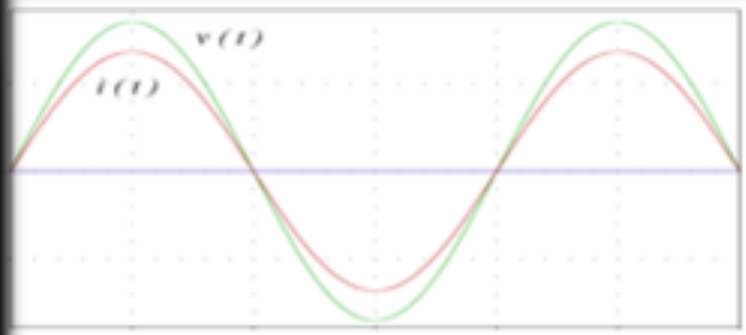
TAXA DE DISTORÇÃO HARMÓNICA E FATOR DE POTÊNCIA

$$\lambda = \frac{I_{1ef}}{I_{ef}}\cos(\varphi_1) = \frac{I_{1ef}}{\sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} I_{kef}^2}}\cos(\varphi_1) = \frac{\cos(\varphi_1)}{\sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{\infty} I_{kef}^2}{I_{1ef}^2}}}$$

$$\lambda = \frac{\cos(\varphi_1)}{\sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100}\right)^2}}$$

O factor de potência depende do desfasamento da 1ª harmónica e da distorção da forma de onda da corrente.

TAXA DE DISTORÇÃO HARMÓNICA E FATOR DE POTÊNCIA

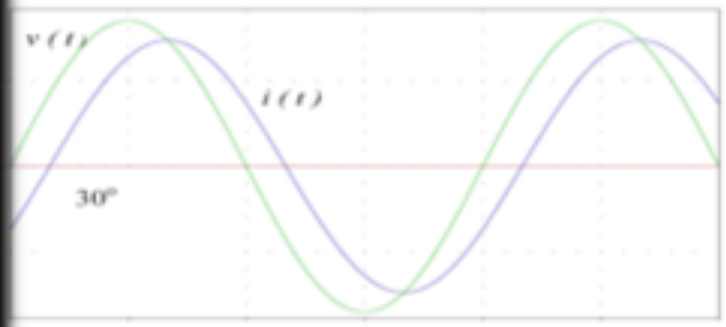


$\theta_{(1)} = 0$

$\cos \theta_{(1)} = 1$

$TDH = 0$

$FP = 1$

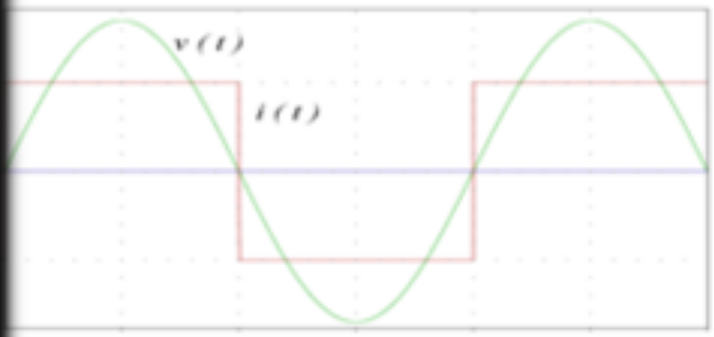


$\theta_{(1)} = 30^{\circ}$

$\cos \theta_{(1)} = 0{,}86$

$TDH = 0$

$FP = 0{,}86$



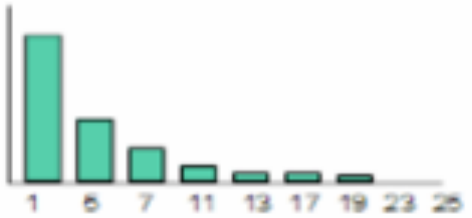
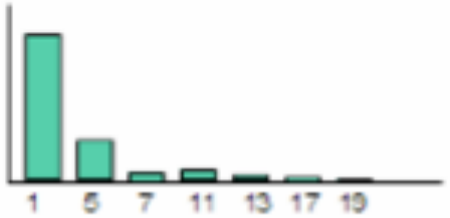
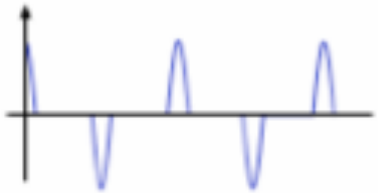
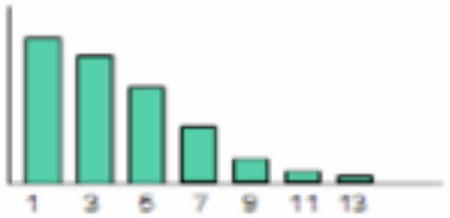
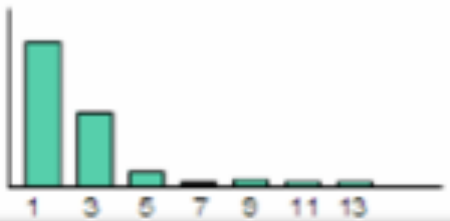
$\theta_{(1)} = 0$

$\cos \theta_{(1)} = 1$

$TDH \geq 0{,}4141$

$FP \leq 0{,}92$

TAXA DE DISTORÇÃO HARMÓNICA E FATOR DE POTÊNCIA

Tipo de carga não linear	Forma de onda da corrente	Espectro	THD
Variador de velocidade			44%
Rectificador / carregador			28%
Sistemas informáticos			115%
Iluminação fluorescente			53%

FONTES DE TENSÃO DISTORCIDAS

$$v(t) = V_{med} + \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{2} V_{kef} \sin(k\omega t + \delta_k)$$

$$i(t) = I_{med} + \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{2} I_{kef} \sin(k\omega t + \varphi_k)$$

$$V_{ef} = \sqrt{V_{med}^2 + \sum_{k=1}^{\infty} V_{kef}^2}$$

$$I_{ef} = \sqrt{I_{med}^2 + \sum_{k=1}^{\infty} I_{kef}^2}$$

FONTES DE TENSÃO DISTORCIDAS

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T v(\omega t)\, i(\omega t)\, d\omega t =$$

$$= \frac{1}{T}\int_0^T \left(V_{med} + \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{2} V_{kef} \sin(k\omega t + \delta_k)\, I_{med} + \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{2} I_{kef} \sin(k\omega t + \varphi_k)\right) d\omega t =$$

$$= V_{med} I_{med} + \sum_{k=1}^{\infty} 2 V_{kef} \cos(\delta_k - \varphi_k) =$$

$$= V_{med} I_{med} + V_{1ef} I_{1ef} \cos(\delta_1 - \varphi_1) + V_{2ef} I_{2ef} \cos(\delta_2 - \varphi_2) + V_{3ef} I_{3ef} \cos(\delta_3 - \varphi_3) + \cdots$$

FONTES DE TENSÃO DISTORCIDAS

Taxa de distorção harmónica da corrente

$$THD_I = \sqrt{\frac{I_{ef}^2 - I_{1ef}^2}{I_{ef}^2}} \times 100\% = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_{kef}^2}}{I_{1ef}} \times 100\%$$

Taxa de distorção harmónica da tensão

$$THD_I = \sqrt{\frac{V_{ef}^2 - V_{1ef}^2}{V_{ef}^2}} \times 100\% = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} V_{kef}^2}}{V_{1ef}} \times 100\%$$

FONTES DE TENSÃO DISTORCIDAS

O fator de potência depende tanto da taxa de distorção harmónica da corrente como da tensão

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{V_{med} I_{med} + V_{1ef} I_{1ef} \cos(\delta_1 - \varphi_1) + V_{2ef} I_{2ef} \cos(\delta_2 - \varphi_2) + \cdots}{V_{ef} I_{ef}}$$

$$\lambda = \frac{V_{med} I_{med} + V_{1ef} I_{1ef} \cos(\delta_1 - \varphi_1) + V_{2ef} I_{2ef} \cos(\delta_2 - \varphi_2) + \cdots}{V_{ef} \sqrt{1 + \left(\frac{THD_V}{100}\right)^2}\, I_{ef} \sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100}\right)^2}}$$

COMO DETETAR A PRESENÇA DE HARMÓNICAS

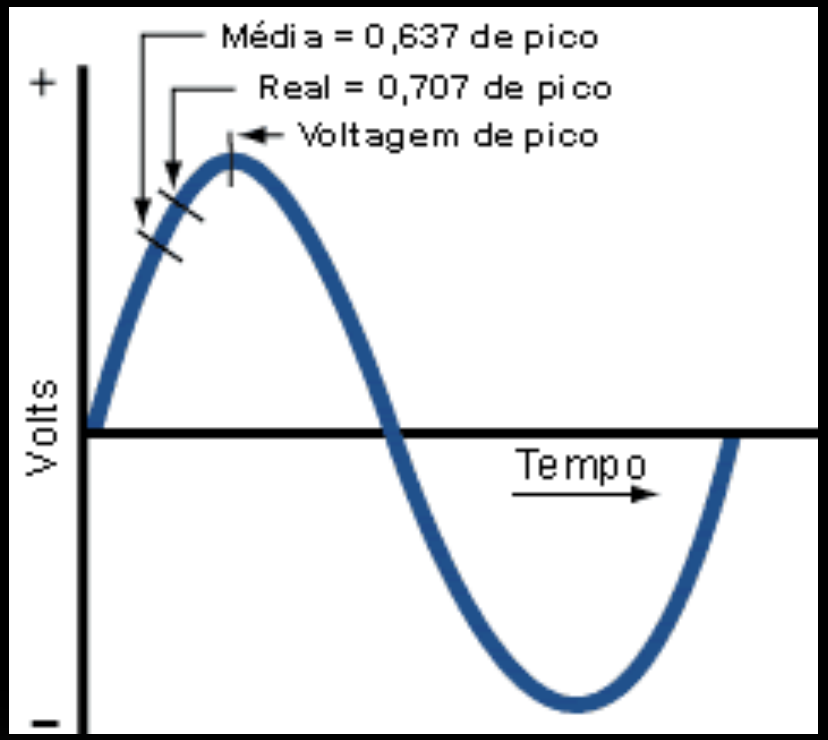
- Utilizando um analisador de energia com capacidade de análise harmónica.
- Em circuitos monofásicos pode utilizar-se o seguinte expediente:
  - Fazer a medição do valor eficaz com um multímetro de resposta média (A)
  - Fazer a medição do valor eficaz com um multímetro True-RMS (R)
  - Determinar a razão A/R
  - A/R próximo da unidade indica a ausência de harmónicas





COMO DETETAR A PRESENÇA DE HARMÓNICAS

- Um multímetro de resposta média faz a amostragem dos picos de uma onda sinusoidal para determinar uma média e aplicar um fator de conversão.
- Um multímetro True-RMS utiliza uma técnica adequada à medição correcta do valor eficaz:
  - Transdutor térmico
  - Transdutor analógico (multiplicadores)
  - Transdutores digitais



	Onda sinusoida	Ondaquadrada	Rectificador monofásico com díodos	Rectificador trifásico
Valor medido com aparelho convencional	Correcto	10% mais elevado	40 % mais baixo	5 a 30 % mais baixo
Leitura do aparelho True RMS	Correcto	Correcto	Correcto	Correcto

Fonte: EDP, Manual da qualidade da energia elétrica

RESUMO

- A existência de harmónicas implica que o fator de potencia não coincida com o desfamaneto entre tensão e corrente
- A potencia ativa depende do valor eficaz e desfazamento da primeira harmonica de corrente
- O fator de potencia depende da taxa de distorção harmonica

BIBLIOGRAFIA

- Pedro Sucena Paiva, Redes de Energia Eléctrica - Uma Análise Sistémica; José IST Press, 2015
- Muhammad H. Rashid, Power Electronics: Circuits, Devices & Applications 4ed, Pearson ed., 2014
- Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins, Power Electronics: Converters, Applications, and Design, 3ed, Wiley, 2003
- A. Kusko e M. T. Thompson, Power Quality in Electrical Systems, McGraw-Hill, 2007