

# Instrumentação Eletrônica

7ª Termo



## Engenharia Computação

PROF. DR. GIULIANO PIERRE ESTEVAM

Aula 01

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



# Conteúdo

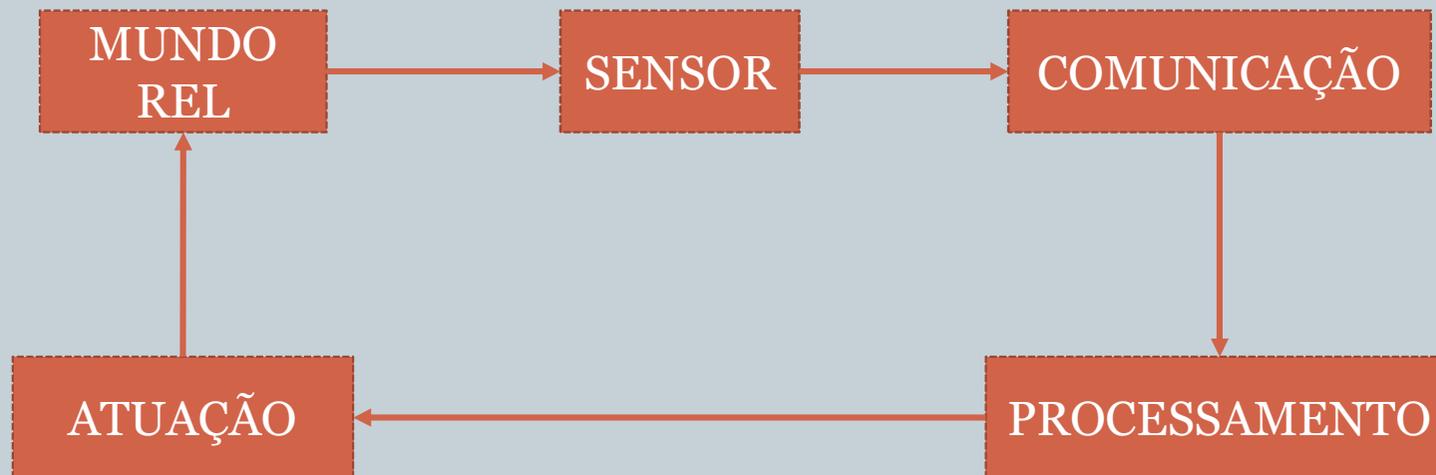


Sistemas de Medição. Incertezas nos Sistemas de Medição. Sensores e Transdutores para Medição de Grandezas Físicas. Conversores D/A e Conversores A/D; Sensores e Atuadores Inteligentes. Redes de comunicação industriais. Perturbações nos sistemas de Medição. Blindagem e Aterramento dos Sistemas de Medição. Técnicas de medição de tensão, corrente, resistência, frequência. Aquisição de Dados. Tópicos de qualidade de energia.

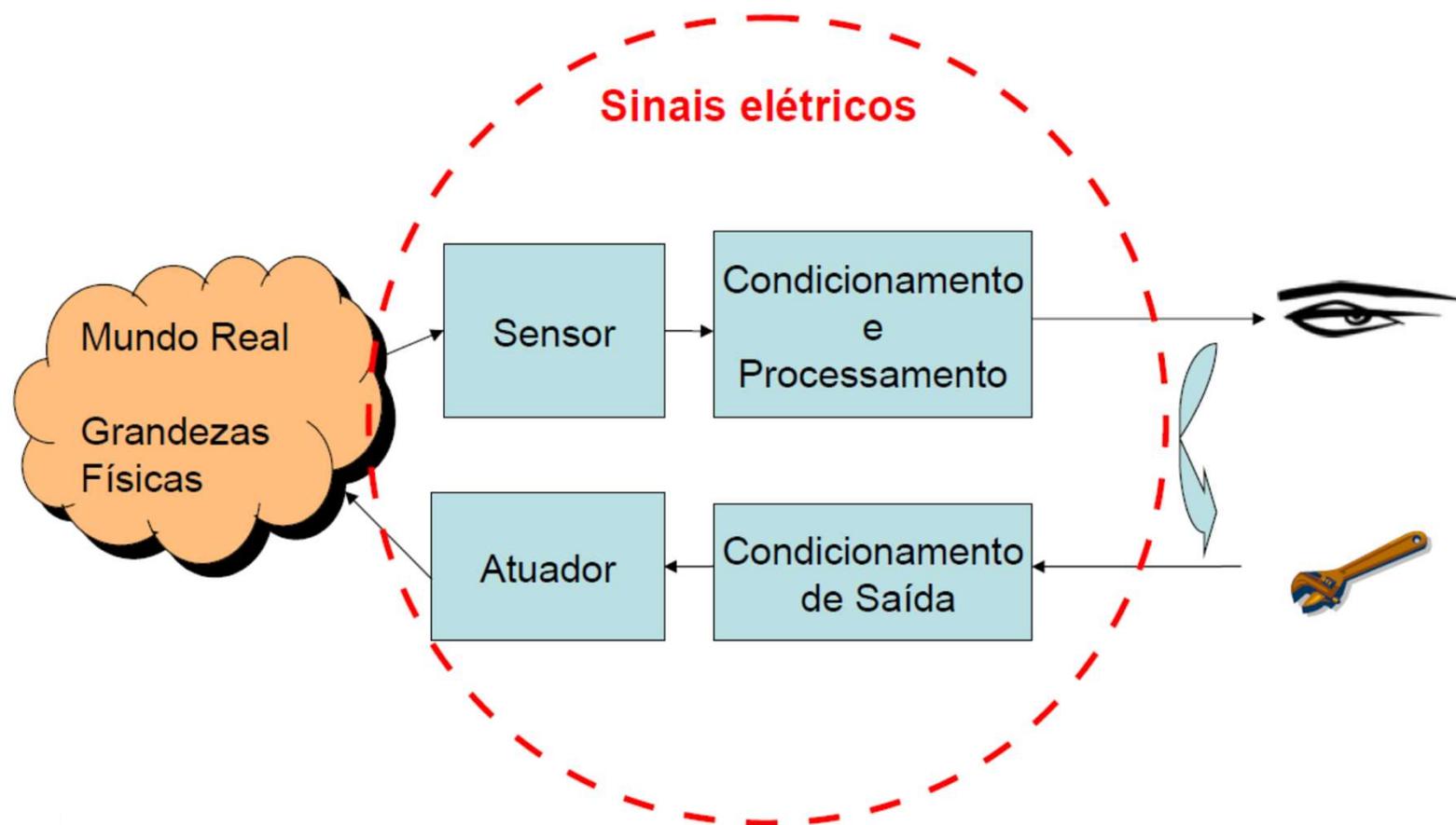
# Avaliação



**A AVALIAÇÃO SERÁ A ELABORAÇÃO DE PROJETO E CONSTRUÇÃO DE SISTEMA DE AUTOMAÇÃO QUE ABRANJE SENSORIAMENTO, COMUNICAÇÃO, SUPERVISÃO E CONTROLE A PARTIR DE PROGRAMA COMPUTACIONAL**



# Instrumentação Eletrônica



# Por que eletrônica?



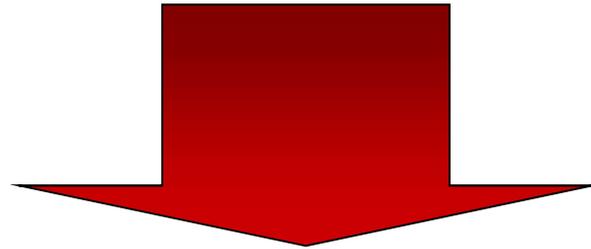
- Facilidade de manipulação do sinal elétrico (amplificação, filtragem, processamento, transmissão)
- Existência de transdutores diversos e de baixo custo
- Baixo tempo de resposta: capacidade de processamento em “tempo real”.
- Controle de processos complexos com múltiplas variáveis

# Vantagem do tratamento de sinal



- Amplificação: a medida é feita extraíndo-se o mínimo de energia do sistema
- Facilidade de processamento: filtragem, conversão A/D e D/A, modulação/demodulação
- Transmissão a longas distâncias (telemetria): cabos elétricos, fibras ópticas, redes sem fio.

# INSTRUMENTAÇÃO



**Ciência que aplica e desenvolve técnicas de medição, indicação, registro e controle de processos de fabricação, visando a otimização na eficiência de processos industriais.**

# **INSTRUMENTAÇÃO**

**A utilização de instrumentos nos permite:**

- a) Incrementar e controlar a qualidade do produto;**
- b) Aumentar a produção e o rendimento;**
- c) Obter e fornecer dados seguros da matéria prima e da quantidade produzida, além de ter em mãos dados relativos a economia dos processos.**

# **Variáveis de Processo**

**Nas indústrias de processos, a instrumentação é responsável pelo rendimento máximo de um processo, fazendo com que toda energia cedida, seja transformada em trabalho na elaboração do produto desejado.**

**As grandezas que traduzem transferências de energia num processo são denominadas**

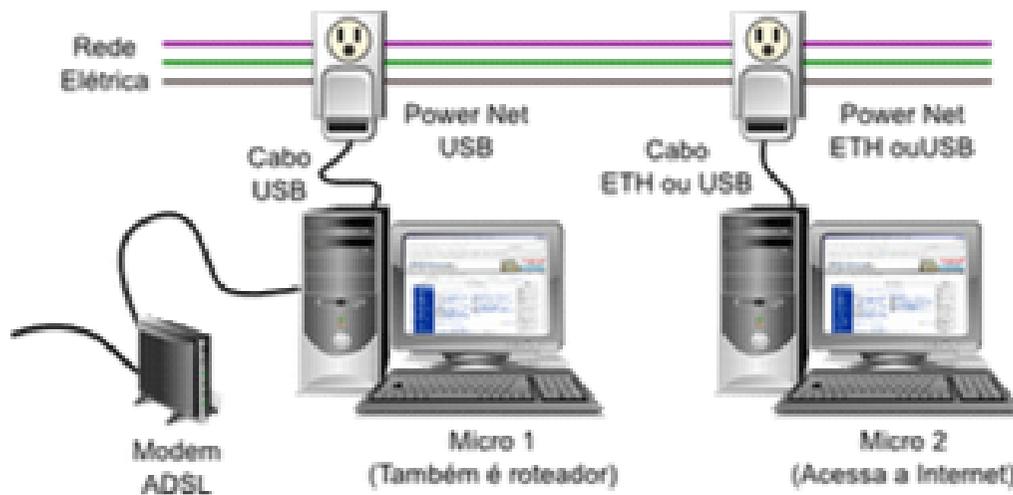
## **VARIÁVEIS DE PROCESSO**

# Realidade Atual

As indústrias estão optando cada vez mais pela automatização dos seus processos/plantas, a partir da implementação de:

## PLCs

PLC (do inglês Power Line Communication, aproximadamente "comunicação via rede elétrica") é a tecnologia que utiliza uma das redes mais utilizadas em todo o mundo: a rede de energia elétrica.



# CLASSIFICAÇÃO DE INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

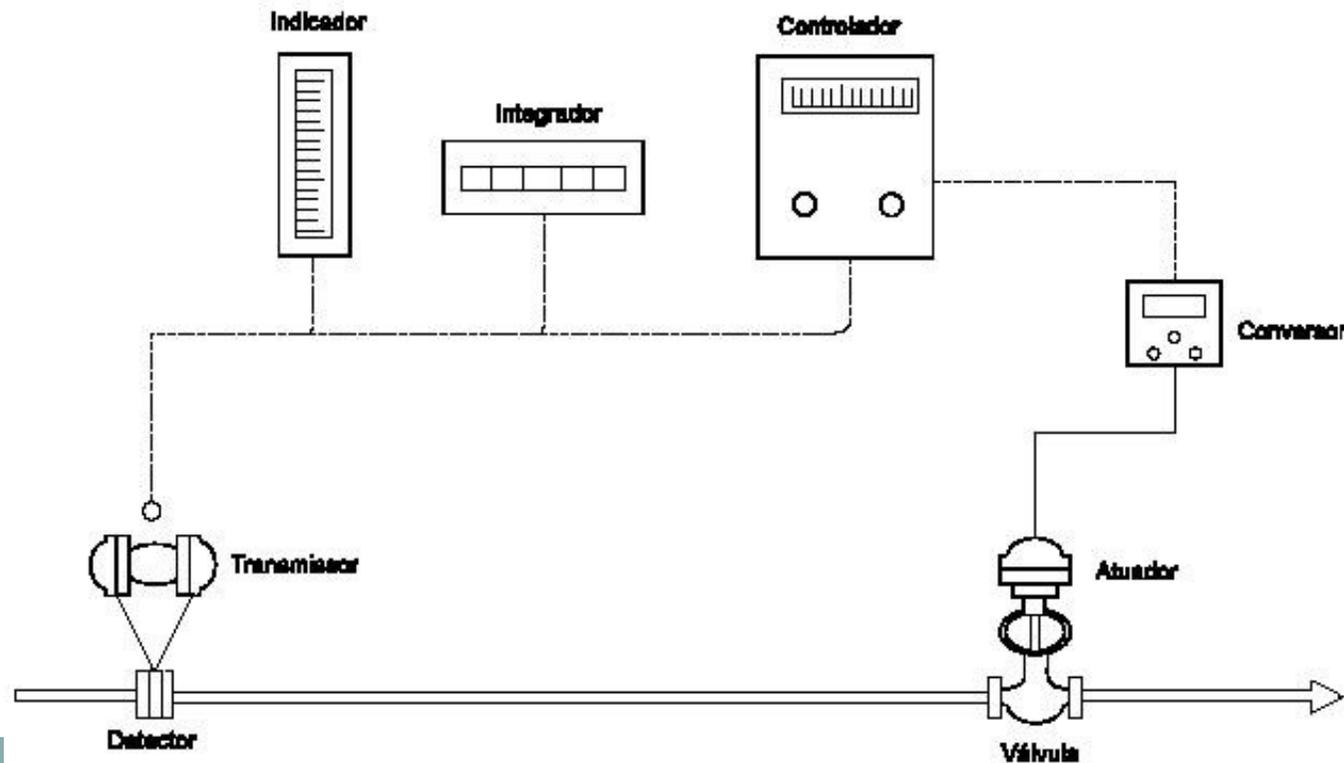


Existem vários métodos de classificação de instrumentos de medição. Dentre os quais podemos ter classificação por:

- **Função**
- **Sinal transmitido ou suprimento**
- **Tipo de sinal**

# Classificação por Função

Os instrumentos podem estar interligados entre si para realizar uma determinada tarefa nos processos industriais. A associação desses instrumentos chama-se malha e em uma malha cada instrumento executa uma função. Os instrumentos que podem compor uma malha são então classificados por função.



# Classificação por Função

INSTRUMENTO	DEFINIÇÃO
Detector	São dispositivos com os quais conseguimos detectar alterações na variável do processo. Pode ser ou não parte do transmissor.
Transmissor	Instrumento que tem a função de converter sinais do detector em outra forma capaz de ser enviada à distância para um instrumento receptor, normalmente localizado no painel.
Indicador	Instrumento que indica o valor da quantidade medida enviado pelo detector, transmissor, etc.
Registrador	Instrumento que registra graficamente valores instantâneos medidos ao longo do tempo, valores estes enviados pelo detector, transmissor, Controlador etc.
Conversor	Instrumento cuja função é a de receber uma informação na forma de um sinal, alterar esta forma e a emitir como um sinal de saída proporcional ao de entrada.
Unidade Aritmética	Instrumento que realiza operações nos sinais de valores de entrada de acordo com uma determinada expressão e fornece uma saída resultante da operação.
Integrador	Instrumento que indica o valor obtido pela integração de quantidades medidas sobre o tempo.
Controlador	Instrumento que compara o valor medido com o desejado e, baseado na diferença entre eles, emite sinal de correção para a variável manipulada a fim de que essa diferença seja igual a zero.
Elemento final de controle	Dispositivo cuja função é modificar o valor de uma variável que leve o processo ao valor desejado.

# **Classificação de Instrumento por Sinal de Transmissão ou Suprimento**

- **Tipo Pneumático**
- **Tipo Hidráulico**
- **Tipo Elétrico**
- **Tipo Digital**
- **Via Rádio**

# Sinal Tipo Pneumático

Nesse tipo de instrumento é utilizado um gás comprimido, cuja pressão é alterada conforme o valor que se deseja representar. Nesse caso a variação da pressão do gás é linearmente manipulada numa faixa específica, padronizada internacionalmente, para representar a variação de uma grandeza desde seu limite inferior até seu limite superior. O padrão de transmissão ou recepção de instrumentos pneumáticos mais utilizado é de 0,2 a 1,0 kgf/cm<sup>2</sup> (aproximadamente 3 a 15psi no Sistema Inglês).

# **Sinal Tipo Pneumático**

**Os transmissores pneumáticos são fabricados a partir de dois métodos de conversão de sinal.**

**São eles:**

- a) Método de equilíbrio de força**
- b) Método de equilíbrio de movimento**

# Sinal Tipo Pneumático

## Vantagem

A grande e única vantagem em se utilizar os instrumentos pneumáticos está no fato de se poder opera-los com segurança em áreas onde existe risco de **explosão** (centrais de gás, por exemplo).

# Sinal Tipo Pneumático

## Desvantagens

- a) **Necessita de tubulação de ar comprimido (ou outro gás) para seu suprimento e funcionamento.**
- b) **Necessita de equipamentos auxiliares tais como compressor, filtro, desumidificador, etc ..., para fornecer aos instrumentos ar seco, e sem partículas sólidas.**
- c) **Devido ao atraso que ocorre na transmissão do sinal, este não pode ser enviado à longa distância, sem uso de reforçadores. Normalmente a transmissão é limitada a aproximadamente 100 m.**
- d) **Vazamentos ao longo da linha de transmissão ou mesmo nos instrumentos são difíceis de serem detectados.**
- e) **Não permite conexão direta aos computadores.**

## **Sinal Tipo Hidráulico**

**Similar ao tipo pneumático e com desvantagens equivalentes, o tipo hidráulico utiliza-se da variação de pressão exercida em óleos hidráulicos para transmissão de sinal. É especialmente utilizado em aplicações onde torque elevado é necessário ou quando o processo envolve pressões elevadas.**

# Sinal Tipo Hidráulico

## Vantagens

- a) Podem gerar grandes forças e assim acionar equipamentos de grande peso e dimensão.
- b) Resposta rápida.

# Sinal Tipo Hidráulico

## Desvantagens

- a) **Necessita de tubulações de óleo para transmissão e suprimento.**
- b) **Necessita de inspeção periódica do nível de óleo bem como sua troca.**
- c) **Necessita de equipamentos auxiliares, tais como reservatório, filtros, bombas, etc...**

# Sinal Tipo Elétrico

**Face a tecnologia disponível no mercado em relação a fabricação de instrumentos eletrônicos microprocessados, hoje, é esse tipo de transmissão amplamente usado em todas as indústrias, onde não ocorre risco de explosão.**

**Assim como na transmissão pneumática, o sinal é linearmente modulado em uma faixa padronizada representando o conjunto de valores entre o limite mínimo e máximo de uma variável de um processo qualquer.**

# Sinal Tipo Elétrico

## Vantagens

- a) **Permite transmissão para longas distâncias sem perdas.**
- b) **A alimentação pode ser feita pelos próprios fios que conduzem o sinal de transmissão.**
- c) **Não necessita de poucos equipamentos auxiliares.**
- d) **Permite fácil conexão aos computadores.**

# Sinal Tipo Elétrico

## Vantagens

- e) Fácil instalação.
- f) **Permite de forma mais fácil realização de operações matemáticas.**
- g) **Permite que o mesmo sinal (4~20mA) seja “lido” por mais de um instrumento, ligando em série os instrumentos. Porém, existe um limite quanto à soma das resistências internas deste instrumentos, que não deve ultrapassar o valor estipulado pelo fabricante do transmissor.**

# Sinal Tipo Elétrico

## Desvantagens

- a) **Necessita de técnico especializado para sua instalação e manutenção.**
- b) **Exige utilização de instrumentos e cuidados especiais em instalações localizadas em áreas de riscos**
- c) **Os cabos de sinal devem ser protegidos contra ruídos elétricos.**
- d) **Exige cuidados especiais na escolha do encaminhamento de cabos ou fios de sinais.**

# Transmissores Eletrônicos Analógicos



**Apresentam princípio de funcionamento baseado na conversão do sinal de pressão detectado em sinal elétrico padronizado de 4 a 20 mA<sub>dc</sub>.**

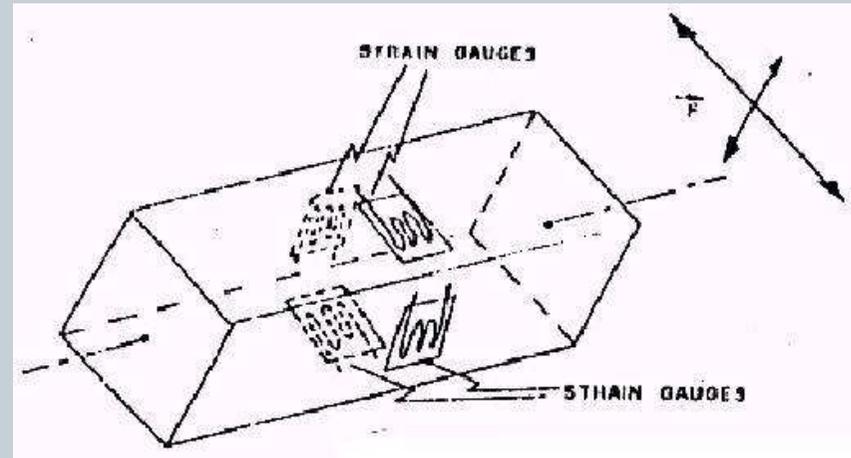
**Existem vários princípios físicos relacionados com a variações de pressão que podem ser utilizados como elemento de transferência.**

# Transmissores Eletrônicos Analógicos

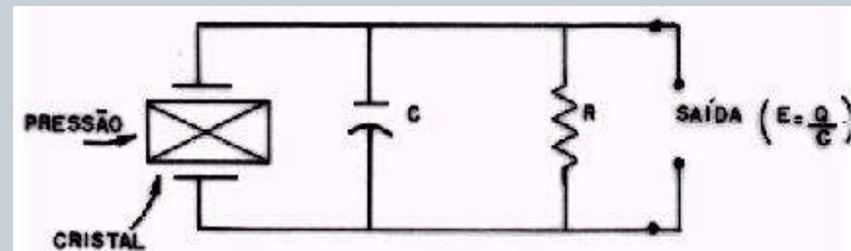


Os mais utilizados nos transmissores mais recentes são:

**Fita Extensiométrica  
(Strain Gauge)**



**Sensor Piezoelétrico**

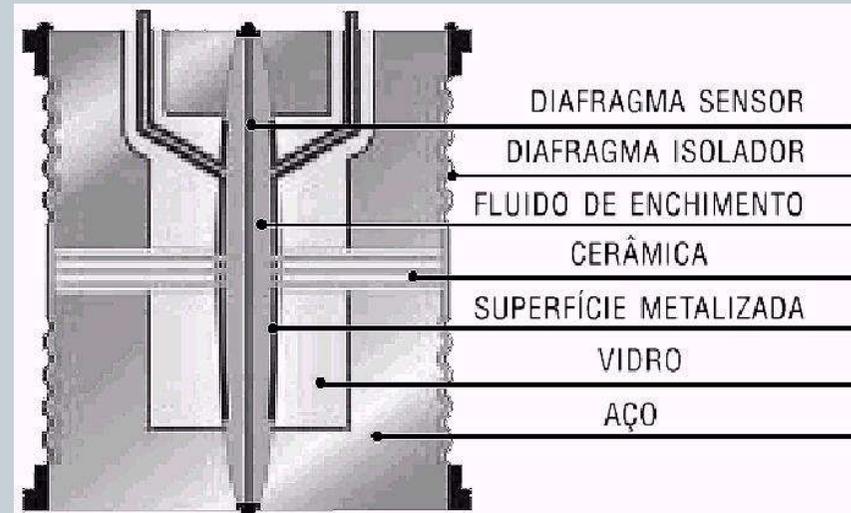


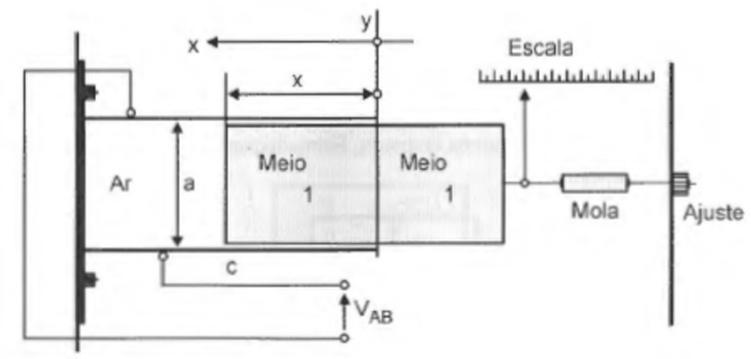
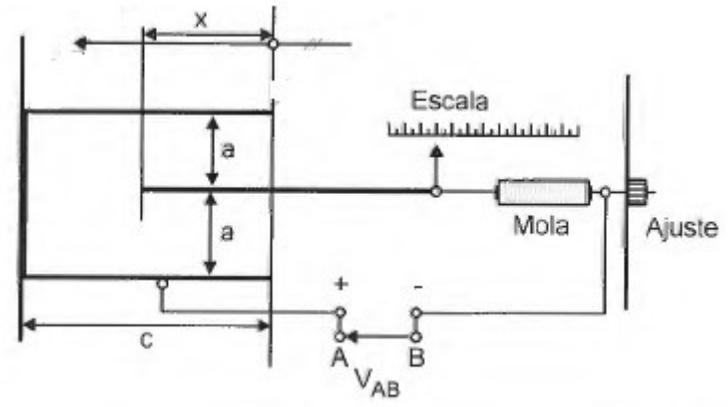
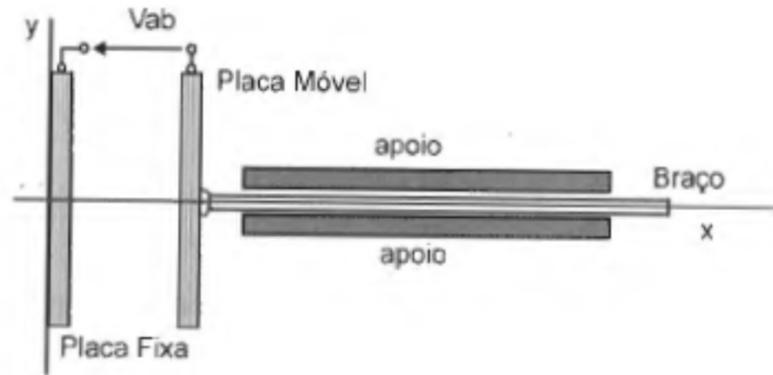
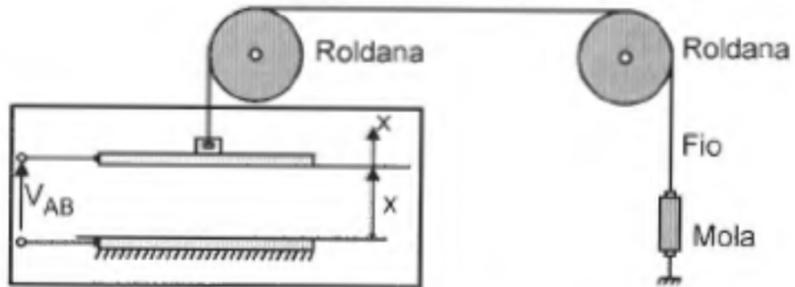
# Transmissores Eletrônicos Analógicos



## Sensor Capacitivo (Célula Capacitiva)

Neste sensor, um diafragma de medição se move entre dois diafragmas fixos. Entre os diafragmas fixos e o móvel, existe um líquido de enchimento que funciona como um dielétrico. Como um capacitor de placas paralelas é constituído por duas placas paralelas separadas por um meio dielétrico, ao sofrer o esforço de pressão, o diafragma móvel (que vem a ser uma das placas do capacitor) tem sua distância em relação ao diafragma modificada. Isso provoca modificação na capacitância de um circuito de medição, e então tem-se a medição de pressão.





## Sinal Tipo Digital

Nesse tipo de sinal, “pacotes de informações” sobre a variável medida são enviados para uma estação receptora, através de sinais digitais modulados e padronizados. Para que a comunicação entre o elemento transmissor receptor seja realizada com êxito é utilizada uma “linguagem” padrão chamado **protocolo de comunicação**.

# **Sinal Tipo Digital**

## **Vantagens**

- a) Não necessita ligação ponto a ponto por instrumento.**
- b) Pode utilizar fibra óptica para transmissão dos dados.**
- c) É imune a ruídos externos.**
- d) Permite configuração, diagnósticos de falha e ajuste em qualquer ponto da malha.**
- e) Menor custo final.**

# **Sinal Tipo Digital**

## **Desvantagens**

- a) Existência de vários protocolos no mercado, o que dificulta a comunicação entre equipamentos de marcas diferentes.**
  
- b) Caso ocorra rompimento no cabo de comunicação pode-se perder a informação e/ou controle de várias malha.**

## **Sinal Tipo Rádio**

**Neste tipo de sinal, o sinal ou um pacote de sinais medidos são enviados à sua estação receptora via ondas de rádio em uma faixa de frequência específica.**

# **Sinal Tipo Rádio**

## **Vantagens**

**a) Não necessita de cabos de sinal.**

**b) Pode-se enviar sinais de medição e controle de máquinas em movimento.**

# **Sinal Tipo Rádio**

## **Desvantagens**

**a) Alto custo inicial.**

**b) Necessidade de técnicos altamente especializados.**

## **Sinal Tipo Modem**

**A transmissão dos sinais é feita através de utilização de linhas telefônicas pela modulação do sinal em frequência, fase ou amplitude.**

# **Sinal Tipo Modem**

## **Vantagens**

- a) Baixo custo de instalação.**
- b) Pode-se transmitir dados a longas distâncias.**

# Sinal Tipo Modem

## Desvantagens

- a) **Necessita de profissionais especializados.**
- b) **Baixa velocidade na transmissão de dados.**
- c) **Sujeito a interferências externas, inclusive violação de informações.**

# Instrumentação Eletrônica

7ª Termo



## Engenharia Computação

PROF. DR. GIULIANO PIERRE ESTEVAM

Aula 02

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



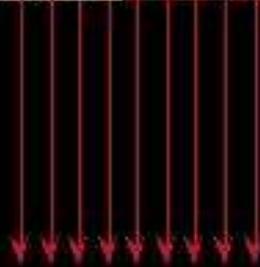
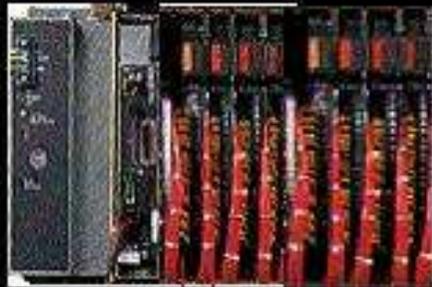
# REDES DE COMUNICAÇÃO



## EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

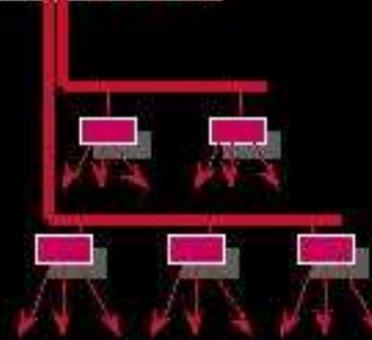
- Interligação de Computadores
- Integração de computadores aos CLP's
- Integração dos CLP's a dispositivos **inteligentes**
  - **Controladores de solda**
  - **Robôs**
  - **Terminais de válvulas**
  - **Balanças**
  - **Sistemas de Identificação**
  - **Sensores**
  - **Centros de Comando de Motores**

# FILOSOFIAS DE DISTRIBUIÇÃO E/S



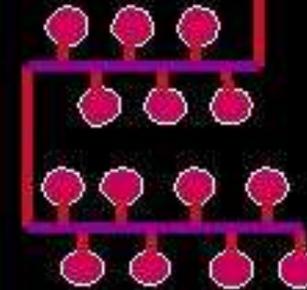
## Tradicional

Cada dispositivo é ligado individualmente ao CLP  
Alto custo de instalação



## Atual

Distribuição de E/S ao longo da fabrica.  
Menor custo de instalação



## Tendência

Sensores inteligentes  
Ganho funcional  
Baixo custo de instalação

# REDES DE COMUNICAÇÃO



## O QUE É NECESSÁRIO OTIMIZAR?

- **Instalação mais rápida e mais simples**
- **Diagnósticos mais completos**
- **Facilidade de Manutenção**
- **Reconfiguração mais rápida**
- **Maior Flexibilidade**
- **Menor Fiação**
- **Redução de CUSTOS**

# REDE FIELDBUS

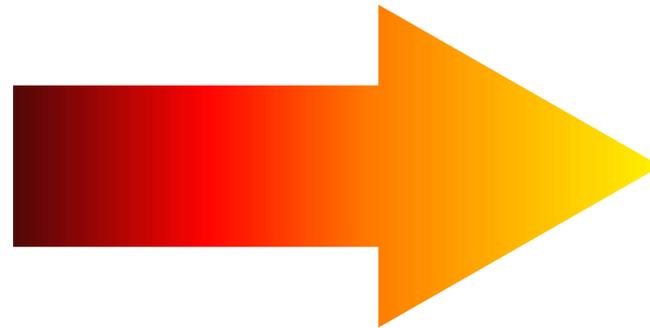
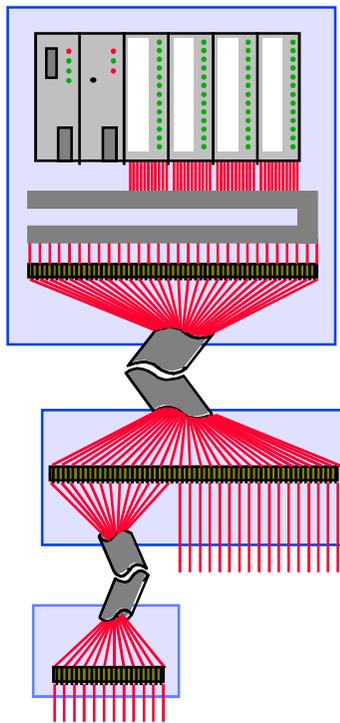


**FIELDBUS** É UM SISTEMA DE COMUNICAÇÃO DIGITAL BIDIRECIONAL QUE INTERLIGA EQUIPAMENTOS INTELIGENTES DE CAMPO COM SISTEMA DE CONTROLE OU EQUIPAMENTOS LOCALIZADOS NA SALA DE CONTROLE.

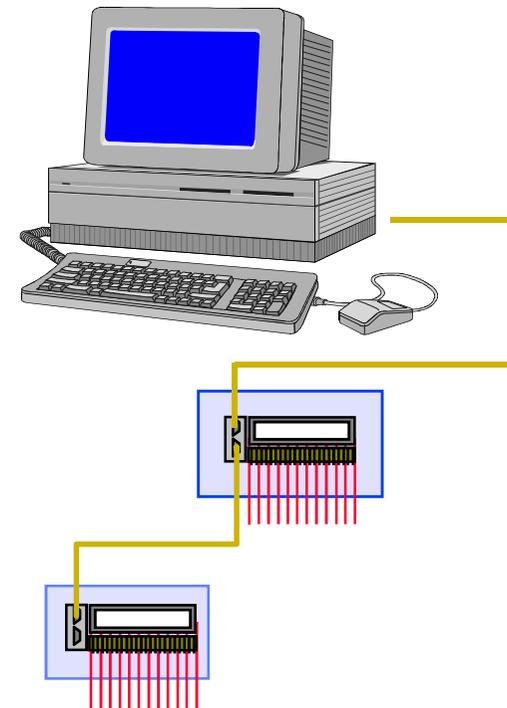
# UMA GRANDE EVOLUÇÃO NAS REDES DE COMUNICAÇÃO INDUSTRIAL



## Convencional



## Field Bus



## INTRODUÇÃO



O “**FIELD BUS**” não representa uma paixão típica por novas tecnologias e sim a redução de aproximadamente 40 % nos custos de projeto, instalação, operação e manutenção de um processo industrial.

# INTRODUÇÃO



O termo " **FIELD BUS** " se refere a um protocolo de comunicações digital, bidirecional usado para comunicações entre instrumentos de campo e sistemas de controle em processo, manufatura. É intencional, com a substituição do 4-20 mA analógico, uma oferta de benefícios, inclusive a habilidade para:

- Migrar o controle ao chão de planta;
- Acesso para uma riqueza sem precedente de dados do campo;
- custos reduzido de telemetria
- aumentou capacidades de manutenção avançada,
- Grande redução de custos de instalação.

# FIELDBUS : VANTAGENS



- **Redução no custo de fiação, instalação, operação e manutenção de plantas industriais;**
- **Informação imediata sobre diagnóstico de falhas nos equipamentos de campo. Os problemas podem ser detectados antes deles se tornarem sérios, reduzindo assim o tempo de inatividade da planta;**
- **Distribuição das funções de controle nos equipamentos de campo - instrumentos de medição e elementos de controle final. Serão dispensados os equipamentos dedicados para tarefas de controle.**

# FIELD BUS: VANTAGENS



- Aumento da robustez do sistema, visto que dados digitais são mais confiáveis que analógicos;
- Melhoria na precisão do sistema de controle, visto que conversões **D/A** e **A/D** não são mais necessárias. Conseqüentemente a eficiência da planta será aperfeiçoada.

# FIELD BUS: VANTAGENS



- Redução de custo de engenharia;
- Redução de cabos, bandejas, borneiras, etc;
- Melhoria na qualidade das informações;
- Os transmissores transmitem muito mais informações;
- Os equipamentos indicam falha em tempo real;
- Facilidade na manutenção.

# AS VERTENTES MUNDIAIS



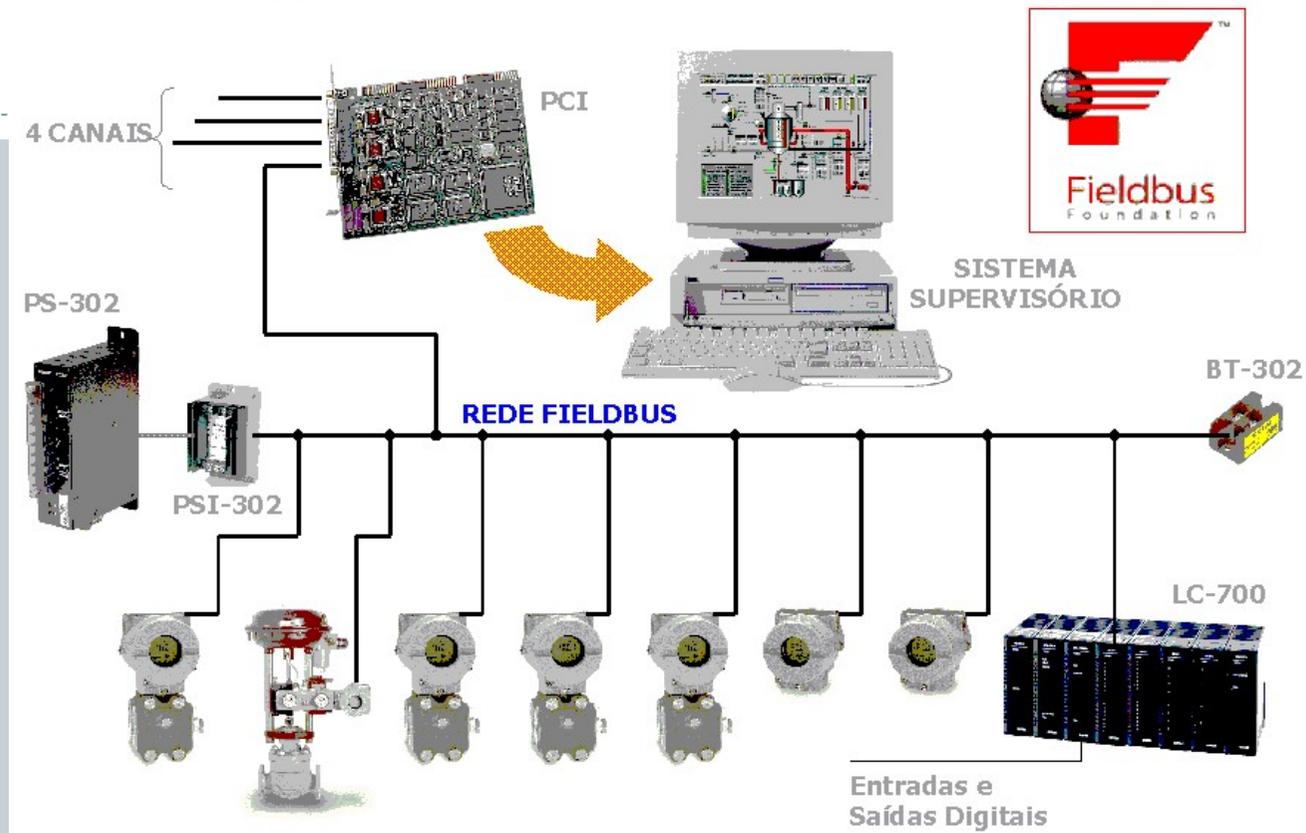
- Por se tratar de uma comunicação puramente digital é necessário que se estabeleçam regras para que seja possível a interoperabilidade entre instrumentos de fabricantes diferentes. Inicialmente cada fabricante procurou desenvolver sua própria tecnologia, ficando o usuário final subordinado aquela rede proprietária.
- A partir da união de grandes empresas surgem duas vertentes mundiais, a **FIELD BUS FOUNDATION** formada basicamente por empresas americanas e a **FIELD BUS PROFIBUS** formada por empresas europeias.

# AS VERTENTES MUNDIAIS



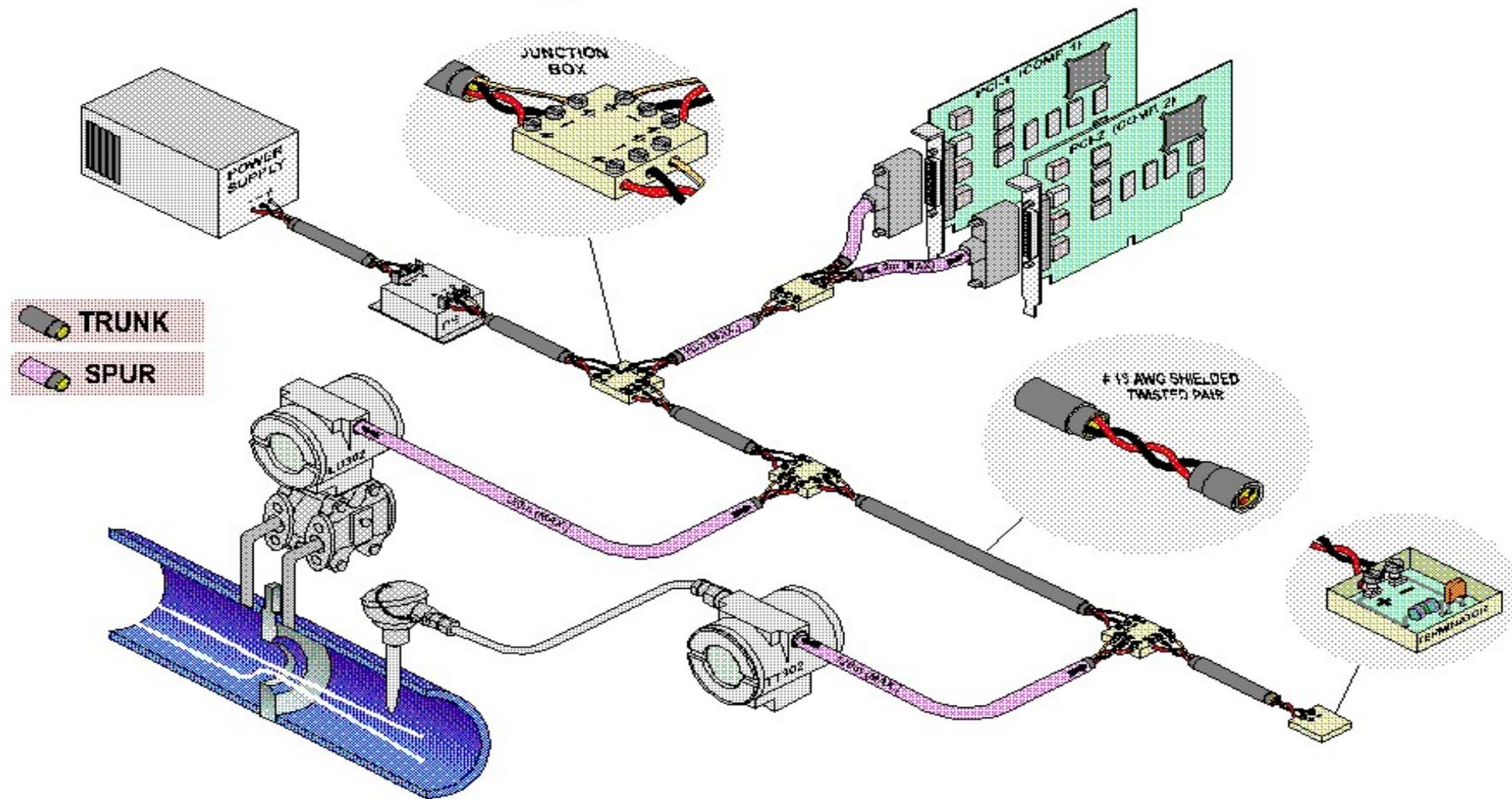
A **FIELD BUS PROFIBUS** sai na frente e estabelece seus padrões, tendo hoje mais de 1400 instrumentos de diversos fabricantes aprovados nos testes de conformidade e com o certificado da fundação. Já a **FIELD BUS FOUNDATION** completou o seu processo de padronização no final do ano de 1997.

# Arquitetura da Rede FIELDBUS



*Exemplo de uma arquitetura de rede Fielbus, onde pode-se observar a estação de supervisão, uma placa de interface com múltiplos canais, o barramento linear, terminador do barramento ( BT-302 ), fonte de alimentação ( PS-302), impedância ( PSI-302 ) e diversos instrumentos, inclusive um CLP com placa de interface para o barramento.*

# INSTALAÇÃO TÍPICA FIELDBUS



# A FAMÍLIA PROFIBUS



**PROFIBUS É UM PADRÃO DE  
FIELDBUS ABERTO PARA LARGAS  
APLICAÇÕES, ENTRE ELAS:**

*Processos contínuos,  
Manufatura elétrica.*

# A FAMÍLIA PROFIBUS



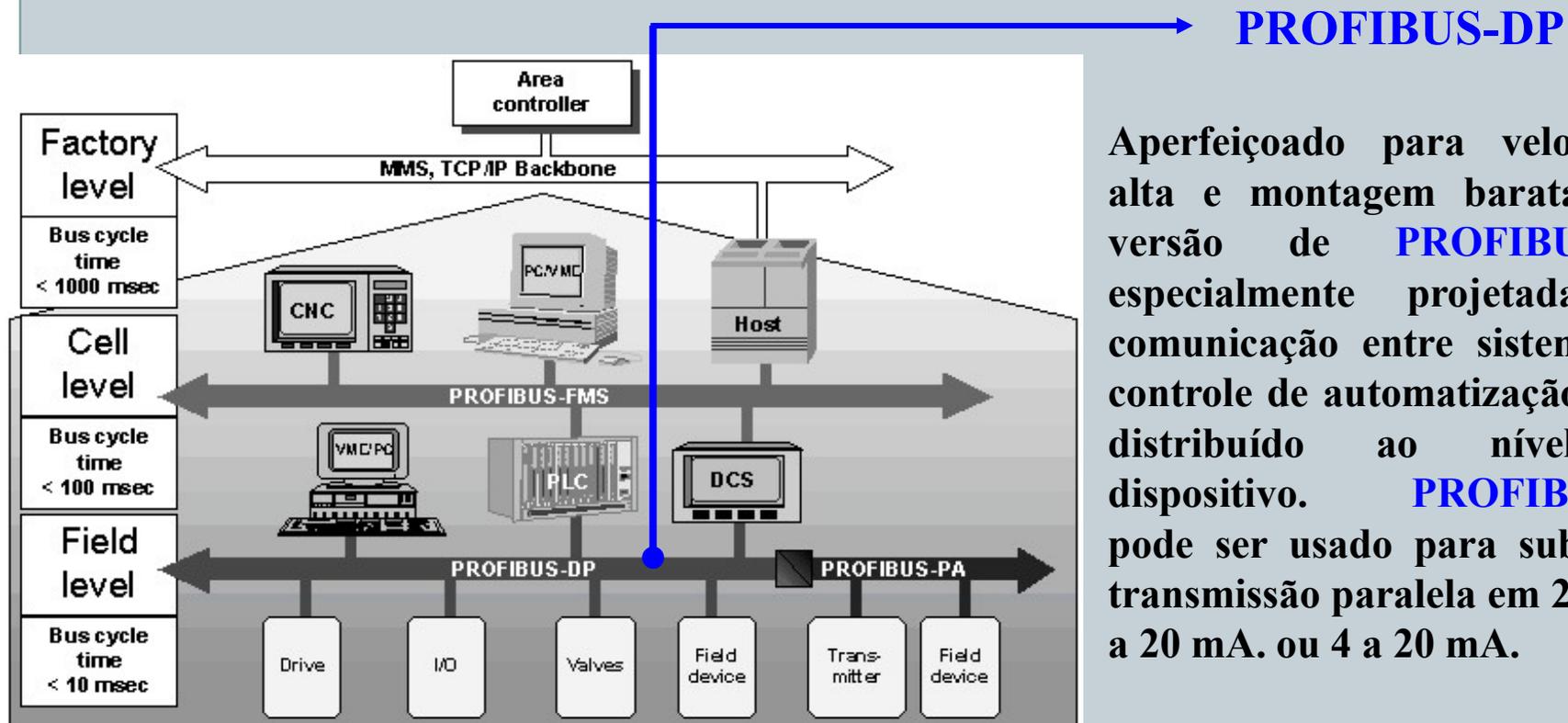
Independência dos vendedores e abertura estão garantidas pelo padrão PROFIBUS EN 50 170.

Com o **PROFIBUS**, dispositivos de diferentes fabricantes podem comunicar entre si sem a necessidade de interface especiais.

**PROFIBUS** pode ser usado onde necessitamos de alta velocidade de transmissão de dados e tarefas de comunicação complexas e extensas.

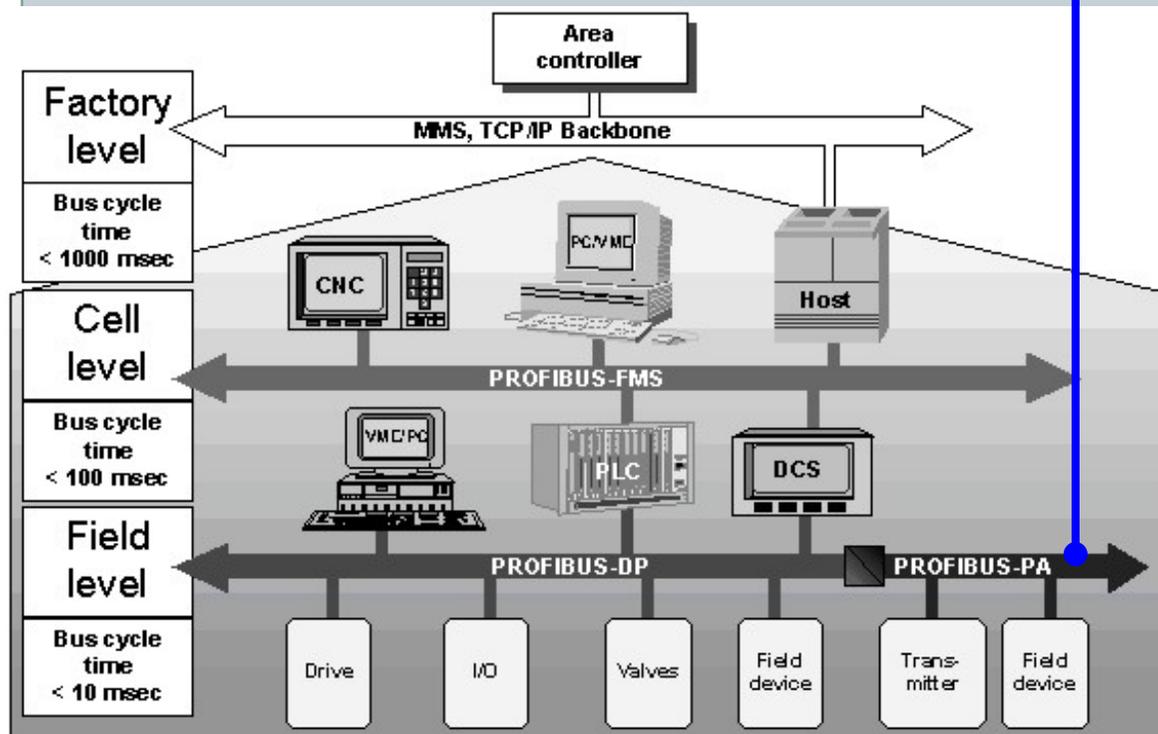
# A FAMÍLIA PROFIBUS

A família de PROFIBUS consiste em três versões compatíveis.



Aperfeiçoado para velocidade alta e montagem barata, esta versão de **PROFIBUS** é especialmente projetada para comunicação entre sistemas de controle de automação e I/O distribuído ao nível de dispositivo. **PROFIBUS-DP** pode ser usado para substituir transmissão paralela em 24 V - 0 a 20 mA. ou 4 a 20 mA.

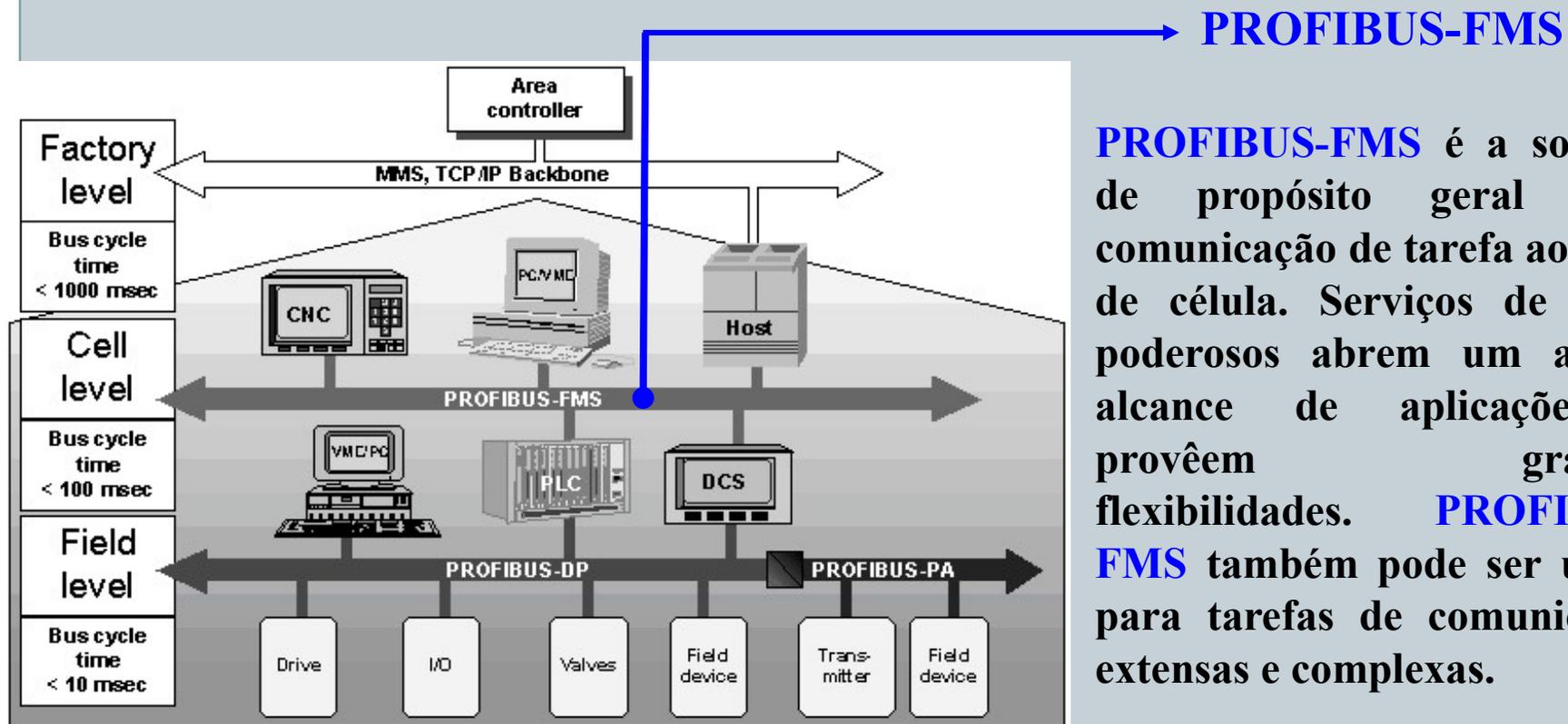
# A FAMÍLIA PROFIBUS



## PROFIBUS-PA

**PROFIBUS-PA** é especialmente projetado para automatização de processo. Permite conectar sensor e atuadores até mesmo em um barramento comum em áreas intrinsecamente seguras. **PROFIBUS-PA** permite comunicação de dados e pode ser usado com tecnologia 2 fios de acordo com o padrão internacional IEC 1158-2.

# A FAMÍLIA PROFIBUS



**PROFIBUS-FMS** é a solução de propósito geral para comunicação de tarefa ao nível de célula. Serviços de FMS poderosos abrem um amplo alcance de aplicações e provêm grandes flexibilidades. **PROFIBUS-FMS** também pode ser usado para tarefas de comunicação extensas e complexas.

# PROTOCOLO DE ACESSO AO MEIO



**PROFIBUS** especifica as características técnicas e funcionais de um sistema de **FIELD BUS SERIAL**, descentralizando os controladores digitais, agora trabalhando a nível de célula. Há uma distinção entre **DISPOSITIVOS MESTRE** e **DISPOSITIVOS ESCRAVOS**.

## **PROTOCOLO DE ACESSO AO MEIO** **DISPOSITIVOS MESTRES**



**DISPOSITIVOS MESTRES** determinam a comunicação de dados no barramento. Um mestre pode enviar mensagens sem um pedido externo quando segura os direitos de acesso do barramento (**O TOKEN**). Os mestres Também são chamados **ESTAÇÕES ATIVAS**.

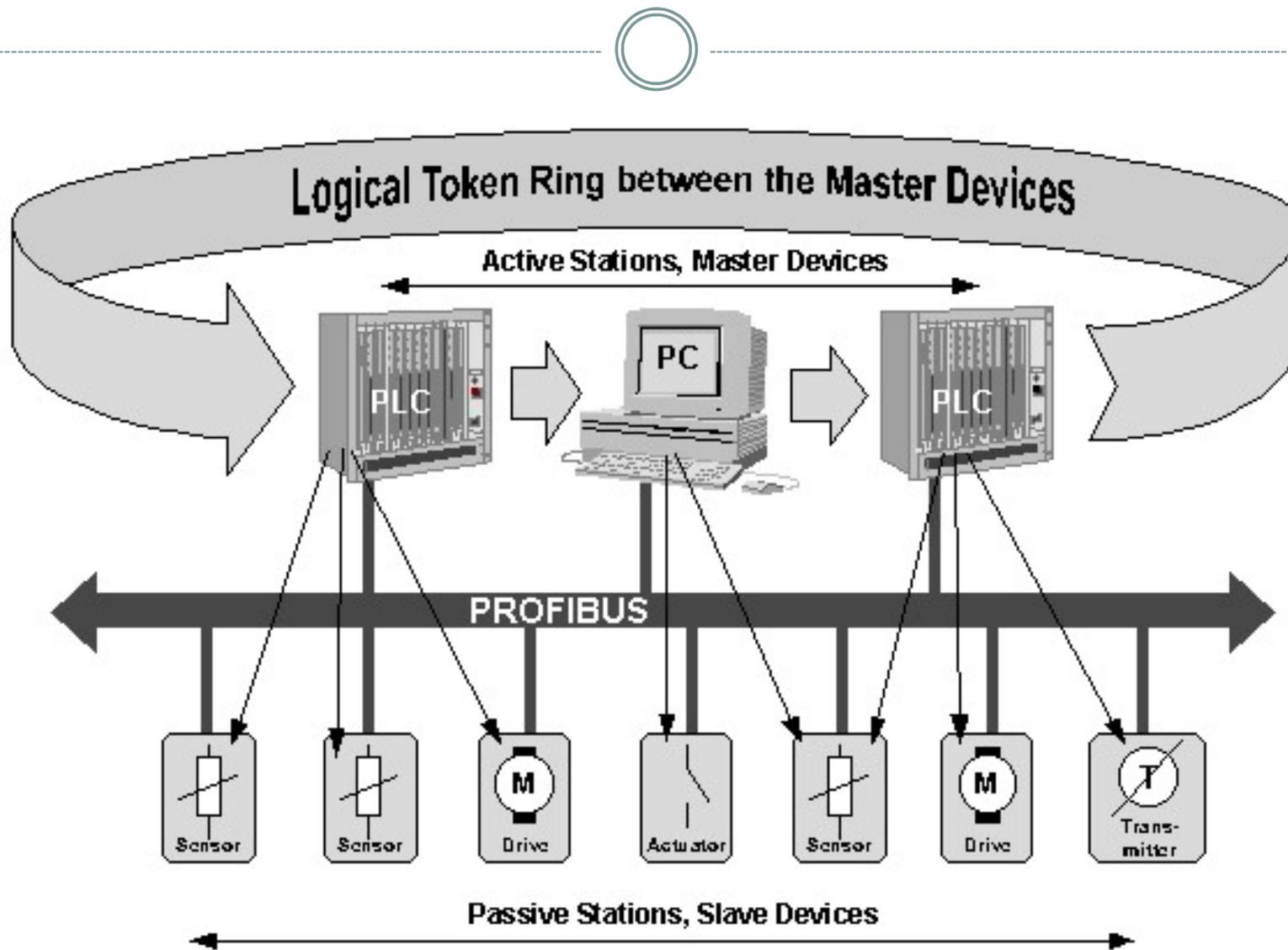
## **PROTOCOLO DE ACESSO AO MEIO** **DISPOSITIVOS ESCRAVOS**



Dispositivos escravos são dispositivos periféricos. Dispositivos escravos típicos incluem dispositivos de I/O, válvulas, drivers e transmissores. Eles não têm direitos de acesso ao barramento e só podem reconhecer mensagens ou podem enviar mensagens ao mestre quando requisitados. Os **ESCRAVOS** também são chamados **ESTAÇÕES PASSIVAS**. Eles só requerem uma porção pequena do protocolo do barramento, a implementação deles é particularmente econômica

# PROBIBUS

## PROTOCOLO DE ACESSO AO MEIO



# PROFIBUS

## PROTOCOLO DE ACESSO AO MEIO

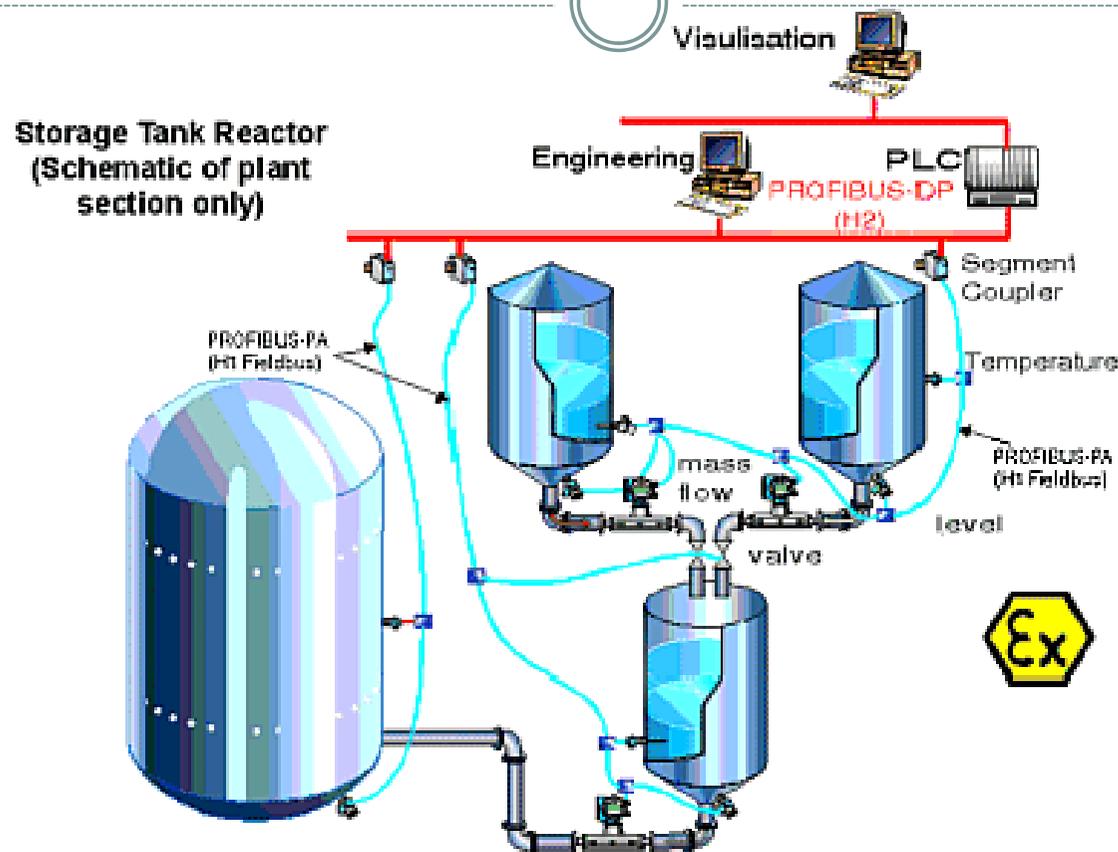


Observamos que a interação com o CLP é totalmente possível, desde que tenhamos um cartão (protocolo) que promova a interface. Muitos fabricantes já possuem cartões de interface com certificado de conformidade, entre eles GEFANUC, ALLEN BRADLEY, entre outros.

Ao lado temos a figura do cartão de interface para PROFIBUS-DP do fabricante Allen Bradley.

# PROBIBUS

## PROTOCOLO DE ACESSO AO MEIO



*A forma de configuração e programação do CLP não se altera, porém existem uma outra interface onde se faz a configuração e a programação dos demais dispositivos da rede.*



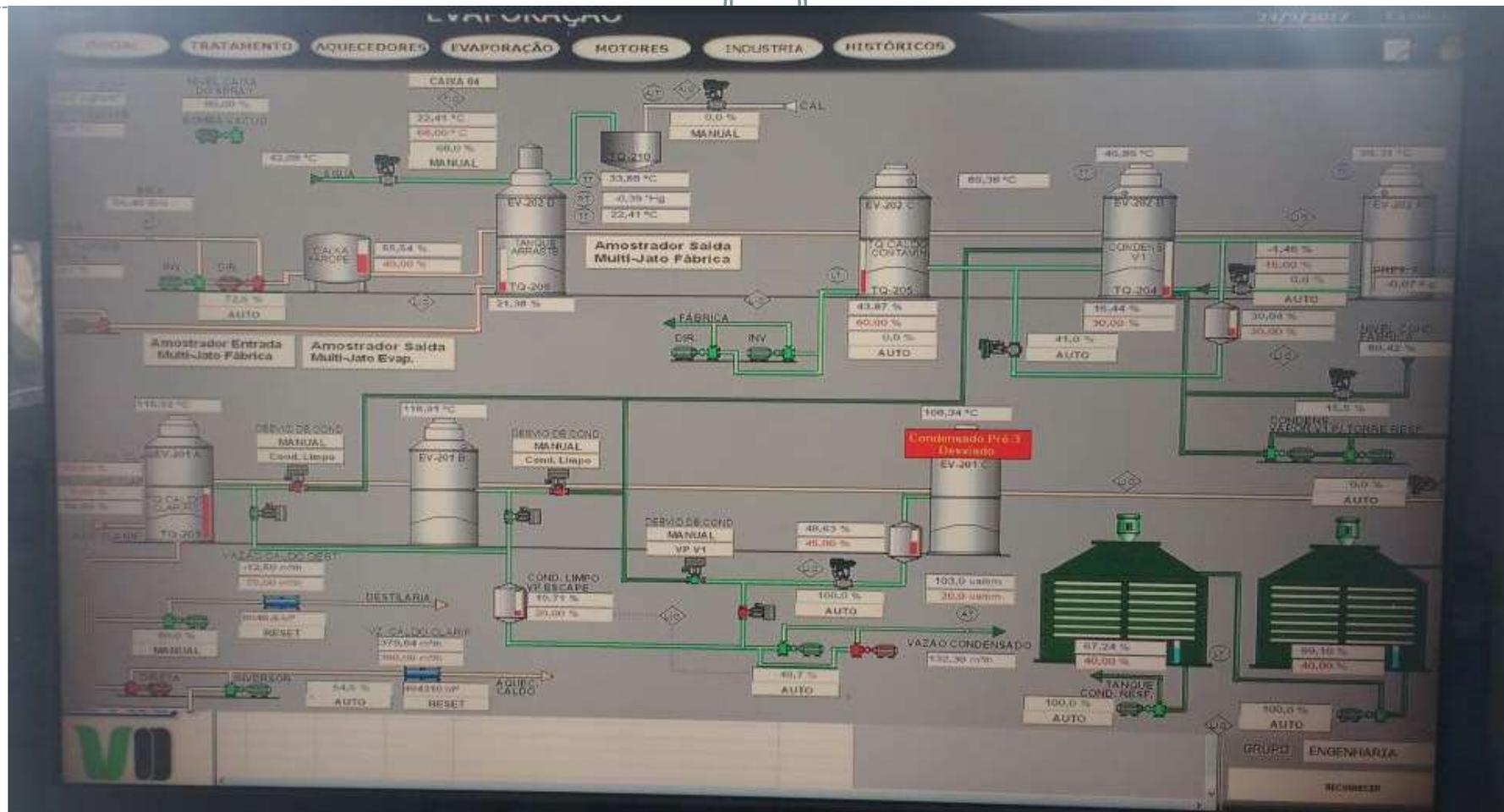












# Instrumentação Eletrônica

7ª Termo



## Engenharia Computação

PROF. DR. GIULIANO PIERRE ESTEVAM

Aula 03

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



## 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**

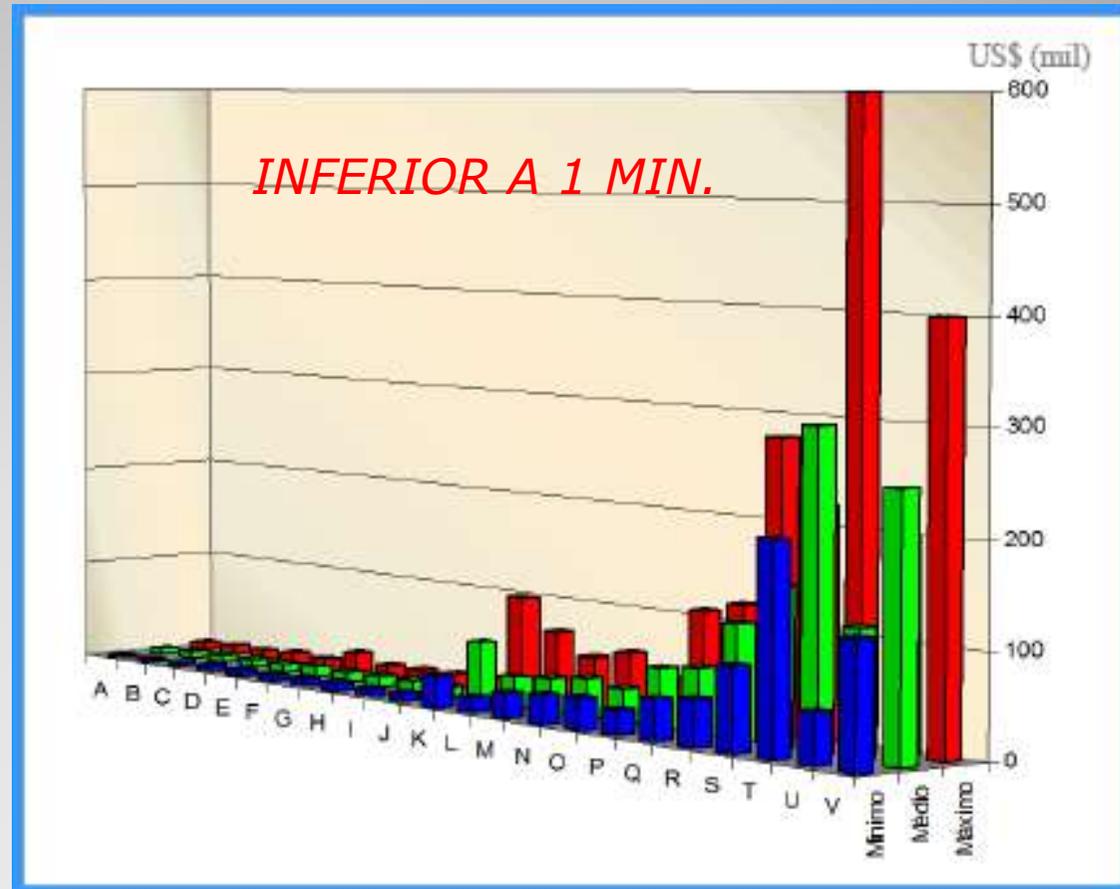
Nos EUA as perdas relacionadas a QEE chegaram entre US\$15 e 24 bilhões anuais, conforme relatório divulgado em 2001.

**Q E E**

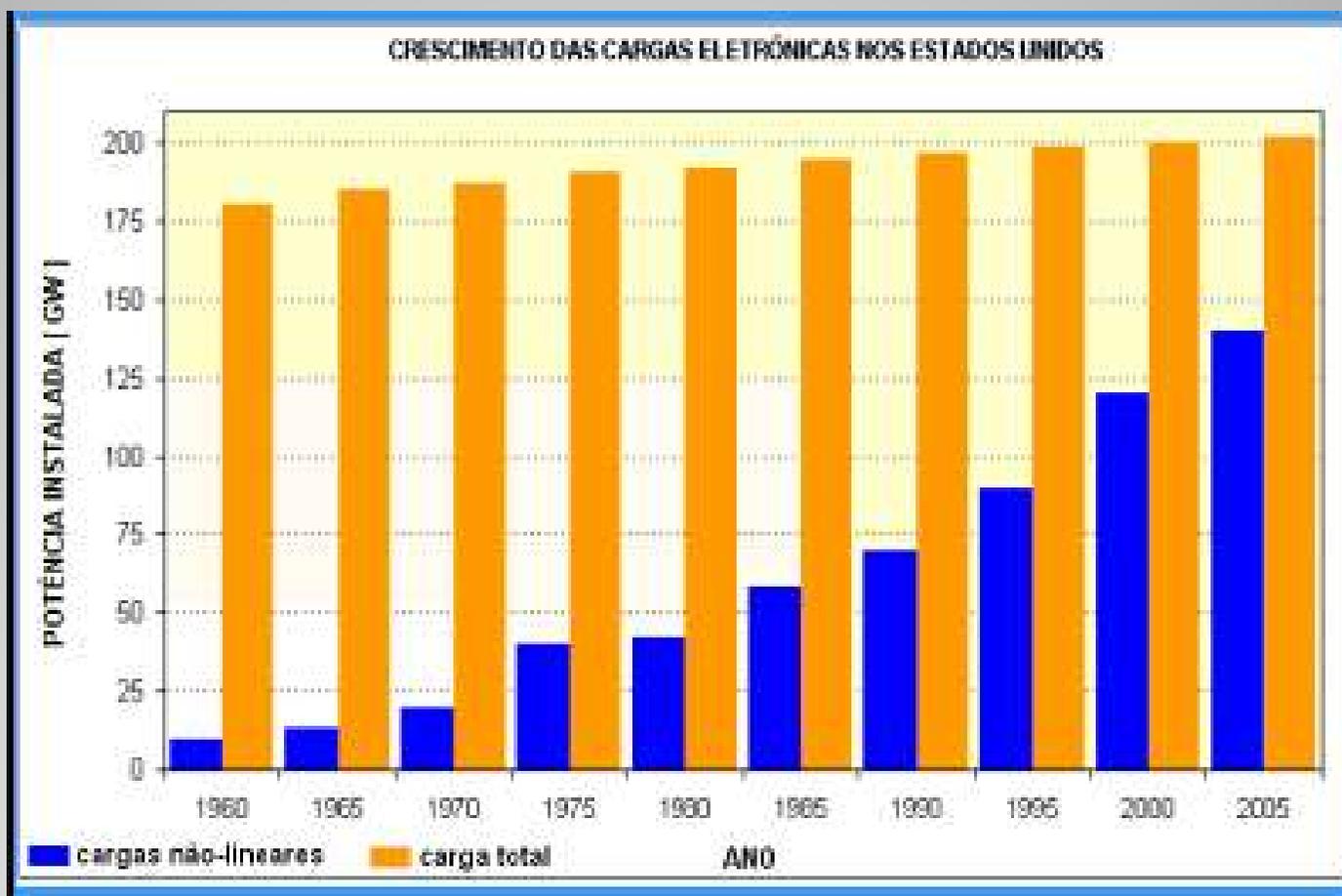
- **Imagem Empresarial**
- **Prejuízos Financeiros**
- **Competitividade**
- **Desenvolvimento Regional.**

## CUSTO ESTIMADO PARA INTERRUPÇÃO

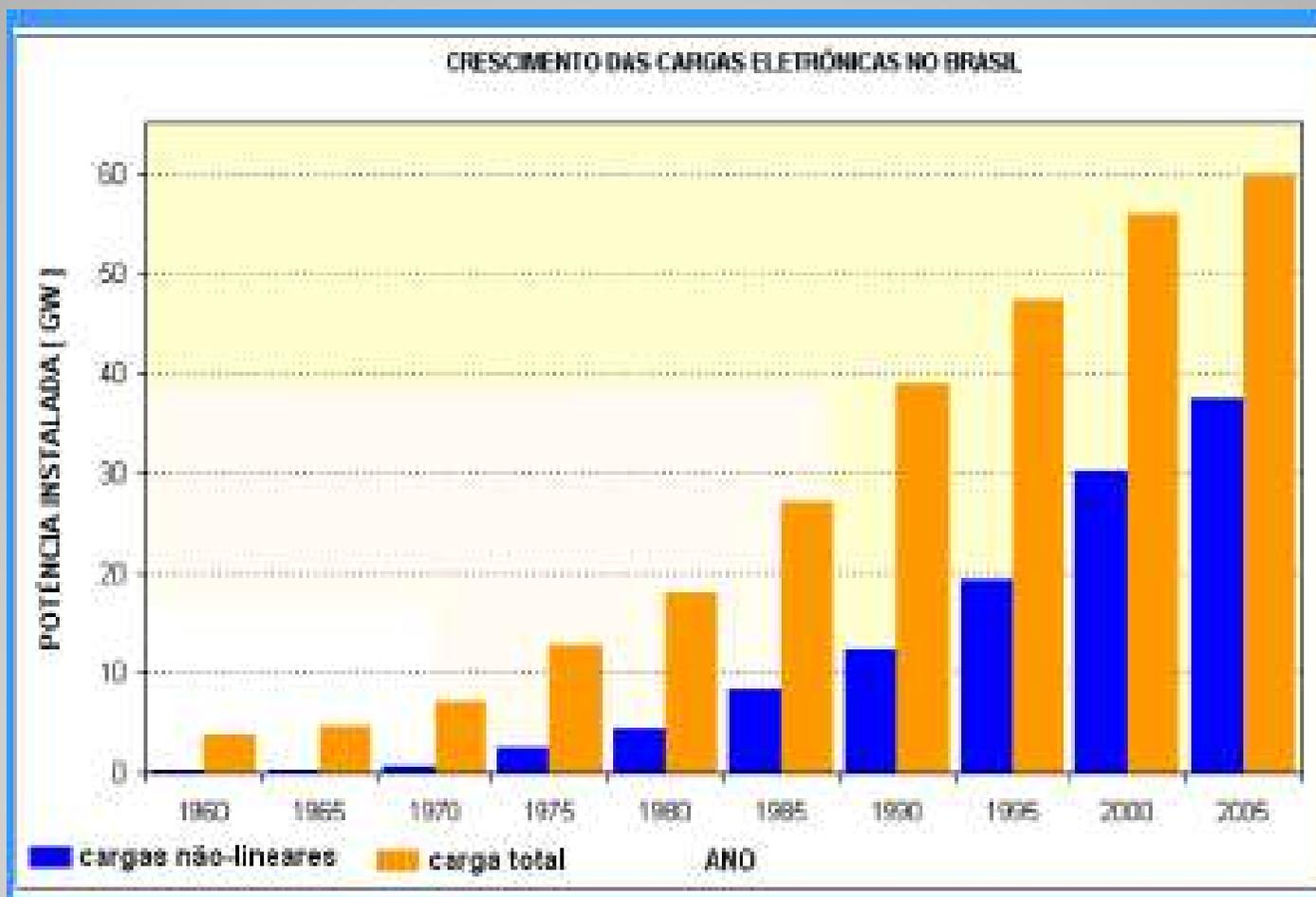
- A - SAÚDE
- B - GÁS
- C - PAPEL
- D - ÓRGÃOS PÚBLICOS
- E - TRANSPORTADORAS
- F - COMÉRCIO ATACADISTA
- G - MADEIREIRAS
- H - QUÍMICAS
- I - PLÁSTICOS/BORRACHAS
- J - EXTRAÇÃO DE PETRÓLEO
- K - PRODUTOS ALIMENTÍCIOS
- L - COMPUTADORES
- M - ENGENHARIA
- N - EQUIP. DE TRANSPORTE
- O - ÓRGÃOS DE FINANCIAMENTO
- 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

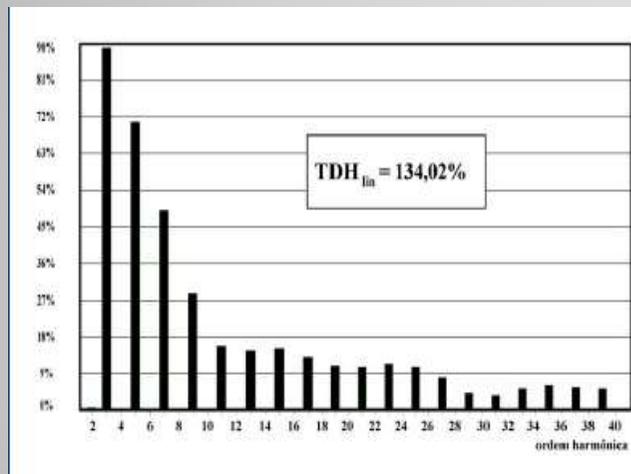
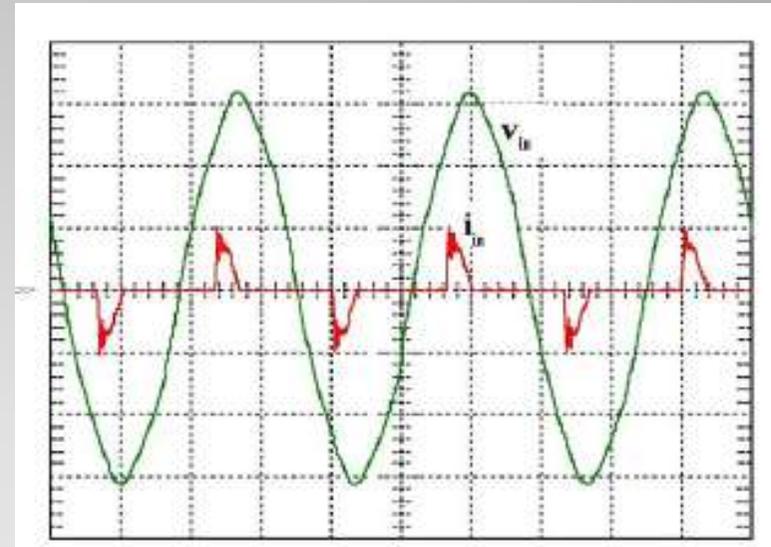
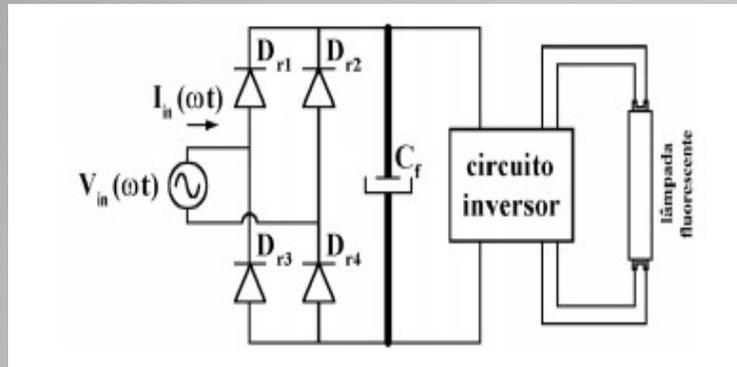
LUZ VISÍVEL



21% ENERGIA ELÉCTRICA

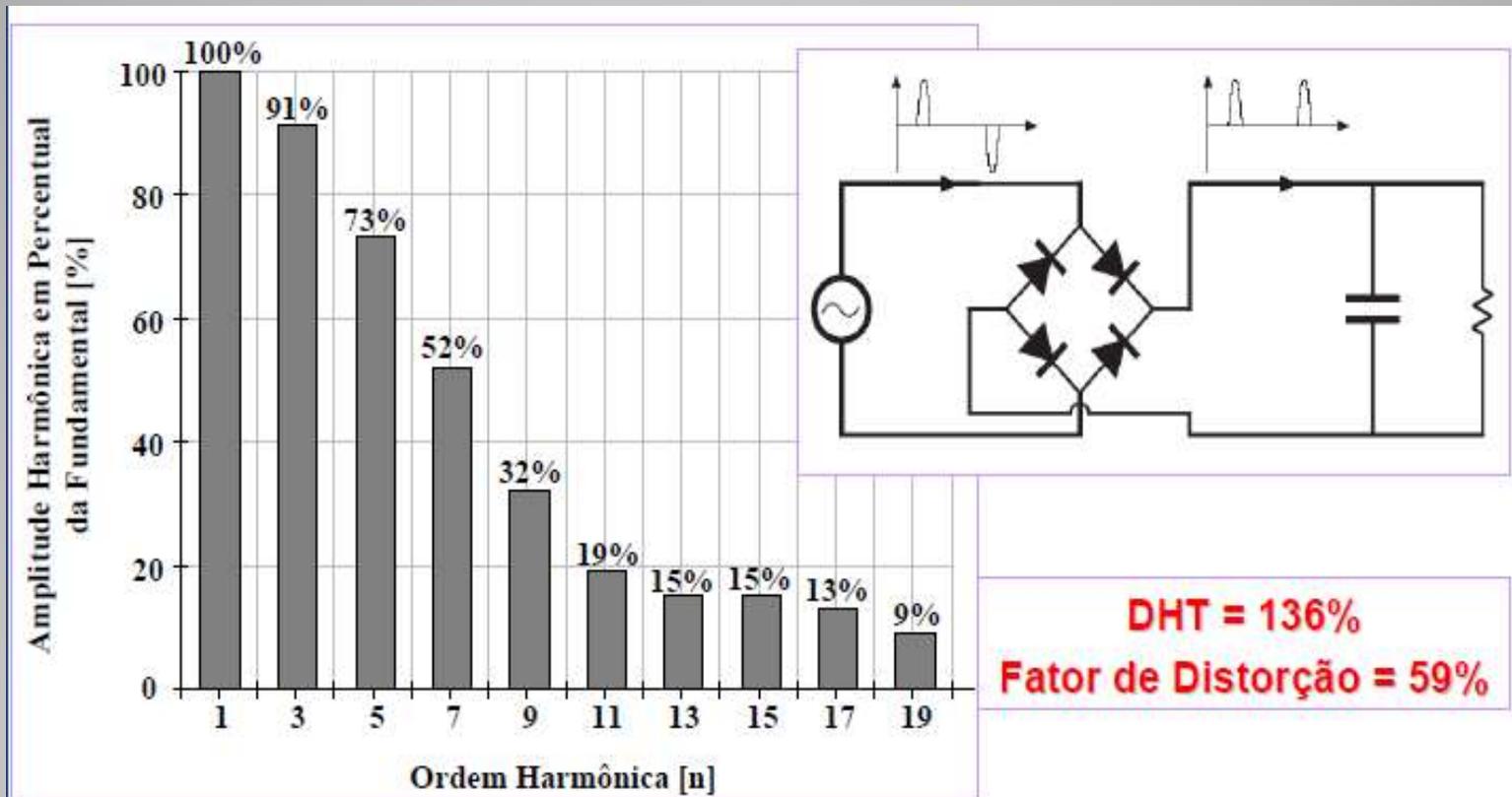
LUZ VISÍVEL

# REATOR ELETRÔNICO CONVENCIONAL



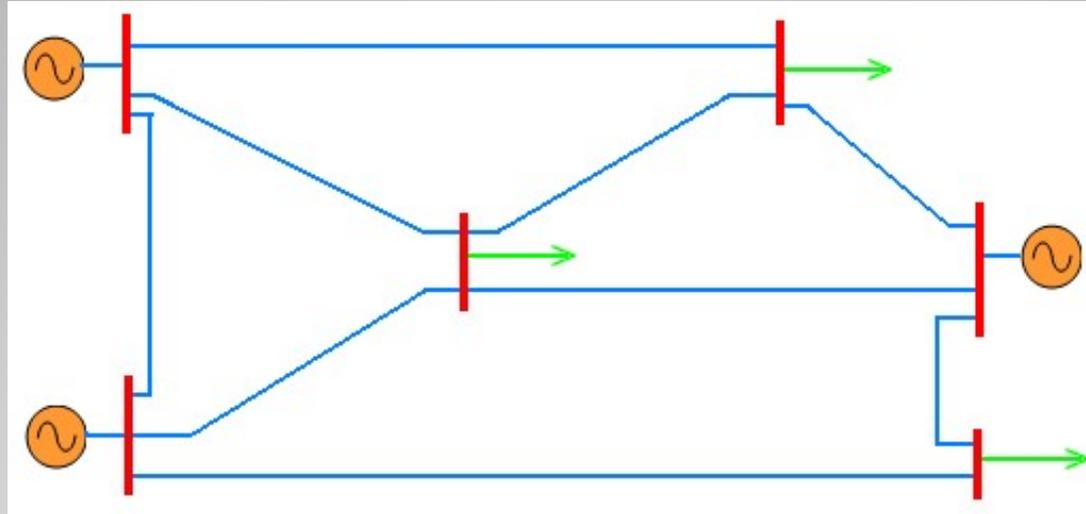
THD  $\approx$  134%  
FP  $\approx$  0,54

# 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

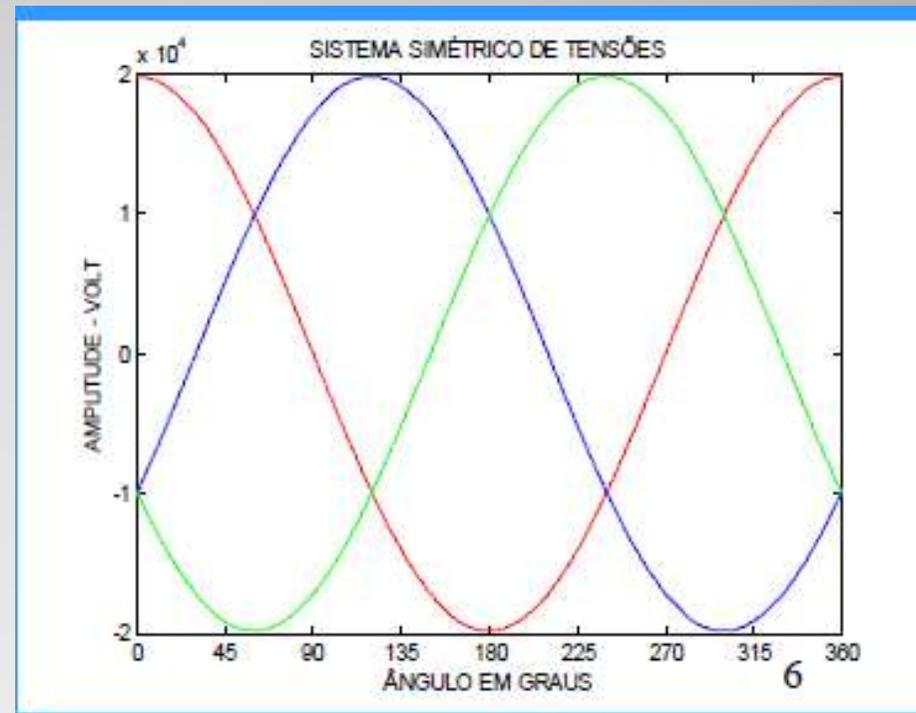
FREQUENCIA ÚNICA E  
CONSTANTE

MAGNITUDE CONSTANTE

SISTEMA TRIFÁSICO  
EQUILIBRADO

FATOR DE POTÊNCIA UNITÁRIO

PERDAS NULAS



# SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA REAL

## TENSÃO

FORMA DE ONDA NÃO SENOIDAL

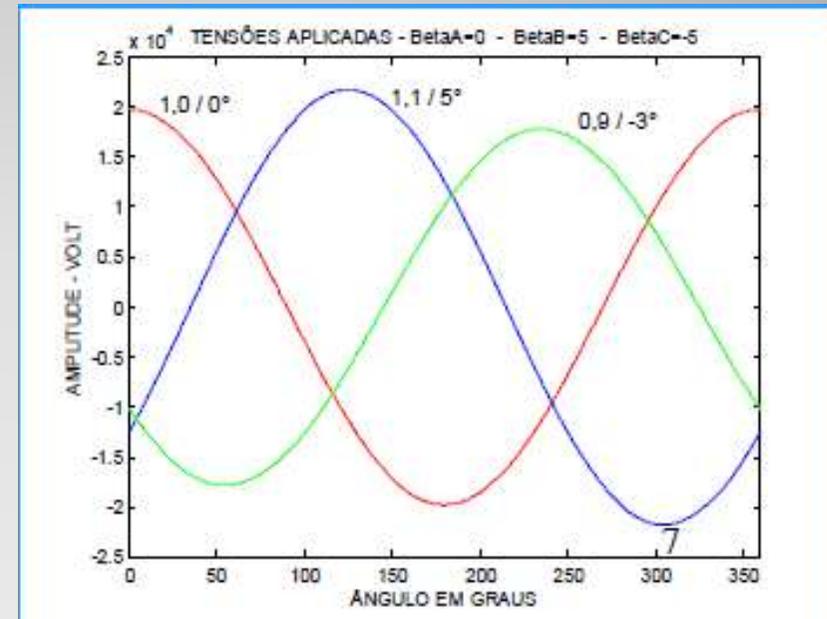
- MÚLTIPLAS FREQUÊNCIAS
- DISTÚRBIOS DIVERSOS

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

# 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

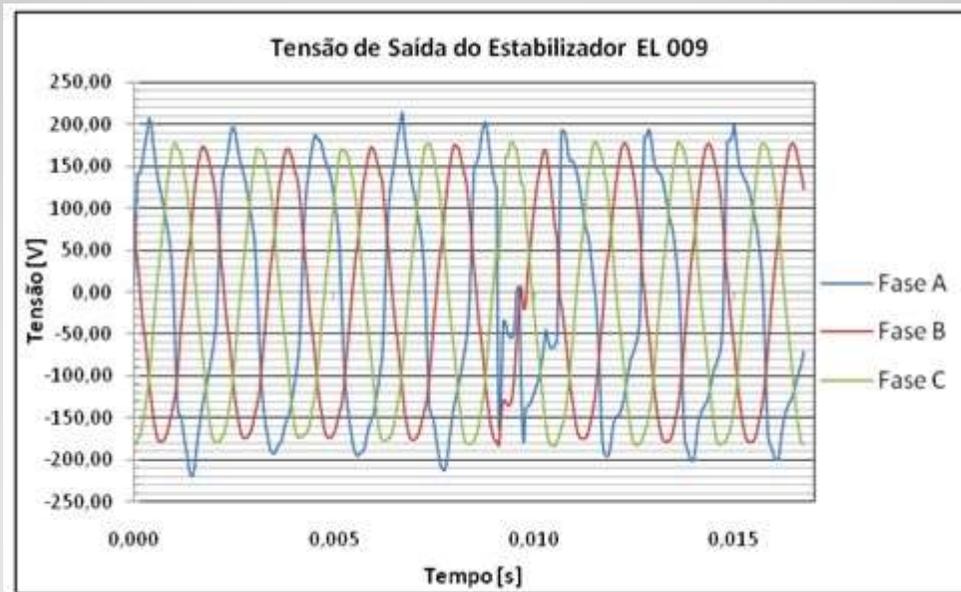
## DESEQUILÍBRIO DE FASES

- CHAVEAMENTO DE CAPACITORES
- COMPENSAÇÃO REATIVA ESTÁTICA

## 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.



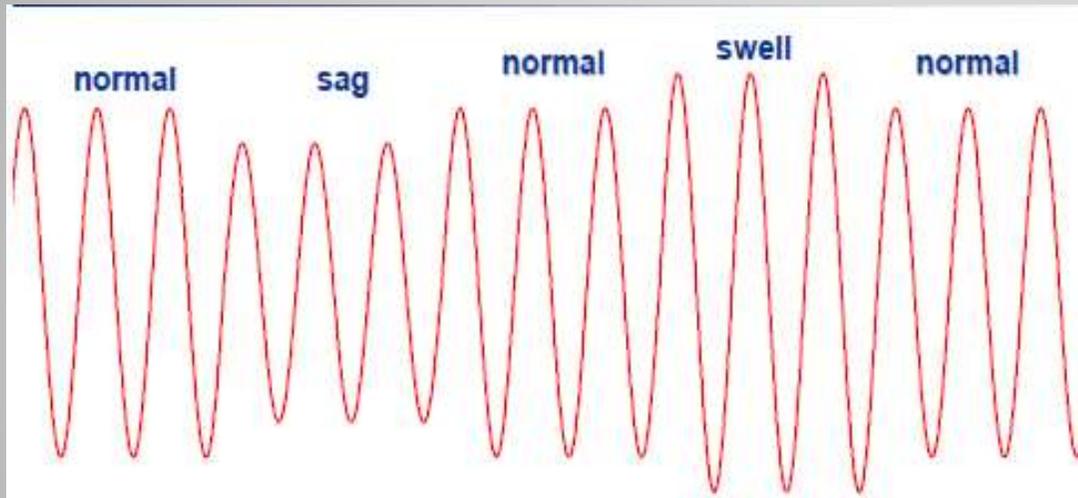
Acionamento de banco de capacitores que, ao serem energizados, exigem da rede uma capacidade maior de corrente. Com isso ocorre uma redução significativa na tensão.

## 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)

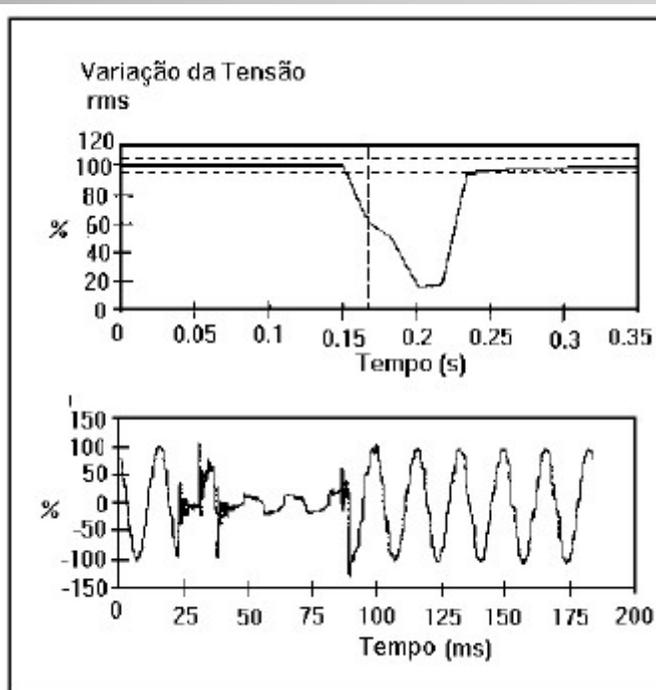
- Afundamento de tensão (SAG);
- Elevação de tensão (SWELL);



**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**

## 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...

# 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.

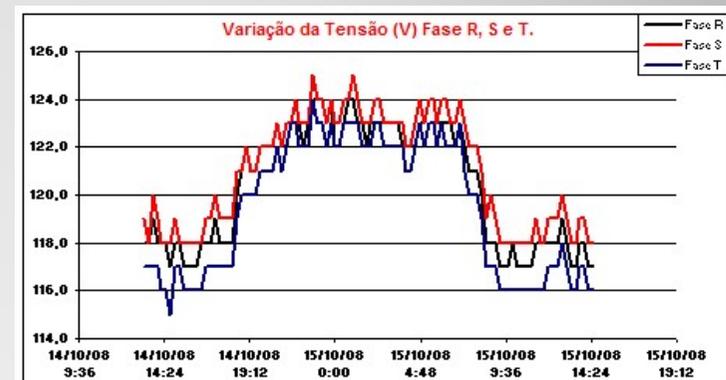
## Variação de tensão de longa duração VTLD

Ocorrem no valor eficaz da tensão (sobretensão ou subtensão)

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

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

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

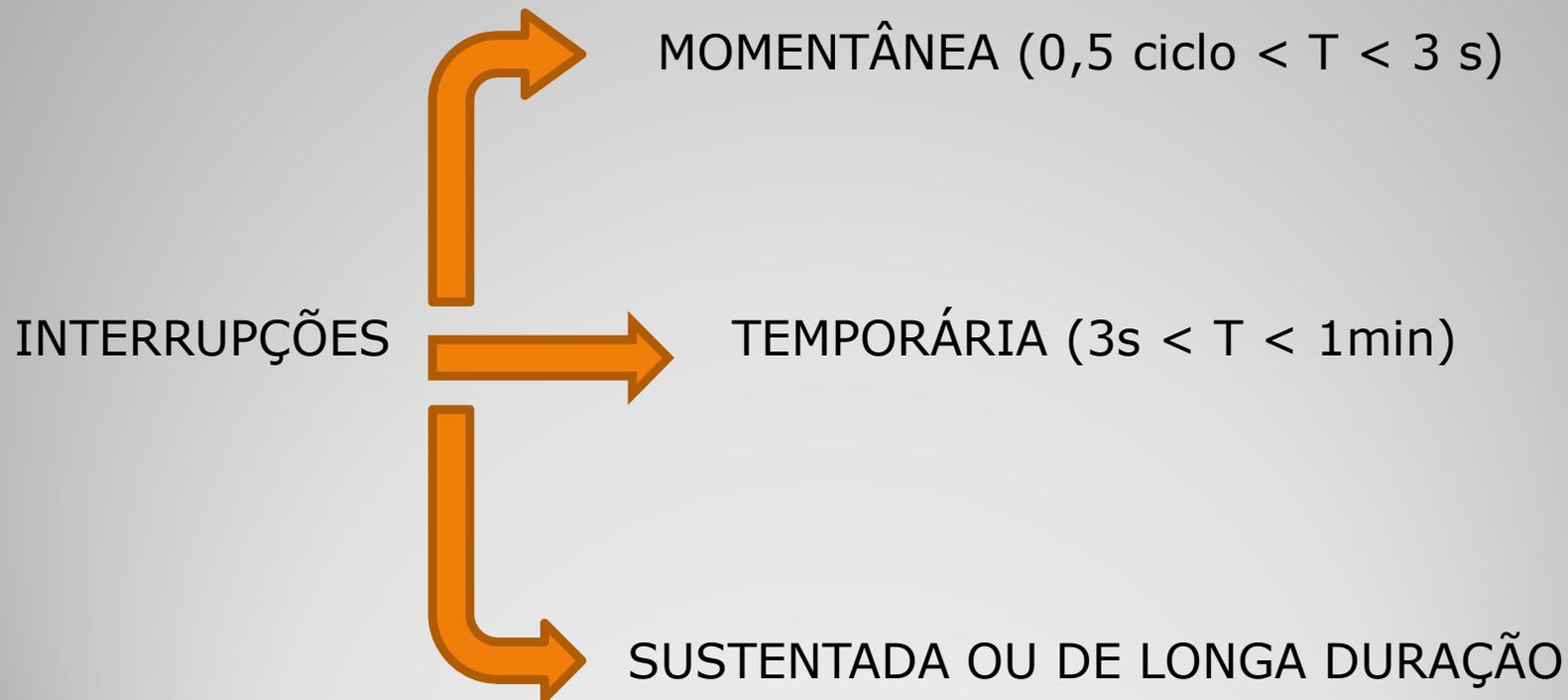
- Dispositivos eletrônicos podem sofrer danos durante condições de sobretensões; (sobretensão)
- Diminuição da vida útil de equipamentos, tais como: transformadores, cabos, disjuntores, TCs, TPs e máquinas rotativas; (sobretensão)
- Redução da potência reativa fornecida por bancos de capacitores ao sistema; (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)

# 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.

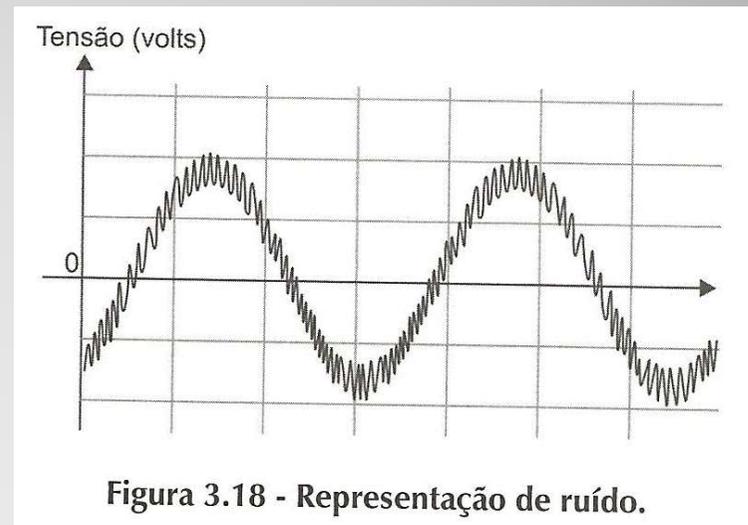
Já as interrupções planejadas são feitas geralmente para executar manutenção na rede, ou seja, serviço como troca de cabos e postes, mudança do tap do transformador, alteração dos ajustes de equipamentos de proteção, etc.

# 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

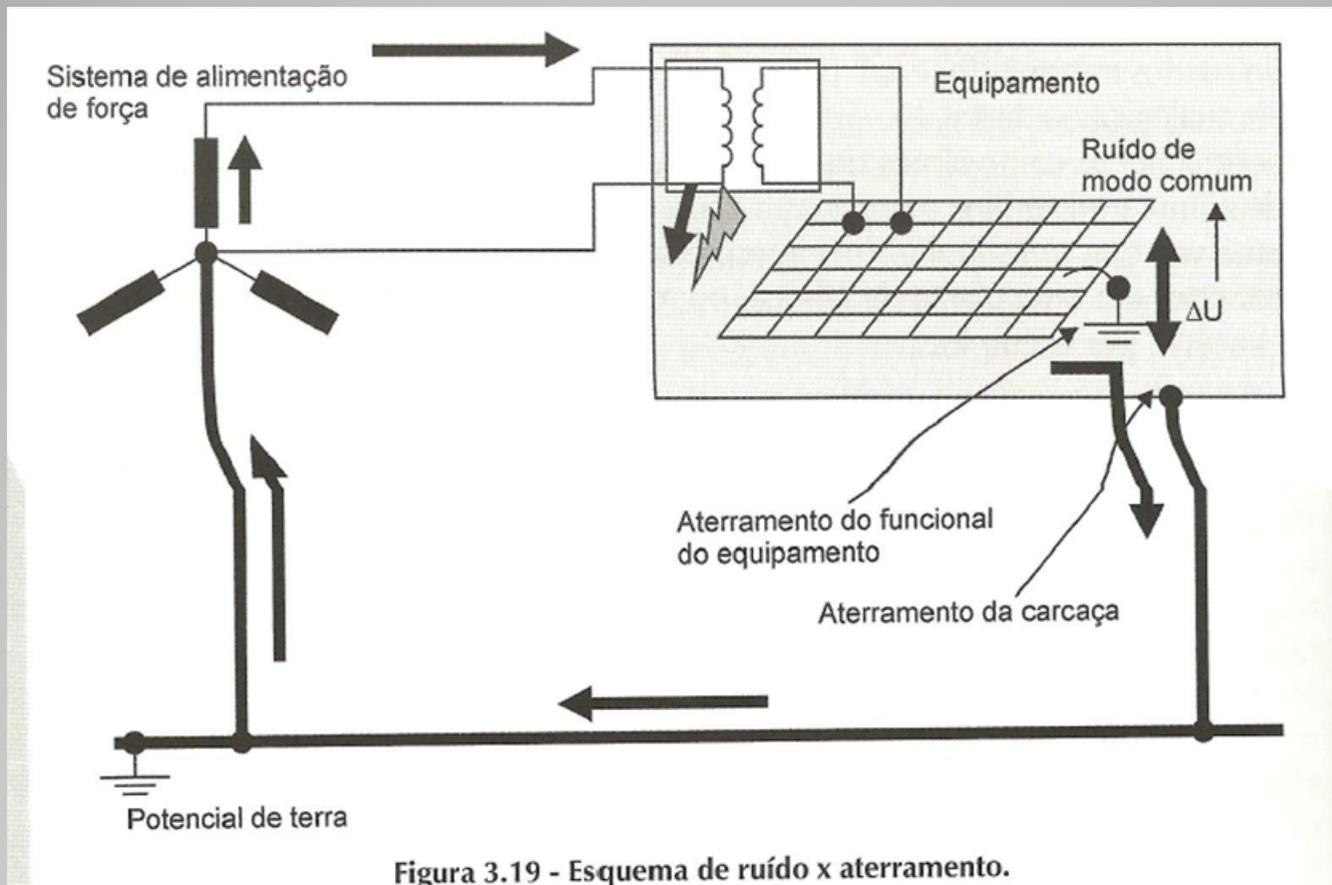
Afeta a referência nos circuitos eletrônicos, pela existência de diferença de potencial entre as referências do circuito

MODO NORMAL  RUÍDO ENTRE FASES

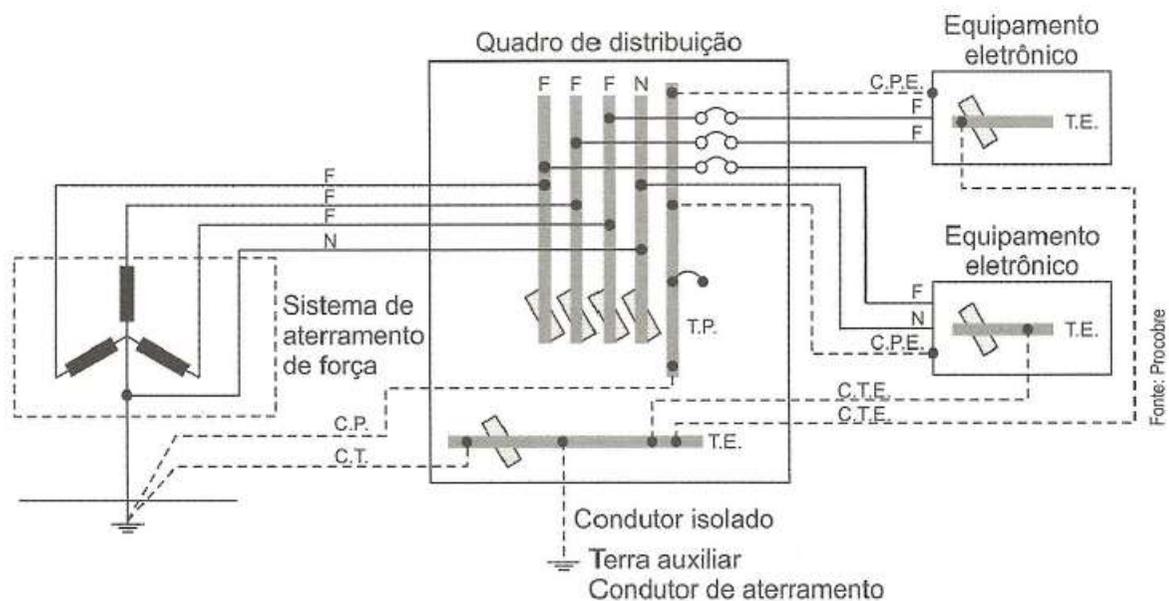
# MINIMIZAÇÃO DOS RUÍDOS

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

## Equipamento e fonte aterrados em ponto diferentes.



## Aterramento de ponto único.



### 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

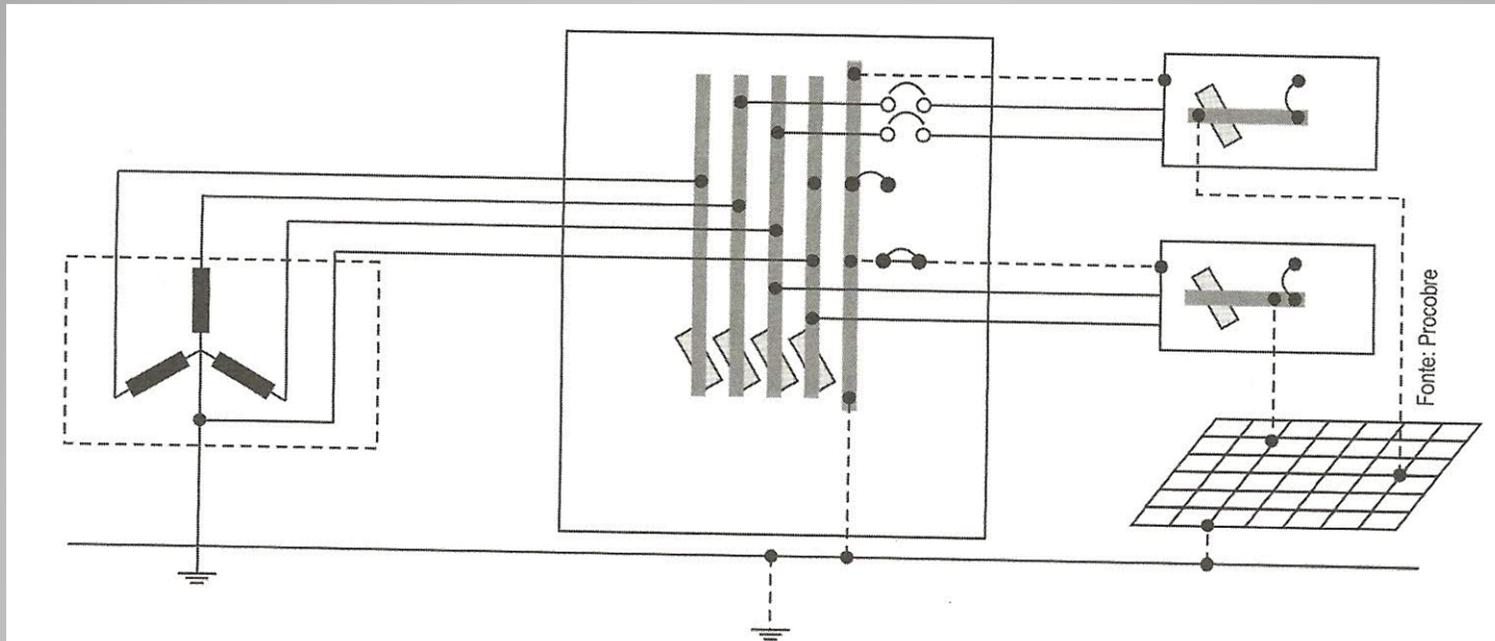


Figura 3.21 - Aterramento em malha de terra de referência MTR.

## Malha de terra de referência MTR.

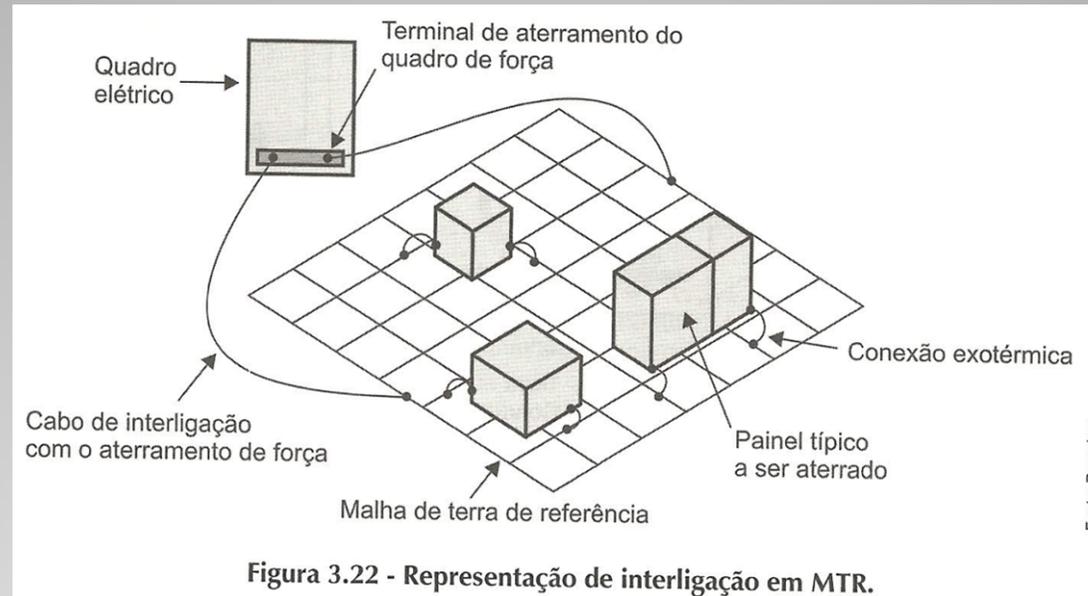
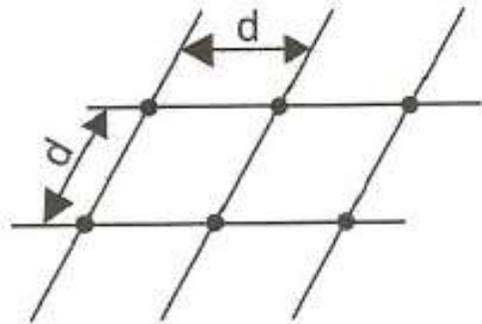


Figura 3.22 - Representação de interligação em MTR.

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.

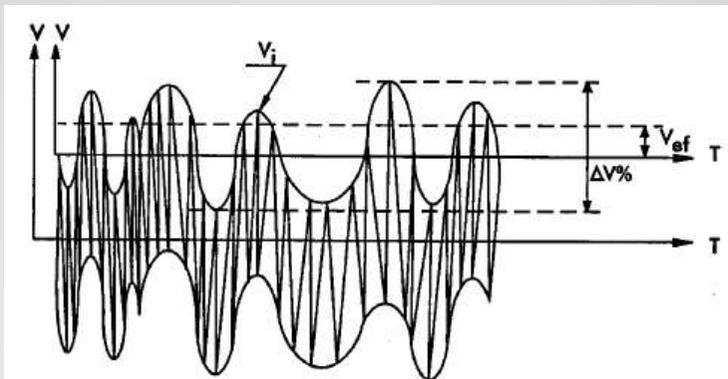
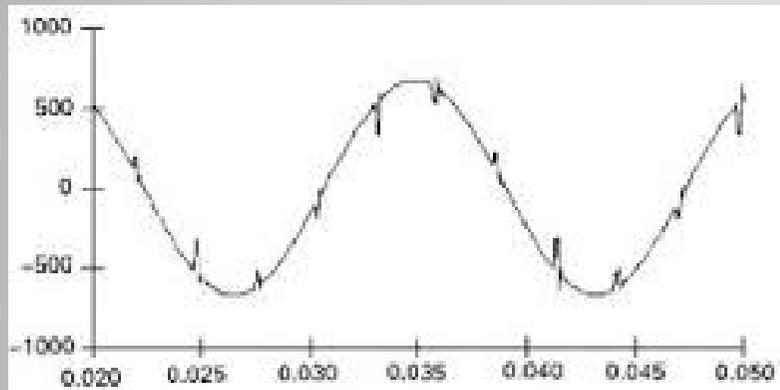


Figura 2: Variação de tensão ocasionada pela operação de um forno a arco.

# 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

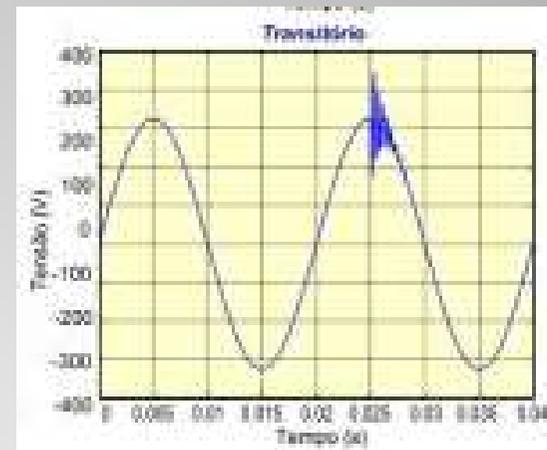
Substituição dos equipamento geradores ou separação dos circuitos entre carga geradora e carga afetada..

# 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

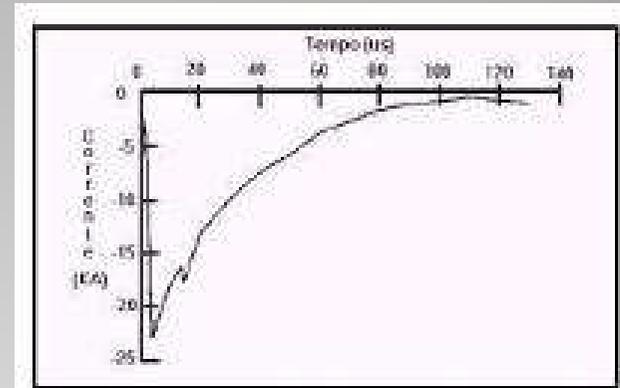
Ocorrem devido a descargas atmosféricas.

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)

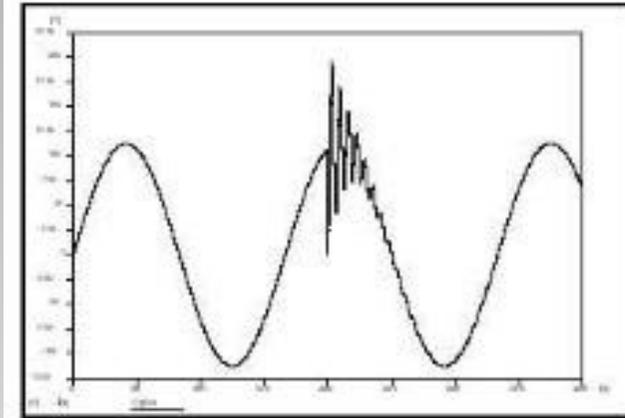


Corrente transitória impulsiva oriunda de uma descarga atmosférica.

# Transitório

## Oscilatórios

Ocasionados pelo chaveamento de cargas indutivas ou capacitivas.



*Transitório proveniente 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**.

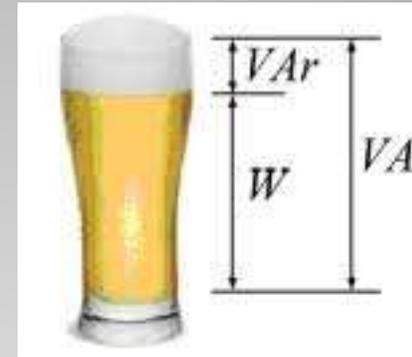
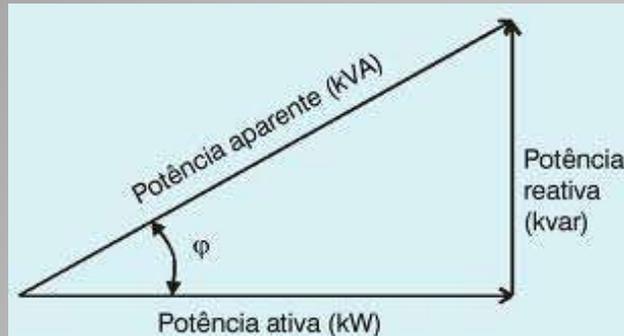
As instalações de **geração conectadas** ao sistema de distribuição **devem garantir** que a frequência retorne para a faixa de **59,5 Hz a 60,5 Hz**, no prazo de **30 (trinta) segundos** após sair desta faixa, quando de distúrbios no sistema de distribuição, para permitir a recuperação do equilíbrio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

# REDUÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

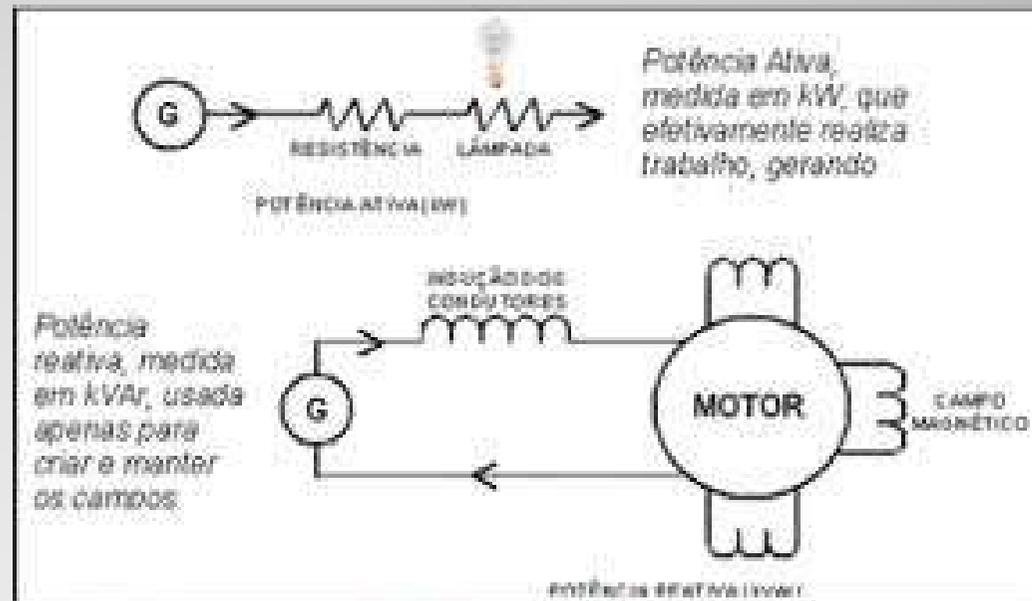


$$P = \sqrt{S^2 - Q^2}$$

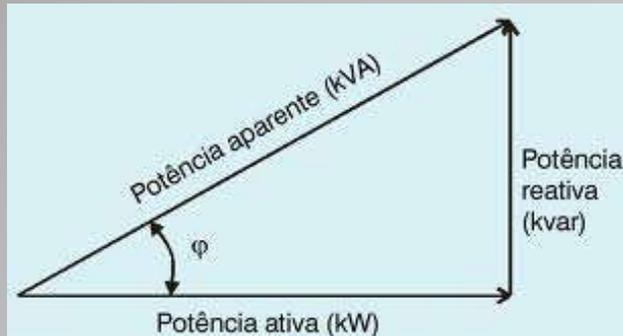
$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

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

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



# REDUÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA



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

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

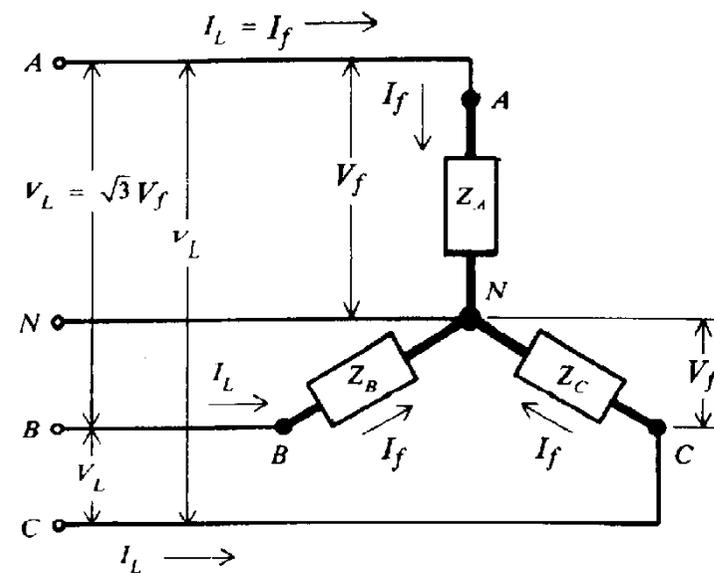
$$P = \sqrt{3} V_L I_L \cos \phi$$

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

$$S = 3 V_f I_f$$

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

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



# CARGAS QUE PROMOVEM A REDUÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

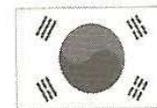
Bloco 1	Bloco 2
<ul style="list-style-type: none"><li>- Transformadores</li><li>- Motores de Indução</li><li>- Geradores</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Cargas Não-Lineares</li><li>- Microcomputadores</li><li>- Retificadores Industriais</li></ul>

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



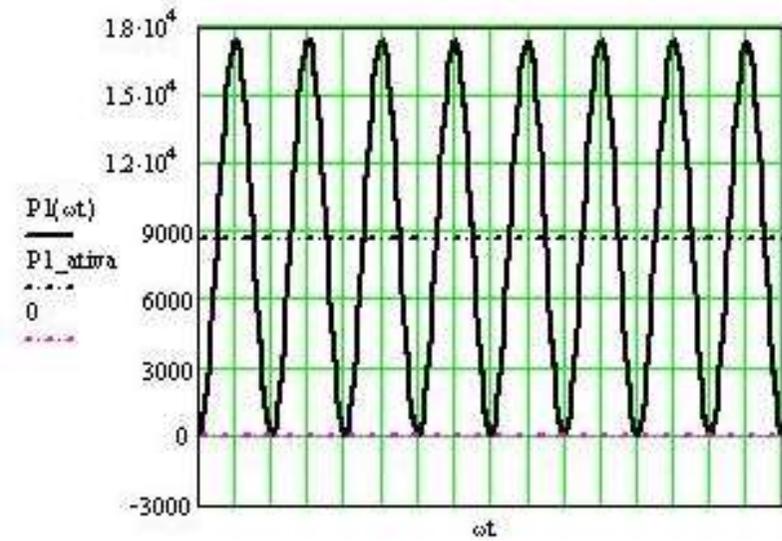
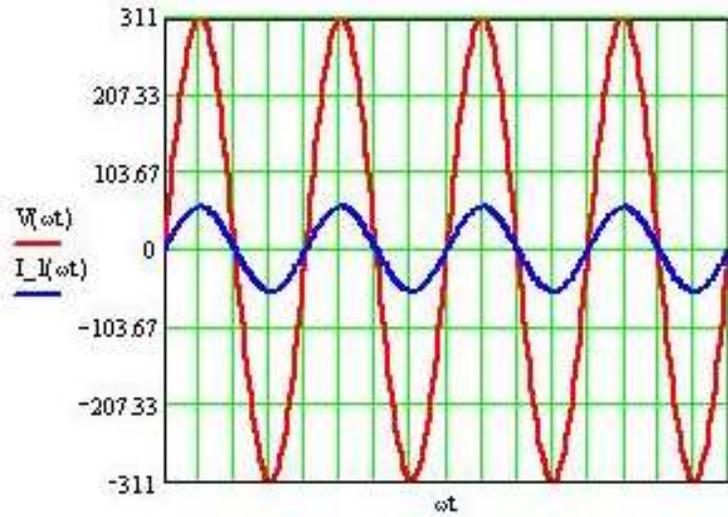
Alemanha  
0,96



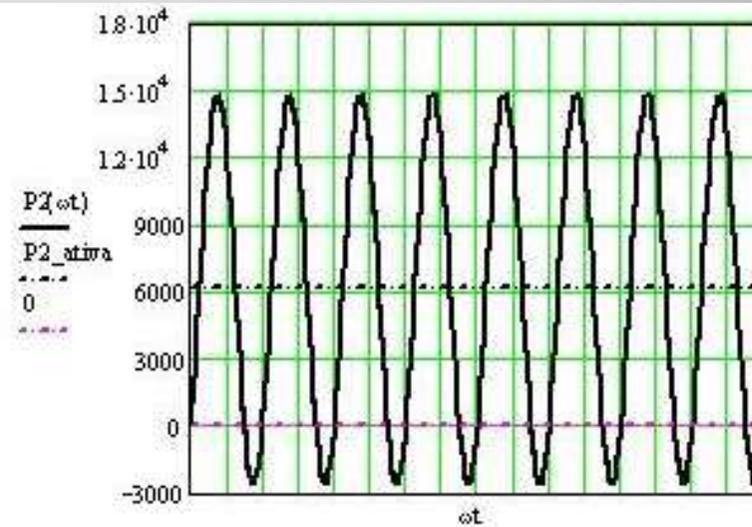
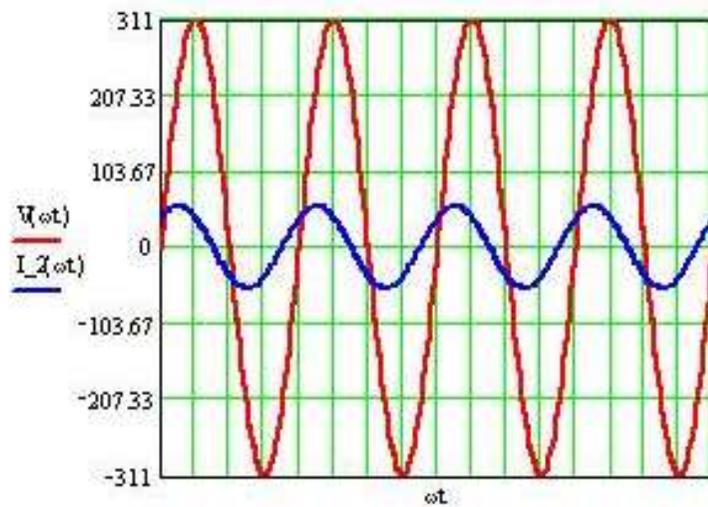
Suíça  
0,96



Argentina  
0,95

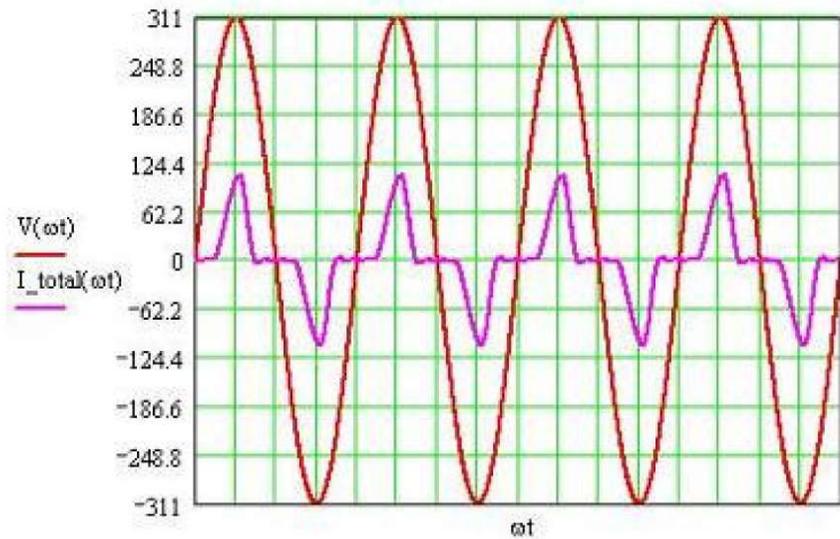


## CARGA RESISTIVA

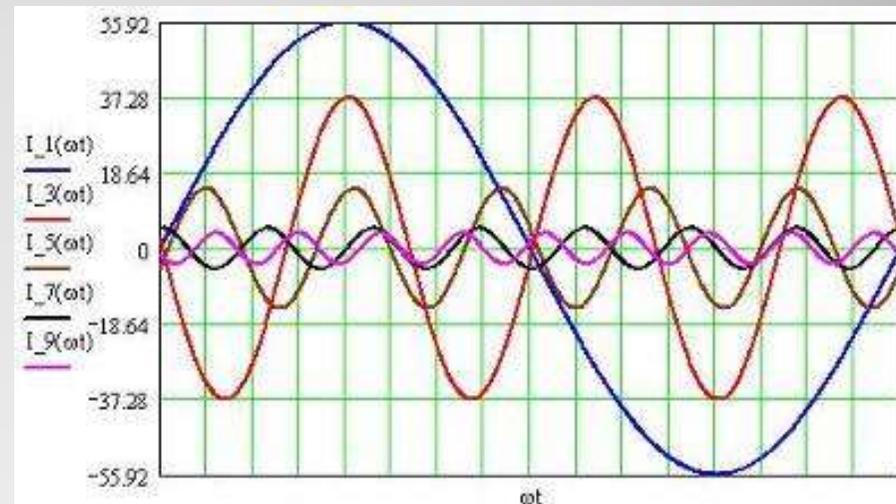


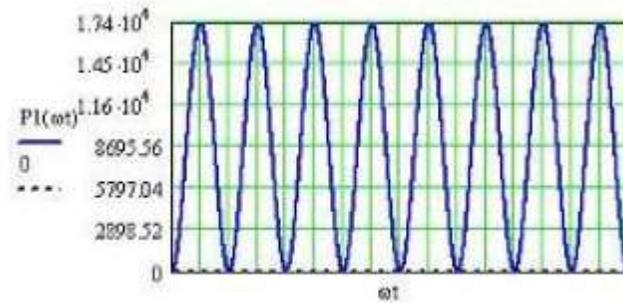
## CARGA INDUTIVA

# CARGA NÃO LINEAR

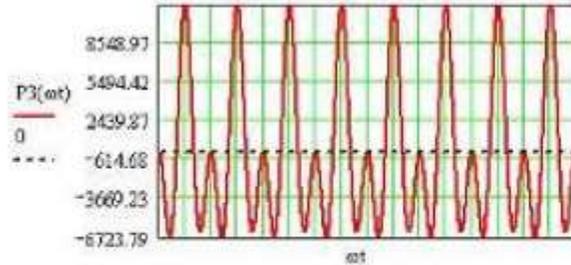


Fundamental = 60 Hz  
3ª Harmônica = 180 Hz  
5ª Harmônica = 300 Hz  
7ª Harmônica = 420 Hz  
9ª Harmônica = 540 Hz

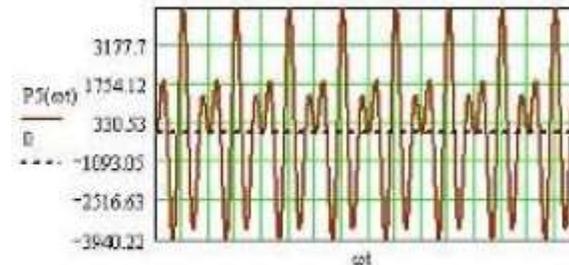




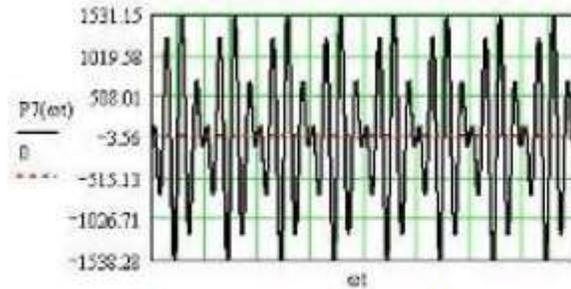
Componente Fundamental  $P_{ATIVA} = 8696W$



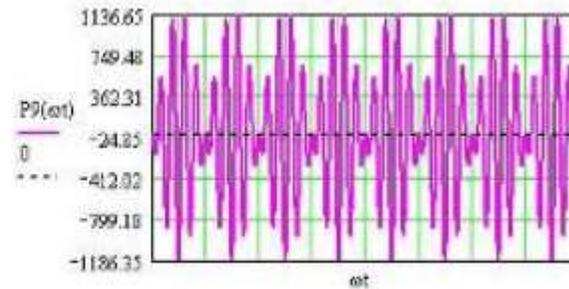
3ª Harmônica  $P_{ATIVA} = 0W$



5ª Harmônica  $P_{ATIVA} = 0W$

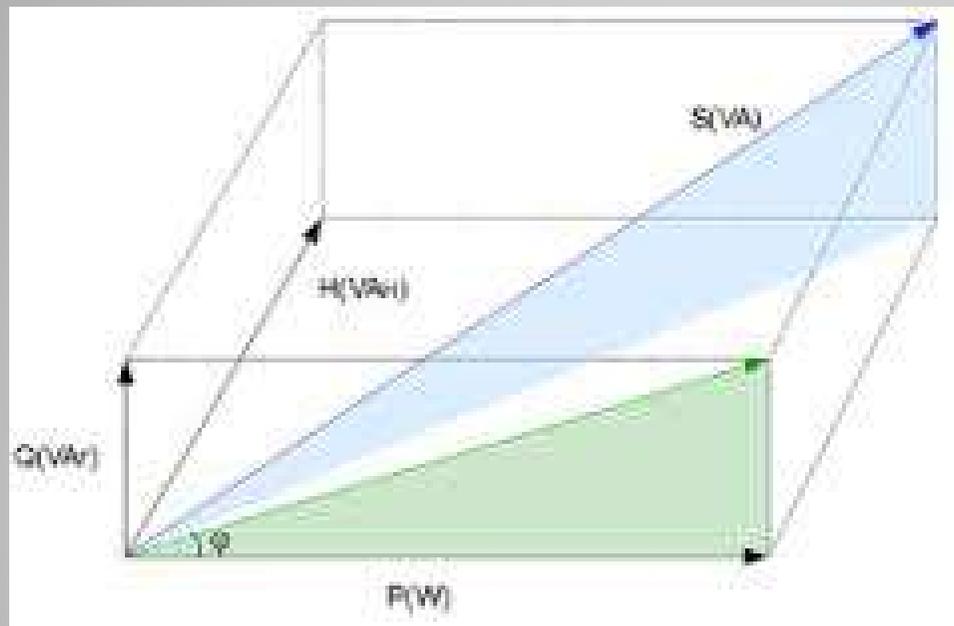


7ª Harmônica  $P_{ATIVA} = 0W$



9ª Harmônica  $P_{ATIVA} = 0W$

# FATOR DE POTÊNCIA EM CARGAS NÃO LINEARES



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

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

# 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.

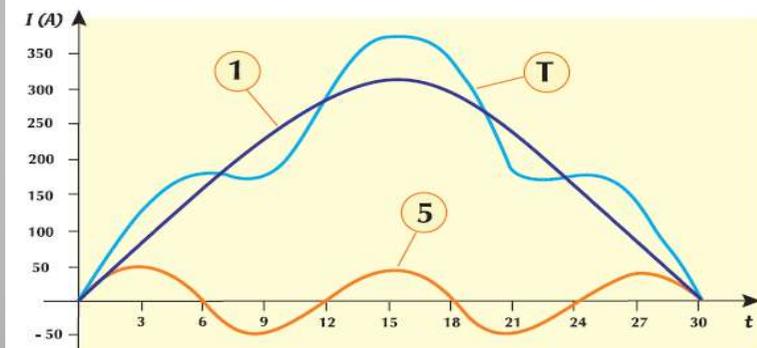
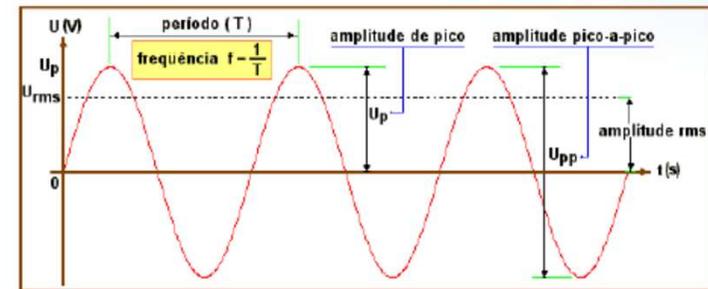
## **Filtros ativos**

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.

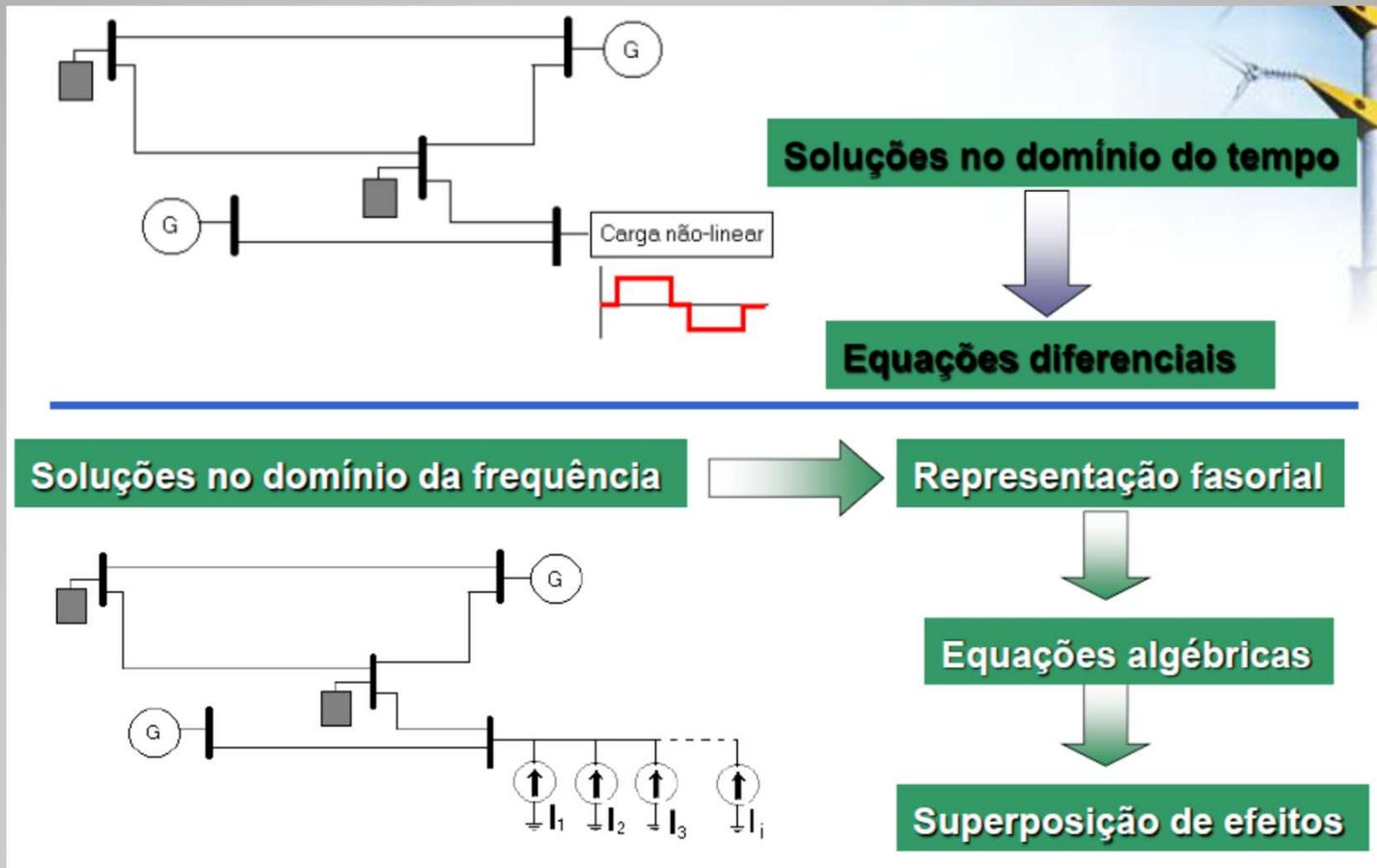
# HARMÔNICAS

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

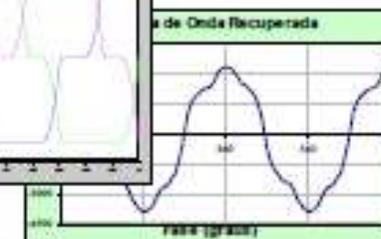
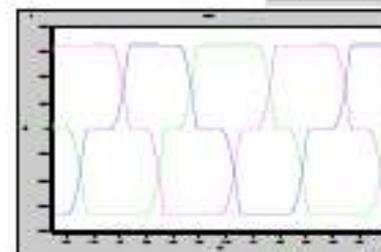
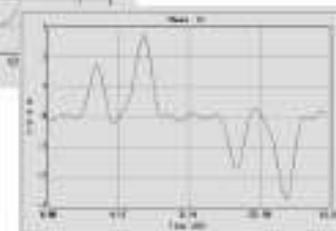
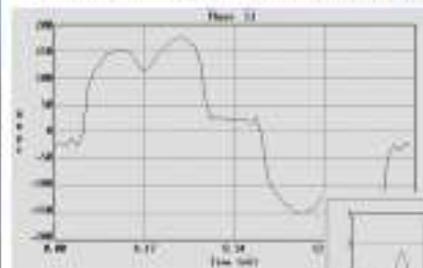


# Cargas Não Lineares

Consumidores comerciais e industriais:



## Correntes de alimentação



Onda Recuperada

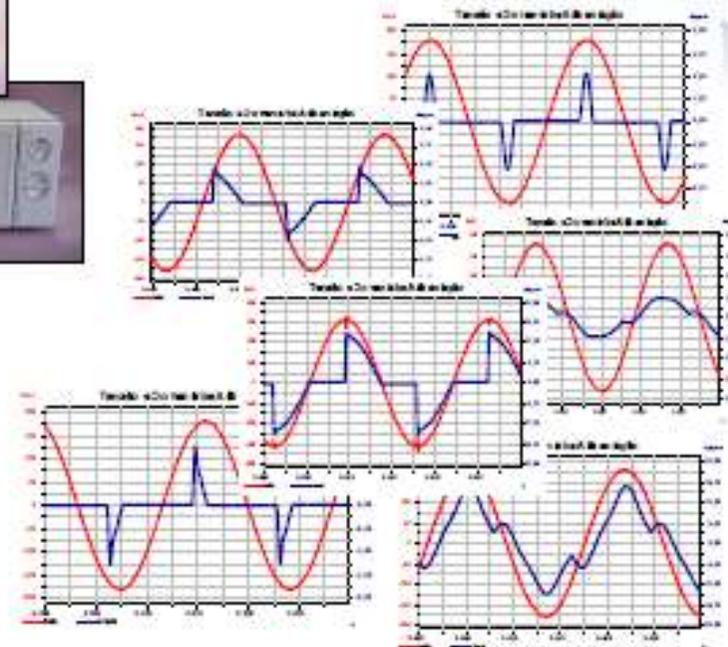
Perda (p.u.)

# Cargas Não Lineares

Consumidores residenciais:



Correntes de alimentação



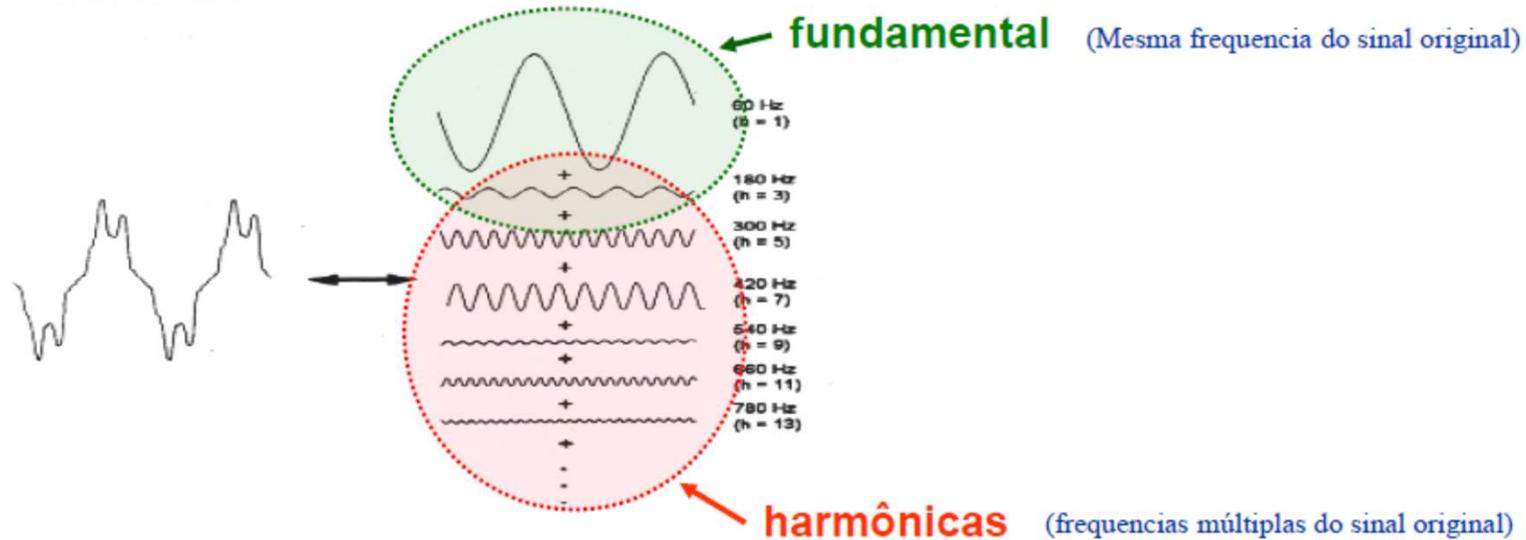
## Teorema de Fourier:

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



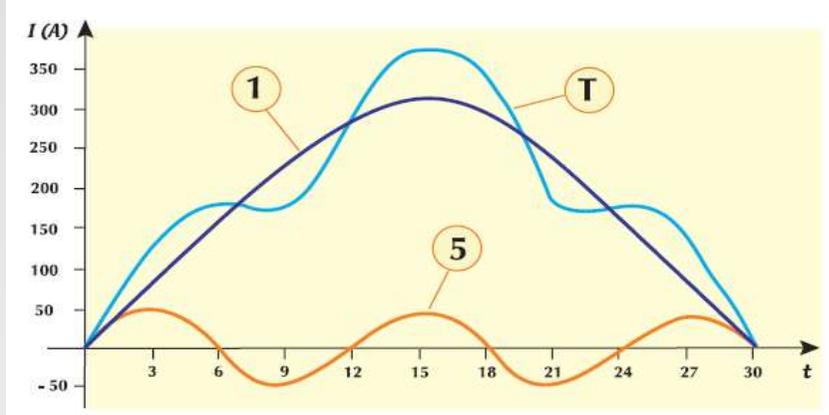
1768 to 1830

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



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)	Sequência
1	60	+
2	120	-
3	180	0
4	240	+
5	300	-
6	360	0
n	n * 60	-

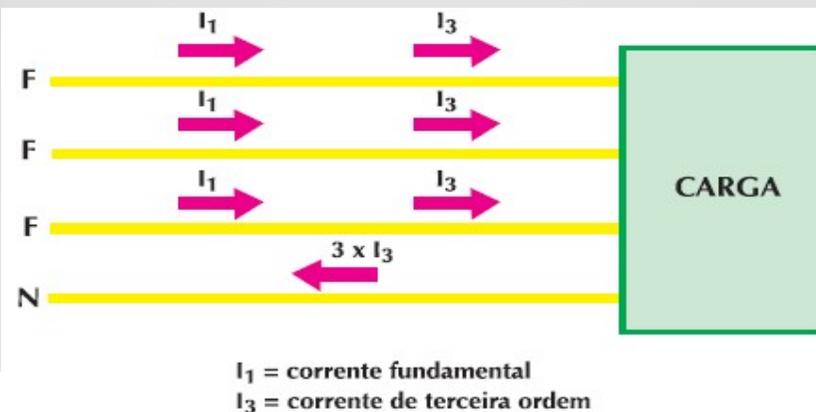


## Harmônicas : Sequencia positiva

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

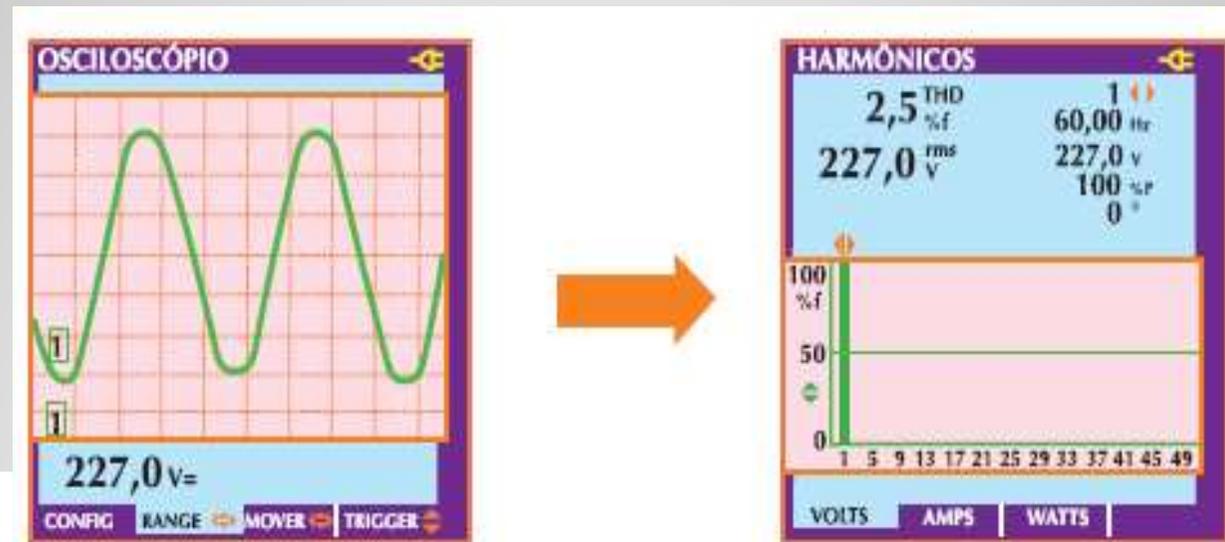
As harmônicas de seqüência negativa fariam o motor girar em sentido contrário ao giro produzido pela fundamental, freando assim o motor e também causando aquecimento indesejado. Por sua vez, as harmônicas de seqüência nula, zero ou também conhecidas como homopolares, não provocam efeitos no sentido de 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

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

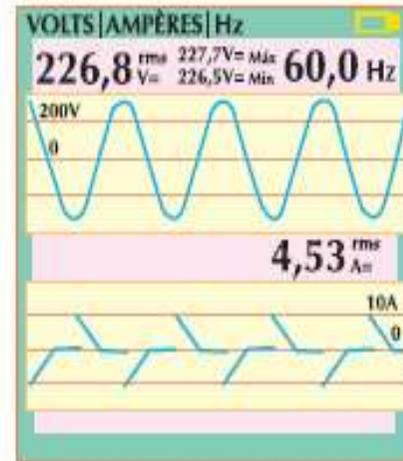
THD em relação a fundamental

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

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



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

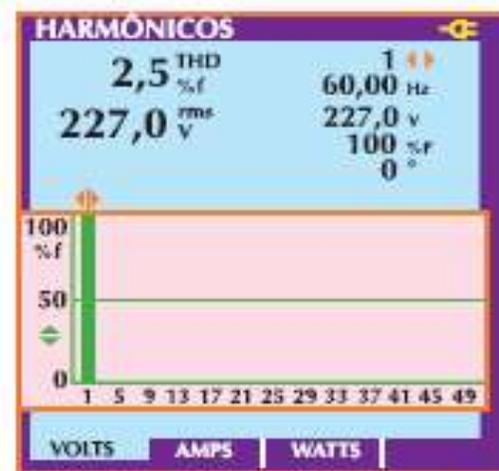
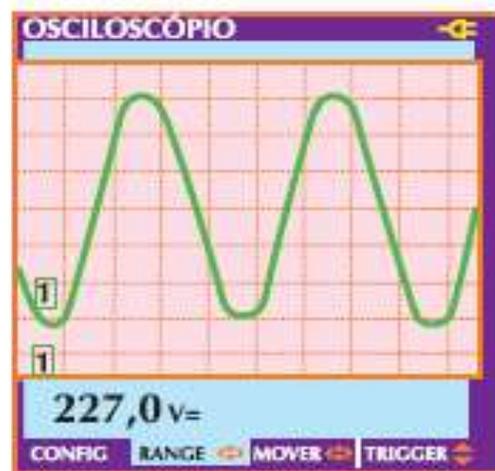


Figura 8 - Forma de onda e espectro de um sinal praticamente senoidal ( $THD_f = 2,5\%$ ).



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

## Valor eficaz (rms)

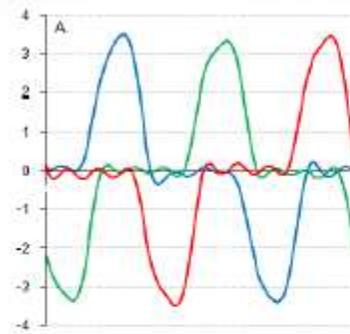
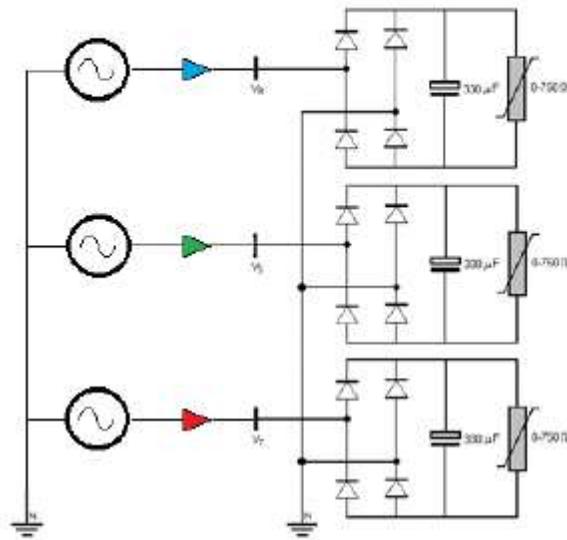
Ordem	Valor em A
h <sub>1</sub>	3,63
h <sub>3</sub>	2,33
h <sub>5</sub>	0,94
h <sub>7</sub>	0,69
h <sub>9</sub>	0,50
h <sub>11</sub>	0,41
h <sub>13</sub>	0,33
Total	4,53

**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:

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

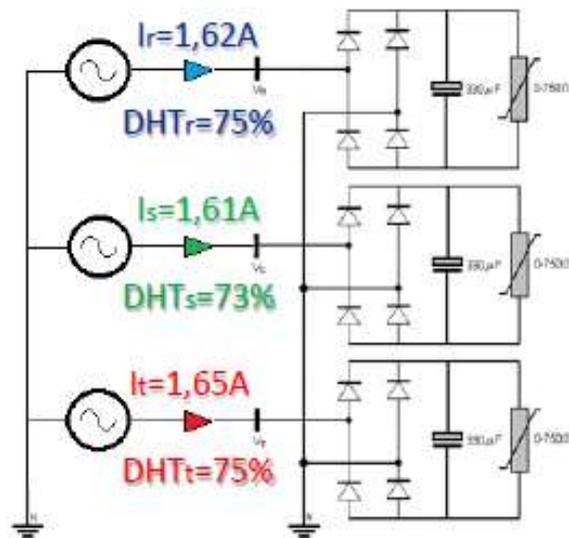


Valores de pico das componentes harmônicas

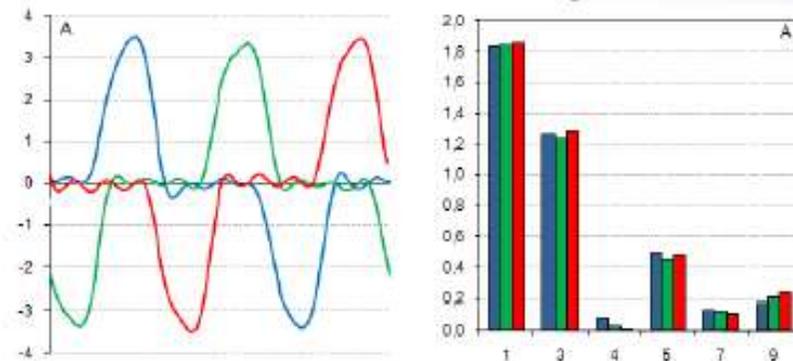
h	I <sub>a</sub> (A)	Φ <sub>a</sub> (°)	I <sub>b</sub> (A)	Φ <sub>b</sub> (°)	I <sub>c</sub> (A)	Φ <sub>c</sub> (°)
1	1,84	9,54	1,85	-111,6	1,86	129,2
3	1,26	-157,04	1,24	-159,3	1,28	-158,9
4	0,08	57,12	0,03	83,9	0,01	-2,5
5	0,49	26,37	0,45	148,8	0,48	-90,8
7	0,13	122,11	0,12	-35,3	0,11	-124,2
9	0,17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

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

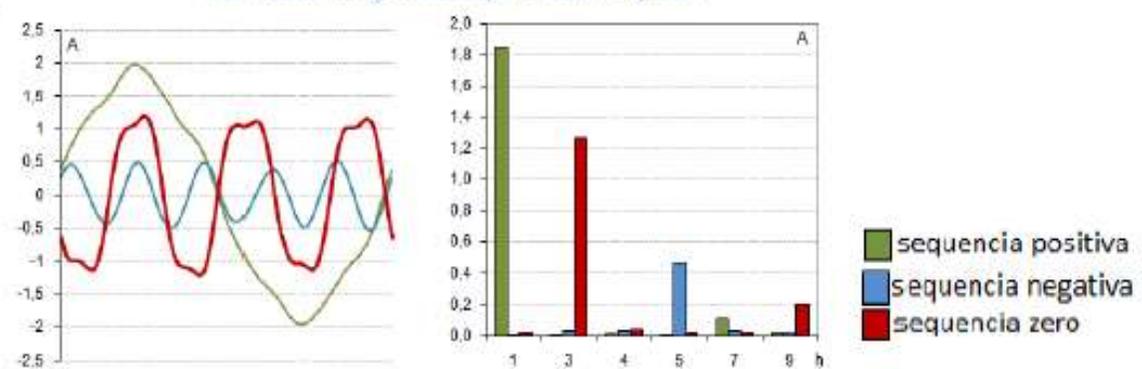
# Conjunto de retificadores de onda completa e filtro capacitivo



### Correntes de alimentação



### Concentração sequencial típica



### Valores de pico das componentes harmônicas

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

# FATOR DE POTÊNCIA E $\cos \phi$

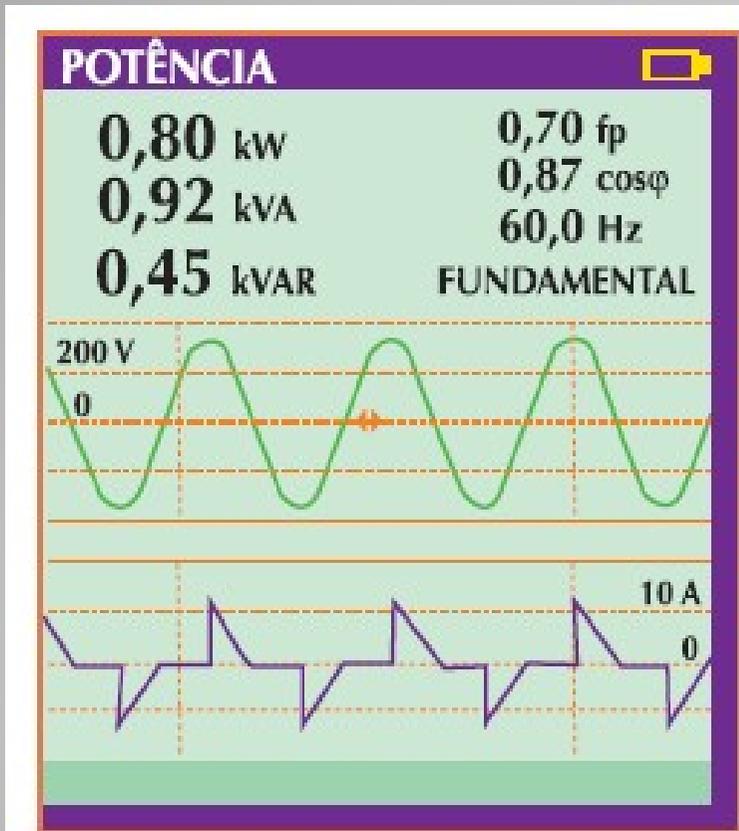
$$fp = \frac{P \text{ (W)}}{S \text{ (VA)}}$$

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.

# 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		
Harmônica h	Limite (mA / W)	Limite (A)
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	$3,85/n$	$0,15 \cdot 15/n$

Maxima 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).

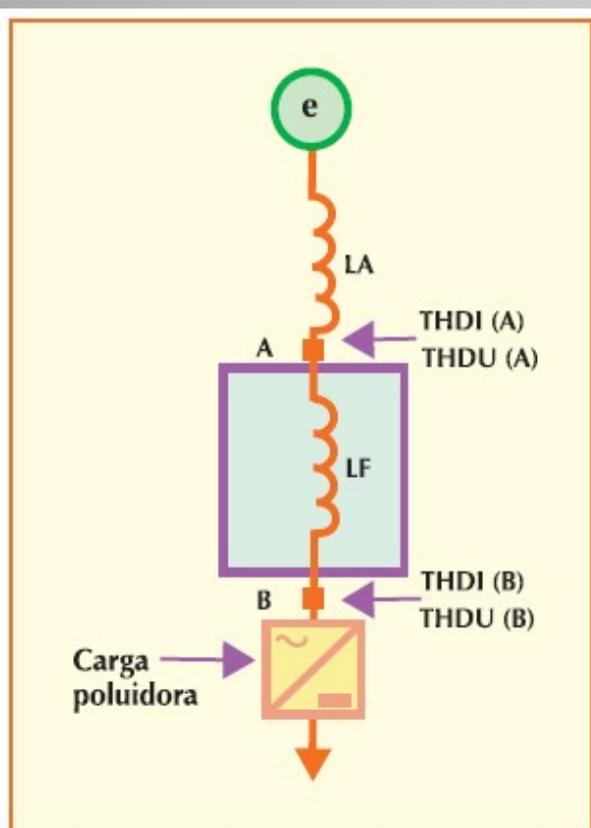
## FILTRO DE HARMÔNICAS

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:

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

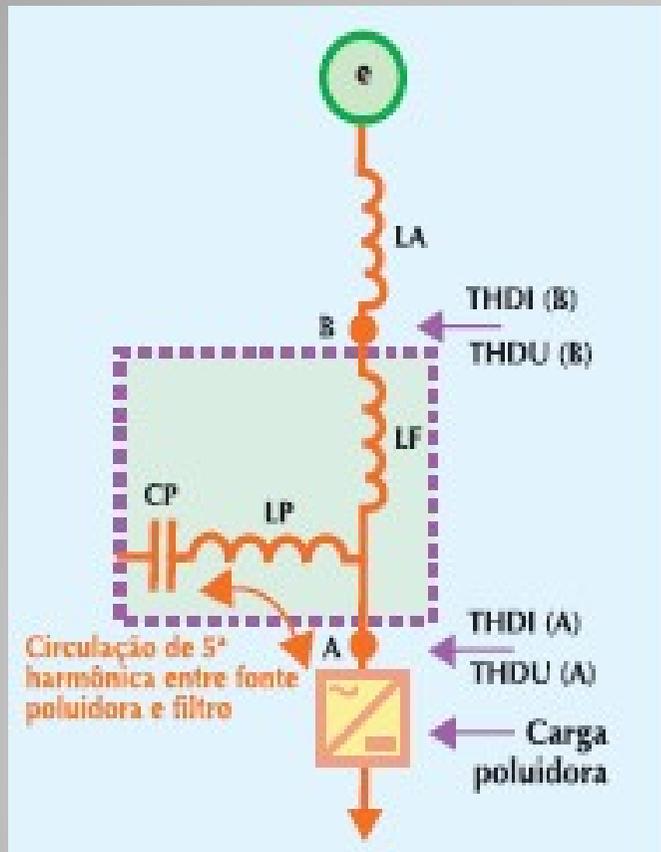
As principais vantagens da indutância são:

- 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  
DIMENSIONADOS DE FORMA  
QUE PARA DETERMINADA  
FREQUENCIA A REATÂNCIA  
RESULTANTE SEJA NULA.

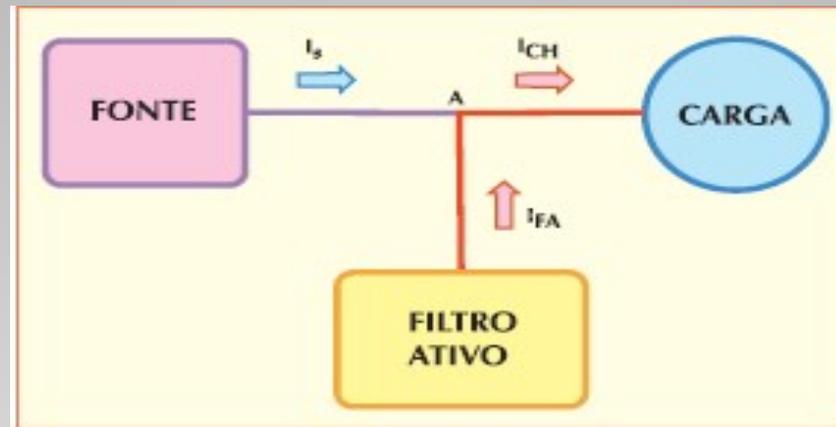
As principais vantagens dos filtros de harmônicas passivos LC são as seguintes:

- 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



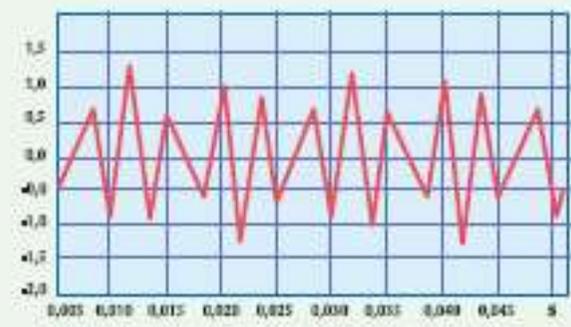
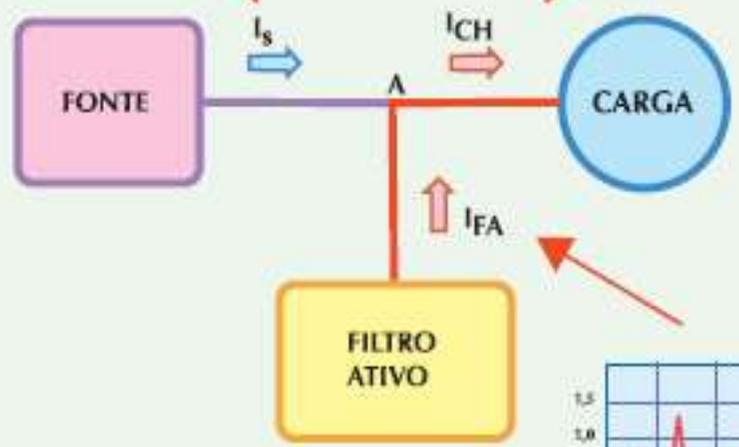
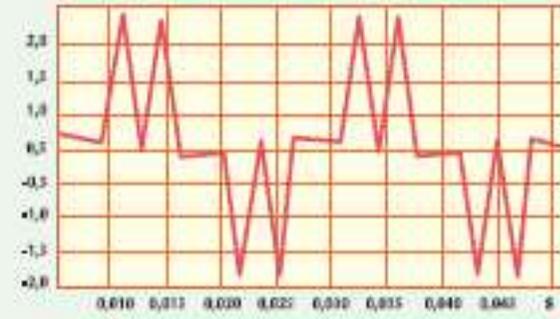
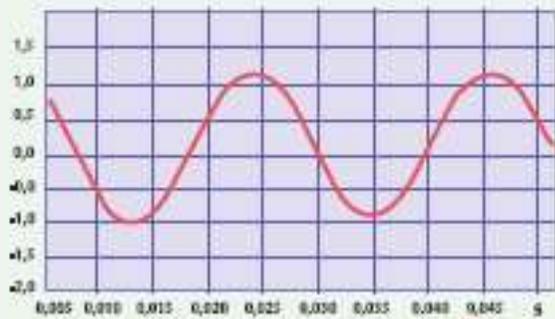
Esse filtro analisa cada uma das fases continuamente, em tempo real, monitorando a corrente de carga  $I_{CH}$ . Dessa análise, obtém-se o espectro harmônico, que é a indicação da presença da fundamental e de todas as demais componentes harmônicas do sinal.

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:

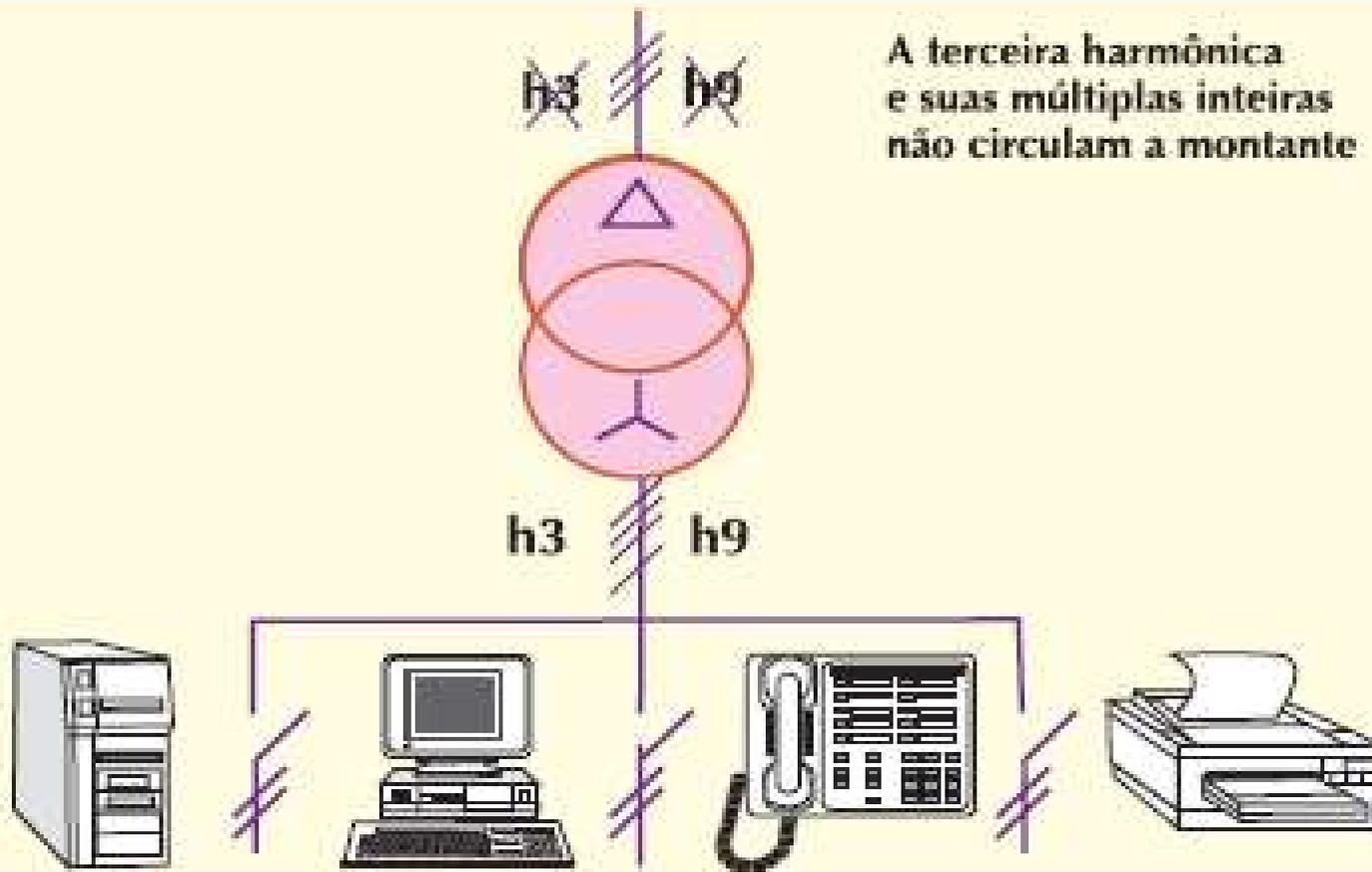
- Não circulação de correntes harmônicas pela instalação elétrica, o que pode afetar os demais componentes;
- Redução das perdas por efeito Joule nos cabos, componentes em geral e da carga no transformador ou gerador;
- Redução da seção dos condutores.



## **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

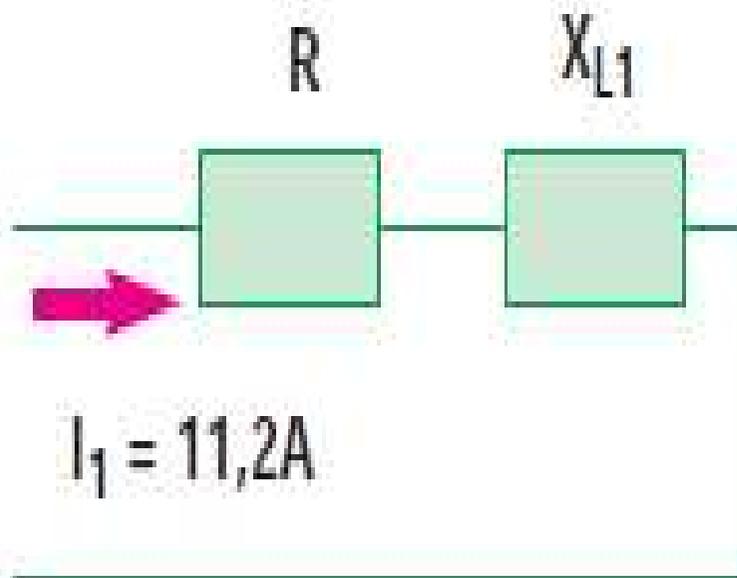
Cargas monofásicas com alto conteúdo de harmônica  
3ª e 9ª harmônicas em grande quantidade pelo neutro

## **EFEITOS E CONSEQUENCIAS DA HARMÔNICAS**

- Sobrecargas e sobreaquecimentos em equipamentos e subsequente redução da vida útil;**
- Sobretensões harmônicas e solicitações do isolamento dos dispositivos com subsequente “stress” e redução da vida útil;**
- Operação indevida de equipamentos elétricos;**
- Aumento do consumo de energia elétrica.**

## A) REDUÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

- SEM HARMÔNICAS



$$R = 1\Omega$$

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

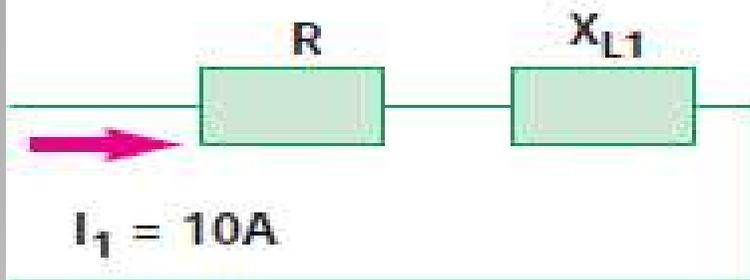
$$P_1 = R \cdot I_1^2 = 1 \cdot 11,2^2 = 125W$$

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

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

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

• COM 3ª HARMÔNICA



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

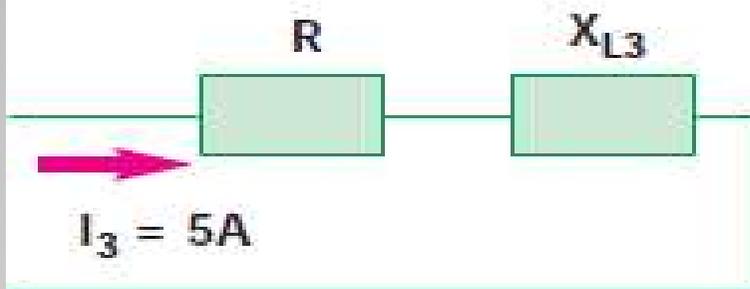
$$P_1 = R \cdot I_1^2 = 1 \cdot 10^2 = 100W$$

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

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

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

+



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

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

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

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

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

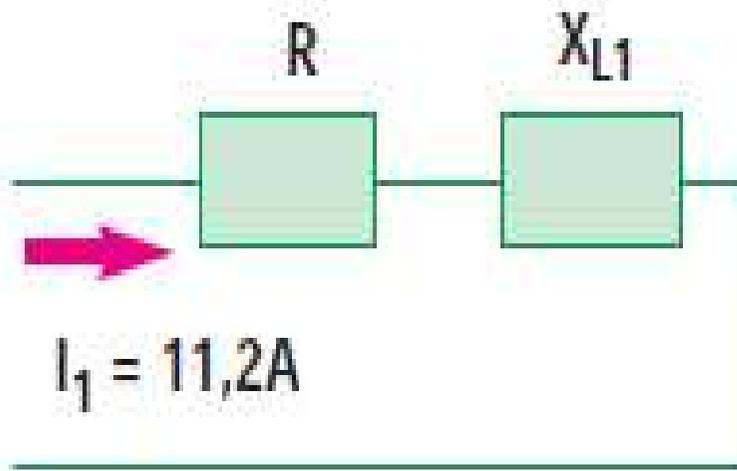
$$P_{TOTAL} = 100 + 25 = 125W$$

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

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

## B) AUMENTO DA QUEÇA DE TENSÃO

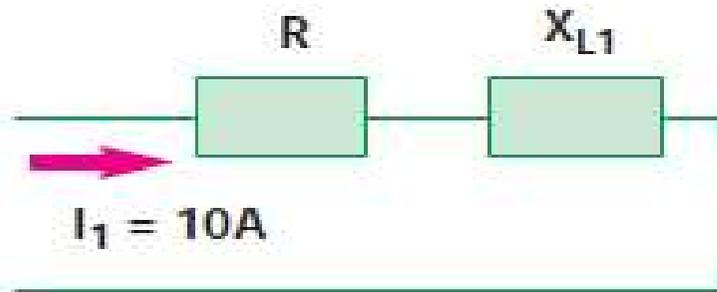
- SEM HARMÔNICAS



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

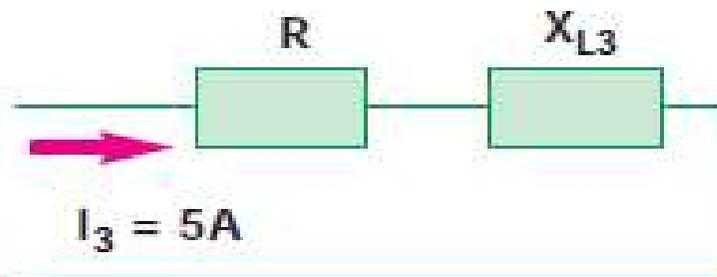
$$U_1 = 1,4 \cdot 11,2 = 16V$$

• COM 3ª HARMÔNICA



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

+



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

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