

# QUALIDADE DE ENERGIA

7ª Termo

**Engenharia Elétrica**

Aula 01

Prof. Dr. Giuliano Pierre Estevam

[www.electroenge.com.br](http://www.electroenge.com.br)



# **BIBLIOGRAFIA**

**Introdução a Análise de Circuitos Elétricos**

**Robert L. Boylestad**

**Distúrbios da Energia Elétrica**

**Edson Martinho**

**Harmônicas nas instalações elétricas : causas, efeitos e soluções**

**PROCOBRE – INSTITUTO BRASILEIRO DO COBRE**

**Prodist 8 - ANEEL**

**Material fornecido pelo professor**

## AVALIAÇÃO

Prova (80%), Listas de exercícios (20%)

$$MF = MP \times 0,8 + MT \times 0,2$$

Sendo

MF : Média final

MP : Média das provas realizadas

MT : Média dos trabalhos realizados

## CONTEÚDO

Definição de qualidade de energia; Termos e definições utilizados; Fenômenos associados ao estudo da qualidade de energia; Transitório: impulsivo, oscilatório; Variações na tensão de curta e longa duração; Desbalanceamento da tensão; Distorções da forma de onda: harmônicas perturbações; Flutuação da tensão; Variações da frequência; Normas; Medições: equipamentos, técnicas e interpretação.

## QUALIDADE DE ENERGIA

QUALIDADE  
DO PRODUTO

QUALIDADE  
DO SERVIÇO

QUALIDADE  
DO  
ATENDIMENTO

# QUALIDADE DO PRODUTO ENERGIA

- Qualidade de atendimento
  - Relacionamento comercial empresa-cliente
    - Novas ligações
    - Religamento de consumidor
  
- Qualidade do serviço
  - Continuidade de Fornecimento
  - Interrupções: Falhas : Manutenção
  
- Qualidade do produto
  - Qualidade da tensão
  - Qualidade da frequência de oscilação
  - Forma de onda da tensão

# QUALIDADE DE ENERGIA

A QEE DEVE SER A PERFEITA COMBINAÇÃO ENTRE AS CARACTERÍSTICAS QUASE IDEAIS DO PRODUTO ELETRICIDADE ... (**QUALIDADE DO PRODUTO / CONFORMIDADE**);

COM UM SISTEMA FÍSICO DE FORNECIMENTO ADEQUADO ... (**QUALIDADE DO SERVIÇO / CONTINUIDADE**);

E AGILIDADE OPERACIONAL PARA SATISFAZER AS EXPECTATIVAS DO CLIENTE (**QUALIDADE DO ATENDIMENTO**).

## QUALIDADE DE ENERGIA - FORNECIMENTO



A disponibilidade da energia elétrica representa um incremento na qualidade de vida das populações.

Num primeiro momento em que se implanta um sistema de distribuição de energia elétrica, a população local imediatamente passa a constar com inúmeros benefícios, tanto do ponto de vista de maior conforto doméstico como de melhores possibilidades de emprego e produção.



## QUALIDADE DO FORNECIMENTO



À medida que os benefícios da energia elétrica passam a fazer parte do dia-a-dia das pessoas, é natural que inicie-se um processo de discussão quanto à qualidade daquele produto.

**TRANSTORNOS**

# QUALIDADE DO PRODUTO ENERGIA

**CONTINUIDADE**

**MAL  
FUNCIONAMENTO  
DE EQUIPAMENTOS**



## MOTIVAÇÃO PARA O ESTUDO

**As maiores Exigências Impostas pelos consumidores são devido a implicações econômicas**

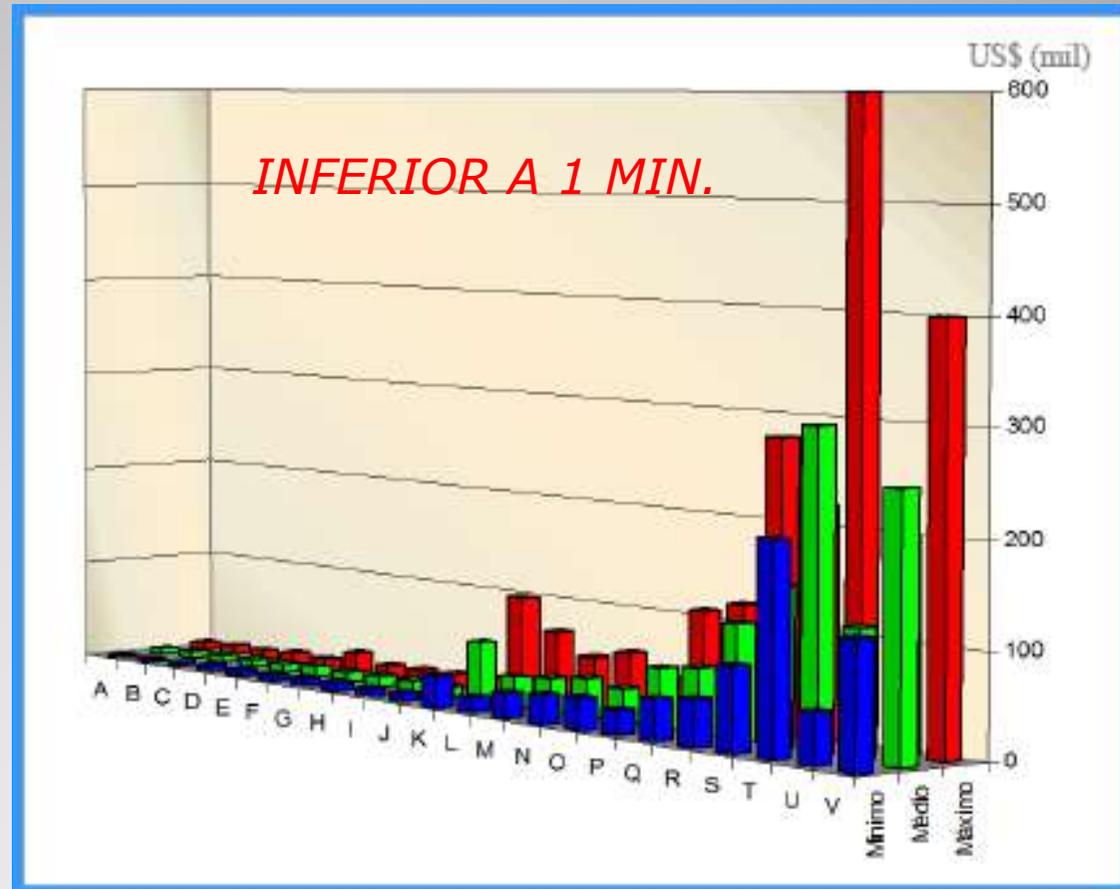
Nos EUA as perdas relacionadas a QEE chegaram entre US\$15 e 24 bilhões anuais, conforme relatório divulgado em 2001.

**Q E E**

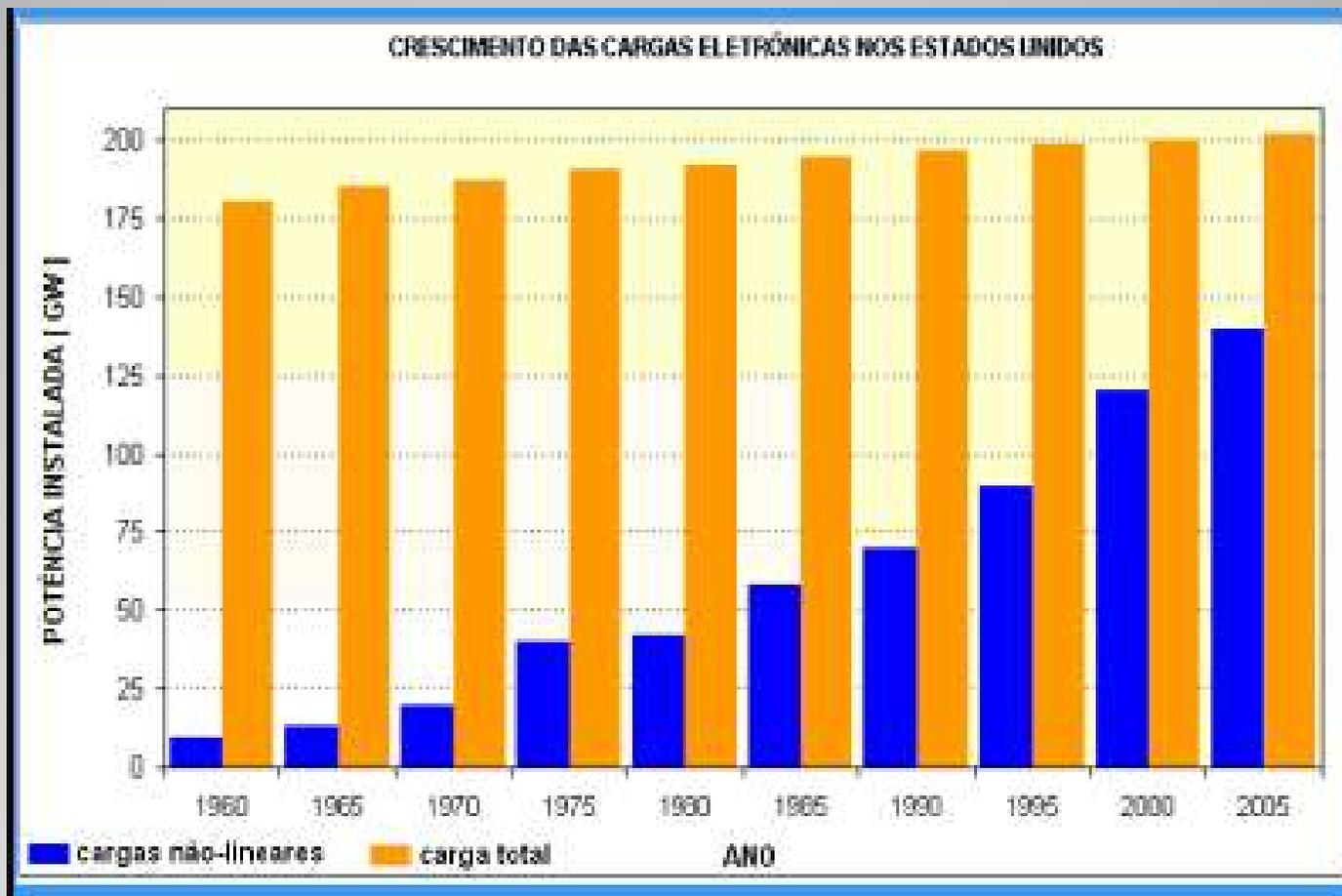
- **Imagem Empresarial**
- **Prejuízos Financeiros**
- **Competitividade**
- **Desenvolvimento Regional.**

## CUSTO ESTIMADO PARA INTERRUPÇÃO

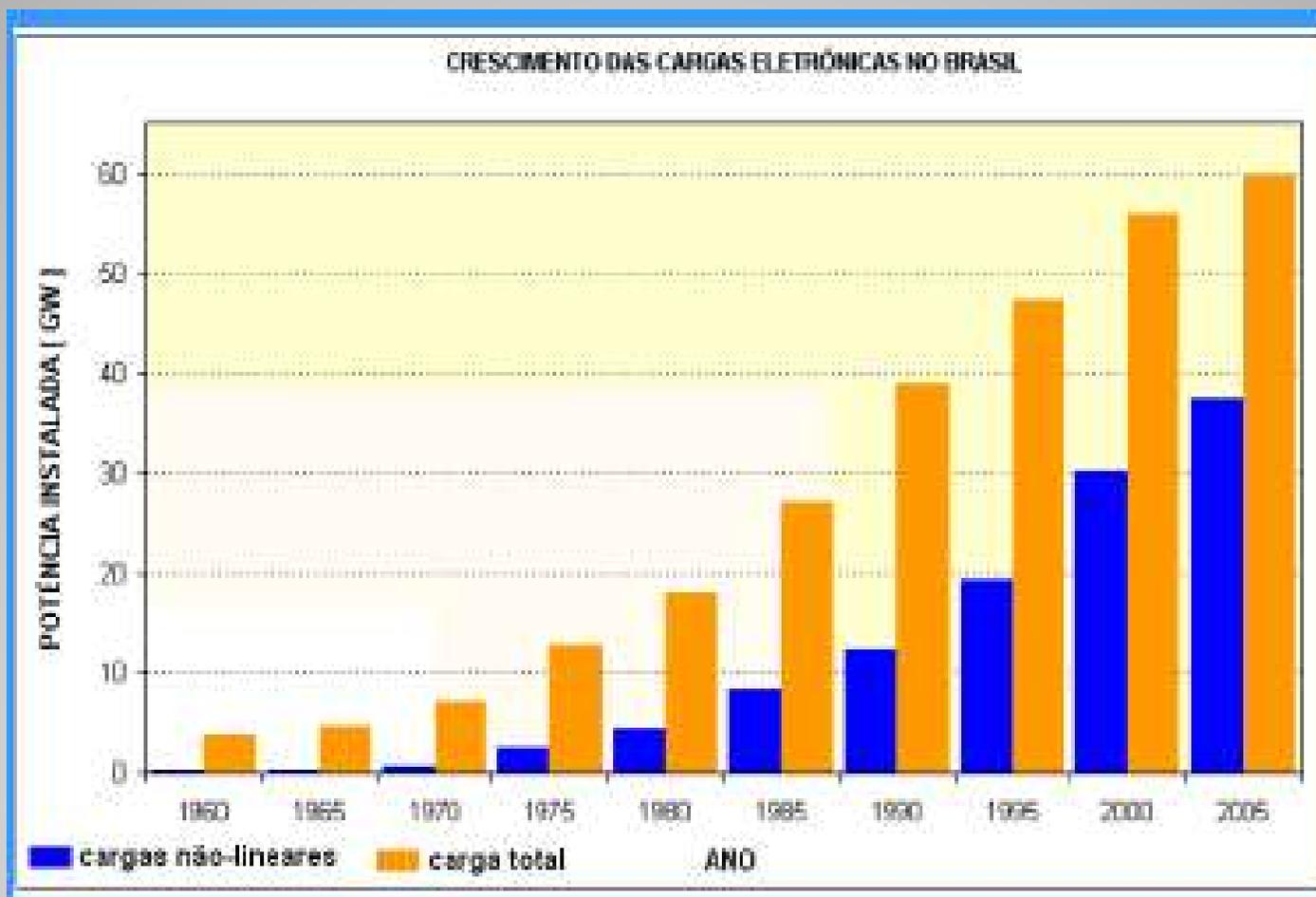
- A - SAÚDE
- B - GÁS
- C - PAPEL
- D - ÓRGÃOS PÚBLICOS
- E - TRANSPORTADORAS
- F - COMÉRCIO ATACADISTA
- G - MADEIREIRAS
- H - QUÍMICAS
- I - PLÁSTICOS/BORRACHAS
- J - EXTRAÇÃO DE PETRÓLEO
- K - PRODUTOS ALIMENTÍCIOS
- L - COMPUTADORES
- M - ENGENHARIA
- N - EQUIP. DE TRANSPORTE
- O - ÓRGÃOS DE FINANCIAMENTO
- P - CENTROS DE NEGÓCIOS
- Q - MINERAÇÃO
- R - EQUIPAM. ELETRÔNICO
- S - EQUIPAM. INSTRUMENTAÇÃO
- T - REFINARIAS DE PETRÓLEO
- U - SIDERÚRGICAS
- V - TEXTIL



## APLICAÇÃO DE EQUIPAMENTOS QUE AFETAM A QUALIDADE DE ENERGIA



## APLICAÇÃO DE EQUIPAMENTOS QUE AFETAM A QUALIDADE DE ENERGIA



## IMPACTOS PROVOCADOS POR ALGUMAS CARGAS ELÉCTRICAS EFICIENTES



ELEVADA TDH



5% ENERGIA  
ELÉCTRICA

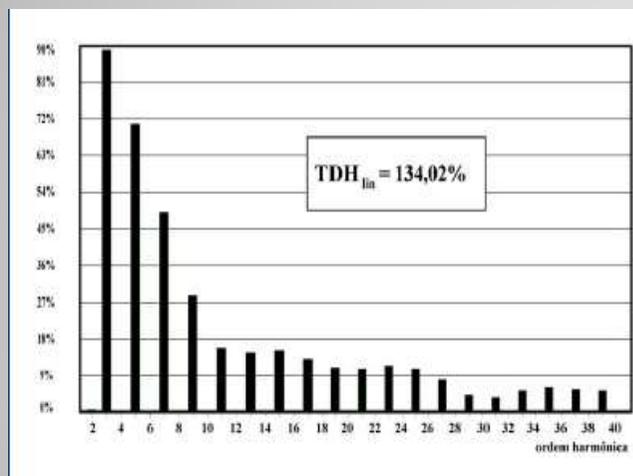
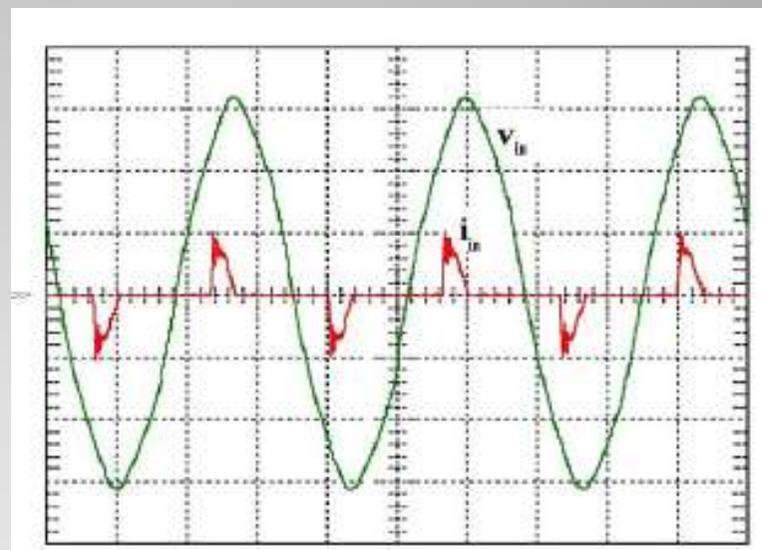
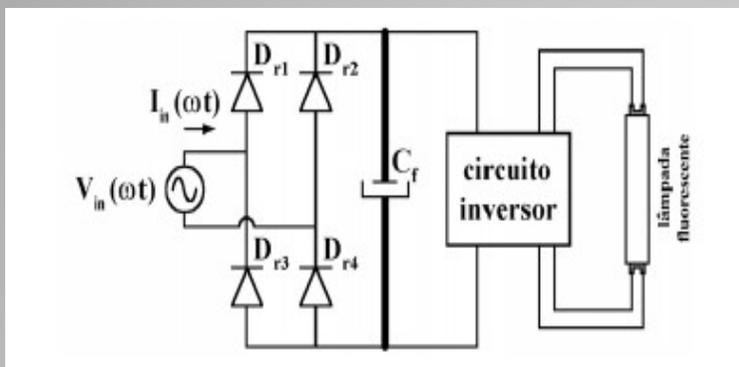
LUZ VISÍVEL



21% ENERGIA  
ELÉCTRICA

LUZ VISÍVEL

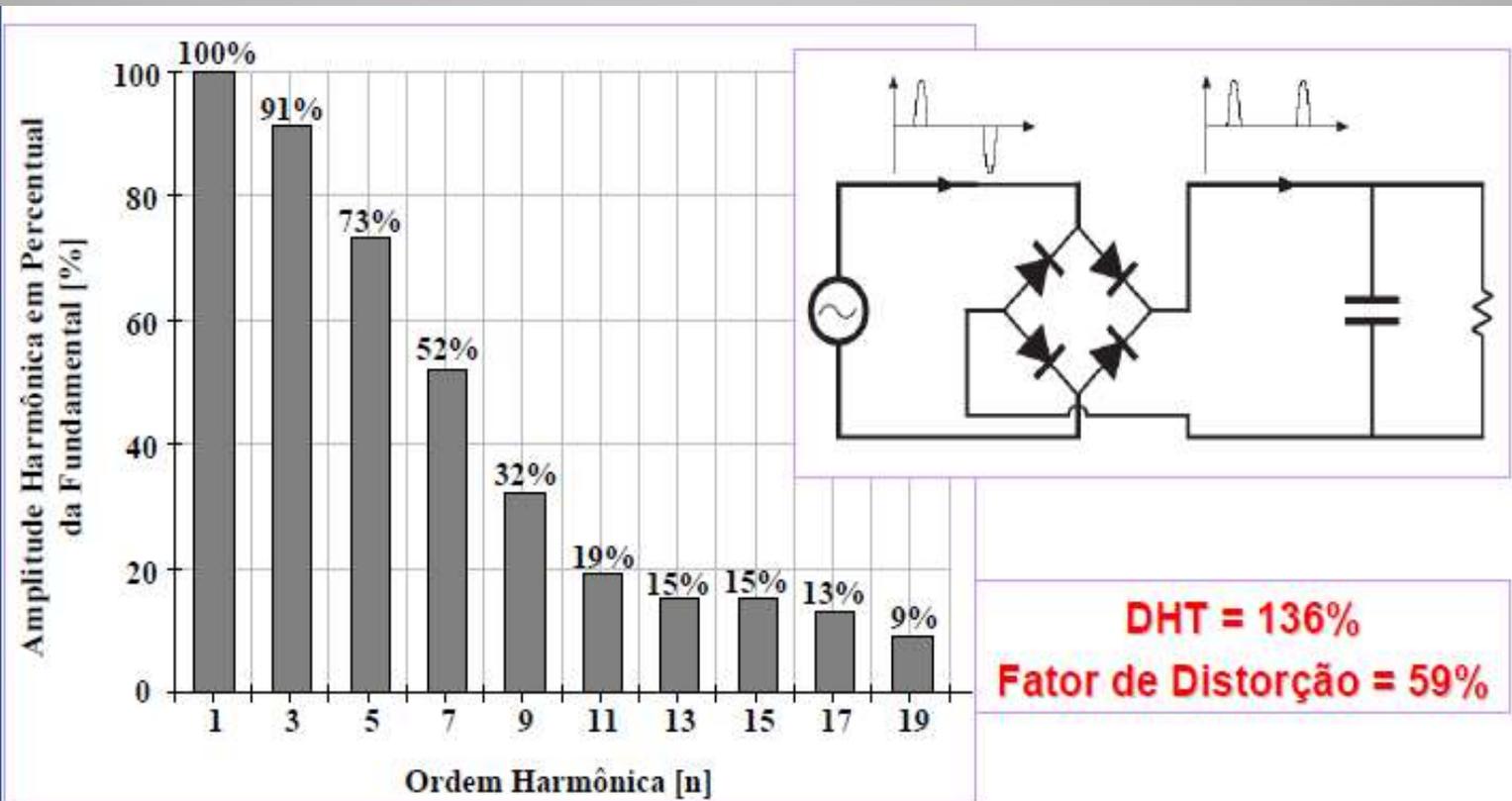
# REATOR ELETRÔNICO CONVENCIONAL



THD  $\approx$  134%

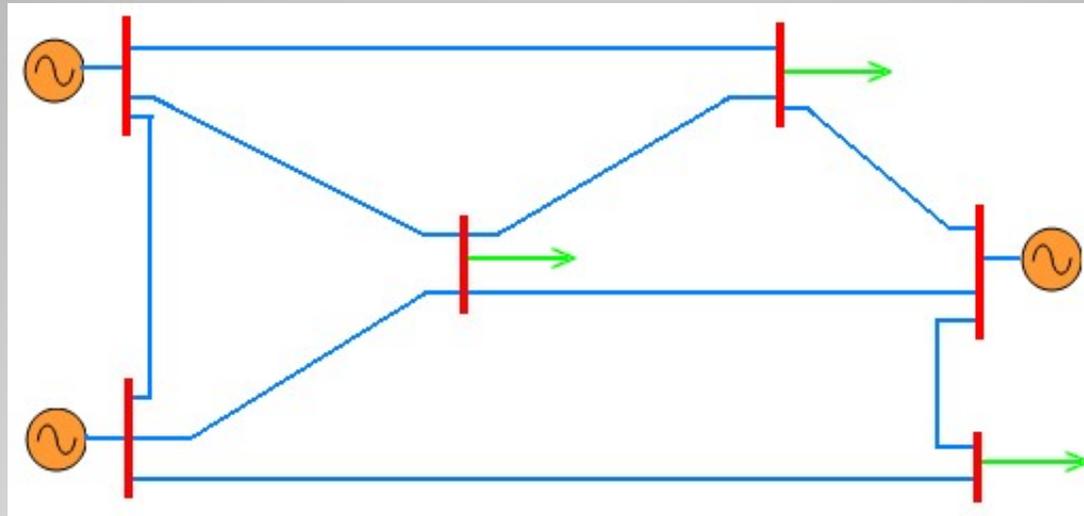
FP  $\approx$  0,54

# RETIFICADOR MONOFÁSICO COM FILTRO CAPACITIVO



Espectro Harmônico Típico para a Corrente de Entrada

## SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA



UM SEE DEVE GERAR ENERGIA ELÉTRICA EM QUANTIDADE SUFICIENTE E NOS LOCAIS APROPRIADOS, TRANSMITIR-LA AOS CENTROS DE CARGA E DISTRIBUI-LA AOS CONSUMIDORES INDIVIDUAIS, EM FORMA E QUALIDADE APROPRIADAS E COM O MENOR CUSTO ECOLÓGICO E ECONÔMICO POSSÍVEL

# SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA IDEAL

## TENSÃO

FORMA DE ONDA SENOIDAL

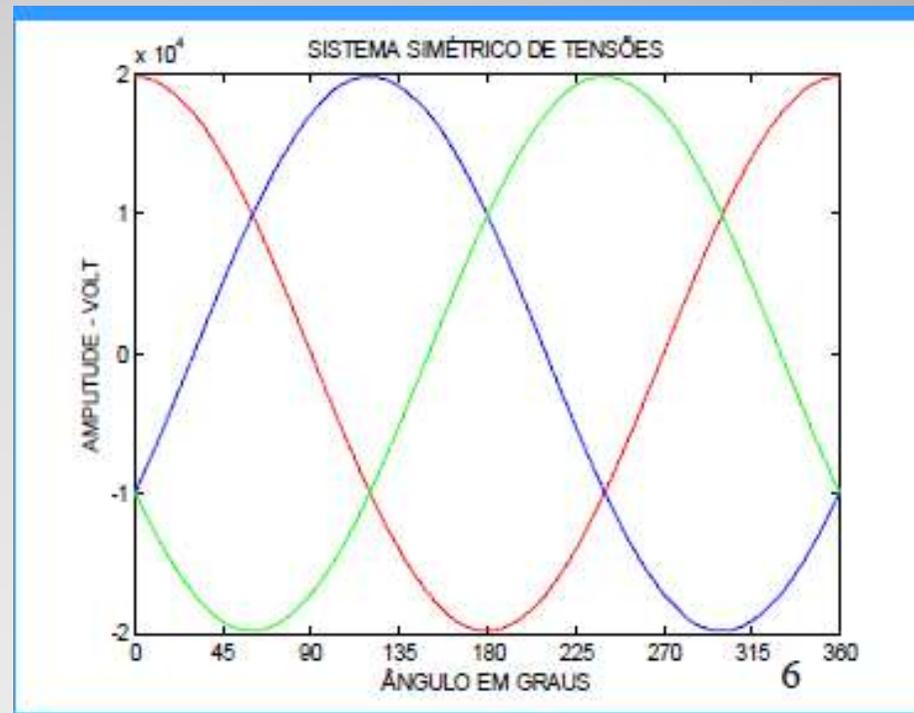
FREQUENCIA ÚNICA E  
CONSTANTE

MAGNITUDE CONSTANTE

SISTEMA TRIFÁSICO  
EQUILIBRADO

FATOR DE POTÊNCIA UNITÁRIO

PERDAS NULAS



# SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA REAL

## TENSÃO

FORMA DE ONDA NÃO SENOIDAL

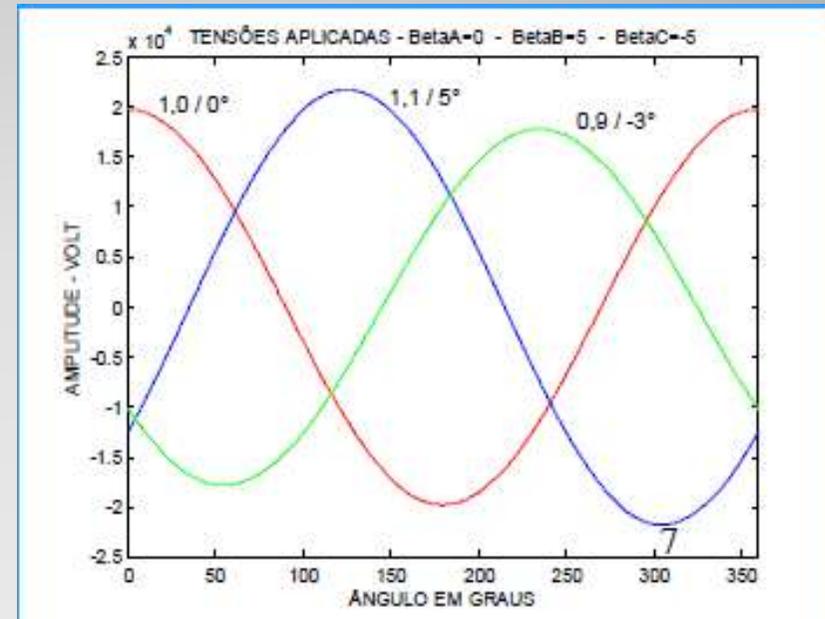
- MÚLTIPLAS FREQUÊNCIAS
- DISTÚRBIOS DIVERSOS

SISTEMA TRIFÁSICO DESEQUILIBRADO

- MAGNITUDES DIFERENTES
- FASES DIFERENTES

FATOR DE POTÊNCIA NÃO UNITÁRIO

PERDAS NÃO NULAS



# CARGAS ELÉTRICAS CONVENCIONAIS

## COMPORTAMENTO

**-ESTÁVEL**

**-EQUILIBRADO**

**-COMPORTAMENTO LINEAR NA OPERAÇÃO**

EXEMPLOS :MOTOR SÍNCRONO, MOTOR DE INDUÇÃO,CARGAS RESISTIVAS, REATORES NÃO SATURADOS,CAPACITORES, ETC...

# CARGAS ELÉTRICAS ESPECIAIS

## COMPORTAMENTO

- **VARIÁVEL**
- **NÃO LINEAR**
- **SUJEITO E DESEQUILÍBRIO**

EXEMPLOS : FORNOS A ARCO, INVERSORES,  
RETIFICADORES, COMPRESSORES, BOMBAS, PONTES  
CONVERSoras CONTROLADAS, ETC...

## DISTÚRBIOS EM SEE

QUALQUER PERTURBAÇÃO MANIFESTADA NOS NÍVEIS DE TENSÃO, NA FREQUÊNCIA CARACTERÍSTICA, NAS FORMAS DE ONDA DA TENSÃO OU CORRENTE QUE POSSAM RESULTAR EM INSUFICIÊNCIA DE ENERGIA, MÁ OPERAÇÃO, FALHA OU DEFEITO PERMANENTE EM EQUIPAMENTOS PERTENCENTES OU CONECTADOS AO SISTEMA ELÉTRICO.



# LOCALIZAÇÃO DISTÚRBIOS

## TRANSMISSÃO

- RETIFICAÇÃO E INVERSÃO EM HVDC
- COMPENSADORES ESTÁTICOS CONTROLADOS
- REATORES DE NÚCLEO SATURADO



# LOCALIZAÇÃO DISTÚRBIOS

## INDÚSTRIAL

- ACIONADORES CONTROLADOS EM AMPLITUDE E LARGURA DE PULSO
- PONTES RETIFICADORAS PARA PROCESSOS ELETROLÍTICOS
- SISTEMAS DE ACIONAMENTO A MOTORES: ELEVADORES, GUINDASTES..
- CARGAS CÍCLICAS: COMPRESSORES, BOMBAS, ESTAMPAS...
- FORNOS A ARCO
- MÁQUINAS DE SOLDA

# LOCALIZAÇÃO DISTÚRBIOS

## RESIDENCIAL

- TELEVISORES
- ELETRODOMÉSTICOS
- AR-CONDICIONADO
- LÂMPADAS COMPACTAS
- REATORES ELETRÔNICOS
- CONTROLADORES DE AQUECIMENTO E ILUMINAÇÃO



# TIPOS DE DISTÚRBIOS E SEUS EFEITOS

## FLUTUAÇÃO DA TENSÃO

- OSCILAÇÃO DE POTÊNCIA
- CINTILAÇÃO LUMINOSA -FLICKER
- FADIGA DO DIELÉTRICO
- MAU FUNCIONAMENTO DE EQUIPAMENTOS

## VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIA

- ERRO DO TEMPO SÍNCRONO
- VELOCIDADE VARIÁVEL DE MOTORES

# TIPOS DE DISTÚRBIOS E SEUS EFEITOS

## VARIAÇÃO DO FATOR POTÊNCIA

- PERDAS ADICIONAIS
- SOBRECARGA
- AQUECIMENTO
- QUEDA DE TENSÃO

## DISTORÇÃO HARMÔNICA

- PERDAS ADICIONAIS
- SOBRECARGA DE CAPACITORES
- AQUECIMENTO DE ENROLAMENTOS
- OPERAÇÃO INTEMPESTIVA DE PROTEÇÃO

# TIPOS DE DISTÚRBIOS E SEUS EFEITOS

## DESEQUILÍBRIO DE FASES

- SOBRETENSÃO
- SOBRECARGA
- OSCILAÇÕES DE POTÊNCIA
- OPERÇÃO DA PROTEÇÃO
- INDUÇÃO MÚTUA

## FORMAS DE REDUZIR OS EFEITOS

### MUDANÇA DO FATOR DE POTÊNCIA

- CHAVEAMENTO DE CAPACITORES/REATORES FIXOS
- CONTROLE DE EXCITAÇÃO DE COMPENSADOR SÍNCRONO
- COMPENSAÇÃO ESTÁTICA REATIVA

### DISTORÇÃO HARMÔNICA

- FILTRAGEM HARMÔNICA – RESSONANTES, ATIVOS, ELETROMAGNÉTICOS
- CIRCUITOS ATENUADORES RLC

### DESEQUILÍBRIO DE FASES

- CHAVEAMENTO DE CAPACITORES
- COMPENSAÇÃO REATIVA ESTÁTICA

## CAUSAS DA DETERIORIZAÇÃO DA QEE

- AUMENTO DO NÚMERO E DA POTÊNCIA DE EQUIPAMENTOS QUE UTILIZAM ELETRÔNICA DE POTÊNCIA
- UTILIZAÇÃO DE EQUIPAMENTOS A ARCO VOLTÁICO
- SATURAÇÃO MAGNÉTICA DE TRANSFORMADORES

## CONSEQUÊNCIAS DA DETERIORIZAÇÃO DA QEE

- MAU FUNCIONAMENTO DE EQUIPAMENTOS SENSÍVEIS À QUALIDADE DA TENSÃO
- PREJUÍZOS DE ORDEM ECONÔMICA
- PREJUÍZOS DO CONFORTO VISUAL E/OU AUDITIVO

# QUALIDADE DE ENERGIA

7ª Termo

**Engenharia Elétrica**

AULA 02

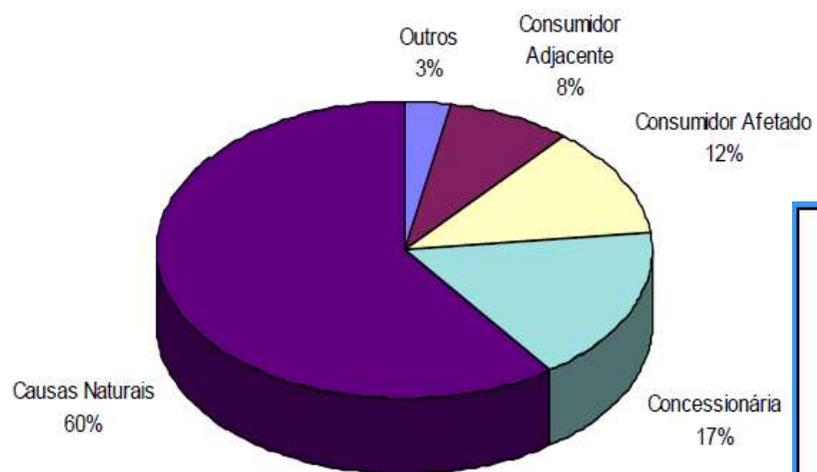
Prof. Dr. Giuliano Pierre Estevam

[www.electroenge.com.br](http://www.electroenge.com.br)

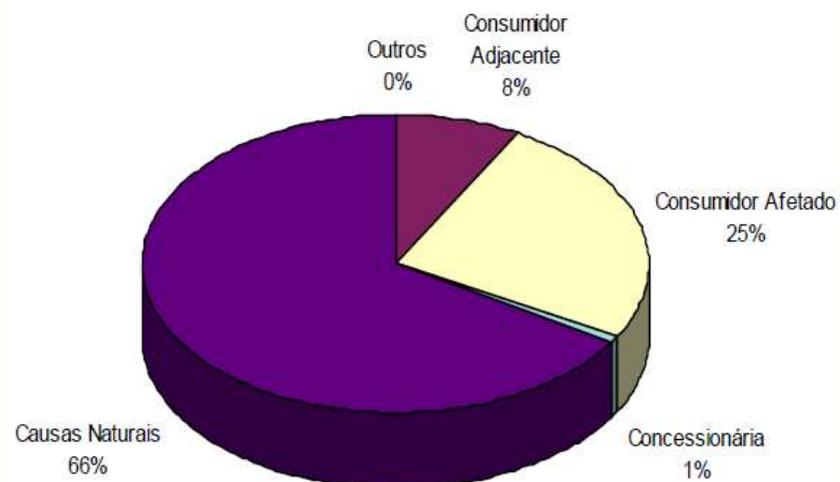


# ATRIBUIÇÃO DE RESPONSABILIDADES

Ponto de Vista do Consumidor



Ponto de Vista do Concessionário



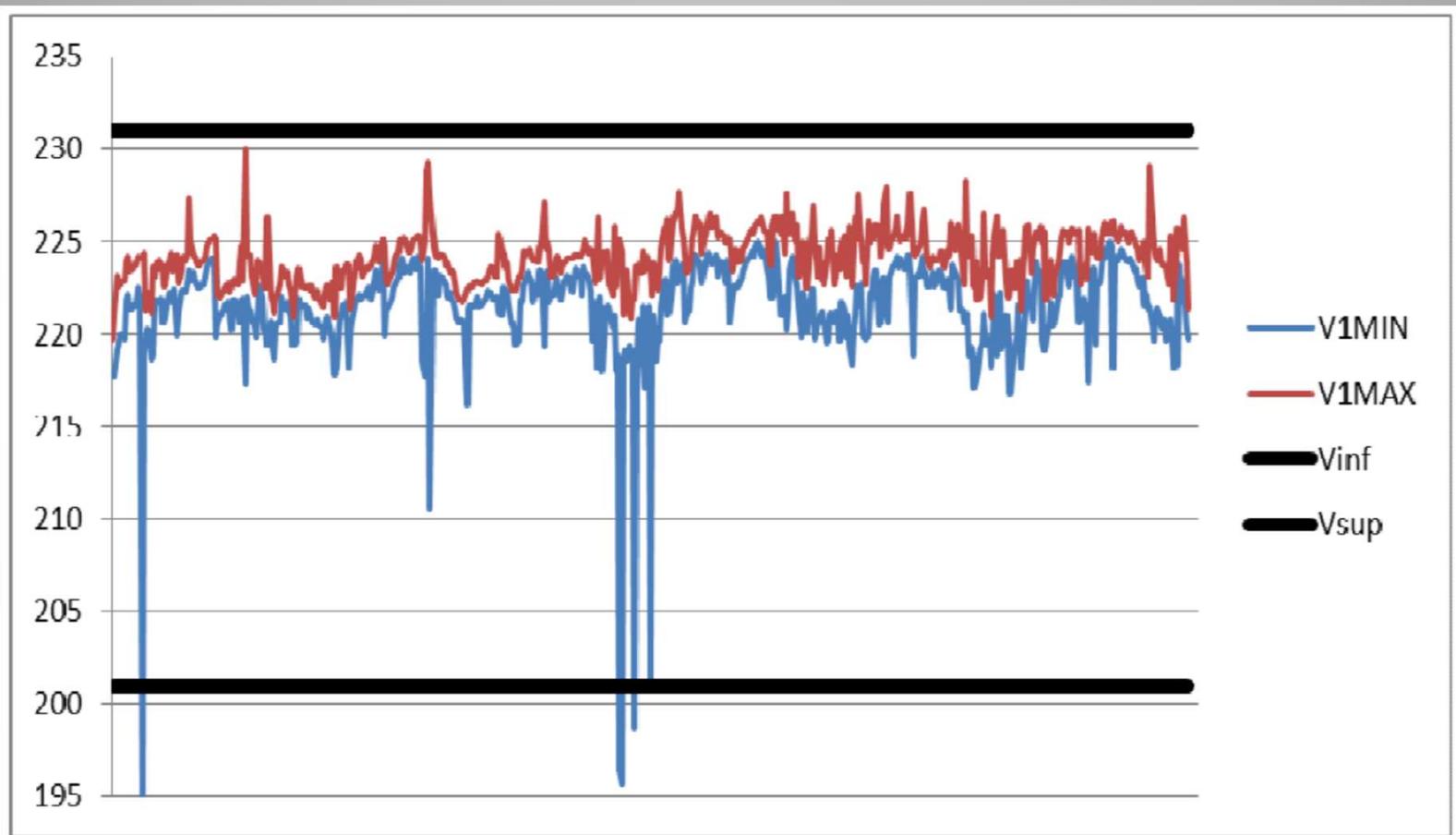


Fig. 06: Valores mínimos e máximos da tensão na fase 1 e os limites estabelecidos pela ANEEL.

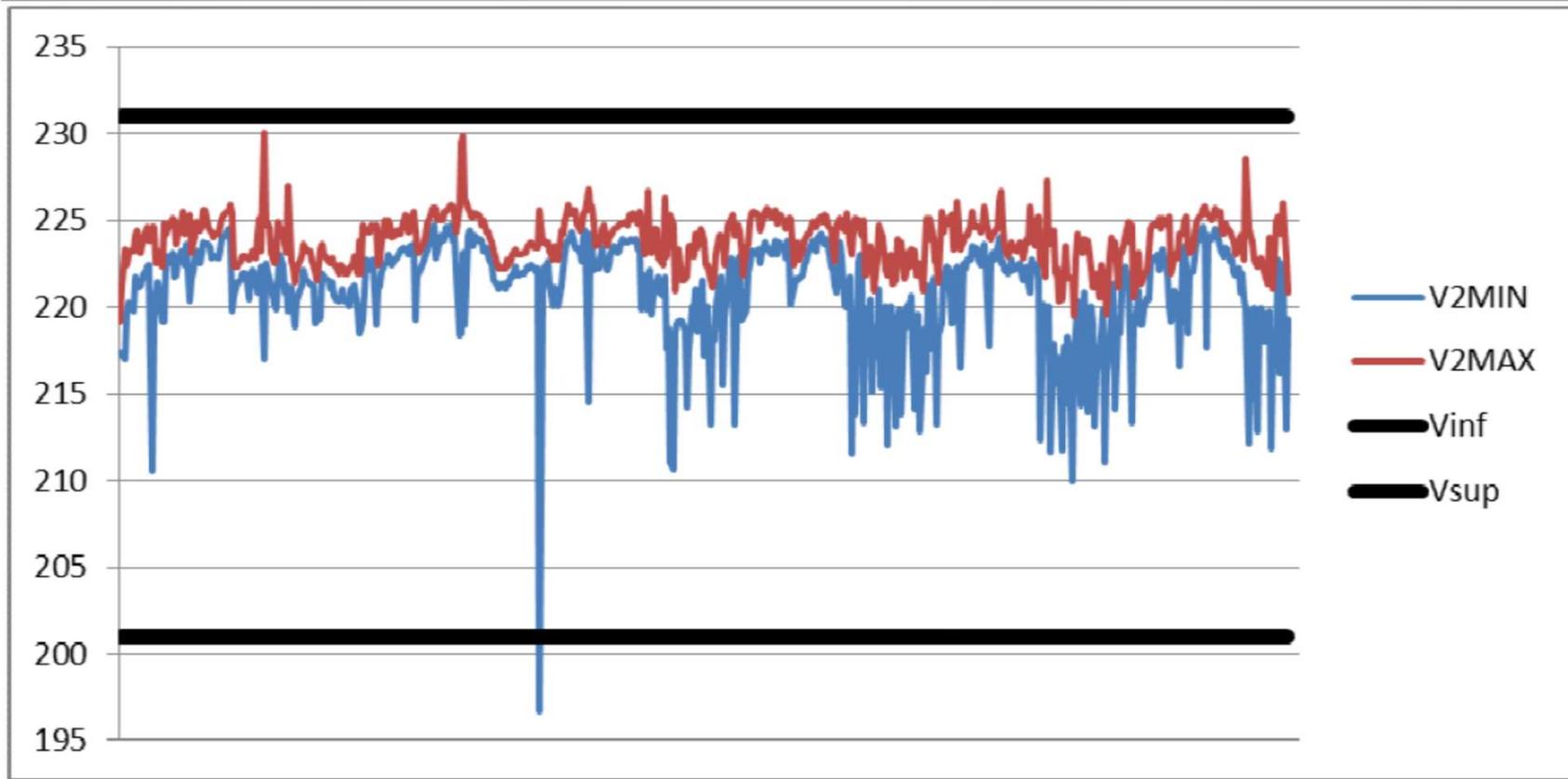


Fig. 07: Valores mínimos e máximos da tensão na fase 2 e os limites estabelecidos pela ANEEL.

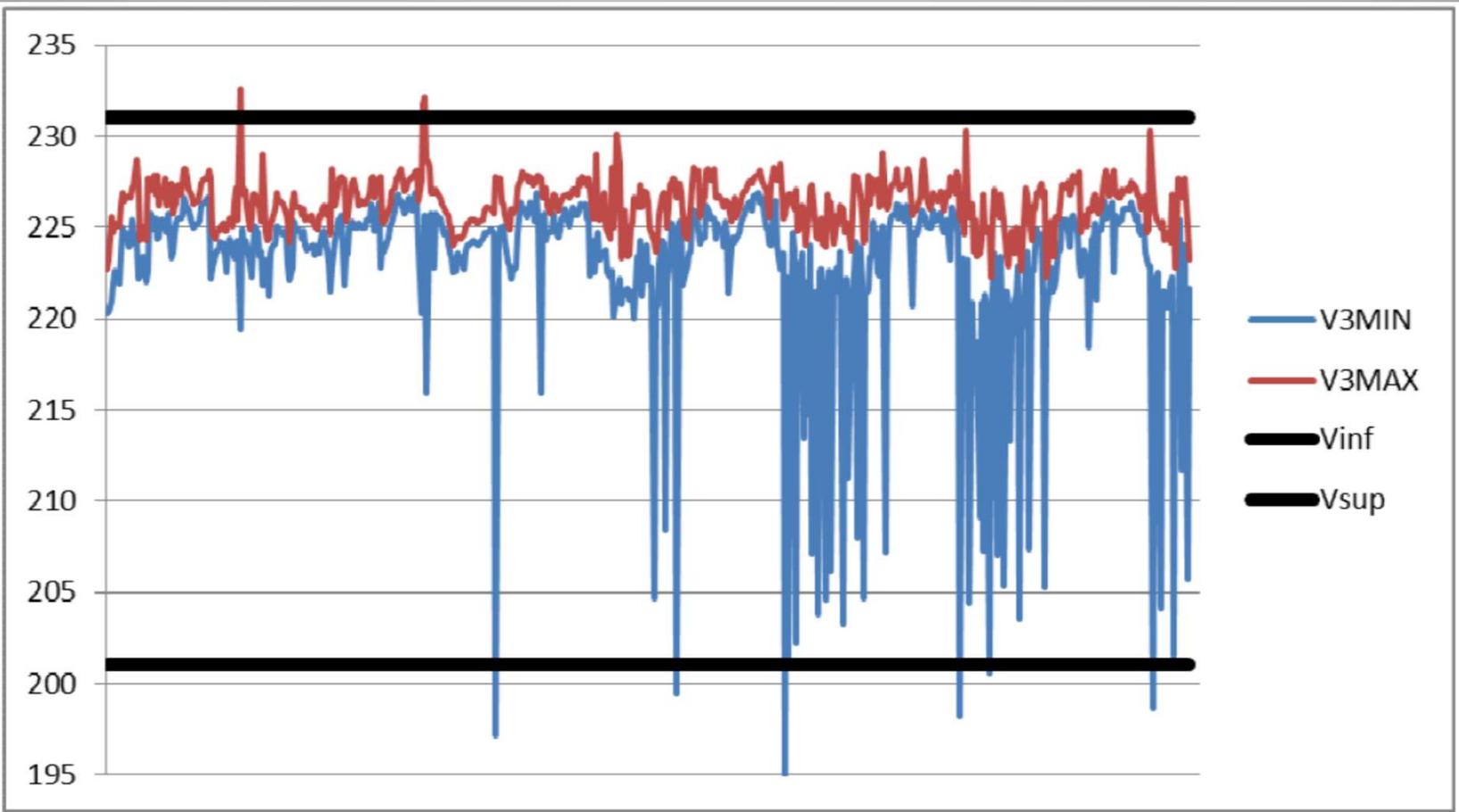
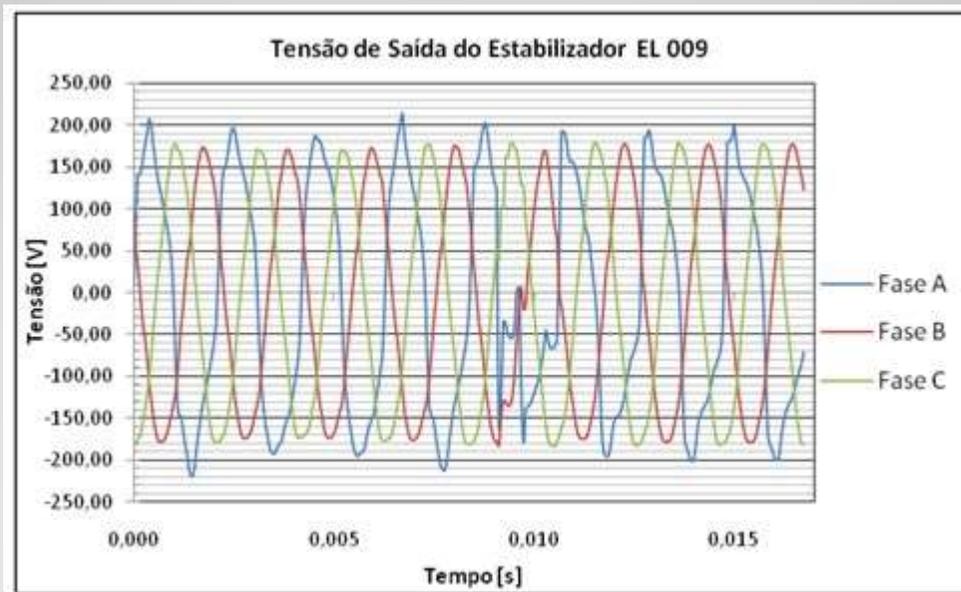


Fig. 08: Valores mínimos e máximos da tensão na fase 3 e os limites estabelecidos pela ANEEL.

## NOMECLATURAS MAIS COMUNS DOS DISTÚRBIOS DA ENERGIA

### Variação de tensão

Modificação no valor de tensão originalmente definido com padrão ou comumente chamado de valor nominal, sendo possível variar para mais ou para menos.



## Causas da variação de tensão

Chaveamento de cargas de elevada potência, que ao serem acionadas, demandam grande quantidade de energia, fazendo com que muitas vezes cause uma redução da tensão e quando desligada, devolvem essa energia para a rede, normalmente aumentando a tensão na rede.



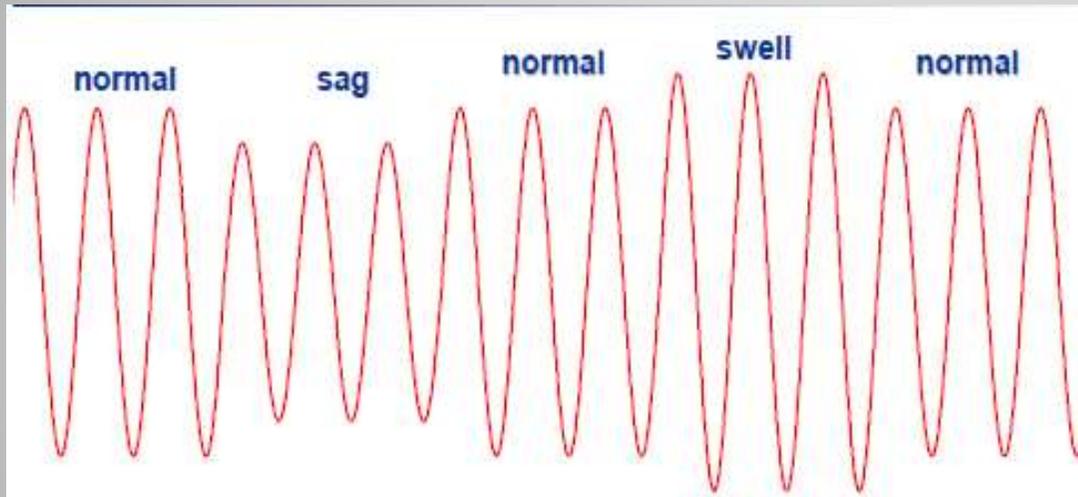
Acionamento de banco de capacitores que, ao serem energizados, exigem da rede uma capacidade maior de corrente. Com isso ocorre uma redução significativa na tensão.

## Efeitos da variação de tensão

- Desprogramação de microprocessadores, CLP;
- Variação da velocidade de motores;
- Desligamento por dispositivos de proteção;
- Falhas de comutação;
- Desligamento de lâmpadas a descarga;
- Atuação de dispositivos de proteção contra sobrecorrente em acionamentos no modo regenerativo.

## Variação de tensão de curta duração (VTCD)

- Afundamento de tensão (SAG);
- Elevação de tensão (SWELL);



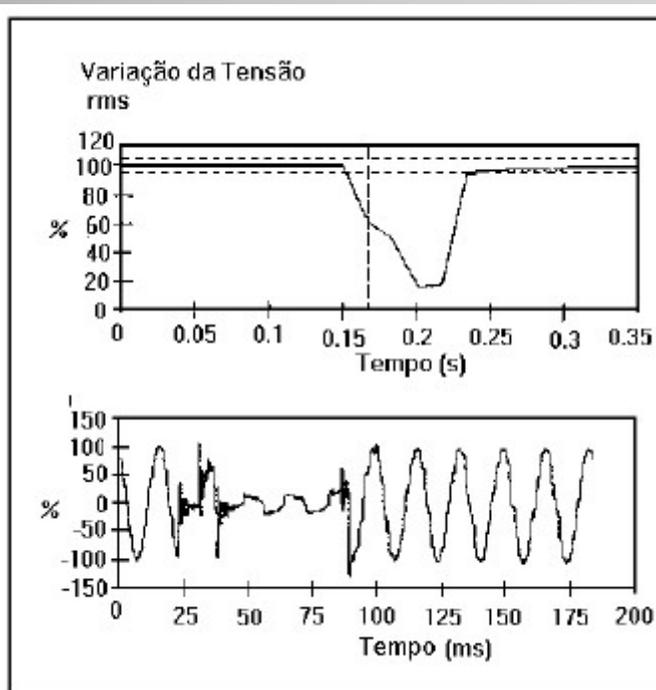
**VTCD é um evento aleatório de tensão caracterizado por desvio significativo, por um período de um ciclo inferior a um minuto, do valor eficaz da tensão**

## Classificação da variação de tensão de curta duração

Denominação	Sigla	Duração da Variação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão nominal
Interrupção momentânea de tensão	IMT	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 pu
Afundamento momentâneo de tensão	AMT	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 pu e inferior a 0,9 pu
Elevação momentânea de tensão	EMT	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 pu
Interrupção temporária de tensão	ITT	Superior a três segundos e inferior ou igual a um minuto	Inferior a 0,1 pu
Afundamento temporário de tensão	ATT	Superior a três segundos e inferior ou igual a um minuto	Superior ou igual a 0,1 pu e inferior a 0,9 pu
Elevação temporária de tensão	ETT	Superior a três segundos e inferior ou igual a um minuto	Superior a 1,1 pu

## Afundamento de tensão de curta duração (SAG ou DIP)

Redução no valor da tensão eficaz, entre 0,1 e 0,9p.u., na frequência nominal, com duração de 0,5 ciclo em um minuto.



Causam inúmeros problemas em equipamentos que possuem componentes eletrônicos como microcontroladores, microprocessadores, memórias, etc...

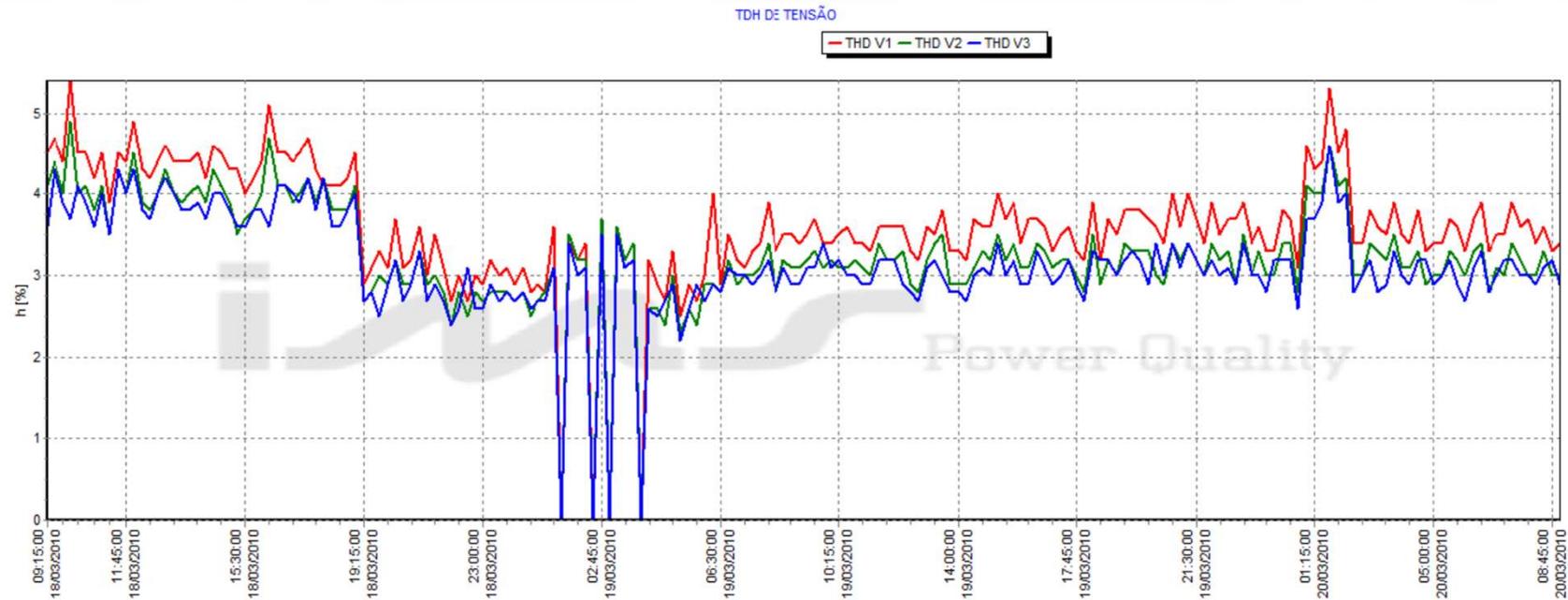
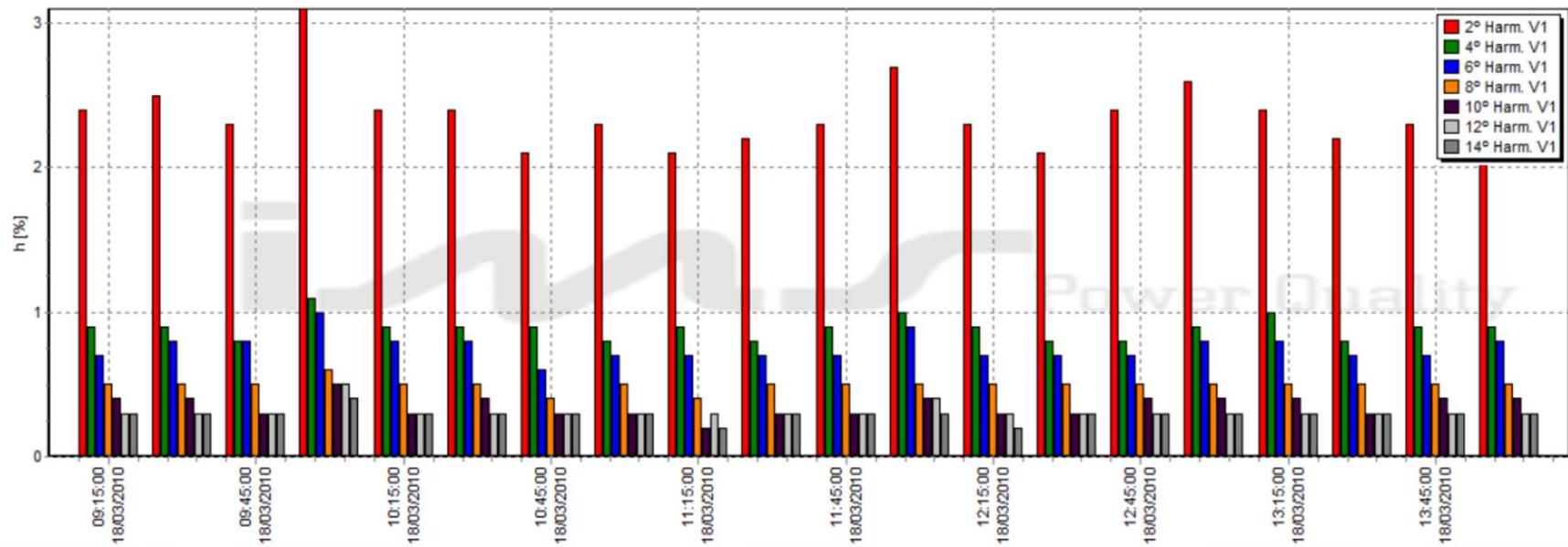


Fig. 2: Taxa de distorção harmônica de tensão.

HARMÔNICAS - TENSÃO ELÉTRICA - ORDEM PAR



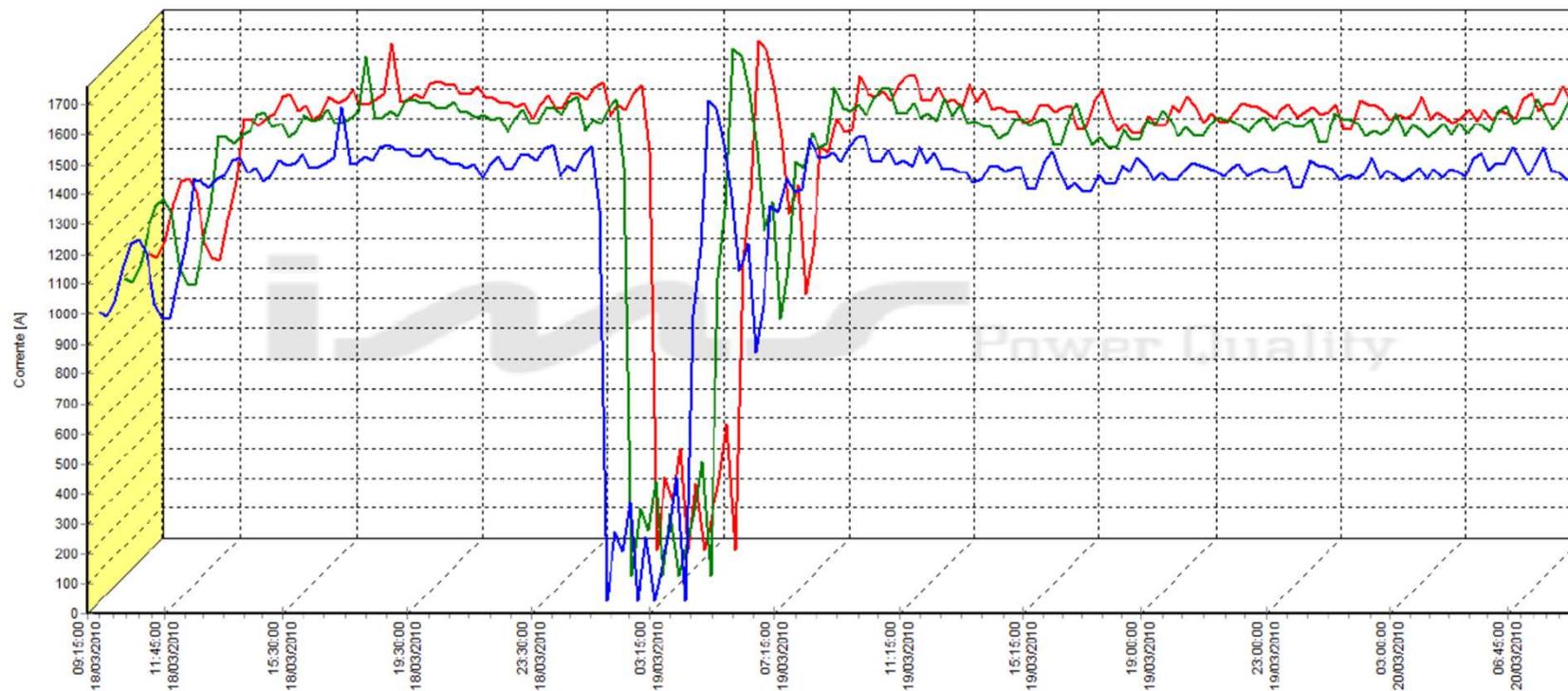


Fig. 9: Corrente elétrica por fase.

## Como tratar ou minimizar o efeito

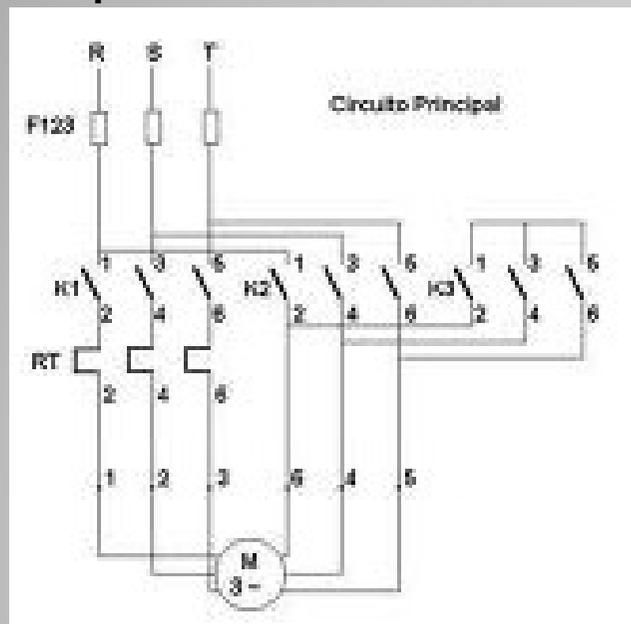
- Avaliação das instalações elétricas desde a entrada da subestação até o ponto de consumo, incluindo as malhas de controle;
- Identificação dos afundamentos de tensão de curta duração VTCD e outros problemas de qualidade de energia;
- Envolvimento do corpo de manutenção, produção e qualidade para interpretação do processo industrial, e os principais equipamentos afetados com a VTCD;
- Verificação do histórico de manutenção e paradas das máquinas e levantamento estatístico das paradas;
- Elaboração de lista de equipamentos críticos;

# Soluções

Alimentação dos sistemas de comandos e de força deve ser separados sempre que possível, visto que a influência do acionamento de cargas de potência elevada pode ser uma das causas do afundamento.

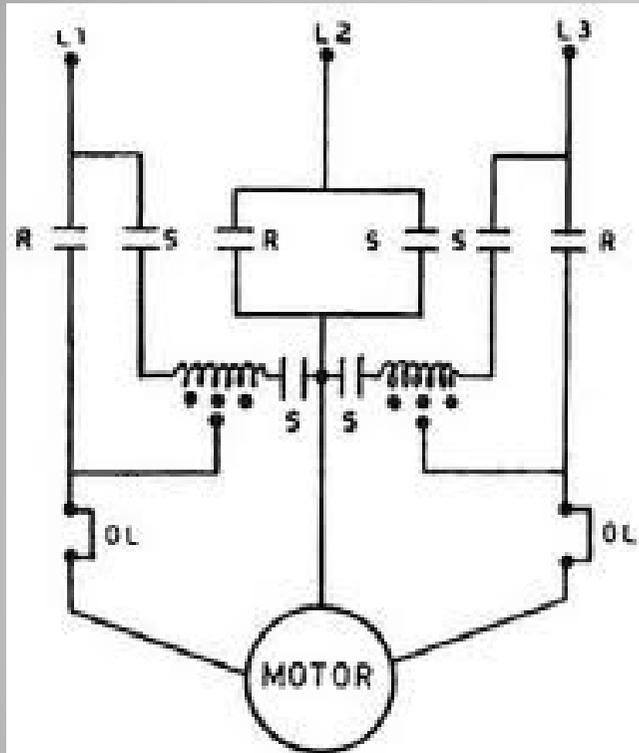
Utilização de condicionadores de energia, quem garantem a saída de tensão estável independente da variação da entrada. Suportam variação de até 25% na entrada sem o chaveamento das baterias ou o uso de cargas das baterias.

# PARTIDA ESTRELA TRIÂNGULO



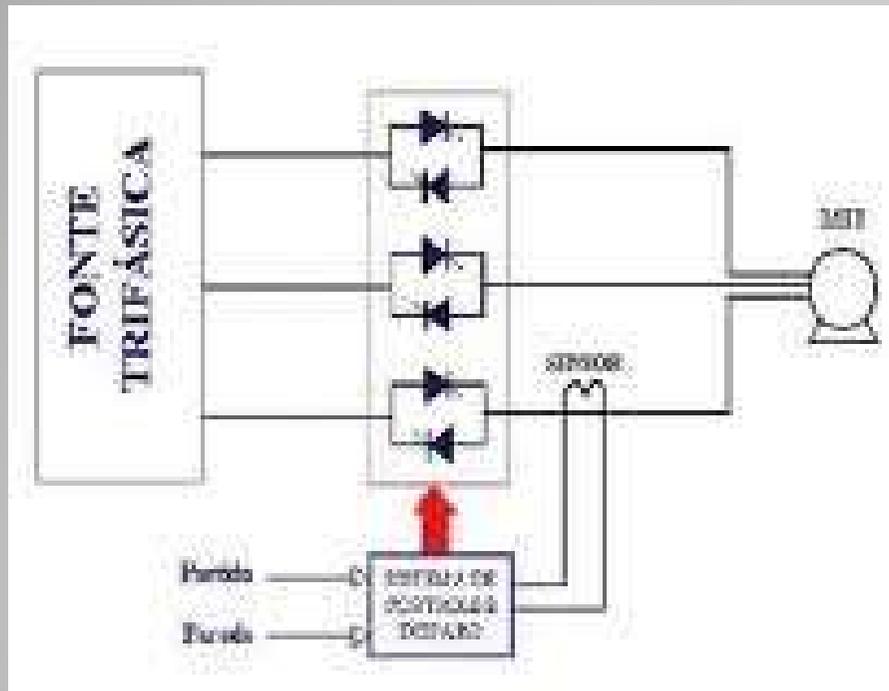
Partida estrela triângulo : Energizar o motor trifásico com tensão menor para que ele saia da inércia (estrela), portanto a corrente exigida para esse deslocamento não será tão grande quanto a corrente exigida para a partida direta. Assim que o motor atinge uma determinada rotação, o circuito é alimentado com a tensão de operação (triângulo) e este passa a atingir o regime de funcionamento.

# AUTOTRANSFORMADOR



Se utiliza de redução de tensão para alimentar o circuito do motor para a partida, reduzindo assim a corrente exigida para saída da inércia. Quando a velocidade do motor atinge um determinado valor, automaticamente ele passa a alimentar o circuito com corrente nominal.

# Soft starter



Permitem uma partida suave, são baseadas em tiristores que são acionados por um circuito eletrônico de disparo, de forma, controlar a corrente de partida pelo controle da tensão. O controle é realizado pela variação do ângulo de disparo. É importante salientar que o controle de disparo dos tiristores causam distorções na forma de onda da corrente.

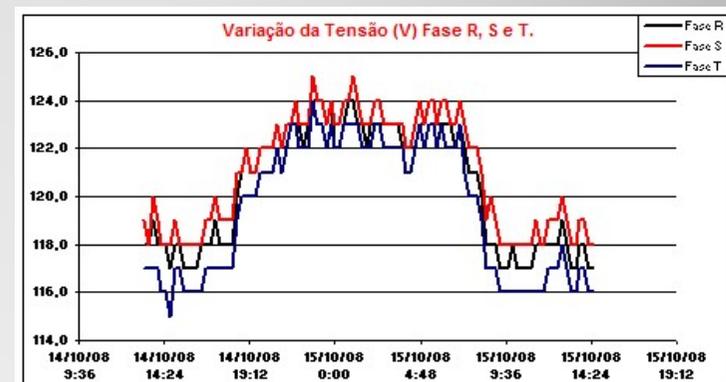
## Variação de tensão de longa duração VTLD

Ocorrem no valor eficaz da tensão (sobretensão ou subtensão)

Sobretensão  $\longrightarrow$   $10\% V_{\text{nominal}} < V < 20\% V_{\text{nominal}}$

Subtensão  $\longrightarrow$   $V < 90\% V_{\text{nominal}}$

Possuem duração superior a 1 minuto



## Variação de tensão de longa duração

### CAUSAS

- Utilização de banco fixo de capacitores para correção de fator de potência;
- Variações de carga no sistema ou por eventos, como a má operação de banco de reguladores.
- Alta impedância de percurso da corrente elétrica.
- Tap 's de transformadores incorretamente conectados.
- Desligamento de banco de capacitores
- Baixo fator de potência

## Variação de tensão de longa duração

### CONSEQUÊNCIAS

- Dispositivos eletrônicos podem sofrer danos durante condições de sobretensões; (sobretensão)
- Diminuição da vida útil de equipamentos, tais como: transformadores, cabos, disjuntores, TCs, TPs e máquinas rotativas; (sobretensão)
- Redução da potência reativa fornecida por bancos de capacitores ao sistema; (subtensão)
- Possível interrupção da operação de equipamentos eletrônicos, tais como computadores e controladores eletrônicos; (subtensão)
- Redução de índice de iluminação para os circuitos de iluminação incandescente; (subtensão)

## Variação de tensão de longa duração

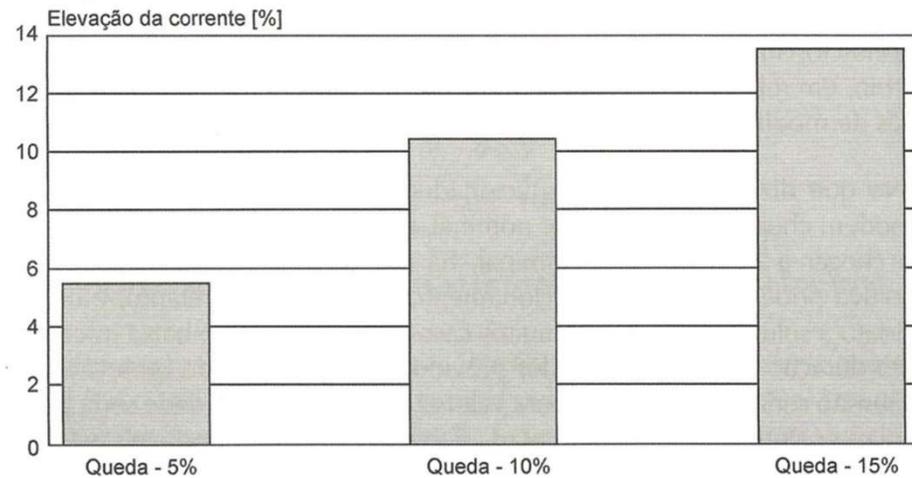
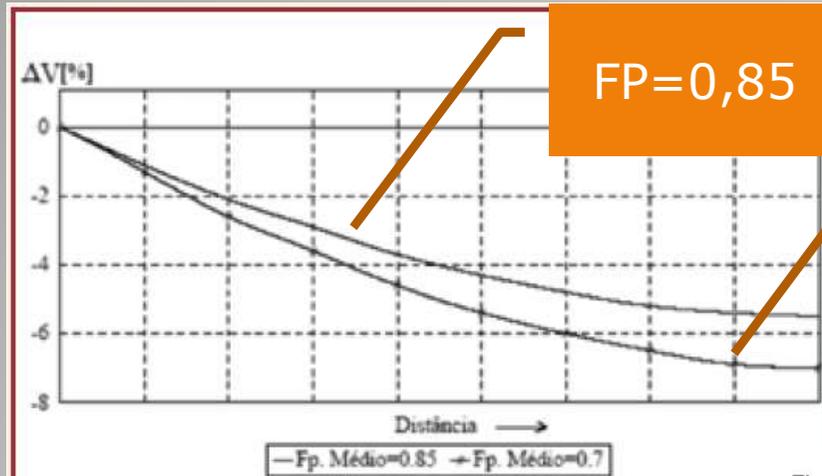


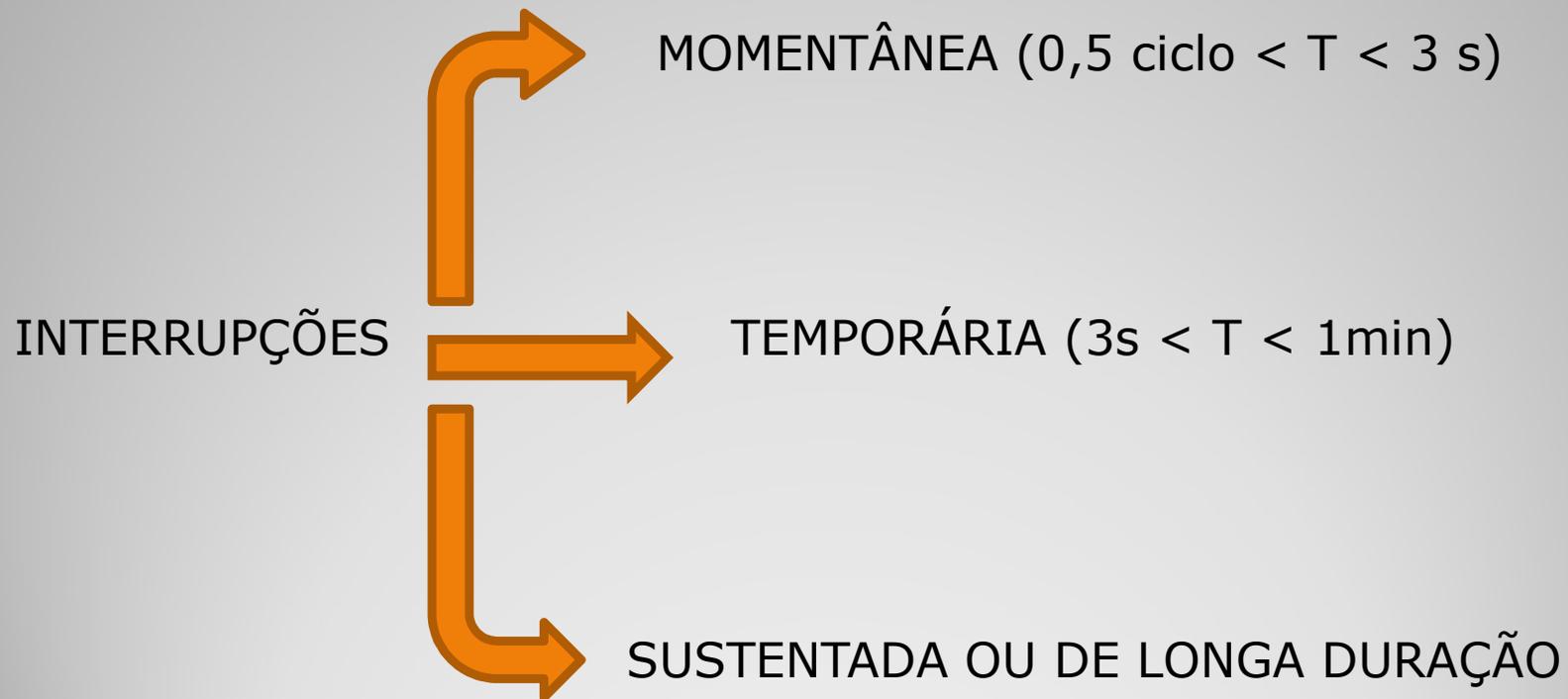
Figura 3.15 - Queda de tensão em função da elevação de corrente em um motor de indução de 5CV.

# Soluções

- Instalar reguladores de tensão para elevar o nível da tensão;
- Instalar capacitores shunt para reduzir a corrente do circuito;
- Instalar capacitores série para cancelar a queda de tensão indutiva;
- Instalar cabos com bitolas maiores para reduzir a impedância  $Z$ ;
- Mudar o transformador de serviço para um de capacidade maior, reduzindo, assim, a impedância  $Z$ ; e
- Instalar compensadores estáticos de reativos, os quais têm os mesmos objetivos que os capacitores, para mudanças bruscas de cargas.

# Interrupções

A interrupção é caracterizada por valores de tensão inferiores a 10% da tensão nominal, chegando a ausência total de tensão que pode ocorrer entre alguns ciclos e até vários minutos.



## CAUSAS

As interrupções sustentadas podem ocorrer de forma **inesperada** ou de forma **planejada**.

A maioria delas ocorre inesperadamente e as principais causas são falhas nos disjuntores, queima de fusíveis, falha de componentes de circuito alimentador, etc.

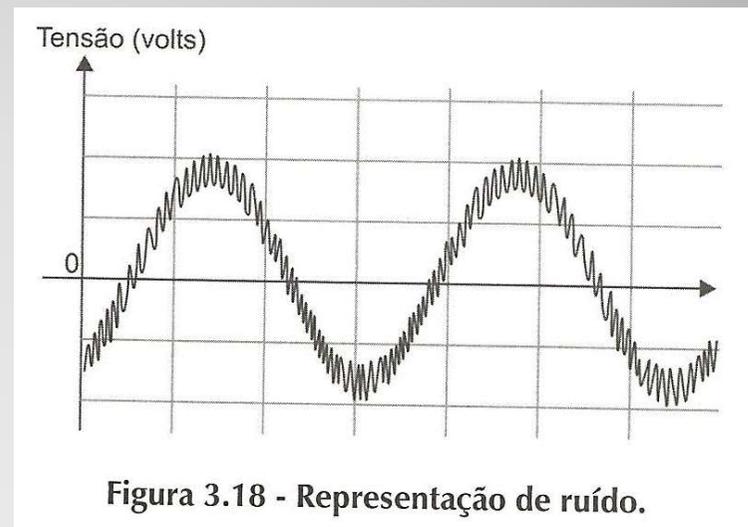
Já as interrupções planejadas são feitas geralmente para executar manutenção na rede, ou seja, serviço como troca de cabos e postes, mudança do tap do transformador, alteração dos ajustes de equipamentos de proteção, etc.

# RUÍDO

Sinal elétrico com frequência menor que 200kHz, superpondo-se ao sinal de potência, seja corrente ou tensão, que circula pelos condutores fase ou neutro de uma instalação elétrica.

Pode ser gerado:

- Já vem incorporado ao sinal que foi transmitido;
- Por influência externas: chaveamento de cargas, presença de equipamento eletromagnético;
- Aterramento mal projetado e instalado.



# CATEGORIAS DE RUÍDOS

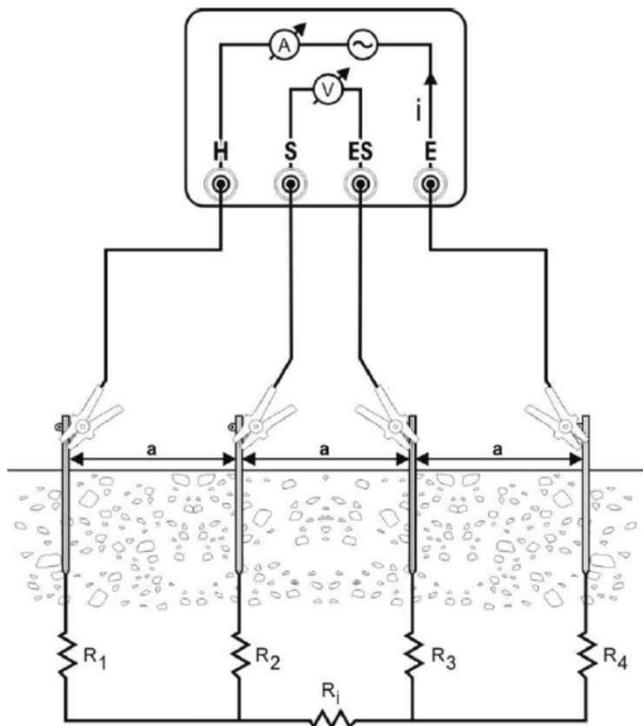
MODO COMUM  RUÍDO ENTRE NEUTRO E TERRA

Afeta a referência nos circuitos eletrônicos, pela existência de diferença de potencial entre as referências do circuito

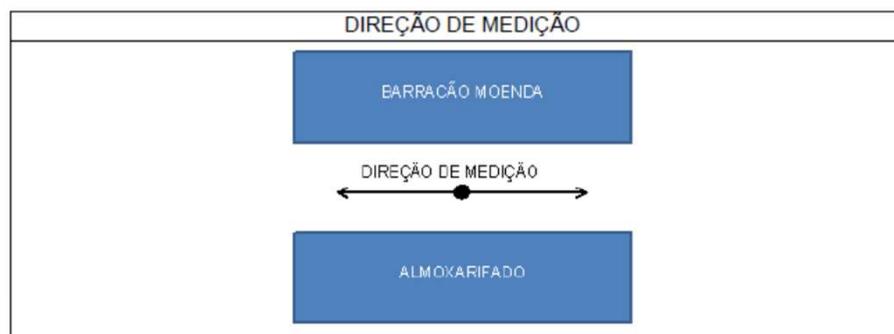
MODO NORMAL  RUÍDO ENTRE FASES

# MINIMIZAÇÃO DOS RUÍDOS

- MELHORIA DO ATERRAMENTO;
- BLINDAGEM ELETROMAGNÉTICA (GAIOLA DE FARADY);
- ACOPLAMENTO DE SINAIS (Indutivo e capacitivo)



$$\rho = \frac{4 \pi a R_T}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}}$$

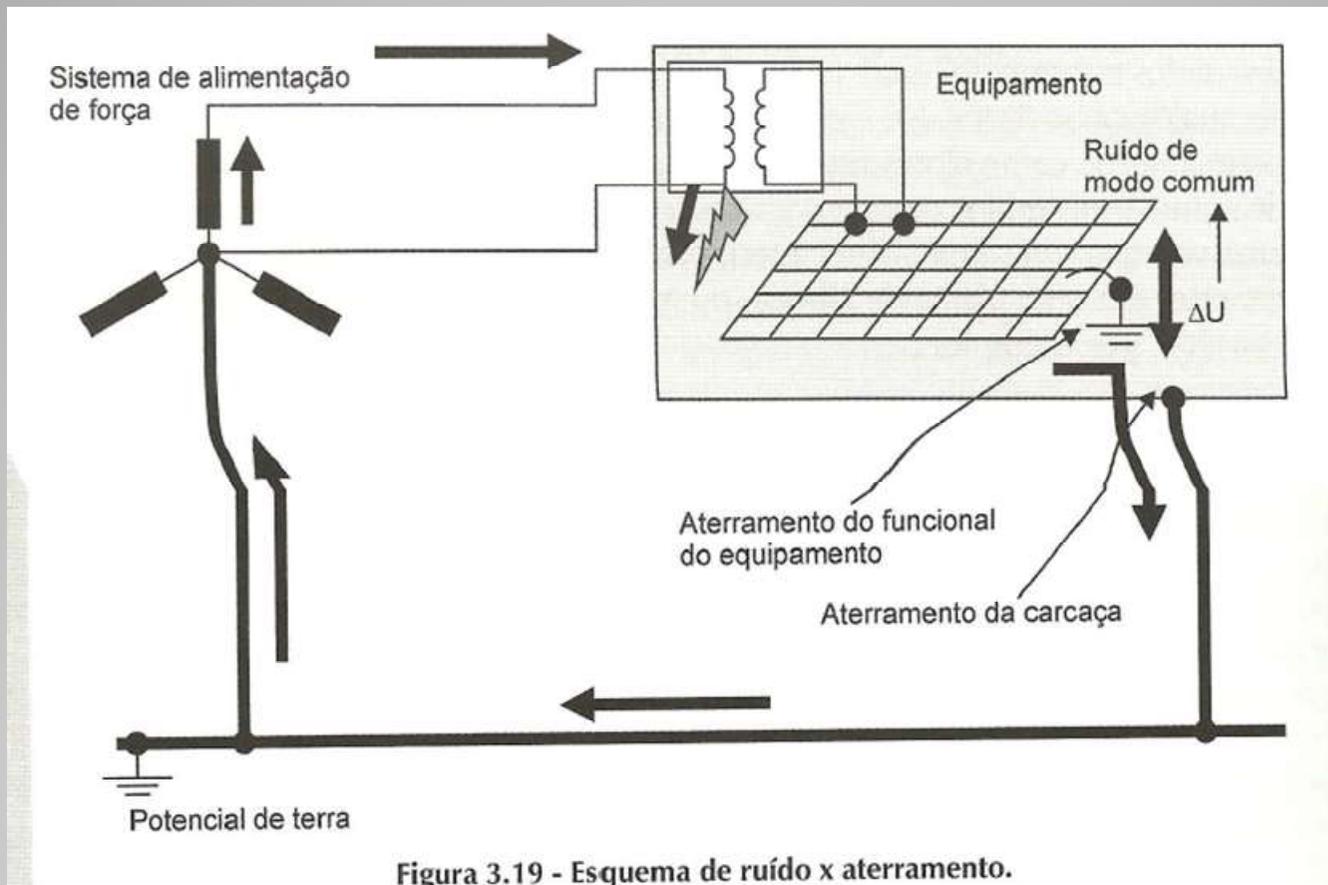


MEDIDA	ESPAÇAMENTO (m)	RESISTÊNCIA MEDIDA (Ω)	RESISTIVIDADE (Ω.m)	PROFUNDIDADE (m)
1	1	15,7	129,74	0,75
2	2	12,1	167,12	1,5
3	4	8,7	224,38	3,0
4	6	5,8	221,18	4,5
5	8	2,5	126,45	6,0
6	10	0,3	18,92	7,5

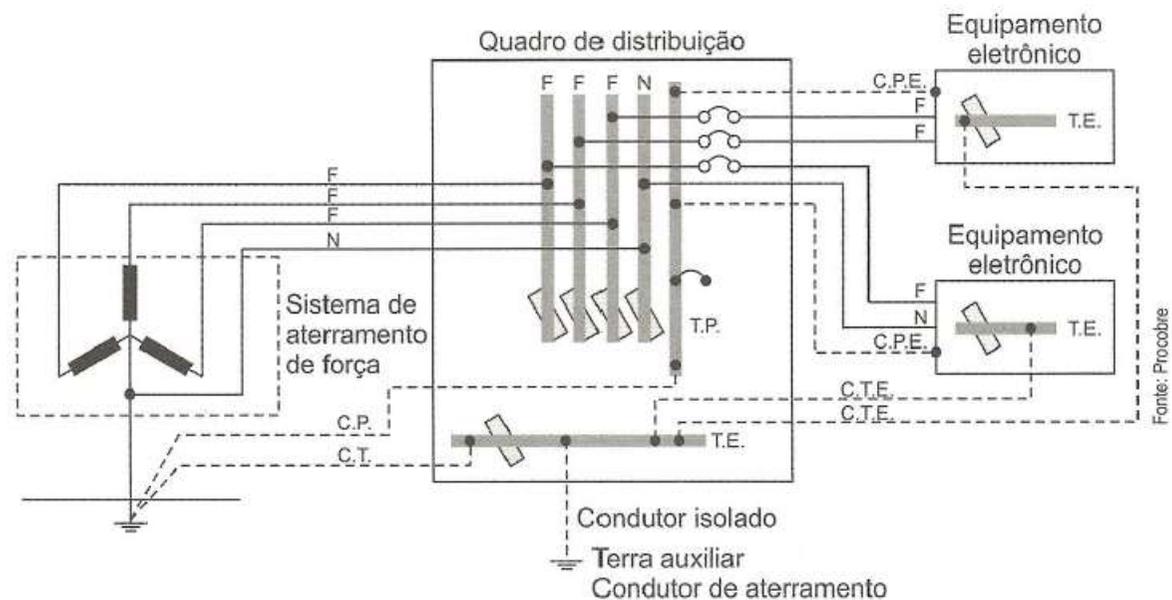




## Equipamento e fonte aterrados em ponto diferentes.



## Aterramento de ponto único.



Fonte: Procobre

### Legenda

F - Fase	C.P.E. - Condutor isolado de proteção dos quadros de equipamentos eletrônicos
N - Neutro	C.T.E. - Condutor isolado de aterramento da T.E.
T.P. - Barra de aterramento que recebe o condutor de proteção (retorno de defeito fase-terra)	C.T. - Condutor isolado de aterramento da T.E. do quadro de distribuição
T.E. - Barra de ferro de referência para equipamentos eletrônicos - isolada do quadro.	C.P. - Condutor de aterramento da T.E. do quadro de distribuição

## Malha de aterramento de referência

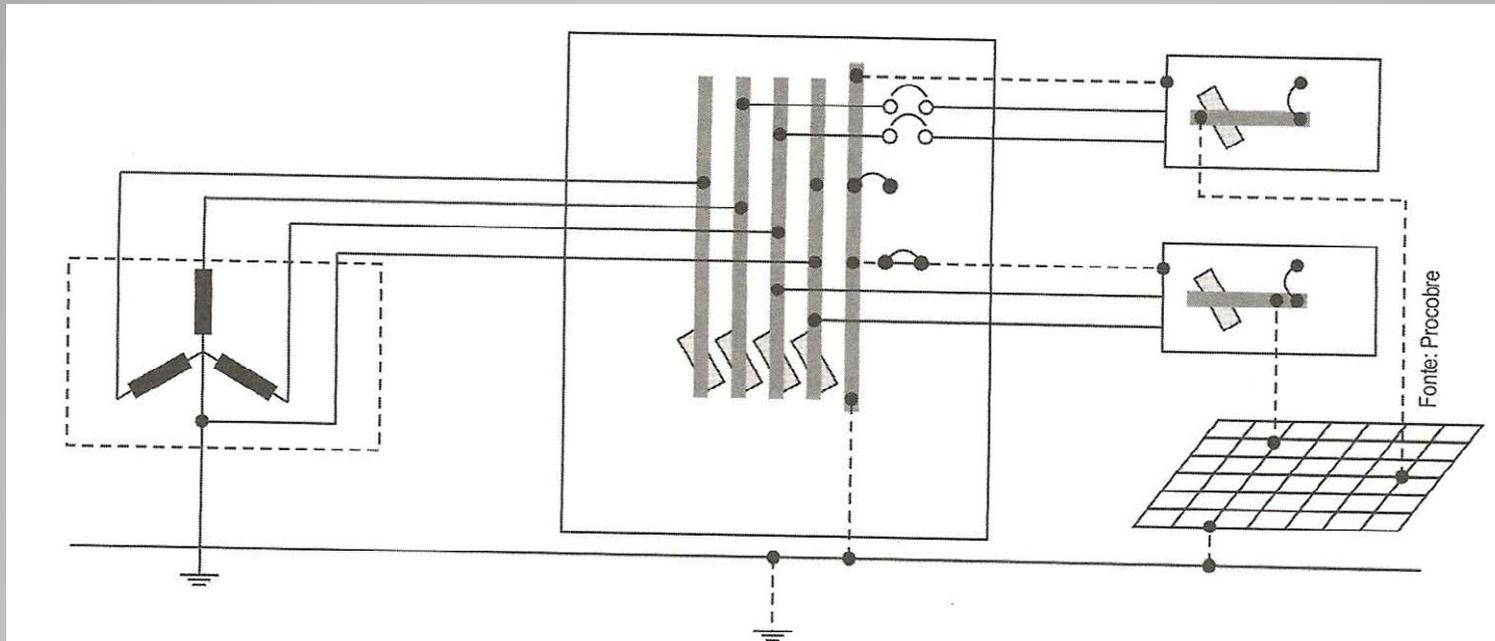
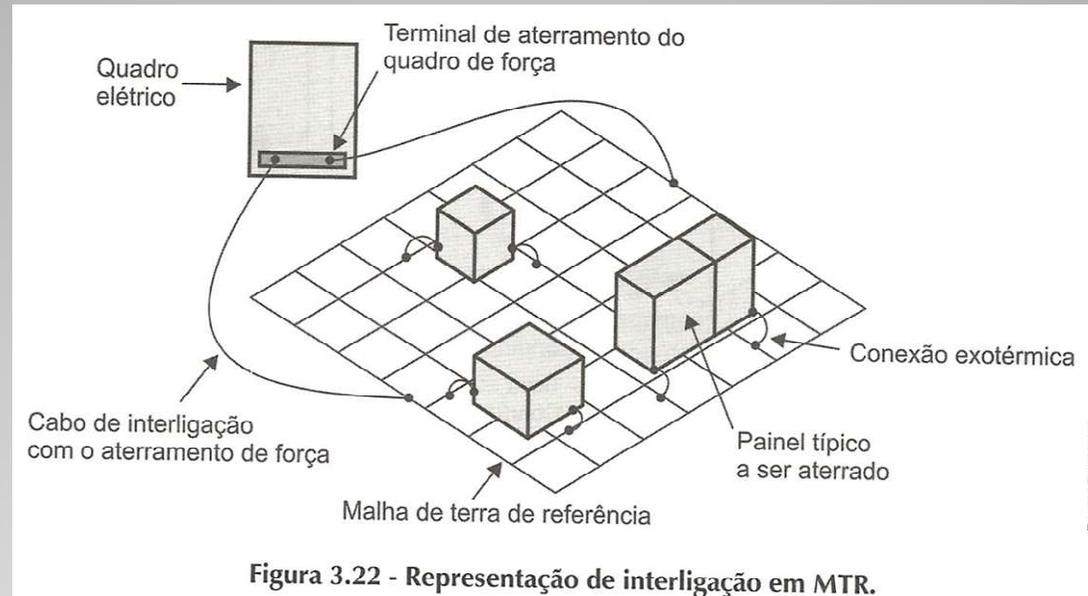


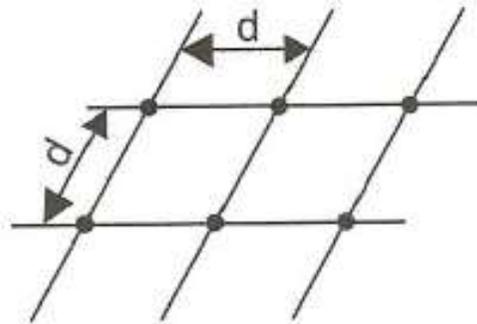
Figura 3.21 - Aterramento em malha de terra de referência MTR.

## Malha de terra de referência MTR.



O SISTEMA MTR É ATUALMENTE A MELHOR SOLUÇÃO PARA INTERLIGAÇÃO DE CIRCUITOS ELETRÔNICOS. NESSE CASO HÁ A REDUÇÃO DA CIRCULAÇÃO DE CORRENTES DE ALTA FREQUÊNCIA. ESSAS FREQUÊNCIAS DEVEM SER LEVADAS EM CONSIDERAÇÃO QUANDO FOR CALCULADO O ESPAÇAMENTO ENTRE OS CONDUTORES DA MALHA.

A distância entre os condutores (MESH) deve ser "muito menor" que o comprimento de onda de maior frequência que está interferindo. Nesse caso a diferença de potencial diminuirá a valores significantes.



$$d = \frac{\lambda}{20} \quad \lambda = \frac{c}{f} \quad d = \frac{c}{20f}$$

d = comprimento do MESH da malha (m)

$\lambda$  = comprimento de onda (m)

c = velocidade da luz =  $3 \times 10^8$  m/s

f = frequência (Hz)

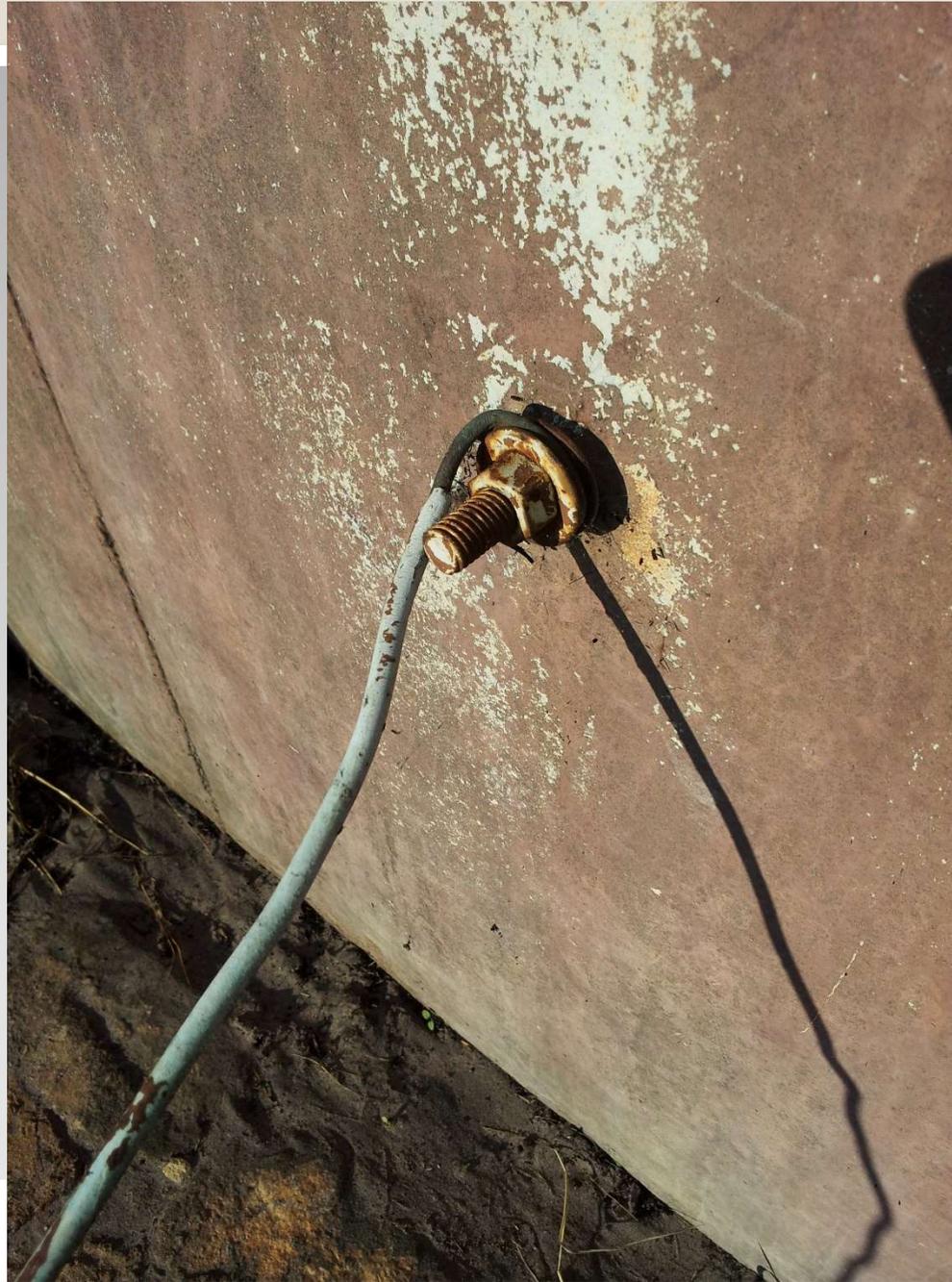
Figura 3.23 - Cálculo do MESH da malha de aterramento.

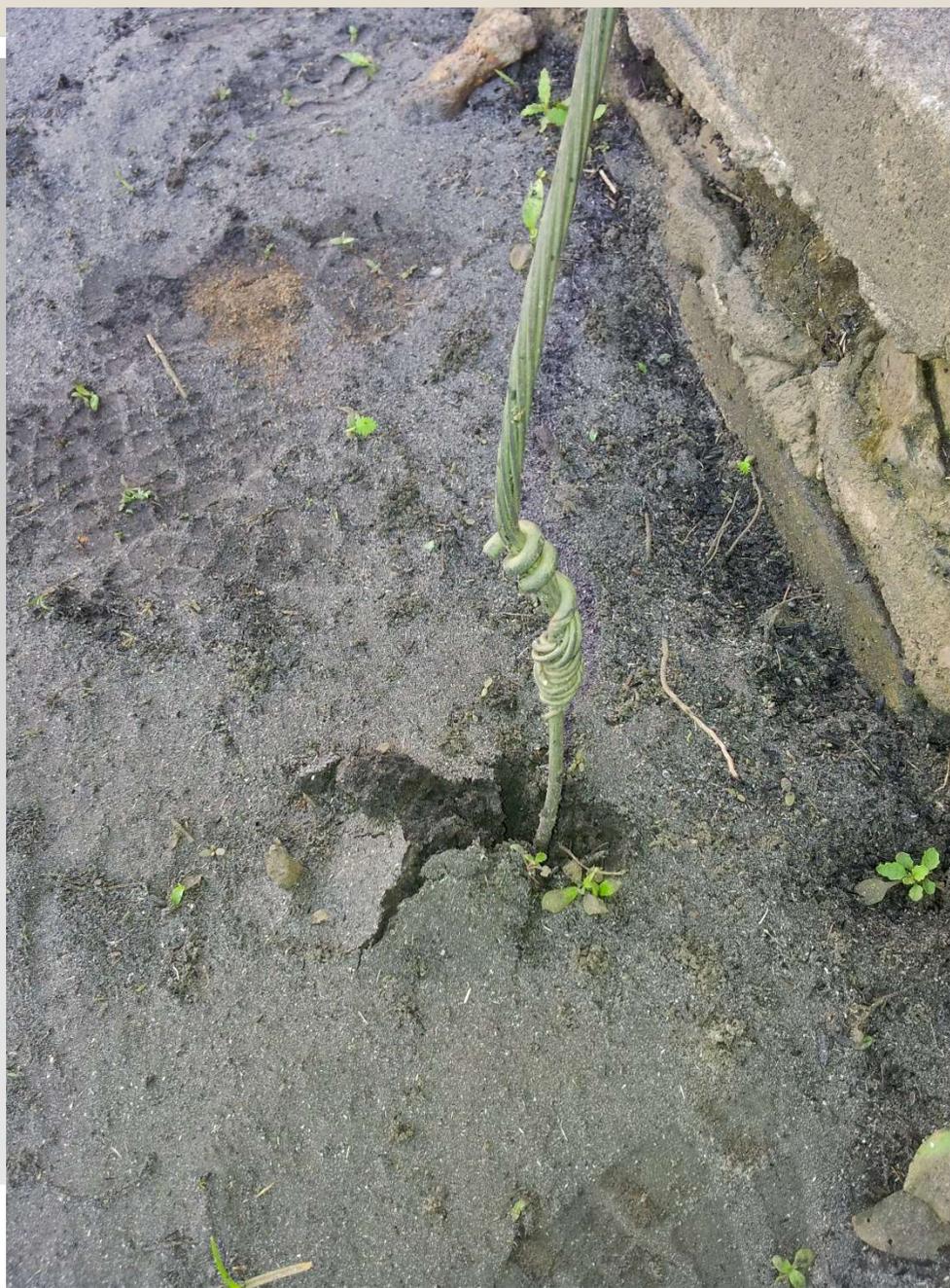
















# Flicker ou cintilação

Variação brusca e intermitente do valor eficaz de tensão, de uma faixa entre 0,1 e 7%.

Definição dada pela Prodist 8

Variação aleatória, repetitiva ou esporádica do valor eficaz da tensão.

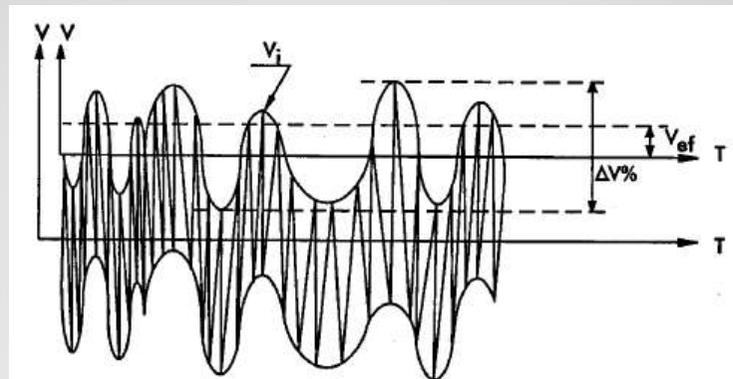


Figura 2: Variação de tensão ocasionada pela operação de um forno a arco.

# Flicker

Geralmente é notado pela impressão visual resultante das variações de fluxo luminoso nas lâmpadas elétricas causadas pelas flutuações de tensão.



Em lâmpadas fluorescentes o fósforo que reveste a parede interna do bulbo leva um pequeno tempo para perder luminosidade.

Quando esse tempo supera 0,11s, aproximadamente, o olho humano pode perceber as variações de luminosidade.

# Flicker

## Consequências



Segurança na operação de tornos mecânicos



Danos em equipamentos sensíveis, pois provoca a circulação de correntes com frequências diferentes de 60Hz.



Queda de rendimento em equipamentos elétricos e oscilação de torque e potência em motores elétricos



Interferência nos sistemas de proteção.

# Flicker

## Parâmetros de identificação



PST (Probabilty Short Term): indica a severidade dos níveis de cintilação associados à flutuação de tensão verificada em um período contínuo de 10 minutos



PLT (Probabilty Long Term): indica a severidade dos níveis de cintilação associados à flutuação de tensão verificada em um período contínuo de 2 horas.

Obs. Valores obtidos a partir de várias medidas de PST.

De acordo com IEC 60869, os valores de PST superiores a 1pu, são considerados inadmissíveis por causarem incômodos acima do nível de conforto.

# Flicker

A principal fonte geradora do efeito flicker são os fornos a arco, fornos de indução, laminadores, máquinas de soldas, elevadores de grande porte, entre outro.



Oscilações de tensão (%)

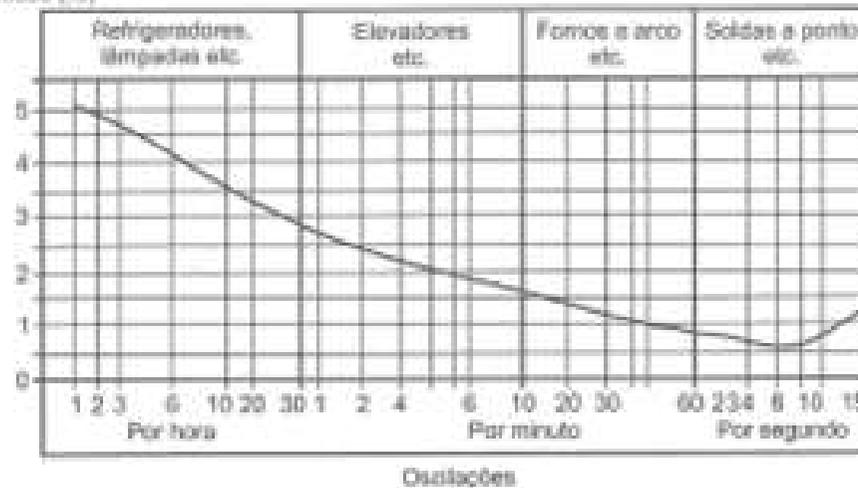
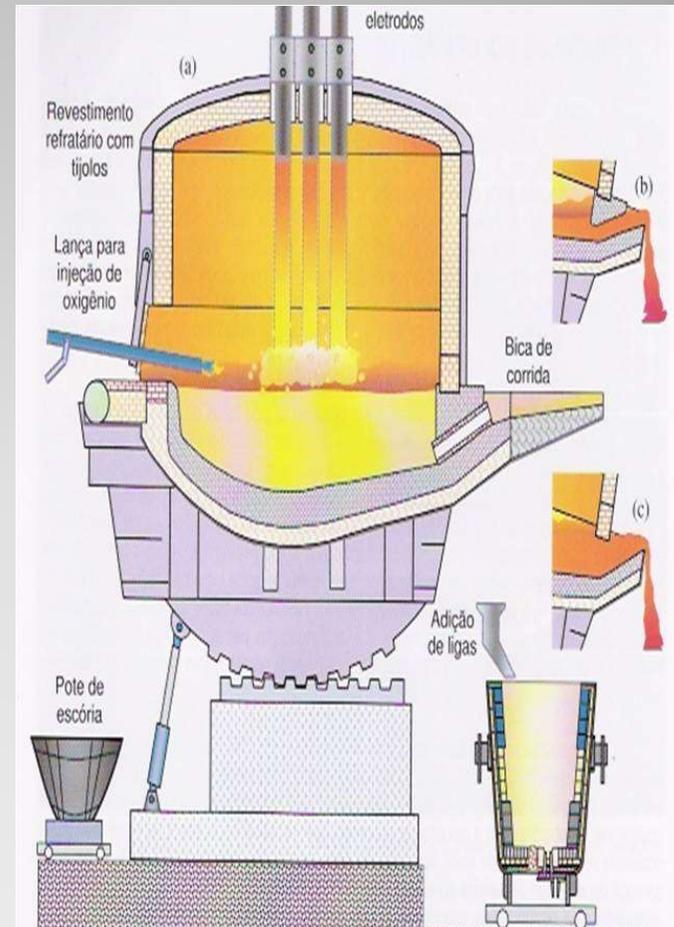


Figura 3.25 - Exemplo de oscilação.

# Forno a arco

Em fornos a arco o derretimento do metal se dá a partir da aplicação de uma tensão elevada. Com o derretimento do material as propriedades do mesmo varia com processo, provocando uma grande instabilidade na potência. As variações no comprimento do arco, provocam flutuações de tensão que são propagadas ao circuito de alimentação até atingir os circuitos de baixa tensão.

A variação acaba atingindo uma frequência visível ao olho humano, que gira em torno de 1 a 15Hz, causando assim o incômodo visual.



# Flicker

## SOLUÇÃO



Aumentar a potência de curto circuito na rede – custo elevado



Diminuir a potência do forno – forno perde eficiência



Se substituir o forno, utilizar forno DC

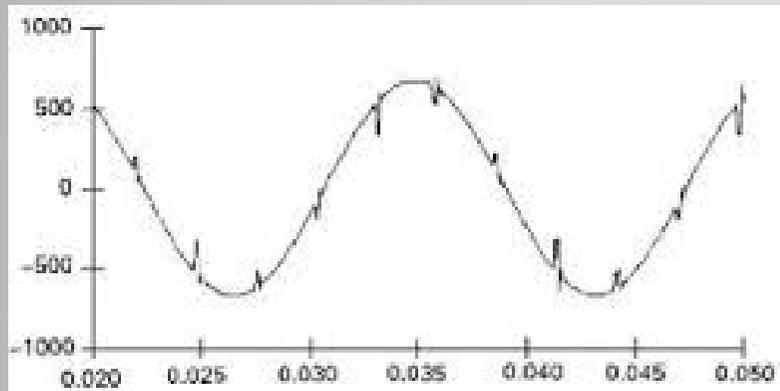


Utilizar compensadores estáticos de reativos para controlar a tensão. Essa prática requer uma avaliação de outros distúrbios.

# Notching

Distúrbio periódico de tensão, causado pela má operação de equipamentos de eletrônica de potência.

Também definidos como micro variações de tensão que ocorrem durante uma senoide.



Comum ocorrer na comutação entre tiristores de um retificador controlado.

# Notching

## Consequências

Causa interferências de alta frequência, distúrbio que pode afetar equipamentos sensíveis.

## Detecção

Para detectar esses distúrbios são necessários equipamento especiais devido a alta frequência ou pelo conteúdo harmônico da tensão.

## Solução

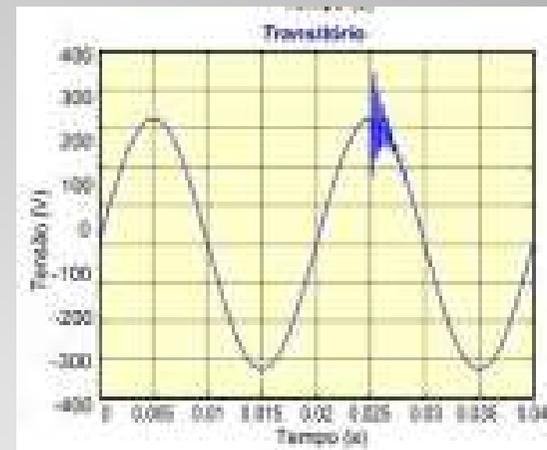
Substituição dos equipamento geradores ou separação dos circuitos entre carga geradora e carga afetada..

# Transitório

É a manifestação ou resposta elétrica local ou nas adjacências que se origina em alterações súbitas nas condições operacionais de um sistema de energia elétrica.

## Causas

- Descarga atmosférica
- Retorno da energia após um apagão
- Chaveamento de cargas indutivas ou capacitivas



# Transitório

## Impulsivo

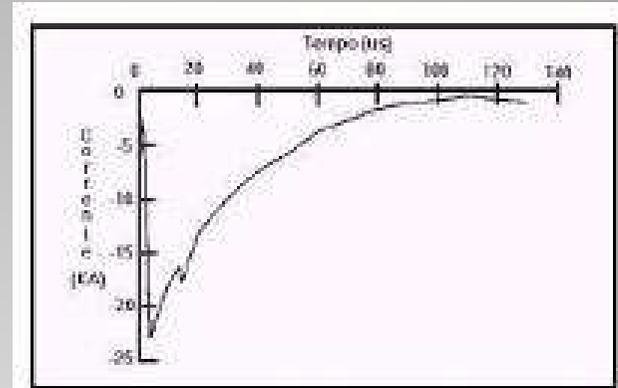
Ocorrem devido a descargas atmosféricas.

Pode provocar:

DDP entre pontos do aterramento provocando tensão de passo, o que pode levar ao risco de choque elétrico em animais ou pessoas que estejam em contato com circuitos distintos.

Faiscamento entre dois pontos distintos, o que pode provocar um incêndio.

Equipotencialização e aplicação de DPS (dispositivo de proteção contra surtos)

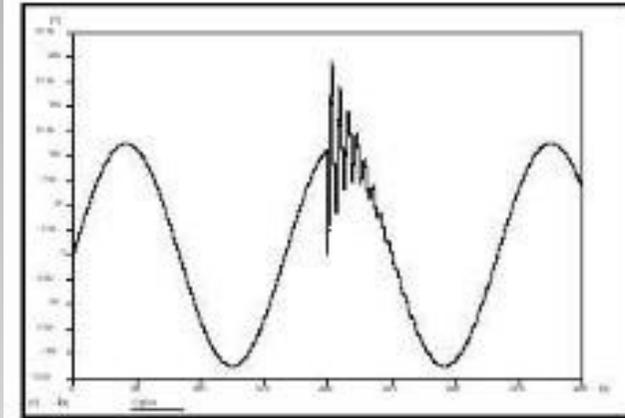


Corrente transitória impulsiva oriunda de uma descarga atmosférica

# Transitório

## Oscilatórios

Ocasionados pelo chaveamento de cargas indutivas ou capacitivas.



*Transitório provocado do chaveamento de um banco de capacitores*

Podem ser:

Baixa frequência (< 5kHz) – geralmente encontrados em sistemas de distribuição

Média frequência (5 a 500kHz) – causados por chaveamento de dispositivos de proteção.

Alta frequência (>500kHz) – Descargas atmosféricas

**Isolar as cargas sensíveis dos pontos de ocorrência do transitório com transformadores isoladores ou filtros de alta frequência.**

# Surto de tensão ou Spike

Confunde-se com o termo transitório, pois é o aumento drástico e instantâneo da tensão da rede elétrica e temo como causa a elevação de tensão principalmente devido às descargas atmosféricas.

## Surto induzido ou indireto

Incidência de descargas atmosféricas que atingem as linhas de transmissão ou distribuição de energia através da indução da descarga em elementos próximos da rede, como árvores, estruturas metálicas.

## Surto conduzido ou direto

Incidência de descargas atmosféricas diretamente sobre a instalação. Nesta situação os eletrodos e os elementos metálicos existentes sofrem elevação de tensão por frações de segundo.

# Variação de frequência

Definida com o desvio no valor da frequência fundamental, que pode ser 50Hz ou 60Hz.

Tem origem no controle da velocidade dos geradores.

O grande desafio nos sistemas de geração isolados, ou geração própria, que a regulamentação não pode fiscalizar.

## Variação de frequência – Prodist 8

O sistema de distribuição e as instalações de geração conectadas ao mesmo devem, em condições normais de operação e em regime permanente, operar dentro dos limites de frequência situados entre **59,9 Hz e 60,1 Hz**.

As instalações de **geração conectadas** ao sistema de distribuição **devem garantir** que a frequência retorne para a faixa de **59,5 Hz a 60,5 Hz**, no prazo de **30 (trinta) segundos** após sair desta faixa, quando de distúrbios no sistema de distribuição, para permitir a recuperação do equilíbrio carga-geração.

## Variação de frequência – Prodist 8

Havendo necessidade de corte de geração ou de carga para permitir a recuperação do equilíbrio carga-geração, durante os distúrbios no sistema de distribuição, a frequência:

- a) não pode exceder 66 Hz ou ser inferior a 56,5 Hz em condições extremas;
- b) pode permanecer acima de 62 Hz por no máximo 30 (trinta) segundos e acima de 63,5 Hz por no máximo 10 (dez) segundos;
- c) pode permanecer abaixo de 58,5 Hz por no máximo 10 (dez) segundos e abaixo de 57,5 Hz por no máximo 05 (cinco) segundos.

# QUALIDADE DE ENERGIA

7ª Termo

Engenharia Elétrica

AULA 03

Prof. Dr. Giuliano Pierre Estevam

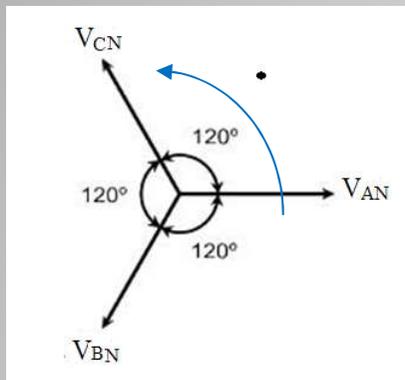
[www.electroenge.com.br](http://www.electroenge.com.br)



# COMPONENTES SIMÉTRICAS

## SISTEMAS EQUILIBRADOS

Os sistemas trifásicos equilibrados e simétricos podem ser analisados através de uma de suas fases e o neutro (terra), tanto em condições normais de funcionamento quanto em decorrência de curtos-circuitos trifásicos.



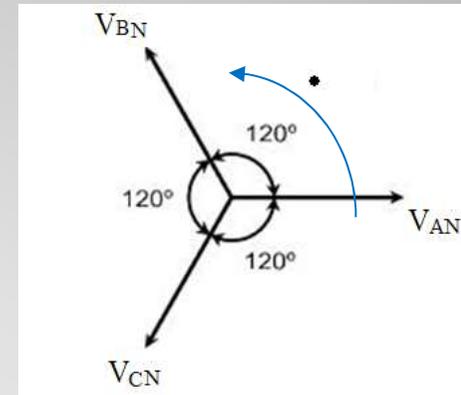
$$\dot{V}_{AN} = V_{AN} < 0$$

$$\dot{V}_{BN} = V_{BN} < -120$$

$$\dot{V}_{CN} = V_{CN} < 120$$

**SEQUENCIA POSITIVA**

$$V_{AB} = V_{AN}\sqrt{3} < 30^\circ$$



$$\dot{V}_{AN} = V_{AN} < 0$$

$$\dot{V}_{CN} = V_{CN} < -120$$

$$\dot{V}_{BN} = V_{BN} < 120$$

**SEQUENCIA NEGATIVA**

$$V_{AB} = V_{AN}\sqrt{3} < -30^\circ$$

# COMPONENTES SIMÉTRICAS

- Fortescue (em 1918) publicou o artigo:

- “Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks”.
  - Apresentado à 34<sup>o</sup> Convenção Anual de AIEE (American Institute of Electrical Engineers) em Atlantic City, N.J. o 28 de julho de 1918. *AIEE Transactions* 37 (II): 1027-1140 (1918).



- “Um sistema trifásico desequilibrado pode ser decomposto em três sistemas equilibrados, onde esta decomposição é única”.
  - Sistema equilibrado: Módulos iguais e Diferença Angulares iguais
- Objetivo de se utilizar componentes simétricas:
  - Decompor um sistema trifásico em três sistemas monofásicos desacoplados.
  - Componentes de fase: A-B-C

$$\dot{V}_{ABC} = \dot{Z}_{ABC} \cdot \dot{I}_{ABC}$$

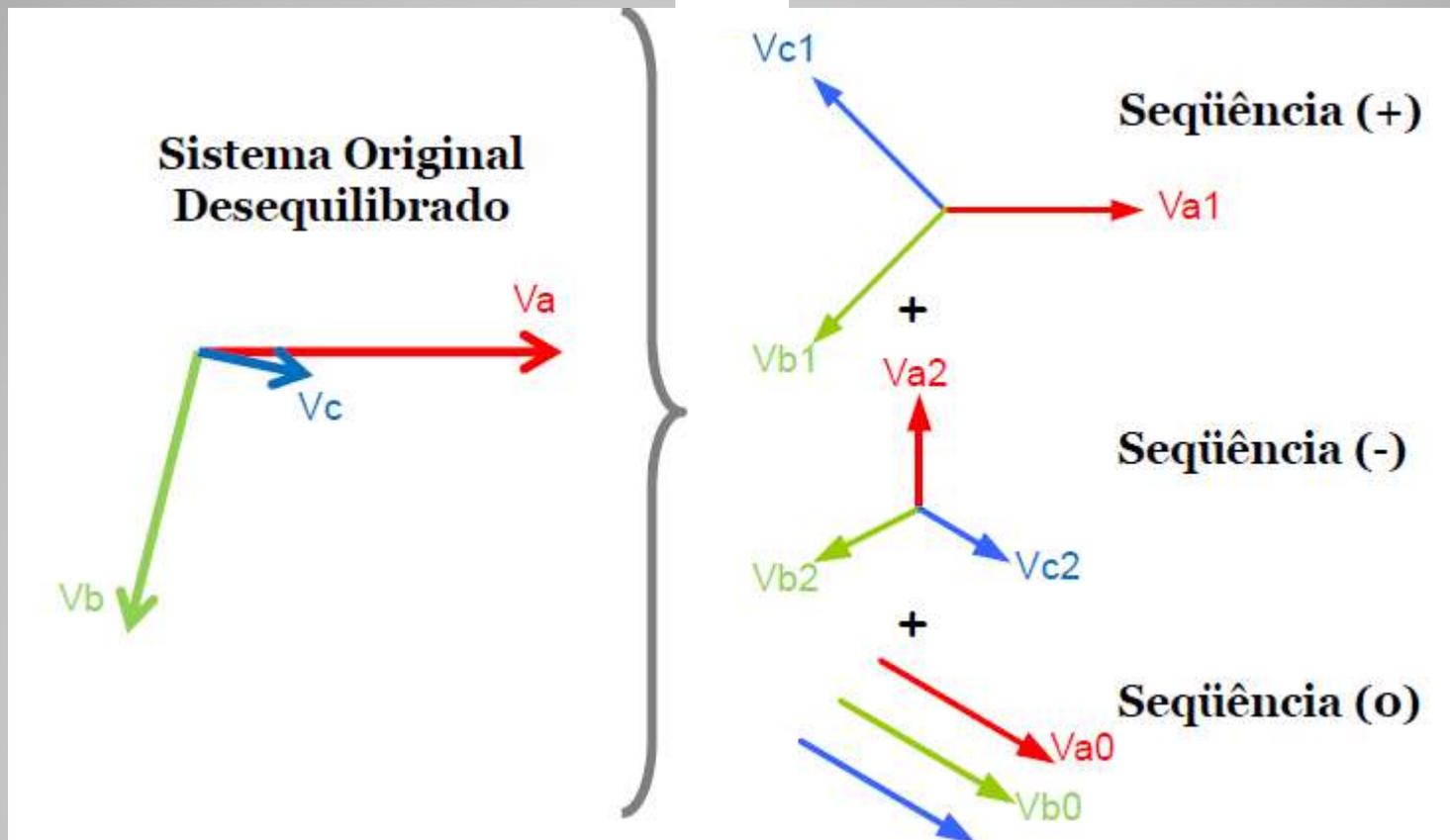
- Componentes simétricas: 0-1-2 (CC, Positiva, Negativa)

$$\dot{V}_{012} = \dot{Z}_{012} \cdot \dot{I}_{012}$$

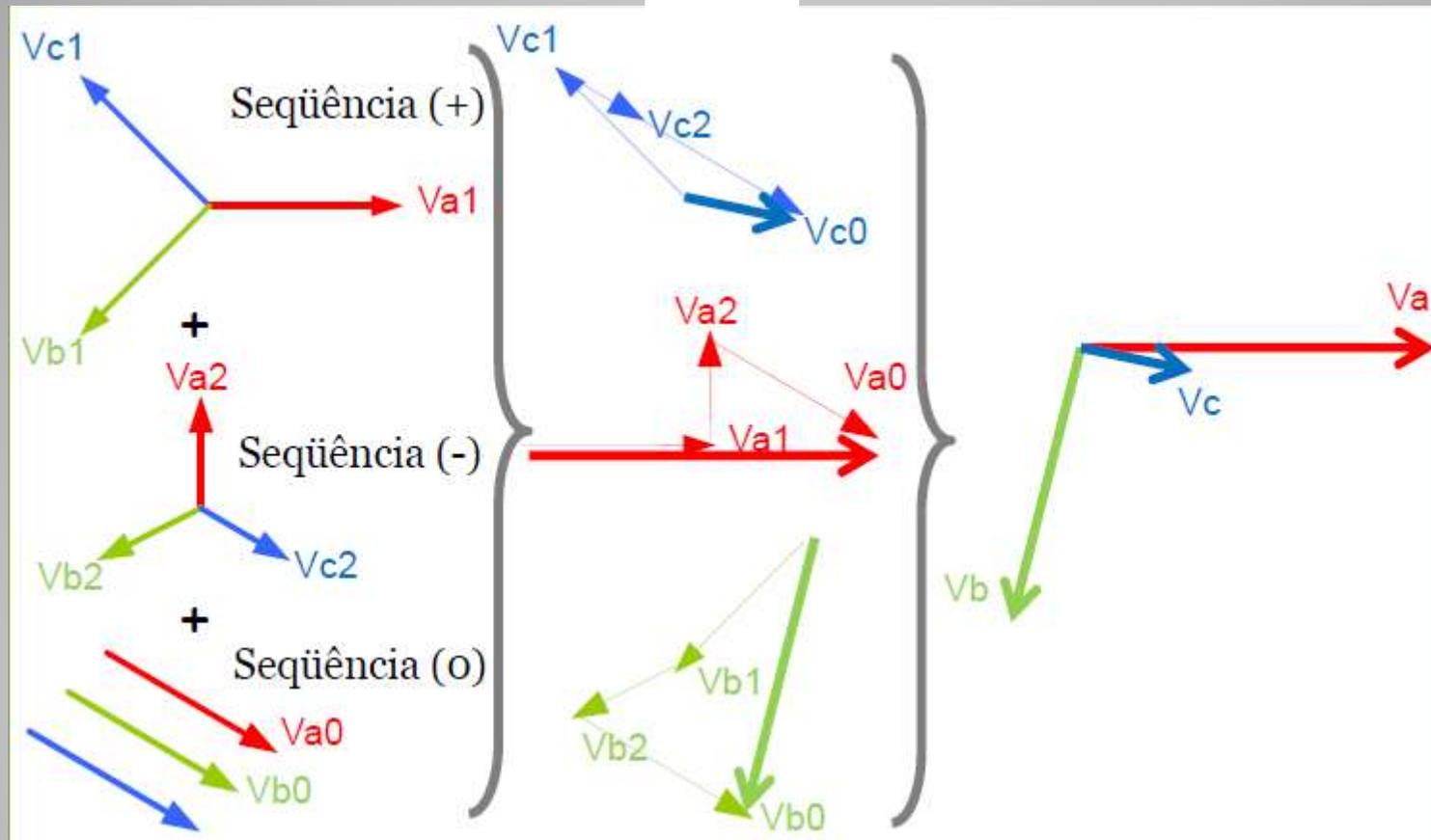
## Decomposição em Componentes Simétricas

- Um sistema trifásico desequilibrado pode ser decomposto em três sistemas equilibrados, formado por **componentes de seqüência positiva (+), negativa (-) e zero (0)**.
- Sistema de seqüência **Positiva** (+, 1):
  - 3 Fasores equilibrados (mesmo módulo e defasados de  $120^\circ$ )
  - **Seqüência** de fase igual ao do sistema **original** (ex. A-B-C)
- Sistema de seqüência **Negativa** (-, 2):
  - 3 Fasores equilibrados (mesmo módulo e defasados de  $120^\circ$ )
  - **Seqüência** de fase **inversa** ao do sistema original (ex. A-C-B)
- Sistema de seqüência **Zero** (0):
  - 3 Fasores de mesmo módulo e com os **mesmos ângulos** de fase.
    - ✦ Defasagem entre fasores iguais a 0.

# Decomposição em Componentes Simétricas



## Decomposição Gráfica em C.S.



## Decomposição Analítica em C.S.

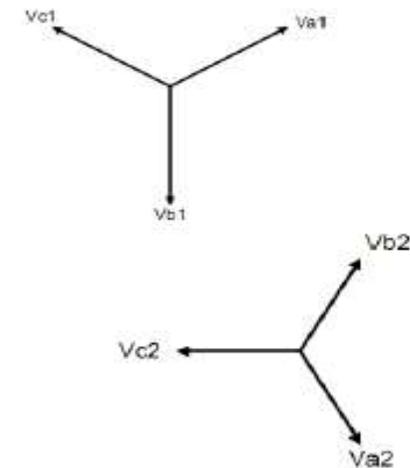
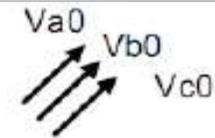
$$V = \begin{bmatrix} \dot{V}_A \\ \dot{V}_B \\ \dot{V}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{V}_{A0} \\ \dot{V}_{B0} \\ \dot{V}_{C0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{V}_{A1} \\ \dot{V}_{B1} \\ \dot{V}_{C1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{V}_{A2} \\ \dot{V}_{B2} \\ \dot{V}_{C2} \end{bmatrix}$$

$$= \dot{V}_{A0} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} + \dot{V}_{A1} \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha^2 \\ \alpha \end{bmatrix} + \dot{V}_{A2} \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha \\ \alpha^2 \end{bmatrix}$$

**S ( 0 )**

**S ( + )**

**S ( - )**



$$\alpha = 1 \angle 120^\circ$$

## Decomposição Analítica em C.S.

$$V = \begin{bmatrix} \dot{V}_A \\ \dot{V}_B \\ \dot{V}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{V}_{A0} \\ \dot{V}_{B0} \\ \dot{V}_{C0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{V}_{A1} \\ \dot{V}_{B1} \\ \dot{V}_{C1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{V}_{A2} \\ \dot{V}_{B2} \\ \dot{V}_{C2} \end{bmatrix}$$

$$\dot{V}_A = \dot{V}_{A0} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} + \dot{V}_{A1} \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha^2 \\ \alpha \end{bmatrix} + \dot{V}_{A2} \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha \\ \alpha^2 \end{bmatrix}$$

$$\dot{V}_B = \dot{V}_{B0} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} + \dot{V}_{B1} \begin{bmatrix} \alpha \\ 1 \\ \alpha^2 \end{bmatrix} + \dot{V}_{B2} \begin{bmatrix} \alpha^2 \\ 1 \\ \alpha \end{bmatrix}$$

$$\dot{V}_C = \dot{V}_{C0} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} + \dot{V}_{C1} \begin{bmatrix} \alpha^2 \\ \alpha \\ 1 \end{bmatrix} + \dot{V}_{C2} \begin{bmatrix} \alpha \\ \alpha^2 \\ 1 \end{bmatrix}$$

## Matriz de Transformação de C.S.

$$V = \begin{bmatrix} \dot{V}_A \\ \dot{V}_B \\ \dot{V}_C \end{bmatrix} = \dot{V}_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}_{S^{(0)}} + \dot{V}_1 \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha^2 \\ \alpha \end{bmatrix}_{S^{(+)}} + \dot{V}_2 \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha \\ \alpha^2 \end{bmatrix}_{S^{(-)}}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_A \\ \dot{V}_B \\ \dot{V}_C \end{bmatrix} \longleftrightarrow \begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_A \\ \dot{V}_B \\ \dot{V}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{V}_0 + \dot{V}_1 + \dot{V}_2 \\ \dot{V}_0 + \alpha^2 \dot{V}_1 + \alpha \dot{V}_2 \\ \dot{V}_0 + \alpha \dot{V}_1 + \alpha^2 \dot{V}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix}$$

MATRIZ TRANSFORMAÇÃO (T)

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_A \\ \dot{V}_B \\ \dot{V}_C \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} = \mathbf{T} \quad \begin{array}{l} \alpha = 1 \angle 120^\circ \\ \alpha^2 = 1 \angle -120^\circ \\ \alpha^3 = \alpha^0 = 1 \end{array}$$

## Transformação

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{T}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{V}_A \\ \dot{V}_B \\ \dot{V}_C \end{bmatrix}$$

$$\frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} = \mathbf{T}^{-1}$$

$$V A^{012} = \begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \dot{V}_A + \dot{V}_B + \dot{V}_C \\ \dot{V}_A + \alpha \dot{V}_B + \alpha^2 \dot{V}_C \\ \dot{V}_A + \alpha^2 \dot{V}_B + \alpha \dot{V}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{V_A + V_B + V_C}{3} \\ \frac{V_A + \alpha V_B + \alpha^2 V_C}{3} \\ \frac{V_A + \alpha^2 V_B + \alpha V_C}{3} \end{bmatrix}$$

$$V^{ABC} = \begin{bmatrix} \dot{V}_A \\ \dot{V}_B \\ \dot{V}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{V}_0 + \dot{V}_1 + \dot{V}_2 \\ \dot{V}_0 + \alpha^2 \dot{V}_1 + \alpha \dot{V}_2 \\ \dot{V}_0 + \alpha \dot{V}_1 + \alpha^2 \dot{V}_2 \end{bmatrix}$$

## Aplicação de C.S. em SEP (V e I)

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_A \\ \dot{V}_B \\ \dot{V}_C \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{T}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{V}_A \\ \dot{V}_B \\ \dot{V}_C \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{T}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix}$$

## Aplicação de C.S. em SEP (V, I e Z)

$$\dot{V}^{abc} = Z^{abc} \times \dot{I}^{abc}$$

$$\dot{V}^{abc} = T \times \dot{V}^{012}$$

$$\dot{I}^{abc} = T \times \dot{I}^{012}$$

$$T \times \dot{V}^{012} = Z^{abc} \times T \times \dot{I}^{012}$$

$$\underbrace{T^{-1} \times T}_{I} \times \dot{V}^{012} = \underbrace{T^{-1} \times Z^{abc} \times T}_{Z^{012}} \times \dot{I}^{012}$$

$$\dot{V}^{012} = \underbrace{T^{-1} \times Z^{abc} \times T}_{Z^{012}} \times \dot{I}^{012}$$

LEMBRANDO QUE:

$$\mathbf{T} \cdot \mathbf{T}^{-1} = \mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\dot{V}^{012} = Z^{012} \cdot \dot{I}^{012}$$

Ex. Dada a sequência

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 120 < 0 \\ 120 < -120 \\ 120 < 120 \end{bmatrix}$$

Decompor analiticamente e graficamente em suas componentes simétricas.

Ex. Dada a sequência

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 120 < 0 \\ 380 < -90 \\ 380 < 90 \end{bmatrix}$$

Decompor analiticamente e graficamente em suas componentes simétricas.

Ex. Dada a sequência

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 141,42 < -15 \\ 51,76 < -15 \\ 193,2 < 165 \end{bmatrix}$$

Decompor analiticamente e graficamente em suas componentes simétricas.

# QUALIDADE DE ENERGIA

7ª Termo

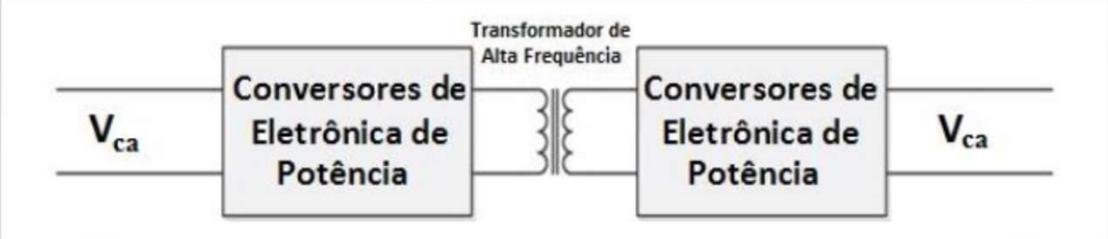
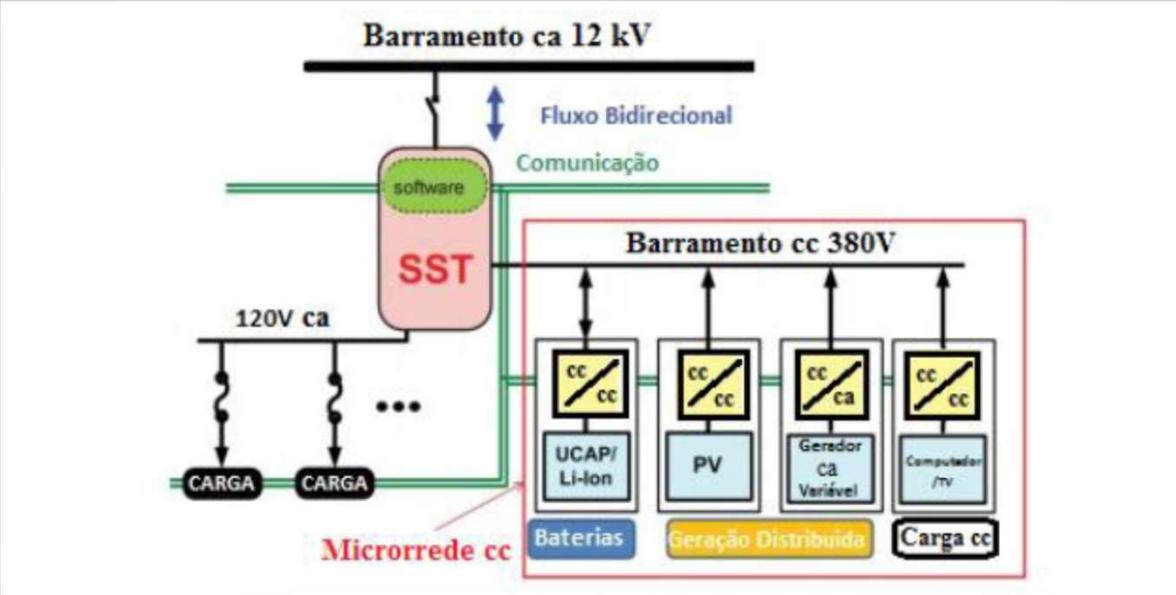
**Engenharia Elétrica**

Aula 04

Prof. Dr. Giuliano Pierre Estevam

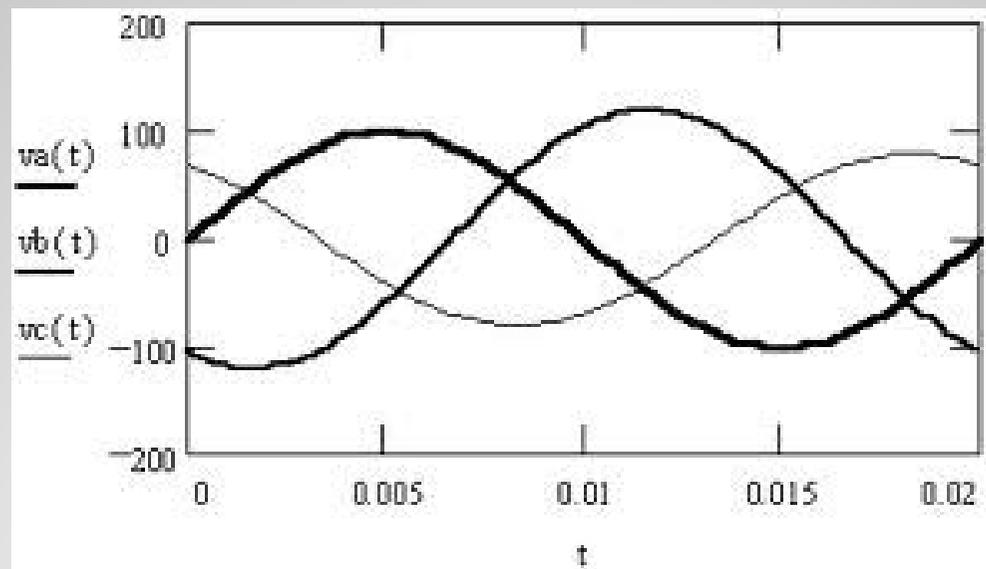
[www.electroenge.com.br](http://www.electroenge.com.br)





## DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

O desequilíbrio em um sistema elétrico trifásico é uma condição na qual as três fases apresentam diferentes valores de tensão em módulo ou defasagem angular entre fases diferentes de  $120^\circ$  elétricos ou, ainda, as duas condições simultaneamente.



## As razões mais conhecidas para a ocorrência deste fenômeno são:

Problemas nas fontes, como **curto entre espiras em transformadores ou em geradores**. Neste caso, a solução é a correção da máquina elétrica/equipamento. Estas anomalias são normalmente detectáveis por testes efetuados em campo e cada vez mais adotados por empresas alimentadas por subestações próprias como rotina de manutenção preventiva. Uma vez detectado o problema, a solução é a correção em oficina de assistência técnica habilitada.

## As razões mais conhecidas para a ocorrência deste fenômeno são:

**Defeito em capacitores:** quando a correção de fator de potência é efetuada com a instalação de capacitores na média tensão, normalmente, a injeção é efetuada por capacitores monofásicos ligados entre fases e neutro ou entre fases; neste caso, havendo a queima de algumas células monofásicas isoladamente, ou mesmo de fusíveis de proteção, a injeção de energia reativa não será equilibrada e como consequência haverá, em maior ou menor proporção, o **desbalanceamento de tensão por conta da injeção de energia reativa desequilibrada.**

## As razões mais conhecidas para a ocorrência deste fenômeno são:

Na baixa tensão, o mesmo fenômeno poderá ocorrer uma vez que um capacitor trifásico é formado por células monofásicas, isto é, a queima de "parte" de um capacitor trifásico (ou mesmo de um banco de capacitores) incorrerá em desbalanceamento de tensão.

Cargas monofásicas não equilibradas entre as fases, proporcionando consumos de corrente desequilibradas, causando, como consequência, desequilíbrio de tensões.

Ocorrências de descargas atmosféricas com influência em circuitos de distribuição ou ainda curtos-circuitos, provocando variações de curta duração, refletindo em curtos períodos em que ocorrerão desequilíbrios de tensão.

## CONSEQUENCIAS

Aumento de perdas elétricas contribuindo para o desperdício de energia elétrica.

Desligamento de plantas industriais ou prédios comerciais pela atuação do relé de proteção específico

Elevação significativa de temperatura, o que reduz a vida útil do sistema e coloca em risco a instalação e o processo.

**TABELA 2 – EFEITOS DOS DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO EM MOTORES ELÉTRICOS  
– MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO: 5 HP, 1725 RPM, 230 V, 60 Hz**

CARACTERÍSTICA	DESEMPENHO		
Tensão Média [V]	230	230	230
Desequilíbrio de Tensão [%]	0,3	2,3	2,3
Desequilíbrio de Corrente [%]	0,4	40	17,7
Elevação Temperatura [°C]	0	40	30



- Aproximadamente 60% da energia produzida é consumida na alimentação de motores elétricos nos sistemas industriais;
- Um pequeno desequilíbrio de tensão – da ordem de 2,3% – é responsável por um desequilíbrio de corrente – da ordem de 17% – juntamente com uma elevação de temperatura de 30 °C;
- Sabe-se que a cada 10 °C de elevação de temperatura, a vida útil da isolação de um motor elétrico diminui pela metade.

## FATOR DE DESEQUILÍBRIO OU GRAU DE DESEQUILÍBRIO

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} \times 100$$

FD% - Fator de desequilíbrio de tensão em porcentagem;

$V_-$  - Módulo da tensão de sequência negativa;

$V_+$  - Módulo da tensão de sequência positiva.

Ex. Dada a sequência

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 120 < 0 \\ 120 < -120 \\ 120 < 120 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} V_+ &= 120 \\ V_- &= 0 \\ V_0 &= 0 \end{aligned}$$

$$FD = \frac{V_-}{V_+} = \frac{0}{120} = 0$$

Determinar o fator de desequilíbrio.

Ex. Dada a sequência

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 120 < 0 \\ 380 < -90 \\ 380 < 90 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} V_+ &= 260 \\ V_- &= 180 \\ V_0 &= 40 \end{aligned}$$

$$FD = \frac{V_-}{V_+} = \frac{180}{260} = 0,69 \text{ ou } 69\%$$

Determinar o fator de desequilíbrio.

Ex. Dada a sequência

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 141,42 < -15 \\ 51,76 < -15 \\ 193,2 < 165 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} V_+ &= 100 \\ V_- &= 100 \\ V_0 &= 0 \end{aligned}$$

$$FD = \frac{V_-}{V_+} = \frac{100}{100} = 1,0 \text{ ou } 100\%$$

Determinar o fator de desequilíbrio.

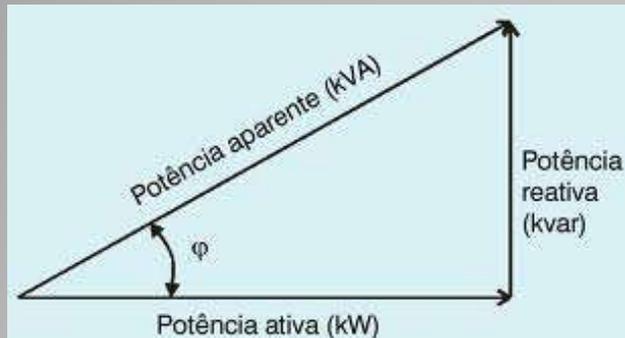
Recomendações/Normas	Expressões
IEC	$K = \frac{V_2}{V_1} \times 100$
ONS / PRODIST	$K = \frac{V_2}{V_1} \times 100 \text{ ou } K = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}}$ , em que $\beta = \frac{V_{AB}^4 + V_{BC}^4 + V_{CA}^4}{(V_{AB}^2 + V_{BC}^2 + V_{CA}^2)^2}$
CENELEC	$K = \frac{V_2}{V_1} \times 100$
NRS 048	$UB = \frac{V_N}{V_P} \times 100 \text{ ou } UB = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}}$ , em que $\beta = \frac{V_{12}^4 + V_{23}^4 + V_{31}^4}{(V_{12}^2 + V_{23}^2 + V_{31}^2)^2} \times 100$
ANSI	$FDV\% = \frac{DV_{MAX}}{V_{MED}} \times 100$
IEEE	$FDV\% = \frac{3 \times (V_{MAX} - V_{MIN})}{V_A + V_B + V_C} \times 100$

## LIMITES DE DESEQUILÍBRIO

serão apresentados os limites permissíveis dos desequilíbrios de tensão em sistemas elétricos definidos por diversas normas, tanto em nível nacional como em nível internacional. Estes valores constituem-se como indicadores da necessidade ou não de se adotar medidas de mitigação, de modo a se respeitar a normalização vigente.

NORMA	LIMITE
NEMA MG1 14-34 (1)	2%
ANSI C.84.1-1989 (2)	3%
IEEE Orange Book – 446/1995 (3)	2,5%
GTCP/CTST/GCPS – ELETROBRÁS (4)	1,5% e 2%
ONS e ANEEL	2%

# REDUÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

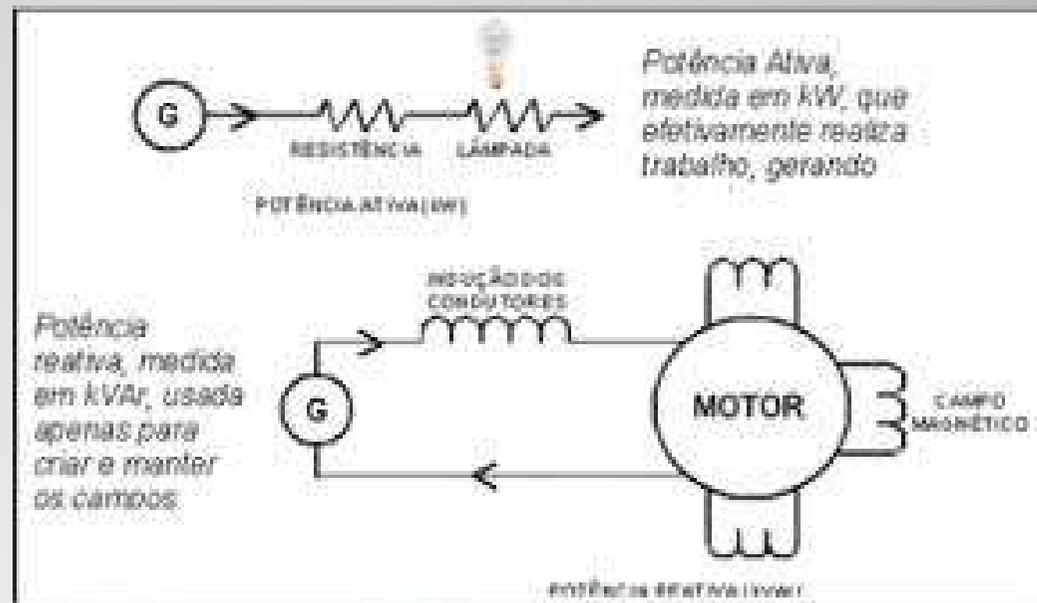


$$P = \sqrt{S^2 - Q^2}$$

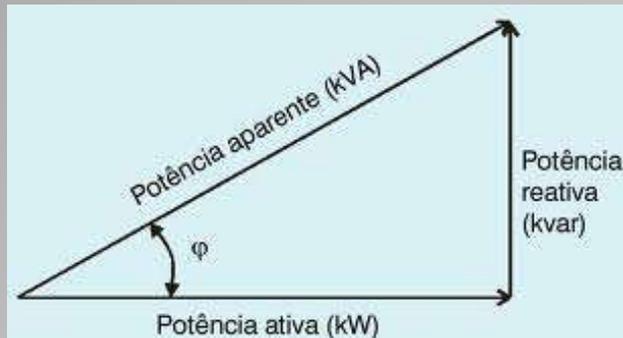
$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

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

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$



# REDUÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA



$$V_L = V_f \cdot \sqrt{3}$$

$$S = \sqrt{3} V_L I_L$$

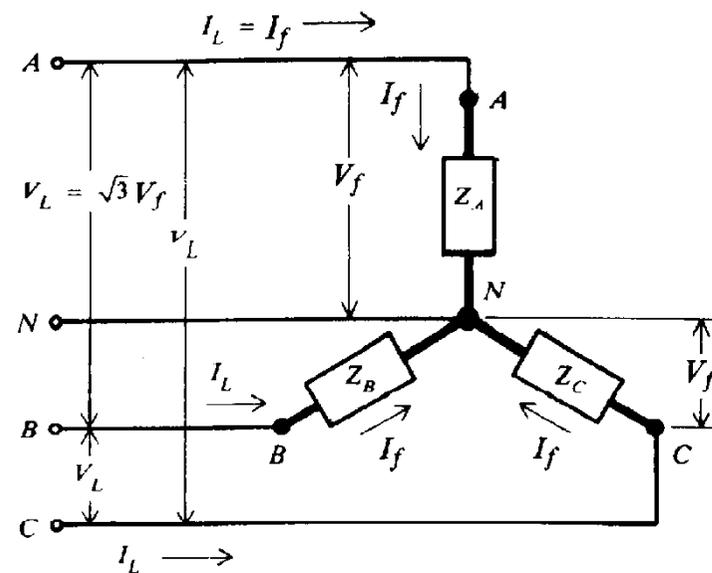
$$P = \sqrt{3} V_L I_L \cos \phi$$

$$Q = \sqrt{3} V_L I_L \sin \phi$$

$$S = 3 V_f I_f$$

$$P = 3 V_f I_f \cos \phi$$

$$Q = 3 V_f I_f \sin \phi$$



# CARGAS QUE PROMOVEM A REDUÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

Bloco 1	Bloco 2
<ul style="list-style-type: none"><li>- Transformadores</li><li>- Motores de Indução</li><li>- Geradores</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Cargas Não-Lineares</li><li>- Microcomputadores</li><li>- Retificadores Industriais</li></ul>

BLOCO 01: CARGAS  
INDUTIVAS

BLOCO 02: CARGAS  
GERADORAS DE HARMÔNICAS



Espanha  
0,92



Coreia  
0,93



França  
0,93



Portugal  
0,93



Bélgica  
0,95



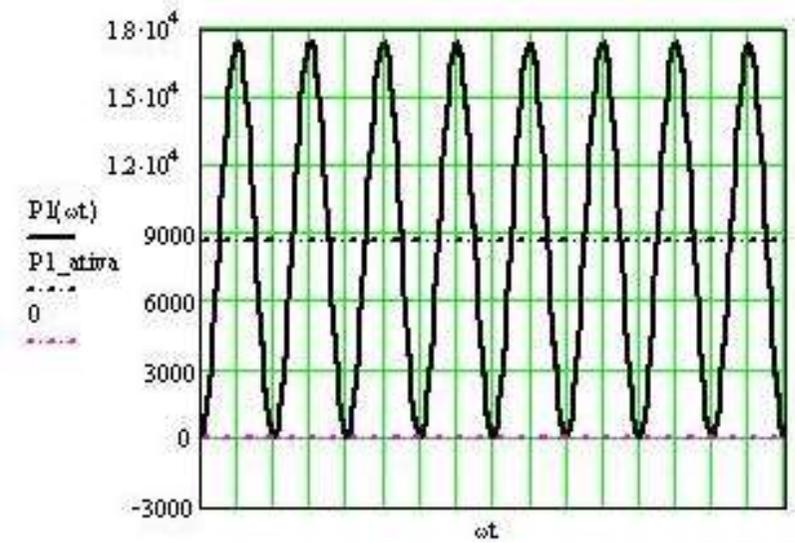
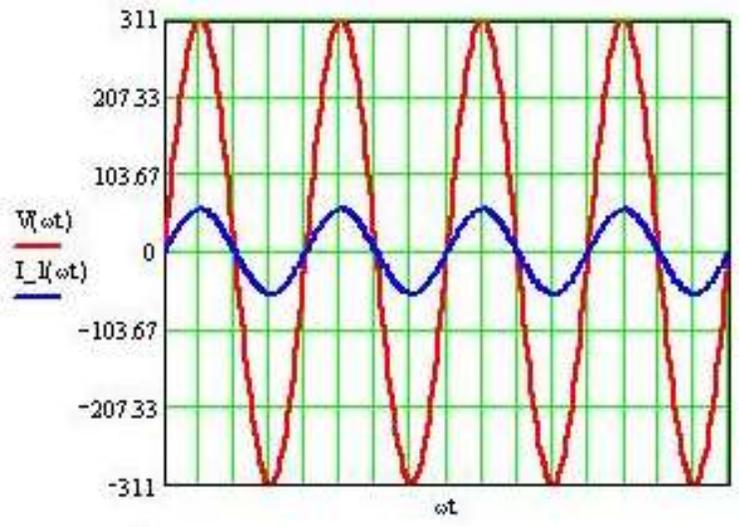
Alemanha  
0,96



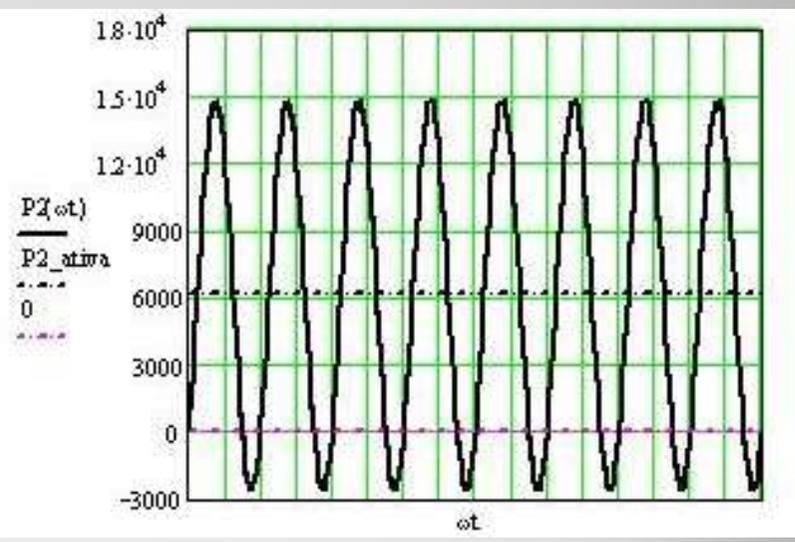
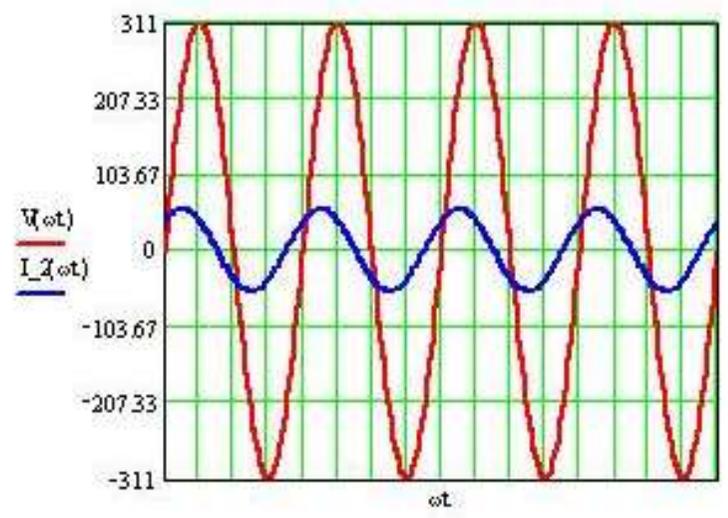
Suíça  
0,96



Argentina  
0,95

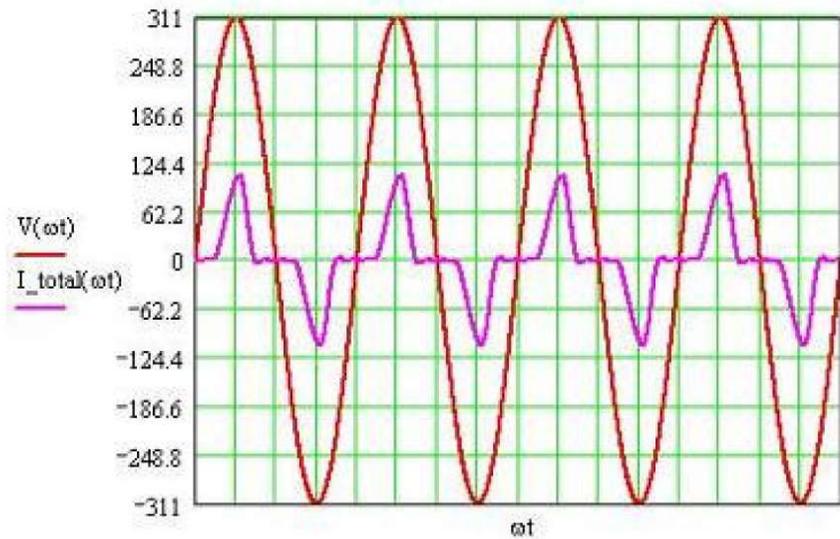


**CARGA RESISTIVA**

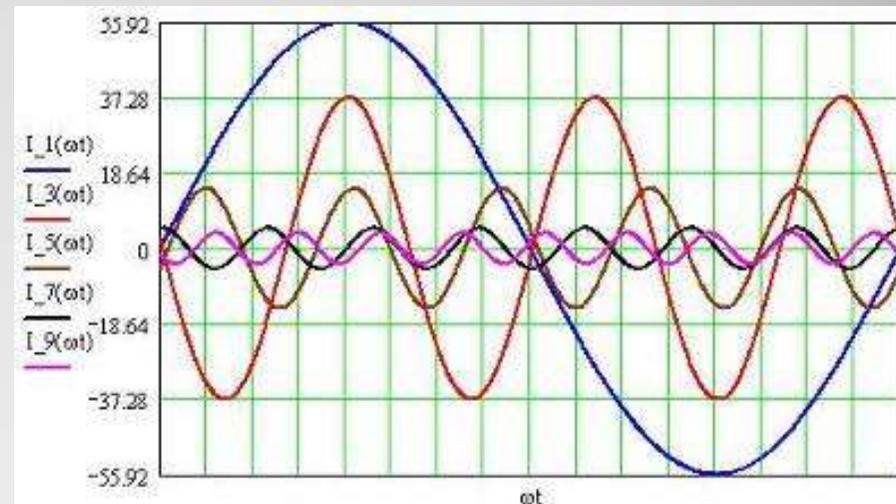


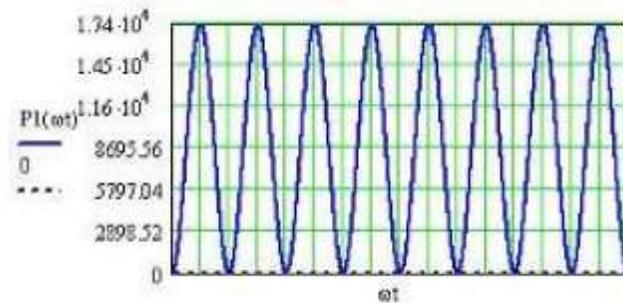
**CARGA INDUTIVA**

# CARGA NÃO LINEAR

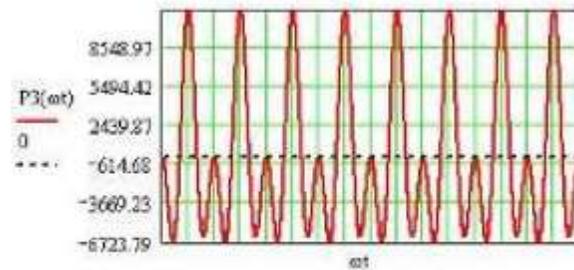


Fundamental = 60 Hz  
3<sup>a</sup> Harmônica = 180 Hz  
5<sup>a</sup> Harmônica = 300 Hz  
7<sup>a</sup> Harmônica = 420 Hz  
9<sup>a</sup> Harmônica = 540 Hz

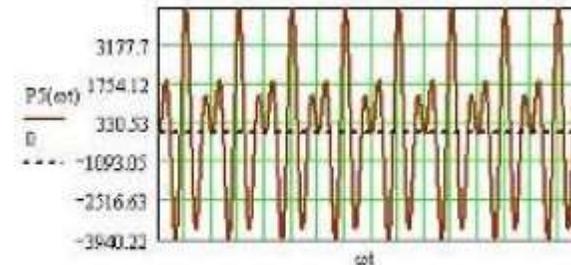




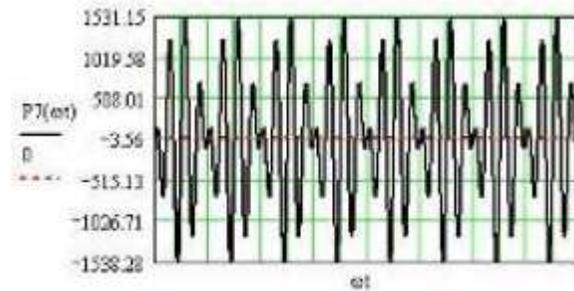
Componente Fundamental  $P_{ATIVA} = 8696W$



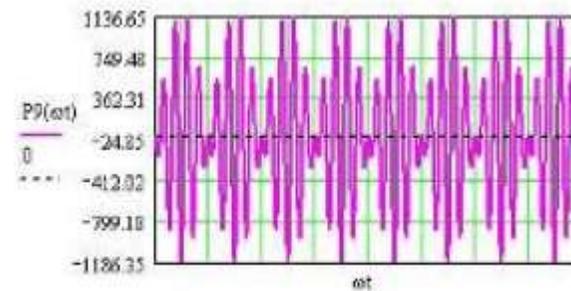
3ª Harmônica  $P_{ATIVA} = 0W$



5ª Harmônica  $P_{ATIVA} = 0W$

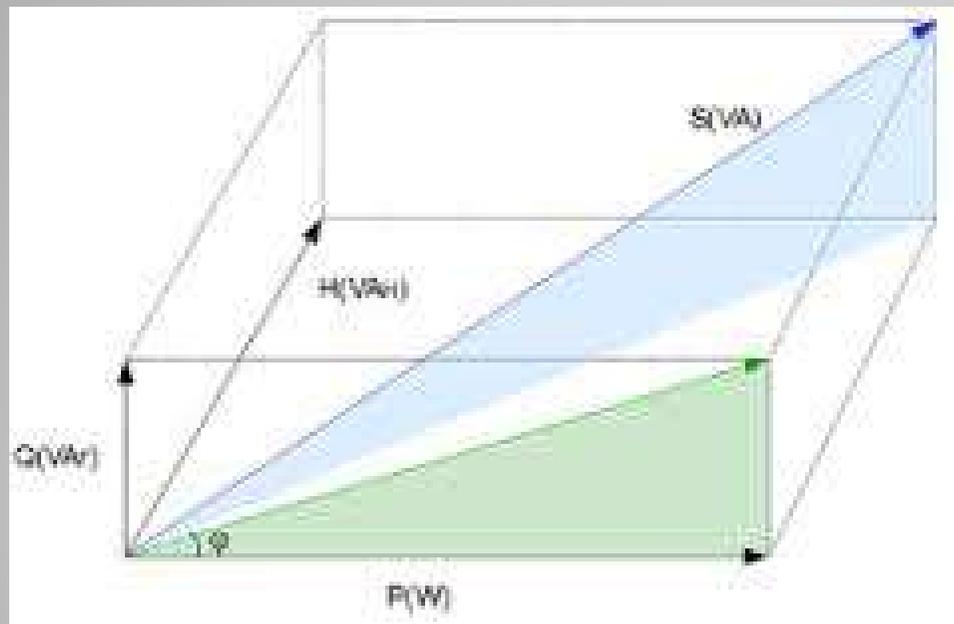


7ª Harmônica  $P_{ATIVA} = 0W$



9ª Harmônica  $P_{ATIVA} = 0W$

# FATOR DE POTÊNCIA EM CARGAS NÃO LINEARES

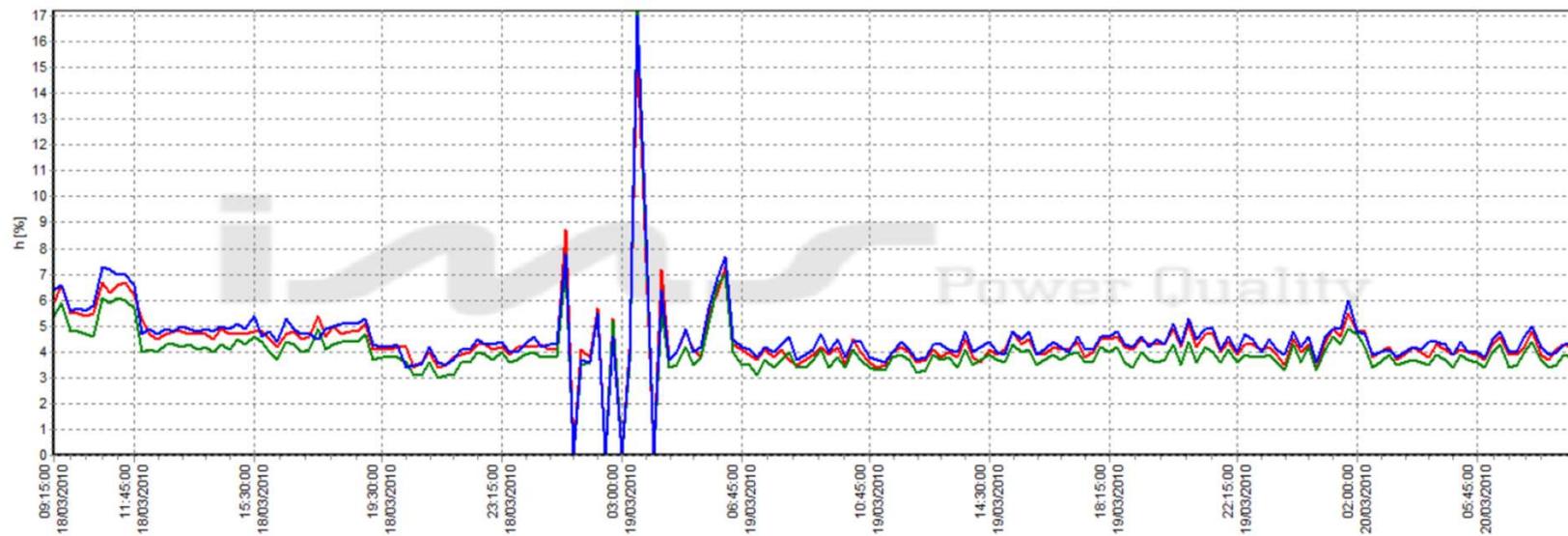


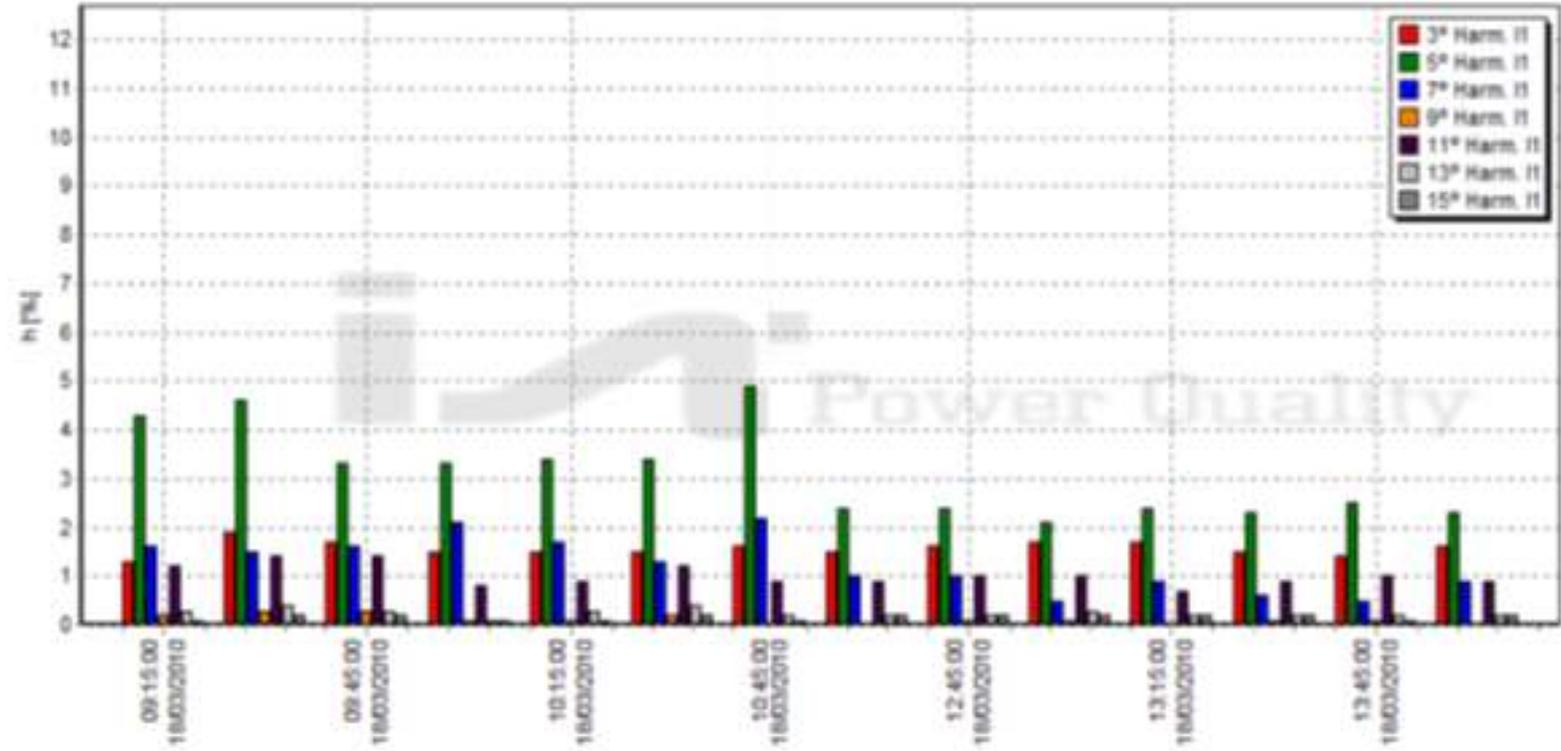
$$FP = \frac{\cos \theta}{\sqrt{1 + THD_i^2}}$$

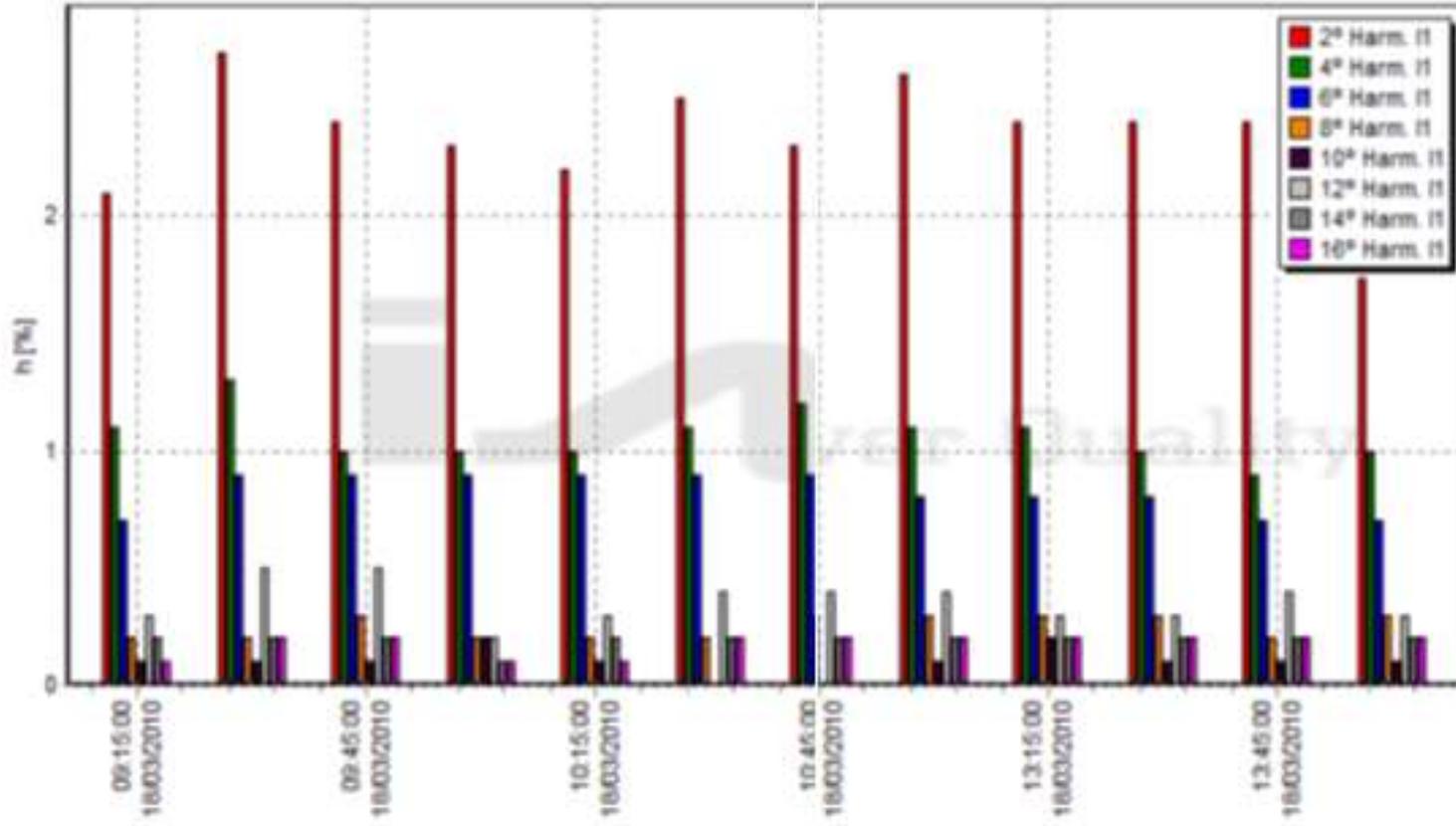
$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum I_{i(n)ef}^2}}{I_{i(1)ef}}$$

TDH DE CORRENTE

— THD I1 — THD I2 — THD I3







Equipamento	Efeito das Componentes Harmônicas	Resultado
Capacitores	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sobreaquecimento;</li> <li>- Rompimento do material dielétrico;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aquecimento e aumento das perdas no dielétrico;</li> <li>- Curto-Circuito;</li> <li>- Explosão;</li> </ul>
Transformadores	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Componentes harmônicas da corrente podem elevar consideravelmente as perdas nos transformadores;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aquecimento;</li> <li>- Redução da vida útil;</li> <li>- Aumento das perdas no ferro e no cobre;</li> <li>- Stress na isolação;</li> <li>- Ruído excessivo;</li> </ul>
Motores	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumento das perdas;</li> <li>- Alterações no campo magnético;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aquecimento;</li> <li>- Vibrações mecânicas e ruído;</li> <li>- Redução na eficiência;</li> <li>- Torques pulsantes;</li> </ul>
Disjuntores	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falhas na operação;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Abertura de disjuntores com correntes abaixo da nominal.</li> </ul>
Sistemas de Telefonia	<ul style="list-style-type: none"> <li>- As componentes harmônicas podem acoplar-se as linhas de telecomunicações produzindo interferências;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ruídos nas ligações.</li> </ul>
Sobrecarga no neutro	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Em determinados sistemas trifásicos, as harmônicas de ordem 3 (3ª, 6ª, 9ª...) produzidas por cada uma das fases se somam no neutro, produzindo correntes maiores que as correntes de fase.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aquecimento e aumento das perdas</li> <li>- Redução da vida útil da instalação elétrica</li> <li>- Queima de fusíveis</li> <li>- Falha na operação de disjuntores</li> </ul>

# CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

## **Elementos passivos**

Indutores;

Capacitores;

Filtros LC sintonizados em determinadas frequências.

## **Elementos ativos e passivos**

Associação de transformador e retificador de 12 pulsos a diodo. Possui ótima relação custo/benefício sendo empregada no estágio de entrada de alguns tipos de equipamentos trifásicos como, por exemplo, Nobreaks.

## **Filtros ativos**

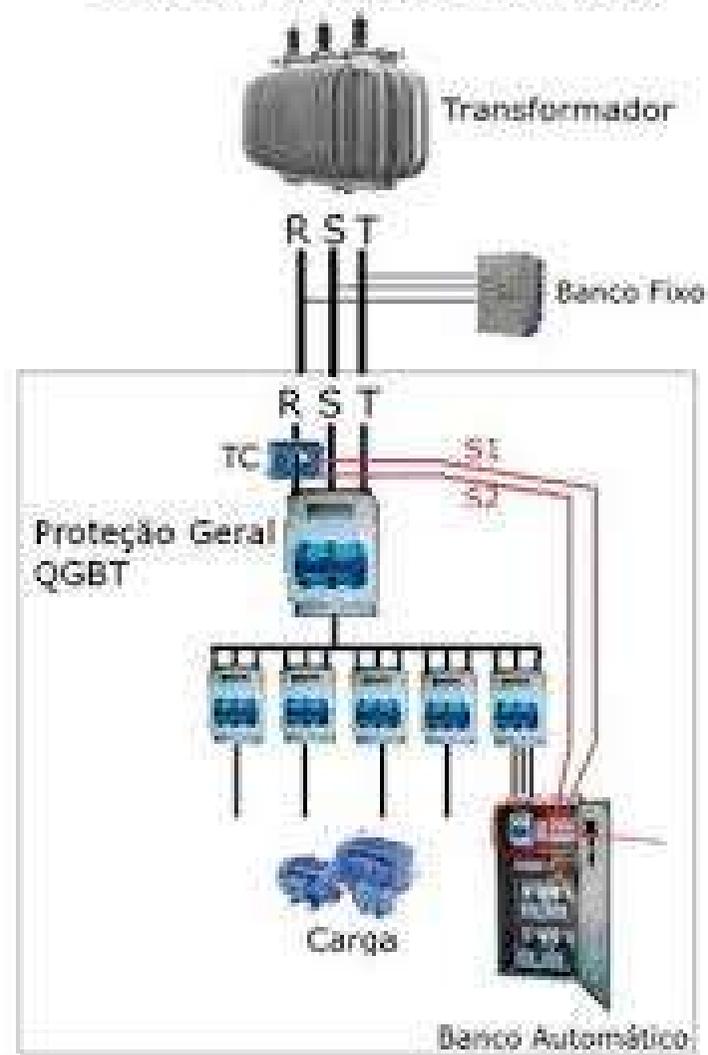
Estes elementos empregam semicondutores de alta frequência e funcionam como uma "fonte de corrente" de forma que a soma das parcelas das correntes do filtro e carga resulte em uma corrente de baixo conteúdo harmônico drenado das concessionárias de energia elétrica.

# Impacto na conta de energia elétrica

	Nobreak 1: Sem CFP	Nobreak 2: Com CFP
Potência Reativa	6,850 kVAr	0,944 kVAr
Custo em 1 mês	R\$ 765,21	R\$ 105,45
Custo em 1 ano	R\$ 9.182,52	R\$ 1.265,40
Economia / mês	-	R\$ 659,76
Economia / ano	-	R\$ 7.917,12



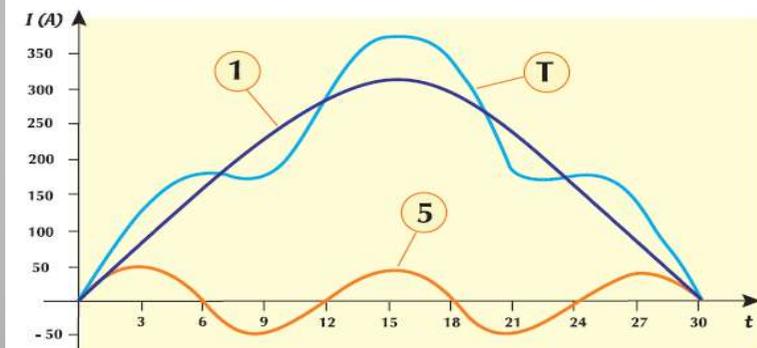
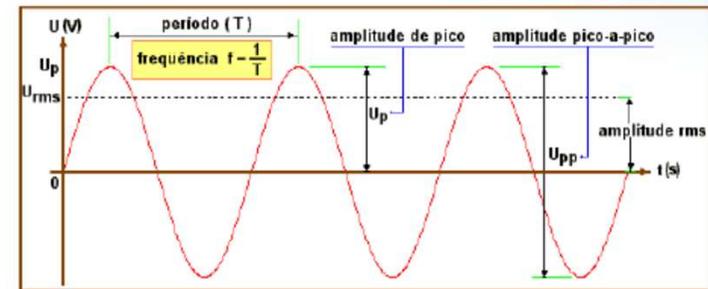
## DESENHO ORIENTATIVO



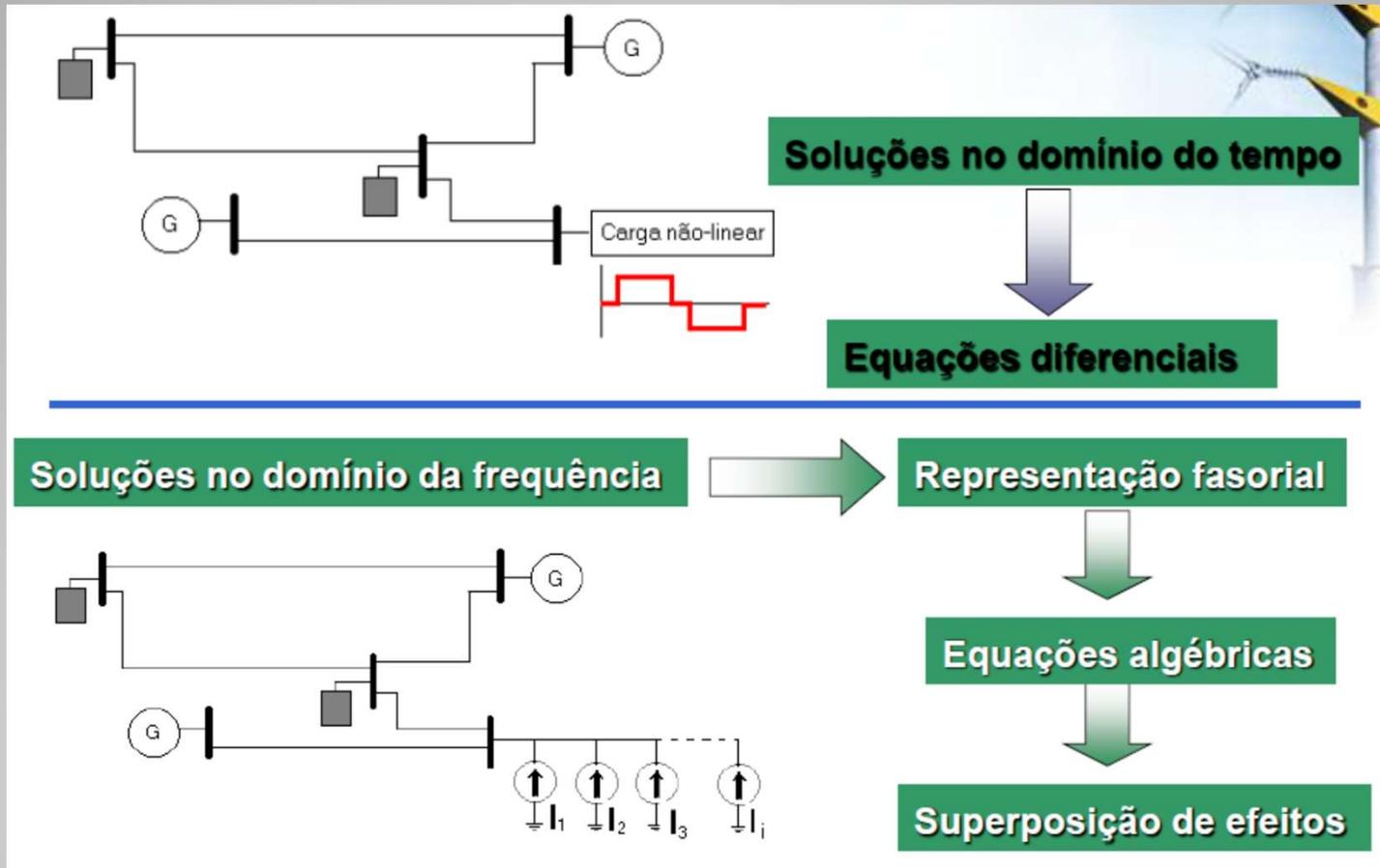
# HARMÔNICAS

Distorções Harmônicas são fenômenos associados com deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental.

Parâmetros idealizados:



# MOTIVAÇÃO

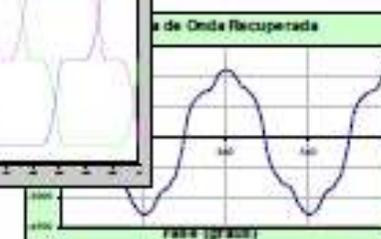
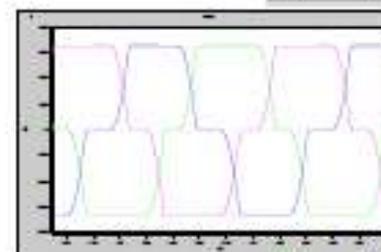
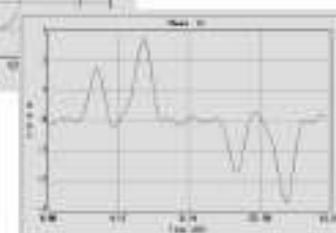
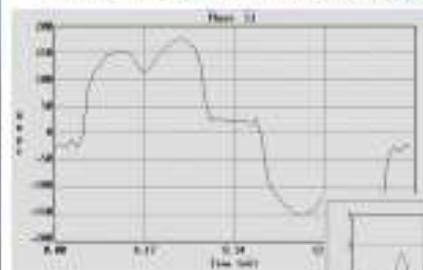


# Cargas Não Lineares

Consumidores comerciais e industriais:



## Correntes de alimentação



Valor (A) 100 0 100

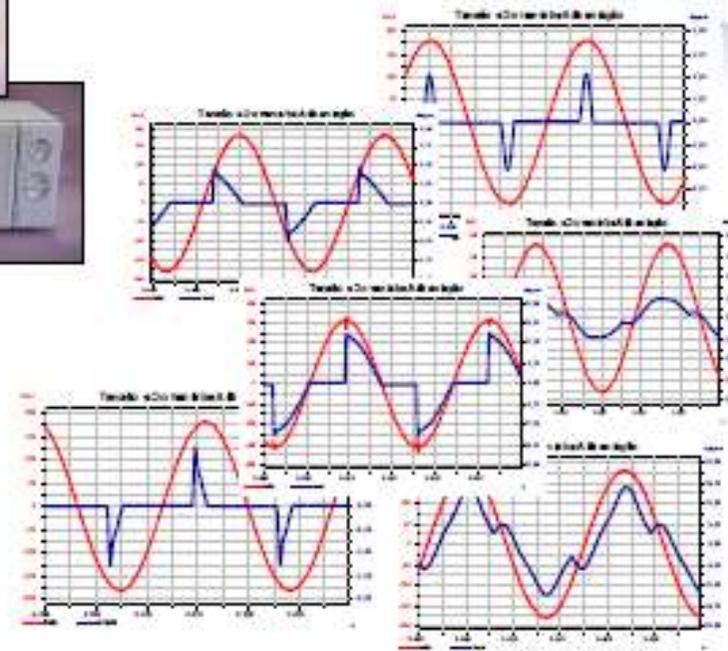


# Cargas Não Lineares

Consumidores residenciais:



Correntes de alimentação



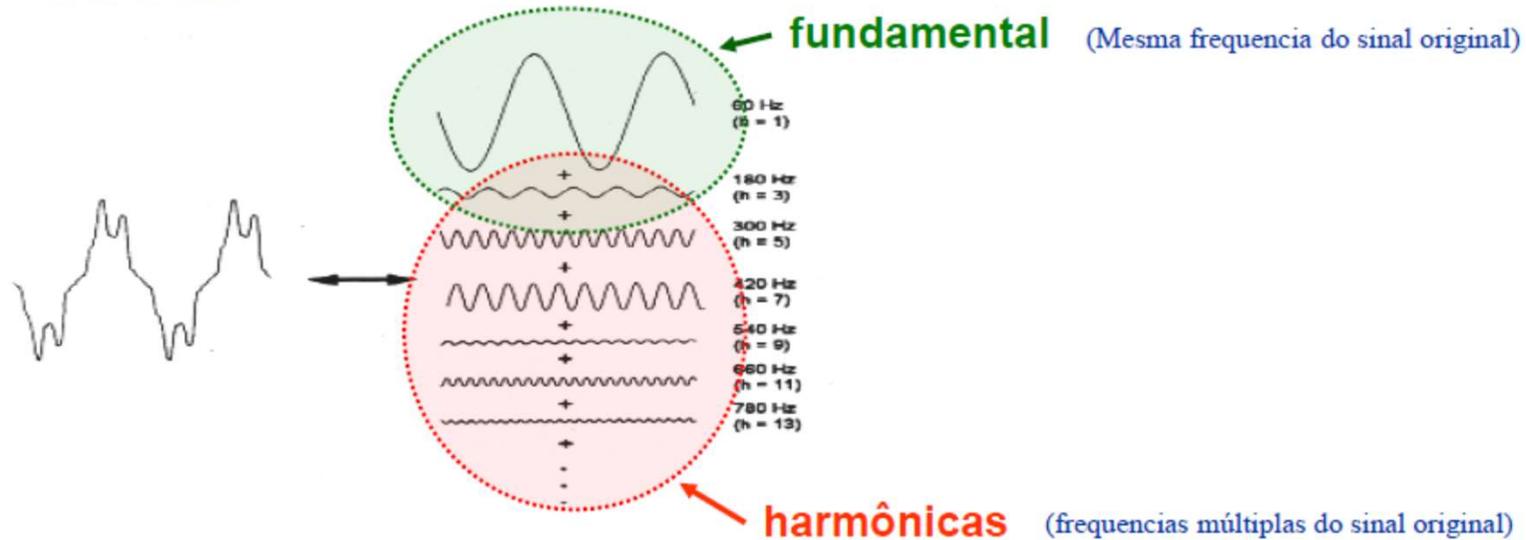
## Teorema de Fourier:

função contínua e periódica pode ser representada por um somatório de componentes senoidais e uma componente constante (1822).



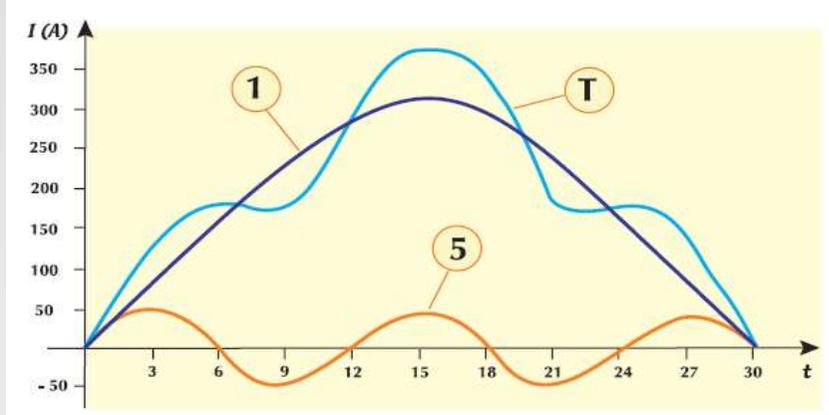
1768 to 1830

$$f(t) = \underbrace{A_0}_{\substack{\text{valor médio} \\ \text{ou cc}}} + \underbrace{A_1 \text{ sen } \omega t + A_2 \text{ sen } 2\omega t + A_3 \text{ sen } 3\omega t + \dots + A_n \text{ sen } n\omega t}_{\text{termos em seno}} + \underbrace{B_1 \text{ cos } \omega t + B_2 \text{ cos } 2\omega t + B_3 \text{ cos } 3\omega t + \dots + B_n \text{ cos } n\omega t}_{\text{termos em co-seno}}$$



t	Sinal 1 (A)	Sinal 5 (A)	Sinal T (A) sinal 1+sinal 5
3	90	50	140
6	190	0	190
9	230	-50	180
12	300	0	300
15	310	50	360
18	300	0	300
21	230	-50	180
24	190	0	190
27	90	50	140
30	0	0	0

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

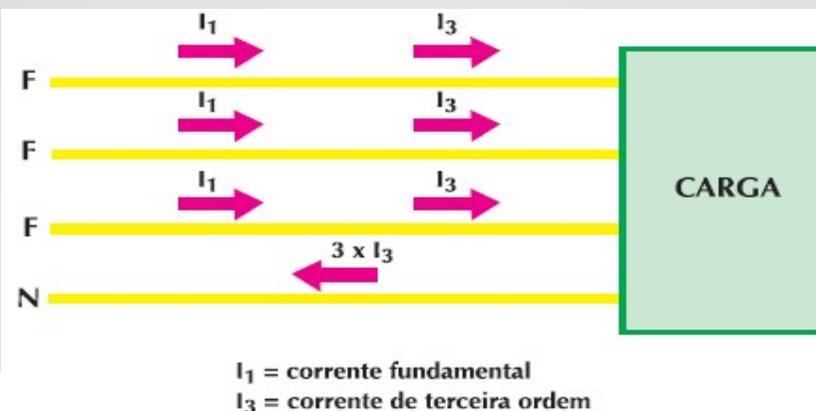


## Harmônicas : Sequencia positiva

A seqüência pode ser positiva, negativa ou nula (zero). Tomando-se como exemplo um motor assíncrono trifásico alimentado por quatro condutores ( $3F + N$ ), as harmônicas de seqüência positiva tenderiam a fazer o motor girar no mesmo sentido que o da componente fundamental, provocando, assim, uma sobrecorrente nos seus enrolamentos, que provocaria um aumento de temperatura, reduzindo a vida útil e permitindo a ocorrência de danos ao motor. Essas harmônicas de seqüência positiva provocam, geralmente, aquecimentos indesejados em condutores, motores, transformadores, etc.

## Harmônicas : Sequencia negativa

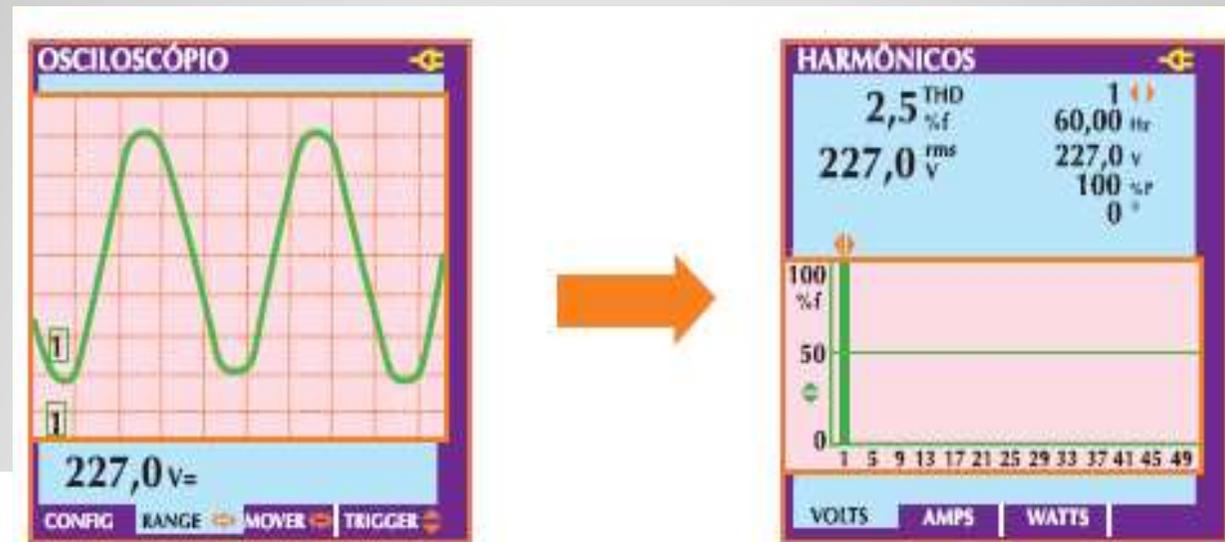
As harmônicas de seqüência negativa fariam o motor girar em sentido contrário ao giro produzido pela fundamental, freando assim o motor e também causando aquecimento indesejado. Por sua vez, as harmônicas de seqüência nula, zero ou também conhecidas como homopolares, não provocam efeitos no sentido de rotação do motor, porém somam-se algebricamente no condutor neutro. Isso implica que podem ocorrer situações em que pelo condutor neutro pode circular uma corrente de terceira ordem que é três vezes maior do que a corrente de terceira ordem que percorre cada condutor fase (figura 4). Com isso, ocorrem aquecimentos excessivos do condutor neutro, destruição de bancos de capacitores, etc.



## Espectro harmônico

Permite decompor um sinal em suas componentes harmônicas e representá-lo na forma de um gráfico de barras, onde cada barra representa uma harmônica com sua frequência, valor eficaz e defasagem

Na prática, geralmente limita-se o número de harmônicas a serem medidas e analisadas por volta da ordem número 40, pois acima dessa raramente os efeitos são significativos.



# Taxa de distorção harmônica total

THD é definida em consequência da necessidade de se determinar numericamente as harmônicas presentes em um dado ponto da instalação

$$\text{THD}_f = \frac{\sqrt{(h_2)^2 + (h_3)^2 + (h_4)^2 + \dots + (h_n)^2}}{h_1} \times 100\%$$

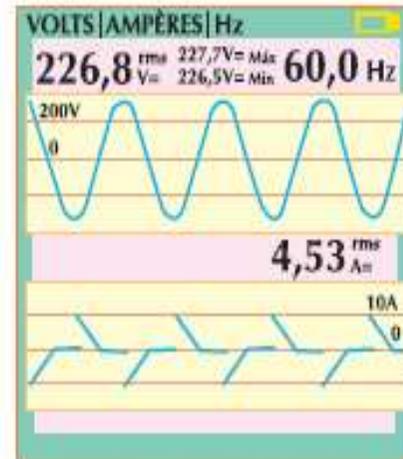
THD em relação a fundamental

$$\text{THD}_r = \frac{\sqrt{(h_2)^2 + (h_3)^2 + (h_4)^2 + \dots + (h_n)^2}}{\sqrt{(h_1)^2 + (h_2)^2 + (h_3)^2 + (h_4)^2 + \dots + (h_n)^2}} \times 100\%$$

THD em relação ao sinal total

# Exemplo

Ordem	Valor em A
h <sub>1</sub>	3,63
h <sub>3</sub>	2,33
h <sub>5</sub>	0,94
h <sub>7</sub>	0,69
h <sub>9</sub>	0,50
h <sub>11</sub>	0,41
h <sub>13</sub>	0,33
Total	4,53



$$\text{THD}_f = \frac{\sqrt{(2,33)^2 + (0,94)^2 + (0,69)^2 + (0,50)^2 + (0,41)^2 + (0,33)^2}}{3,63} \times 100\% = 74,5\%$$

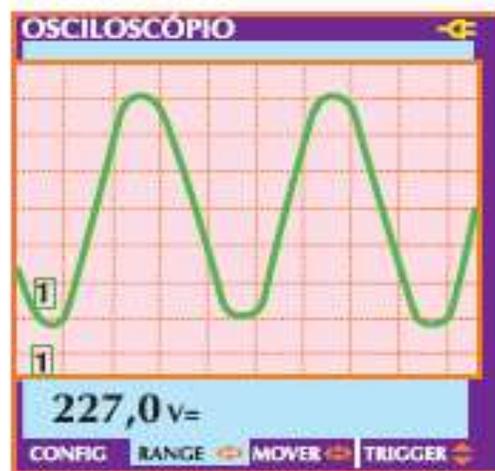


Figura 8 - Forma de onda e espectro de um sinal praticamente senoidal ( $THD_f = 2,5\%$ ).



Figura 9 - Forma de onda e espectro de um sinal fortemente distorcido ( $THD_f = 79,1\%$ ).

## Valor eficaz (rms)

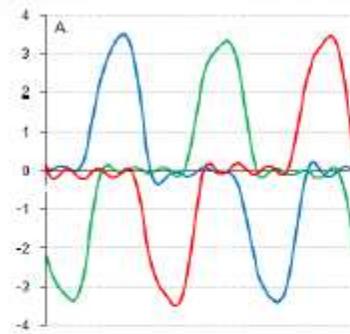
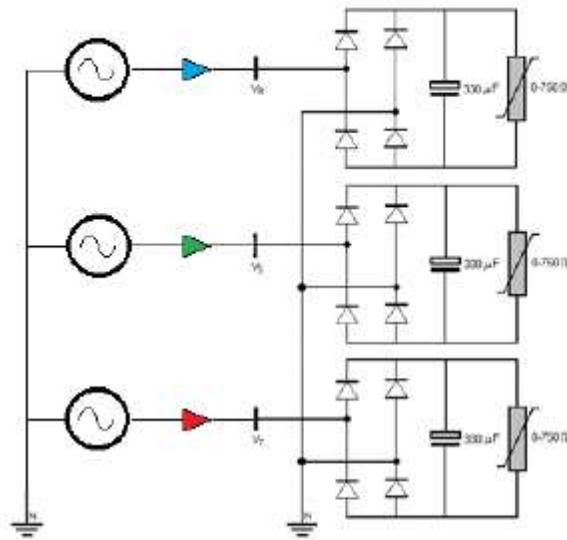
Ordem	Valor em A
h <sub>1</sub>	3,63
h <sub>3</sub>	2,33
h <sub>5</sub>	0,94
h <sub>7</sub>	0,69
h <sub>9</sub>	0,50
h <sub>11</sub>	0,41
h <sub>13</sub>	0,33
Total	4,53

**RMS( Root Mean Square) é o valor em corrente contínua equivalente que produz a mesma quantidade de calor em uma carga resistiva.**

$$I_{\text{rms}h} [\text{A rms}] = \frac{I_{\text{mh}} [\text{A max}]}{\sqrt{2}}$$

O valor efetivo total da soma quadrática do valor eficaz de cada harmônica é:

$$I_{\text{rms tot}} [\text{A rms}] = \sqrt{I_{\text{rms}1}^2 + I_{\text{rms}2}^2 + I_{\text{rms}3}^2 + \dots + I_{\text{rms}h}^2}$$

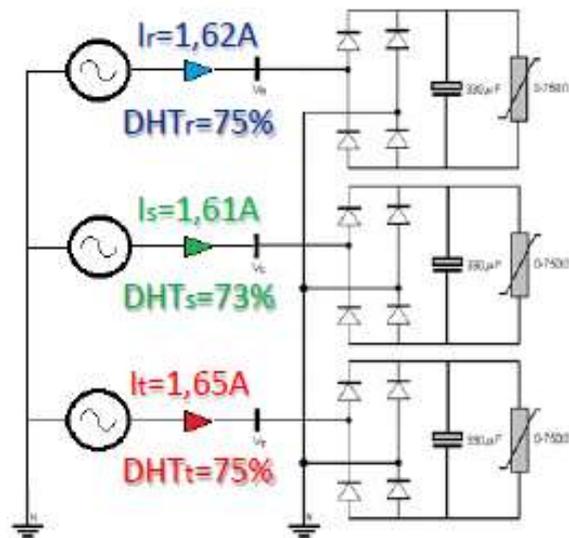


Valores de pico das componentes harmônicas

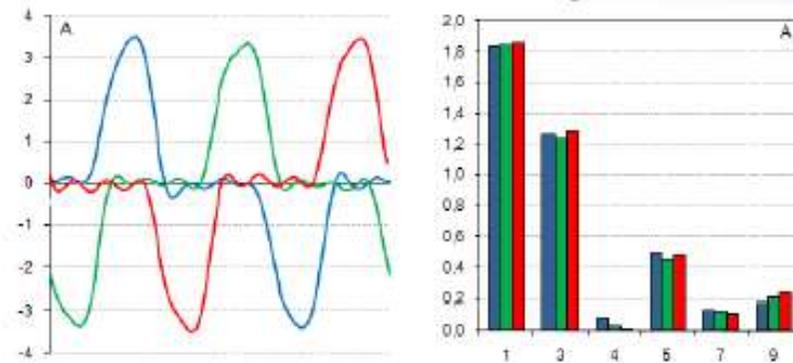
h	I <sub>a</sub> (A)	Φ <sub>a</sub> (°)	I <sub>b</sub> (A)	Φ <sub>b</sub> (°)	I <sub>c</sub> (A)	Φ <sub>c</sub> (°)
1	1,84	9,54	1,85	-111,6	1,86	129,2
3	1,26	-157,04	1,24	-159,3	1,28	-158,9
4	0,08	57,12	0,03	83,9	0,01	-2,5
5	0,49	26,37	0,45	148,8	0,48	-90,8
7	0,13	122,11	0,12	-35,3	0,11	-124,2
9	0,17	-105,26	0,20	-97,1	0,24	-95,1

- Determinar o valor RMS por fase
- Determinar o DTT<sub>h</sub> (%) por fase

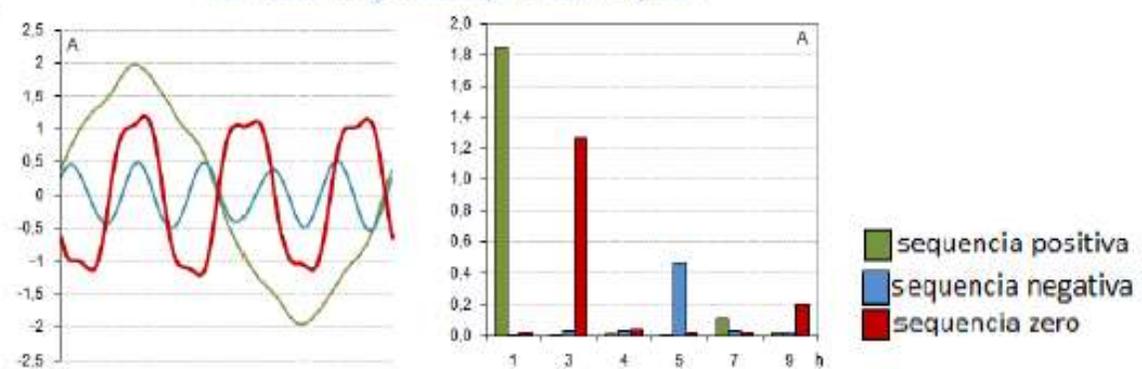
# Conjunto de retificadores de onda completa e filtro capacitivo



Correntes de alimentação



Concentração sequencial típica



### Valores de pico das componentes harmônicas

<b>h</b>	<b>I<sub>a</sub>(A)</b>	<b>Φ<sub>a</sub>(°)</b>	<b>I<sub>b</sub>(A)</b>	<b>Φ<sub>b</sub>(°)</b>	<b>I<sub>c</sub>(A)</b>	<b>Φ<sub>c</sub>(°)</b>
<b>1</b>	1,84	9,54	1,85	-111,6	1,86	129,2
<b>3</b>	1,26	-157,04	1,24	-159,3	1,28	-158,9
<b>4</b>	0,08	57,12	0,03	83,9	0,01	-2,5
<b>5</b>	0,49	26,37	0,45	148,8	0,48	-90,8
<b>7</b>	0,13	122,11	0,12	-35,3	0,11	-124,2
<b>9</b>	0,17	-105,26	0,20	-97,1	0,24	-95,1

# FATOR DE POTÊNCIA E $\cos \phi$

$$fp = \frac{P \text{ (W)}}{S \text{ (VA)}}$$

Fator de potência para onda senoidal.

$\cos \phi$  para cada componente harmônica.

$$\cos \phi_n = \frac{P_{hn} \text{ (W)}}{S_{hn} \text{ (VA)}}$$

## Forma de onda de tensão e corrente verificadas em um dado ponto de uma instalação.



Mede-se o  $\cos\phi$  da componente fundamental e o fator de potência do sinal deformado (total).

$\cos\phi$  e fator de potência muito diferentes caracterizam forte conteúdo harmônico.

## FATOR DE DESCLASSIFICAÇÃO (K)

Fator de desclassificação definido para transformadores indica quanto reduz a potência máxima de saída quando existem harmônicas.

Potência máxima fornecida por um trafo.

$$K = \frac{I_{\text{pico}}}{I_{\text{rms}} \sqrt{2}} = \frac{FC}{\sqrt{2}}$$

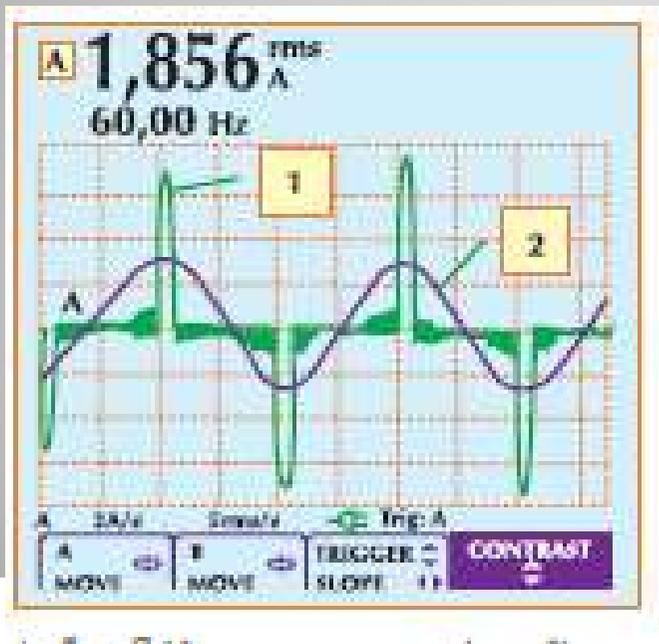
$$S_{\text{max}} = \frac{S_{\text{nom}}}{K}$$

Se o fator k para um certo trafo é 1,2 e sua potência nominal é 1000kVA, então a máxima potência fornecida sem que houvesse sobreaquecimento seria igual a 833kVA.

# FATOR DE CRISTA (FC)

$$FC = \frac{I_{\text{pico}}}{I_{\text{rms}}}$$

$$FC = \sqrt{2} = 1,414$$



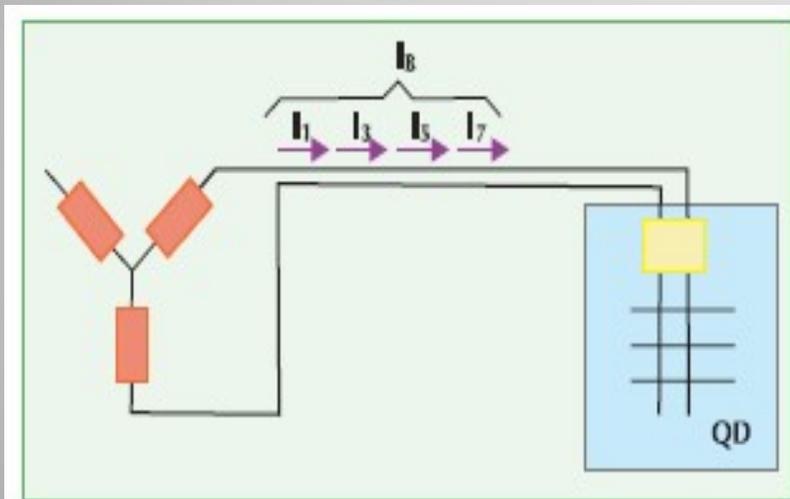
	Sinal 1	Sinal 2
Corrente de pico (A)	7,45	2,63
Corrente rms (A)	1,86	1,86
Fator de crista (FC)	4,000	1,414

Nos circuitos com conteúdo harmônico o valor eficaz por si só não é significativo.

# COMO LIDAR COM PRESENÇA HARMÔNICAS

## DIMENSIONAMENTO DOS CONDUTORES FASE E NEUTRO

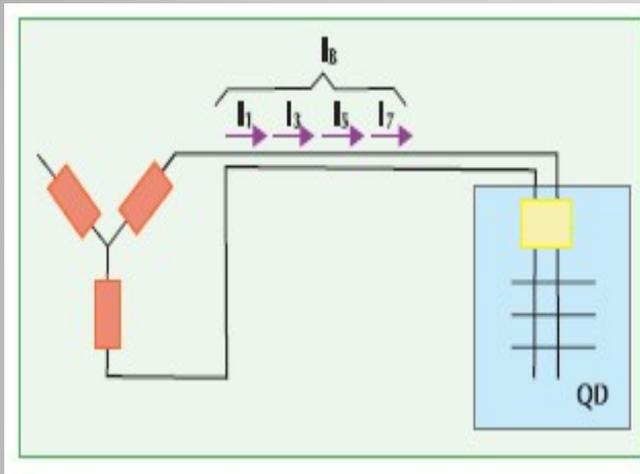
$$I_B = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_n^2}$$



DETERMINA O VALOR DA  
CORRENTE DE PROJETO E  
ENTRA NA TABELA.

## COMO LIDAR COM PRESENÇA HARMÔNICAS

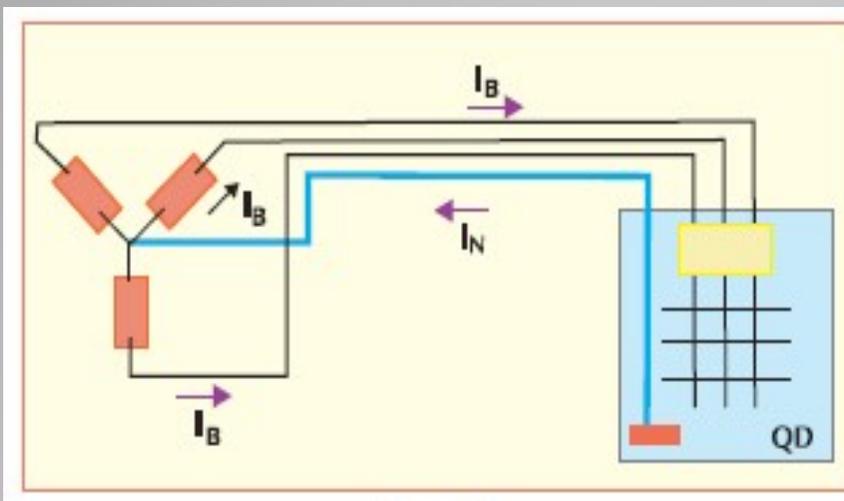
As correntes que estão presentes nesse circuito são de ordens 1 (fundamental), 3 (terceira harmônica), 5 (quinta) e 7 (sétima), com intensidades (valores eficazes) de, respectivamente, 110 A, 57 A, 25 A e 17 A. Nessas condições, qual o valor da corrente de projeto  $I_B$  a considerar no cálculo da seção dos condutores desse circuito?



DETERMINA O VALOR DA CORRENTE DE PROJETO E ENTRA NA TABELA.

$$I_B = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2} = \sqrt{(110)^2 + (57)^2 + (25)^2 + (17)^2} = 127 \text{ A}$$

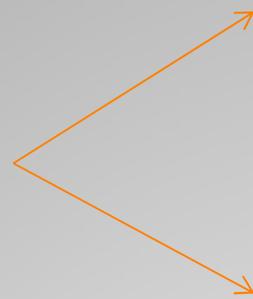
## DIMENSIONAMENTO DOS CONDUTORES FASE E NEUTRO



$$I_N = 57 + 57 + 57 = 171 \text{ A}$$

$$I_B = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2} = \sqrt{(110)^2 + (57)^2 + (25)^2 + (17)^2} = 127 \text{ A}$$

$I_N = 171A$



35% maior que a corrente de fase

55% maior que a corrente de fundametnal

$$I = (1/f) \times I_B \times (p/100) \times 3$$

onde:

$I_B$  = corrente de projeto do circuito

$p$  = porcentagem da harmônica de 3ª ordem (tabela 45)

$f$  = fator de correção (tabela 45)

Porcentagem de 3ª harmônica na corrente de fase (%)	Fator de correção	
	Escolha da seção com base na corrente de fase	Escolha da seção com base na corrente de neutro
0-15	1,0	—
15-33	0,86	—
33-45	—	0,86
> 45	—	1,0

$$I = (1/f) \times I_B \times (p/100) \times 3 = (1/0,86) \times 127 \times (45/100) \times 3 = 199 \text{ A}$$

## DIMENSIONAMENTO DE TRANSFORMADORES

$$K = \frac{I_{\text{pico}}}{I_{\text{rms}} \sqrt{2}} = \frac{FC}{\sqrt{2}}$$

$$S_{\text{max}} = \frac{S_{\text{nom}}}{K}$$

# FILTRO DE HARMÔNICAS

Controlar a presença das correntes harmônicas na instalação elétrica é tarefa fundamental e cada vez mais necessária nos dias atuais para estarem asseguradas as seguintes condições:

- Garantir uma distribuição elétrica "limpa", com um baixo THDI (distorção harmônica de corrente), através da redução ou eliminação das correntes harmônicas;
- Obter valores de THDU (distorção harmônica de tensão) aceitáveis de modo a garantir que as cargas de uma instalação recebam uma alimentação praticamente senoidal. Uma prática internacionalmente aceita é limitar o THDU em torno de 5% em todos os pontos da instalação;
- Possuir uma instalação que atenda aos requisitos normativos existentes

A norma IEC 61000-3-2 estabelece as exigências sobre harmônicas que devem ser atendidas por todos os equipamentos que consomem menos de 16A por fase em redes de 220V a 415V. Dentre esses, estão os computadores pessoais e os televisores.

A tabela 7 mostra os limites que todo equipamento com mais de 50W devem cumprir. Abaixo dessa potência, não há limite algum. A norma estabelece os limites com base nos valores eficazes (rms) de cada harmônica. A relação entre valor eficaz e valor máximo é:

**Limites da norma IEC 61000-3-2**

<b>Harmônica h</b>	<b>Limite (mA / W)</b>	<b>Limite (A)</b>
3	3,4	2,30
5	1,9	1,14
7	1,0	0,77
9	0,5	0,40
11	0,35	0,33
13 ou maior	$3,85/n$	$0,15 \cdot 15/n$

Máxima distorção de corrente harmônica em %  $I_B$

Ordem da harmônica individual (harmônicas ímpares)

$I_{sc}/I_B$	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
< 20*	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20<50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50<100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100<1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
< 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

As harmônicas pares são limitadas a 25% dos limites das harmônicas ímpares indicadas acima

\* Todo equipamento de geração está limitado a esses valores de distorção de corrente independentemente da relação  $I_{sc}/I_B$

onde:

$I_{sc}$  = máxima corrente de curto-circuito no ponto de conexão

$I_B$  = máxima corrente de projeto (componente na frequência fundamental) no ponto de conexão

Tabela 9 - Tabela 10.3 da IEEE 519-2, limites de distorção de corrente para sistemas de distribuição em geral (120V até 69000 V).

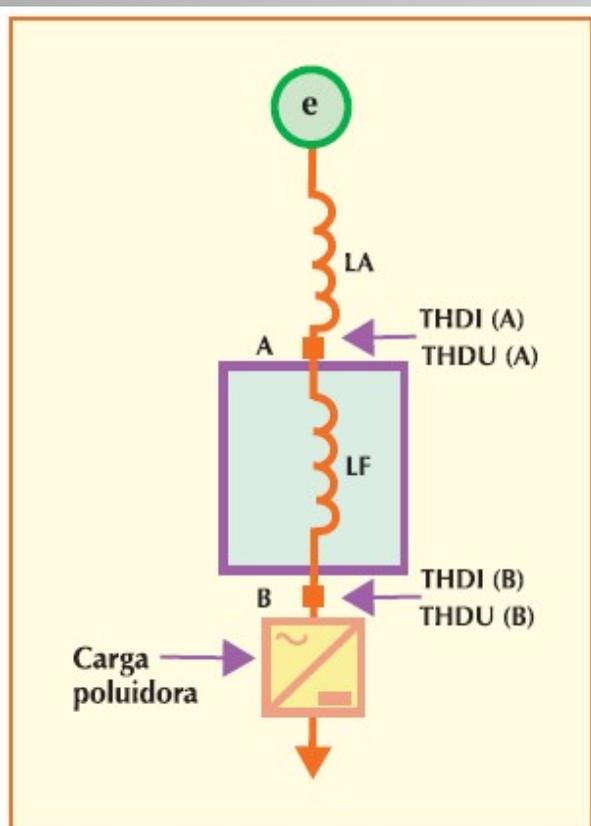
## FILTRO DE HARMÔNICAS

As reduções dos valores de THDI e THDU estão interligadas e dependem da redução ou eliminação das correntes harmônicas predominantes numa instalação elétrica. Com o objetivo de controlar essas harmônicas indesejadas, há atualmente, genericamente, três soluções típicas, a saber:

- Utilização de uma indutância;
- Utilização de filtro passivo;
- Utilização de filtro ativo (compensador ativo).

## FILTRO DE INDUTÂNCIA

SOLUÇÃO PALEATIVA QUE ATENUA TODAS AS HARMÔNICAS. CONSISTE NA UTILIZAÇÃO DE UM INDUTOR EM SÉRIE (LF) COM A FONTE DE ENERGIA E CARGA POLUIDORA.



$$R = \frac{LS}{(LS + LF)}$$

resultando em:

$$THDU(A) = THDU(B) \times R$$

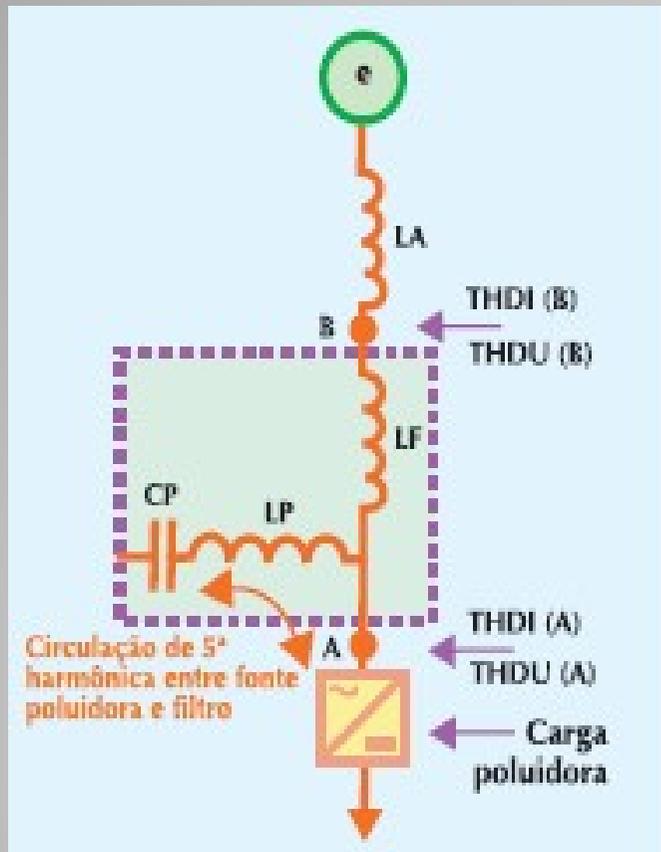
As principais vantagens da indutância são:

- É uma solução simples, confiável e de baixo custo;
- A bobina pode ser utilizada com qualquer tipo de fonte.

E as principais desvantagens são:

- Limitada eficiência;
- Grandes dimensões;
- Introduce uma queda de tensão na linha.

## FILTRO PASSIVO LC



$$LP \times CP \times \omega^2 = 1$$

LP E LC DEVEM SER DIMENSIONADOS DE FORMA QUE PARA DETERMINADA FREQUÊNCIA A REATÂNCIA RESULTANTE SEJA NULA.

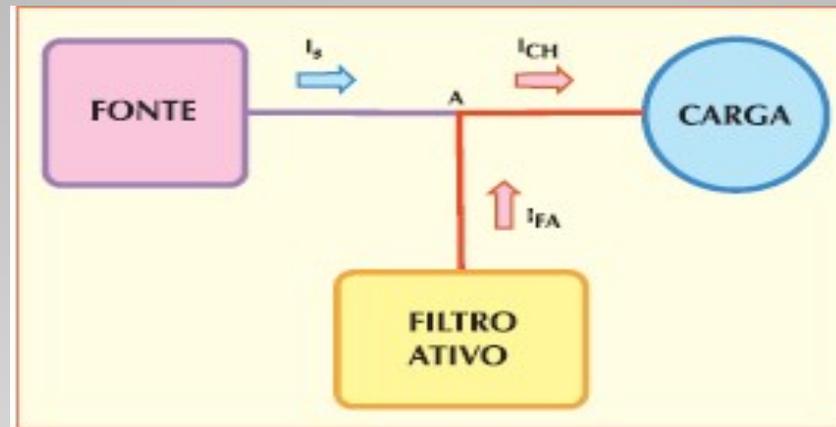
As principais vantagens dos filtros de harmônicas passivos LC são as seguintes:

- Simples e confiáveis;
- A indutância de compensação (LA) pode ser instalada a qualquer momento;
- Desempenho muito satisfatório, sobretudo na frequência sintonizada, obtendo-se, via de regra, THDI  $\leq 5\%$ ;
- Aumento do fator de potência da instalação, uma vez que a introdução do capacitor (CP) compensa parte da energia indutiva dos componentes existentes.

Por sua vez, os filtros de harmônicas passivos LC apresentam algumas desvantagens:

- Limite de espectro de atuação, ou seja, o filtro elimina apenas o sinal harmônico sintonizado e atenua outras harmônicas próximas, mas não é eficaz para uma banda mais larga de sinais;
- Depende da fonte de alimentação, pois o uso de filtro compensado é obrigatório no caso da presença de grupos geradores;
- Funciona adequadamente apenas se não houver alteração nas cargas durante a vida da instalação, uma vez que, a mudança das cargas pode provocar alteração no espectro harmônico da instalação, fazendo com que a frequência de sintonia previamente estabelecida para o filtro seja diferente do novo valor existente.

## FILTRO ATIVO



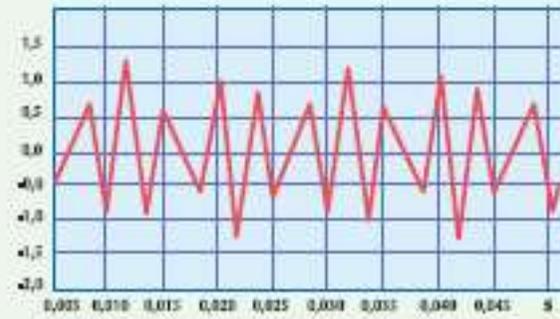
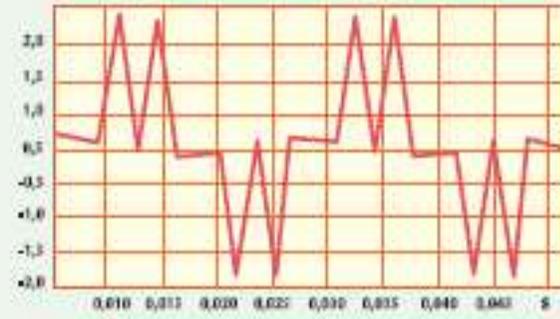
Esse filtro analisa cada uma das fases continuamente, em tempo real, monitorando a corrente de carga  $I_{CH}$ . Dessa análise, obtém-se o espectro harmônico, que é a indicação da presença da fundamental e de todas as demais componentes harmônicas do sinal.

Assim, um filtro ativo pode estar localizado:

- Junto às cargas que geram grande quantidade de harmônicas, assegurando que a filtragem seja realizada localmente;
- Junto aos quadros de distribuição, realizando uma compensação parcial das harmônicas ou;
- Junto ao quadro geral da instalação, para prover uma compensação geral das correntes harmônicas.

Idealmente, um filtro ativo deveria ser instalado no ponto de origem da geração da harmônica, pois assim teríamos as seguintes vantagens:

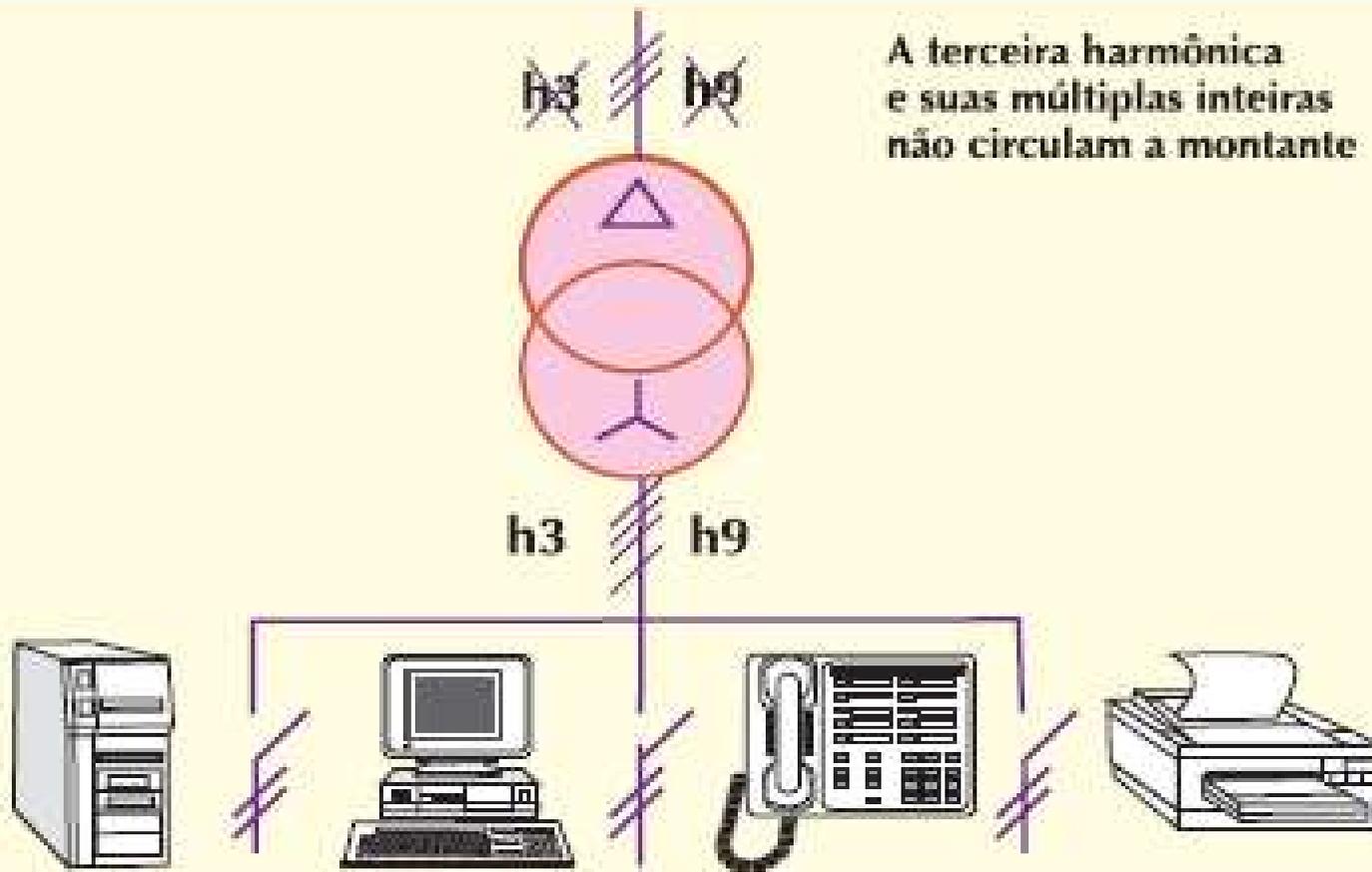
- Não circulação de correntes harmônicas pela instalação elétrica, o que pode afetar os demais componentes;
- Redução das perdas por efeito Joule nos cabos, componentes em geral e da carga no transformador ou gerador;
- Redução da seção dos condutores.



## **TRANSFORMADOR DE SEPARAÇÃO**

Os transformadores, geralmente utilizados como elementos de modificação de tensões e correntes, também são empregados em algumas ocasiões para modificar o regime do neutro da instalação, para isolar galvanicamente trechos de circuitos ou ainda como medida auxiliar na proteção contra contatos diretos

Mais recentemente, os transformadores vêm sendo também aplicados na área de harmônicas, sobretudo por sua propriedade de poder isolar as cargas da fonte. Com isso, é possível confinar os equipamentos problemáticos em termos de geração de harmônicas em um dado setor da instalação, evitando que os mesmos prejudiquem o restante do sistema a montante do transformador.



A terceira harmônica  
e suas múltiplas inteiras  
não circulam a montante

Cargas monofásicas com alto conteúdo de harmônica  
3ª e 9ª harmônicas em grande quantidade pelo neutro

# QUALIDADE DE ENERGIA

7ª Termo

**Engenharia Elétrica**

Aula 05

Prof. Dr. Giuliano Pierre Estevam

[www.electroenge.com.br](http://www.electroenge.com.br)

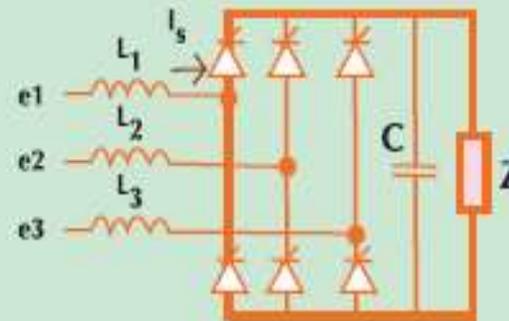


# CARGAS GERADORAS DE HARMÔNICAS

## RETIFICADORES / CARREGADORES

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

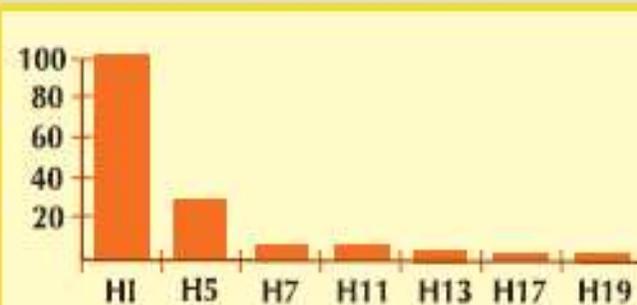
## ESQUEMA TÍPICO



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



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



# CARGAS GERADORAS DE HARMÔNICAS

## VARIADORES DE VELOCIDADE

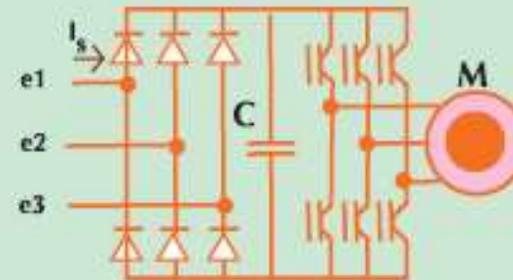
- Cargas trifásicas
- Absorvem grandes correntes harmônicas de ordens 5, 7, 11 e 13

## CORRENTE $I_s$ ABSORVIDA

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

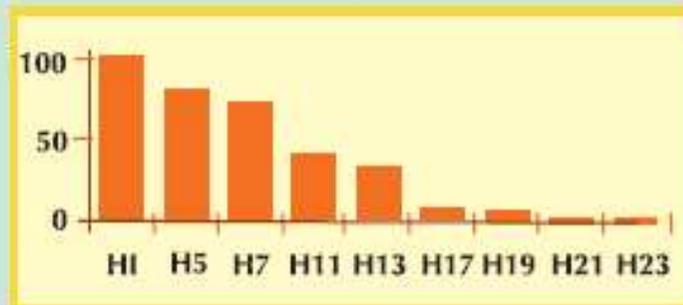


## ESQUEMA TÍPICO



## • ESPECTRO HARMÔNICO

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



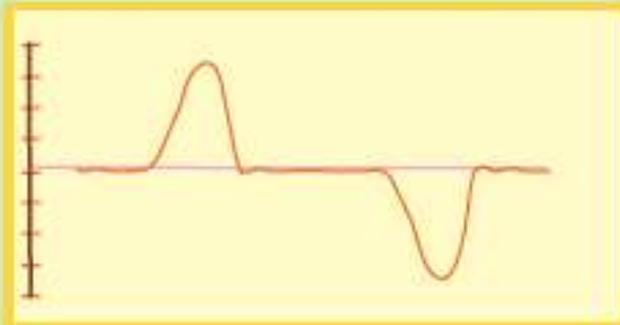
# CARGAS GERADORAS DE HARMÔNICAS

## CARGAS TIPO RCD

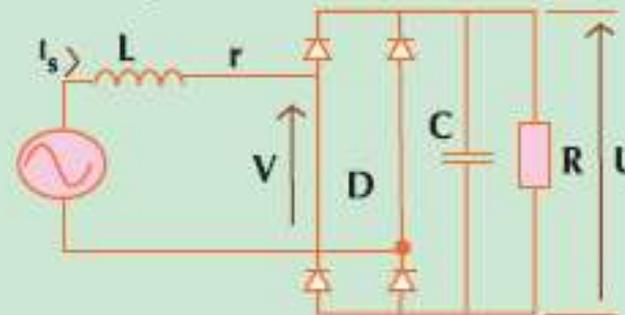
- Cargas monofásicas micro e mini informática
- Geradores de grandes correntes harmônicas de ordens ímpares H3 a H15

## CORRENTE $I_s$ ABSORVIDA

S=8,5kVA Fc=2,4 THDI=93%



## ESQUEMA TÍPICO



## ESPECTRO HARMÔNICO

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



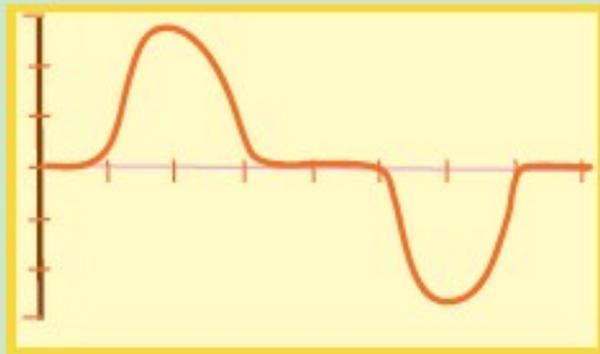
# CARGAS GERADORAS DE HARMÔNICAS

## MÁQUINA DE SOLDAR

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

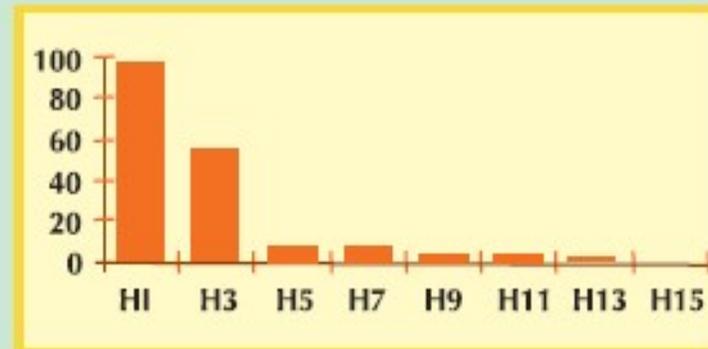
## CORRENTE $I_s$ ABSORVIDA

$I_s=341\text{A}$   $F_c=1,92$  THDI=58%



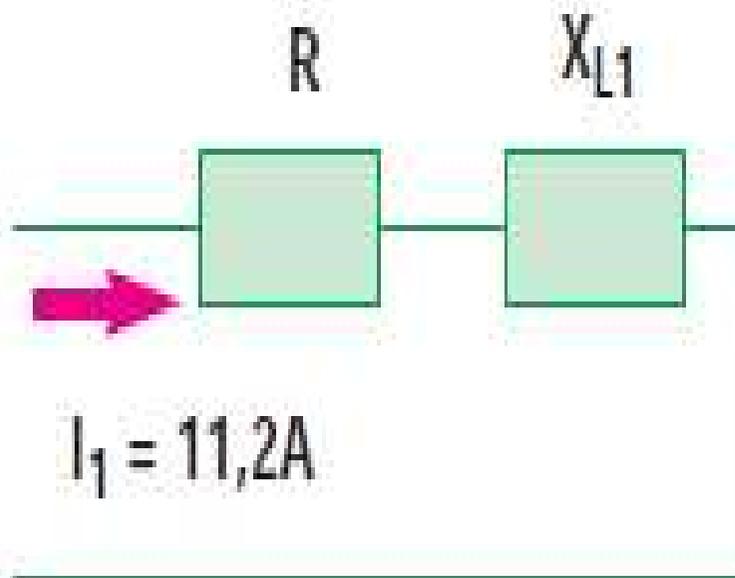
## ESPECTRO HARMÔNICO

56% H3, 9% H5, 9% H7



## A) REDUÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

- SEM HARMÔNICAS



$$R = 1\Omega$$

$$X_{L1} = 1\Omega$$

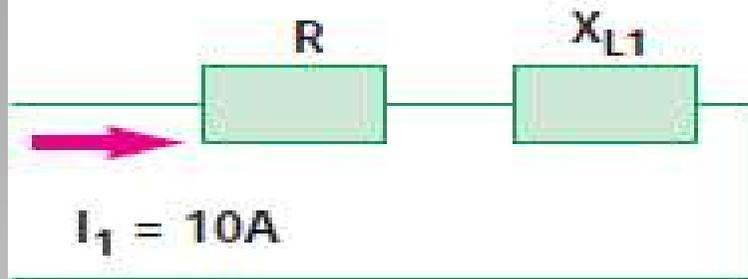
$$P_1 = R \cdot I_1^2 = 1 \cdot 11,2^2 = 125W$$

$$Q_1 = X_{L1} \cdot I_1^2 = 1 \cdot 11,2^2 = 125VAR$$

$$\text{tg}\phi_1 = Q / P = 125 / 125 = 1$$

$$\rightarrow \cos\phi_1 = 0,71$$

• COM 3ª HARMÔNICA



$$R = 1\Omega \qquad X_{L1} = 1\Omega$$

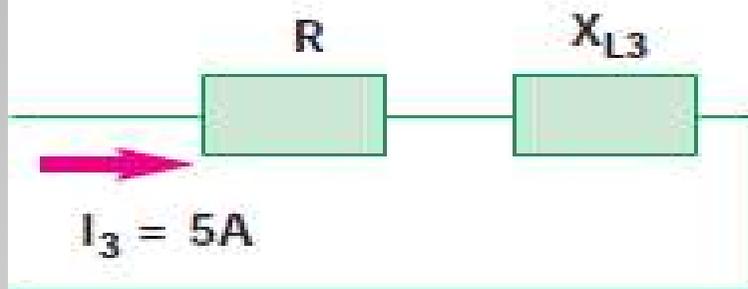
$$P_1 = R \cdot I_1^2 = 1 \cdot 10^2 = 100W$$

$$Q_1 = X_{L1} \cdot I_1^2 = 1 \cdot 10^2 = 100VAr$$

$$\text{tg}\phi_1 = Q / P = 100 / 100 = 1$$

$$\longrightarrow \cos\phi_1 = 0,71$$

+



$$R = 1\Omega \qquad X_{L3} = 3\Omega$$

$$P_3 = R \cdot I_3^2 = 1 \cdot 5^2 = 25W$$

$$Q_3 = X_{L3} \cdot I_3^2 = 3 \cdot 5^2 = 75VAr$$

$$\text{tg}\phi_3 = Q / P = 75 / 25 = 3$$

$$\longrightarrow \cos\phi_3 = 0,32$$

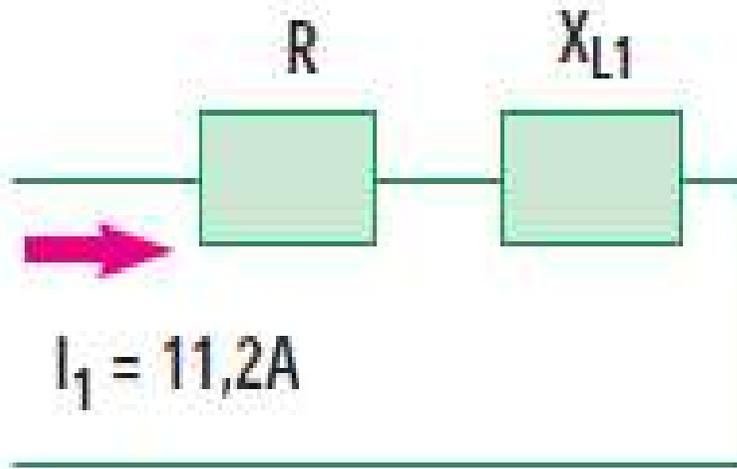
$$P_{TOTAL} = 100 + 25 = 125W$$

$$Q_{TOTAL} = 100 + 75 = 175VAr$$

$$\text{tg}\phi = Q_{TOTAL} / P_{TOTAL} = 175 / 125 = 1,4 \longrightarrow \cos\phi = 0,58$$

## B) AUMENTO DA QUEÇA DE TENSÃO

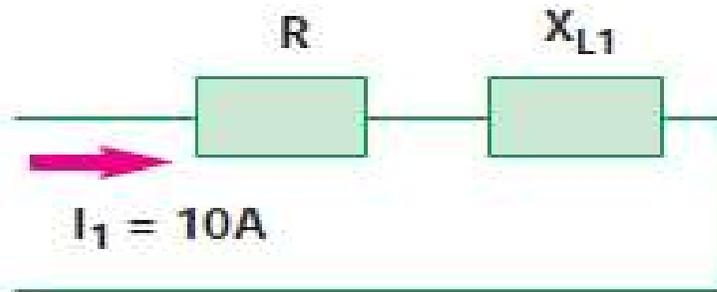
- SEM HARMÔNICAS



$$Z = \sqrt{1^2 + 1^2} = 1,4\Omega$$

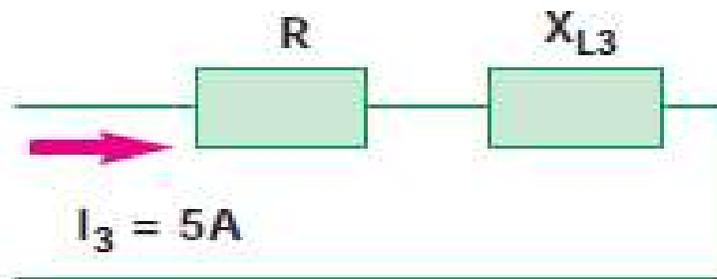
$$U_1 = 1,4 \cdot 11,2 = 16V$$

• COM 3ª HARMÔNICA



$$Z = \sqrt{1^2 + 1^2} = 1,4\Omega$$
$$U_1 = 1,4 \cdot 10 = 14V$$

+



$$Z = \sqrt{1^2 + 3^2} = 3,2\Omega$$
$$U_3 = 3,2 \cdot 5 = 16V$$

$$U_{TOTAL} = \sqrt{14^2 + 16^2} = 21V$$