



# **Workshop** *Instalações Elétricas de Baixa Tensão*

**Qualidade de energia  
Harmônicas**

# Qualidade de energia

## Harmônica

<b>1</b>	<b>Generalidades.....</b>	<b>04</b>
1.1	Definição e origem das harmônicas.....	04
1.1.1	Deformação de um sinal senoidal.....	04
1.1.2	Origem das harmônicas.....	04
1.2	Por que detectar as harmônicas e as combater?.....	05
1.2.1	As perturbações causadas por harmônicas.....	05
1.2.2	O impacto econômico destas perturbações.....	06
1.2.3	Conseqüências cada vez mais consideráveis.....	06
1.2.4	Na prática, quais harmônicas medir e combater?.....	06
<b>2</b>	<b>Os indicadores essenciais da distorção harmônica e os princípios de medição .....</b>	<b>06</b>
2.1	Fator de potência.....	06
2.1.1	Definição.....	06
2.1.2	Interpretação do valor do fator de potência.....	06
2.2	Fator de crista.....	06
2.2.1	Definição.....	06
2.2.2	Interpretação do valor do fator de crista.....	07
2.3	Potência e harmônicas.....	07
2.3.1	Potência ativa.....	07
2.3.2	Potência reativa.....	07
2.3.3	Potência de distorção.....	07
2.4	Espectro em frequência e taxa de harmônica.....	07
2.4.1	Princípio.....	07
2.4.2	Taxa individual de harmônica (ou taxa de harmônica da ordem h).....	07
2.4.3	Espectro em frequência.....	07
2.4.4	Valor eficaz.....	08
2.5	Taxa de distorção harmônica (THD).....	08
2.5.1	Definição do THD.....	08
2.5.2	THD em corrente ou em tensão.....	08
2.5.3	Caso particular: o THF.....	08
2.5.4	Relação entre fator de potência e THD.....	08
2.6	Interesse de cada um dos indicadores.....	09
<b>3</b>	<b>A medição dos indicadores.....</b>	<b>09</b>
3.1	Quais aparelhos para medir estes indicadores?.....	09
3.1.1	A escolha de um aparelho.....	09
3.1.2	Funções asseguradas pelos analisadores numéricos.....	09
3.1.3	Princípio dos analisadores, modo de tratamento de dados.....	09
3.2	Procedimento para análise harmônica da rede.....	10
3.3	Antecipar a luta contra as harmônicas.....	10
3.3.1	Privilegiar os aparelhos de medição instalados permanentemente sobre a rede.....	10
3.3.2	Tirar proveito de aparelhos de medição ou de detecção integrados.....	10
<b>4</b>	<b>Principais efeitos das harmônicas nas instalações.....</b>	<b>10</b>
4.1	Fenômeno de ressonância.....	10
4.2	Aumento das perdas.....	11
4.2.1	Perdas nos condutores.....	11
4.2.2	Perdas nas máquinas assíncronas.....	11
4.2.3	Perdas nos transformadores.....	11
4.2.4	Perdas nos capacitores.....	12
4.3	Sobrecargas dos materiais.....	12
4.3.1	Alternadores.....	12
4.3.2	No-break.....	12
4.3.3	Máquinas assíncronas.....	12
4.3.4	Transformadores.....	12
4.3.5	Capacitores.....	13
4.3.6	Condutores de neutro.....	13
4.4	Perturbações das cargas sensíveis.....	14
4.4.1	Efeito da deformação da tensão de alimentação.....	14
4.4.2	Degradação dos sinais telefônicos.....	14

4.5	Impacto econômico.....	14
4.5.1	Perdas energéticas.....	14
4.5.2	Custo adicional da contratação de serviço.....	14
4.5.3	Sobredimensionamento dos materiais.....	14
4.5.4	Redução da vida dos materiais.....	14
4.5.5	Disparos intempestivos e parada da instalação.....	14
4.5.6	Quaisquer exemplos.....	14
<b>5</b>	<b>Os dispositivos normativos/meio ambiente normativo e regulamentar.....</b>	<b>14</b>
5.1	Normas de compatibilidade entre redes elétricas e produtos.....	15
5.2	Valores máximos de harmônicas aceitáveis.....	15
5.3	Normas de qualidade da rede.....	15
5.4	Normas de produtos.....	15
<b>6</b>	<b>As soluções para atenuar as harmônicas.....</b>	<b>15</b>
6.1	Soluções base.....	15
6.1.1	Posicionar as cargas poluentes em a montante da rede.....	15
6.1.2	Reagrupar as cargas poluentes.....	15
6.1.3	Separar as fontes.....	15
6.1.4	Utilizar transformadores em conjugados isolados.....	16
6.1.5	Inserir indutâncias na instalação.....	16
6.1.6	Escolher um esquema de aterramento adaptado.....	16
6.2	Ações no caso de ultrapassagem dos valores limites.....	16
6.2.1	Filtro passivo.....	16
6.2.2	Filtro ativo (ou compensador ativo).....	16
6.2.3	Filtro híbrido.....	17
6.2.4	Crêterios de escolha.....	17
<b>7</b>	<b>Os dispositivos de detecção.....</b>	<b>17</b>
7.1	A detecção.....	17
7.1.1	As centrais de medição.....	17
7.1.2	A exploração das centrais de medição.....	18
<b>8</b>	<b>As soluções para atenuar as harmônicas.....</b>	<b>19</b>
8.1	Diagnóstico.....	19
8.2	Produtos específicos.....	19
8.2.1	Filtros passivos.....	19
8.2.2	Filtros ativos.....	19
8.2.3	Filtros híbridos.....	19

# 1 Generalidades

"A presença de harmônicas é sinônimo de uma onda de tensão ou de corrente deformada.

A deformação da onda de tensão ou de corrente significa que a distribuição de energia elétrica é perturbada e que a Qualidade de Energia não é ótima".

## 1.1 Definição e origem das harmônicas

### 1.1.1 Deformação de um sinal senoidal

O Teorema de Fourier indica que toda função periódica não senoidal pode ser representada sob a forma de uma soma de expressões (série) que é composta:

- de uma expressão senoidal em frequência fundamental,
- de expressões senoidais cujas frequências são múltiplos inteiros da fundamental (harmônicas),
- e de uma eventual componente contínua.

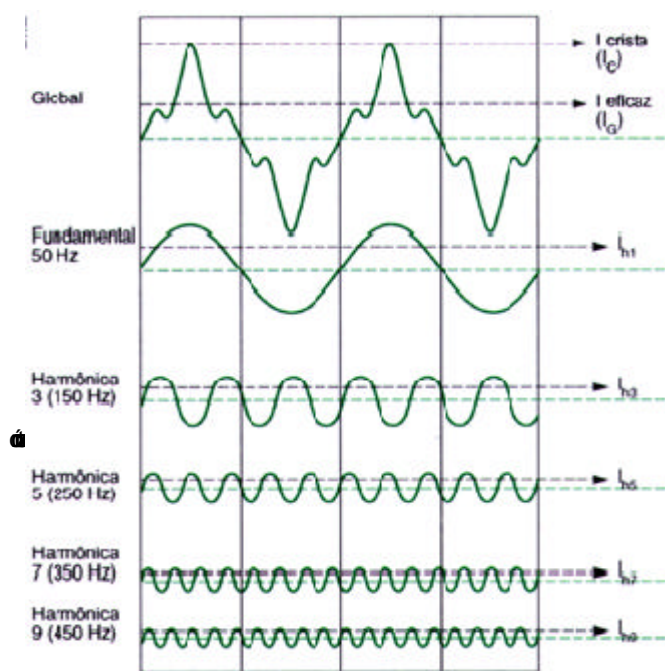


Fig. 1: exemplo de correntes comportando harmônicas, e decomposição da corrente global em seus componentes harmônicos de ordem 1 (fundamental), 3, 5, 7 e 9.

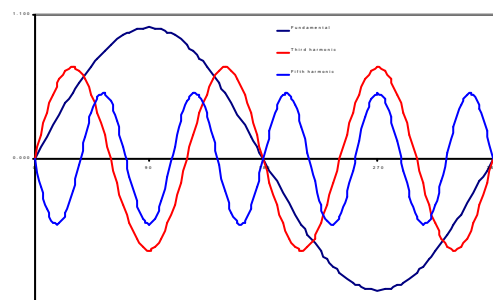


Fig. 2: fundamental com presença da terceira e quinta harmônica.

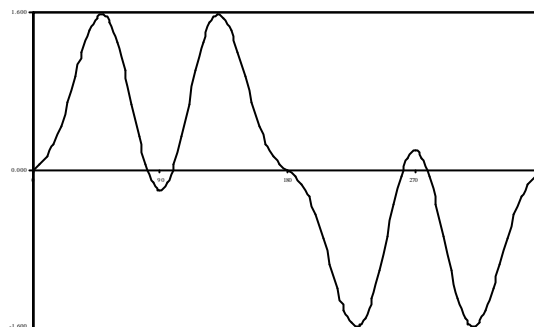


Fig. 3: composição da forma de onda

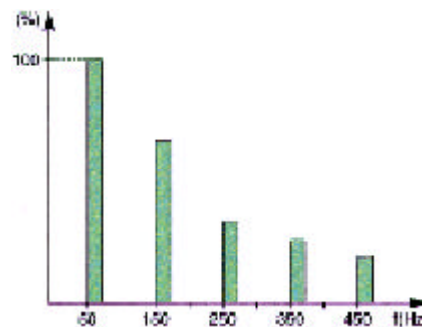


Fig. 4: espectro de um sinal de componente fundamental 50 Hz, e comportando harmônicas de ordens 3 (150 Hz), 5 (250 Hz), 7 (350 Hz) e 9 (450 Hz).

### 1.1.2 Origem das harmônicas

"As correntes harmônicas são geradas pelas cargas não-lineares conectadas a rede. A circulação das correntes harmônicas geram tensões harmônicas através das impedâncias da rede, e então uma deformação da tensão de alimentação".

Antigamente predominavam cargas lineares com valores de impedância fixo (iluminação incandescente, cargas de aquecimento, motores sem controle de velocidade).

Atualmente surgiram cargas não-lineares geradoras de poluição elétrica (harmônicas).

Os dispositivos geradores de harmônicas são apresentados em todos os setores industriais, comerciais e domésticos. As harmônicas são resultados de cargas não-lineares.

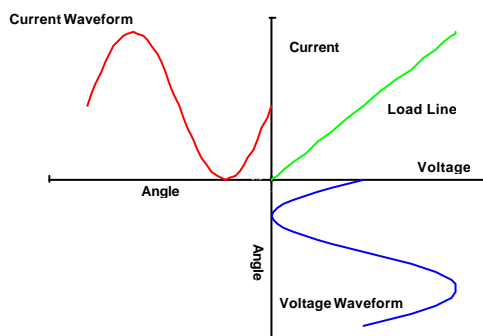


Fig. : cargas lineares

### Carga não-linear: definição

Uma carga é dita não-linear quando a corrente que ela absorve não tem a mesma forma da tensão que a alimenta.

### Exemplos de cargas não-lineares

Tipicamente, as cargas utilizando a eletrônica de potência são não-lineares.

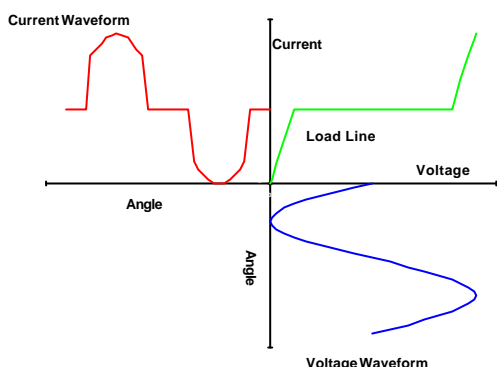


Fig. 8: cargas não-lineares

Elas são cada vez mais numerosas e sua contribuição consumo de energia cresce sem cessar.

### Como exemplo, podemos citar:

- os equipamentos industriais (máquinas de solda,...)
- os inversores de frequência para motores assíncronos ou motores em corrente contínua,
- os equipamentos de escritório (computadores, máquinas copiadoras, fax,...),
- os aparelhos domésticos (TV, forno microondas, iluminação néon,...),
- os no-break's.

Igualmente, não-lineares imputáveis às saturações nos equipamentos (transformadores principalmente) podem se manifestar.

### Perturbações indutivas por cargas não-lineares: corrente e tensão harmônicas

A alimentação de cargas não-lineares gera correntes harmônicas, circulando na rede.

A tensão harmônica é causada pela circulação da corrente harmônica nas impedâncias dos circuitos de alimentação (conjunto transformador e rede, no caso da figura).



Fig. 9: esquema unifilar representando a impedância do circuito de alimentação.

Dizemos que a impedância de um condutor aumenta em função da frequência da corrente que o percorre, para cada corrente harmônica de ordem  $h$  corresponde então uma impedância de circuito de alimentação.

A corrente harmônica de ordem  $h$  vai gerar através da impedância uma tensão harmônica, com  $V_h = Z_h \times I_h$ , por simples aplicação da lei de Ohm. A tensão em B é então deformada. Todo aparelho alimentado à partir do ponto B receberá uma tensão perturbada.

Esta deformação será tanto mais forte que as impedâncias da rede são consideráveis, para uma corrente harmônica dada.

### Circulação das harmônicas nas redes

Para melhor compreender o fenômeno das correntes harmônicas, podemos considerar que tudo se passa como se as cargas não-lineares reinjetassem uma corrente harmônica na rede, em direção da fonte.

As figuras apresentam uma visão de uma instalação poluída pelas harmônicas considerando todo acesso a instalação percorrida pela corrente de frequência 60 Hz, a qual se sobrepõe a instalação percorrida pela corrente harmônica de ordem  $h$ .



Fig. 8: esquema de uma instalação alimentando uma carga não-linear, para a qual só consideramos os fenômenos ligados a frequência 60 Hz (frequência fundamental).

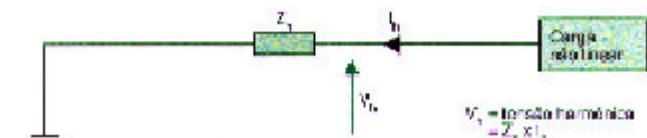


Fig. 9: esquema da mesma instalação, para a qual só consideramos os fenômenos ligados a frequência da harmônica de ordem  $h$ .

A alimentação desta carga não-linear gerada na rede a circulação da corrente  $I_{60Hz}$ , a qual se acrescenta cada uma das correntes harmônicas  $I_h$  correspondente a cada harmônica da ordem  $h$ .

Considerando o modelo das cargas reinjetando uma corrente harmônica na rede, podemos representar a circulação das correntes harmônicas em uma rede na figura.

Nesta figura, podemos notar que se certas cargas geram na rede correntes harmônicas, outras cargas podem absorver estas correntes.

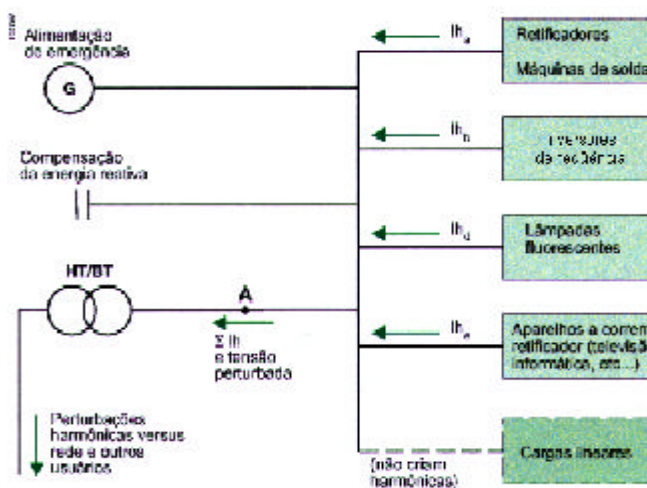


Fig. 10: circulação de correntes harmônicas em uma rede.

## 1.2 Por que detectar as harmônicas e as combater?

### 1.2.1 As perturbações causadas por harmônicas

As harmônicas circulam nas redes deteriorando a qualidade da energia, e são assim a origem de numerosos prejuízos:

- sobrecarga das rede de distribuição por aumento da corrente eficaz,

- sobrecarga dos condutores de neutro em razão da soma das harmônicas de ordem 3 geradas pelas cargas monofásicas,
- sobrecarga, vibrações e envelhecimento dos alternadores, transformadores, motores, ruídos dos transformadores,
- sobrecarga e envelhecimento dos capacitores de compensação de energia reativa,
- deformação da tensão de alimentação podem perturbar receptores sensíveis,
- perturbação das redes de comunicação ou das linhas telefônicas.

### 1.2.2 O impacto econômico destas perturbações

As harmônicas tem um impacto econômico considerável. Neste caso:

- o envelhecimento precoce do material leva a substituí-lo mais tarde, a menos que seja sobredimensionado.
- as sobrecargas da rede obrigam a aumentar a potência necessária, e implicam, a menos que haja um sobredimensionamento das instalações, perdas suplementares,
- as deformações da corrente provocam disparos intempestivos e a parada das instalações da produção.

Estes custos de material, perdas energéticas e perda de produtividade ocasionam uma baixa competitividade das empresas.

### 1.2.3 Consequências cada vez mais consideráveis

O fenômeno das harmônicas era pouco considerada pois seus efeitos sobre as redes eram geralmente pouco importantes. Mais a chegada da eletrônica de potência nos receptores tem amplificado fortemente o fenômeno em todos os setores da atividade.

As harmônicas são tanto mais difíceis para combater que os equipamentos vitais para a empresa são frequentes responsáveis pela geração das perturbações.

### 1.2.4 Na prática, quais harmônicas medir e combater?

As harmônicas frequentemente encontradas nos casos de redes trifásicas, na prática as mais incômodas, são as harmônicas de ordens ímpares.

Além da ordem 50, as correntes harmônicas são desprezíveis e sua medição não é mais significativa.

Assim, uma boa precisão da medição é obtida considerando as harmônicas até a ordem 30.

Os distribuidores de energia supervisionam as harmônicas de ordem 3, 5, 7, 11 e 13.

Assim, a compensação das harmônicas até a ordem 13 é imperativa, uma boa compensação leva igualmente em conta as harmônicas até a ordem 25.

## 2 Os indicadores essenciais da distorção harmônica e os princípios de medição

*"Existem indicadores que permitem quantificar e avaliar a distorção harmônica das ondas de tensão e de corrente.*

Estes são:

- o fator de potência,
- o fator de crista,
- a potência de distorção,
- o espectro em frequência,
- a taxa de distorção harmônica.

*Estes indicadores são indispensáveis para determinação das ações corretivas eventuais".*

### 2.1 Fator de potência

É utilizado FP, para fator de potência.

#### 2.1.1 Definição

O fator de potência é igual a relação entre a potência ativa P e a potência aparente S.

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

Na linguagem dos eletricitistas, é muito frequente confundir com o coseno phi ( $\cos \phi$ ), cuja a definição é:

$$\cos \phi = \frac{P_1}{S_1}$$

P1 = Potência ativa da fundamental.

S1 = Potência reativa da fundamental.

Ora, o  $\cos \phi$  se relaciona unicamente a frequência fundamental, e, na presença de harmônicas, é então diferente do fator de potência FP.

#### 2.1.2 Interpretação do valor do fator de potência

Uma primeira indicação da presença significativa de harmônicas pode ser um fator de potência FP medido diferente do  $\cos \phi$  (o fator de potência será inferior ao  $\cos \phi$ ).

### 2.2 Fator de crista

#### 2.2.1 Definição

É a relação entre o valor de crista da corrente ou da tensão ( $I_m$  ou  $U_m$ ) e o valor eficaz.

$$k = \frac{I_m}{I_{eff}} \quad \text{ou} \quad k = \frac{U_m}{U_{eff}}$$

Para um sinal senoidal, este fator é então igual a r.

Para um sinal não senoidal, pode ser que seja inferior, seja superior a  $\sqrt{2}$ .

Este fator é mais particularmente útil para atrair a atenção sobre a presença de valores de crista excepcionais em relação ao valor eficaz.

O valor de crista nos equipamentos eletrônicos tem relação direta com o disparo de diodos e outros componentes. Observando o gráfico1, somente com o sinal 1, o disparo de um diodo ocorreria em um tempo igual a 15 e com o sinal T (com harmônicas), o disparo ocorreria em um tempo igual a 13 (antes!).



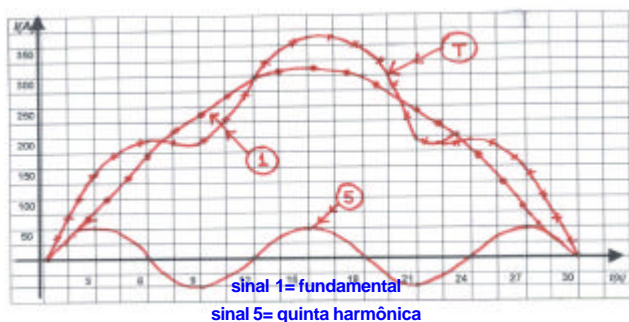


Fig. 11: gráfico 1.

Tabela do gráfico 1

Sinal	$I_p(A)$	$I_{eff}(A)$	FC	Obs.:
1	310	219,2	1,41	Senóide
5	50	35,4	1,41	Senóide
T	360	222	1,62	distorcida

## 2.2.2 Interpretação do valor do fator de crista

O fator de crista típico das correntes absorvidas pelas cargas não-lineares é muito superior a  $\sqrt{2}$ : pode tomar valores iguais a 1,5 ou 2, chegando até 5 nos casos críticos.

Um fator de crista muito elevado significa sobrecargas pontuais consideráveis. Estas sobrecargas, detectadas pelos dispositivos de proteções, podem ser a origem dos disparos intempestivos.

## 2.3 Potência e harmônicas

### 2.3.1 Potência ativa

A potência ativa  $P$  de um sinal comportando harmônicas é a soma das potências ativas causadas por tensões e correntes de mesma ordem.

A decomposição da tensão e da corrente em suas componentes harmônicas nos dá:

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} U_h I_h \cos \varphi_h$$

$\varphi_h$  seria a defasagem entre a tensão e a corrente harmônica de ordem  $h$ .

Nota;

supomos que o sinal não comporta componente contínua:  $U_0=I_0=0$ , na ausência de harmônicas, encontramos a expressão  $P=U_1 I_1 \cos \varphi_1$ , potência de um sinal senoidal,  $\cos \varphi$ , seria o  $\cos \varphi$ .

### 2.3.2 Potência reativa

A potência é definida somente para a fundamental, seja:

$$Q = U_1 \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1$$

### 2.3.3 Potência de distorção

Consideramos a potência aparente  $S$ :

$$S = U_{eff} \cdot I_{eff}$$

Na presença de harmônicas, podemos escrever:

$$S^2 = \left( \sum_{h=1}^{\infty} U_h^2 \right) \left( \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 \right)$$

Em consequência, na presença de harmônicas, a relação  $S^2=P^2+Q^2$  não é válida. Definimos a potência de distorção  $D$  tal que:  $S^2=P^2+Q^2+D^2$ , seja;

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

## 2.4 Espectro em frequência e taxa de harmônica

### 2.4.1 Princípio

Cada tipo de aparelho possui sua própria característica de correntes harmônicas, com amplitudes e defasagem diferentes.

Estes valores, notadamente a amplitude para cada ordem de harmônica, são essenciais para análise.

### 2.4.2 Taxa individual de harmônica (ou taxa de harmônica da ordem $h$ )

Definimos taxa individual de harmônica como a porcentagem de harmônica de ordem  $h$  dividida pela fundamental:

$$u_h(\%) = 100 \frac{U_h}{U_1} \quad \text{ou} \quad i_h(\%) = 100 \frac{I_h}{I_1}$$

### 2.4.3 Espectro em frequência

Representando a amplitude de cada ordem de harmônica, na presença de sua frequência, obtemos uma representação sob forma de histograma, chamada análise espectral.

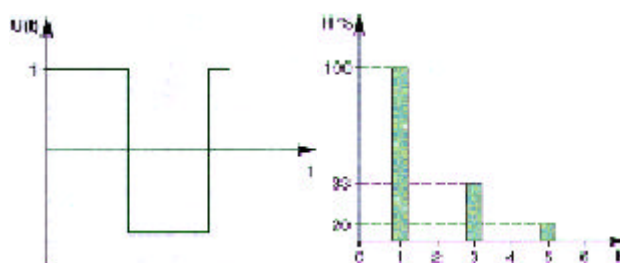


Fig. 12: análise espectral de um sinal retangular, para a tensão  $U(t)$ .

#### 2.4.4 Valor eficaz

O valor eficaz da corrente ou da tensão pode se calcular em função do valor eficaz das diferentes gamas de harmônicas:

$$I_{\text{eff}} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}$$

$$U_{\text{eff}} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} U_h^2}$$

### 2.5 Taxa de distorção harmônica (THD)

"THD corresponde à Total Harmonic Distortion (taxa de distorção harmônica global).

A taxa de distorção harmônica é uma notação muito utilizada para definir a importância do conteúdo harmônico de um sinal alternado".

#### 2.5.1 Definição do THD

Para um sinal y, a taxa de distorção harmônica THD é definida pela fórmula:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} y_h^2}}{y_1}$$

Esta notação segue a definição da norma IEC 61000-2-2. Notar que seu valor pode ultrapassar 1.

Segundo a norma, podemos geralmente limitar h a 50. Esta grandeza permite avaliar com a ajuda de um número único da deformação de uma tensão ou de uma corrente circulando em um ponto da rede.

A taxa de distorção harmônica é geralmente expressa em porcentagem.

#### 2.5.2 THD em corrente ou em tensão

Quando se refere harmônicas de corrente, a expressão deve:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1}$$

Esta fórmula é equivalente a fórmula seguinte, mais direta e mais fácil de utilizar quando conhecemos o valor eficaz total:

$$THD_I = \sqrt{\left(\frac{I_{\text{eff}}}{I_1}\right)^2 - 1}$$

Quando se refere harmônicas em tensão, a expressão deve:

$$THD_u = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_1}$$

#### 2.5.3 Caso particular: o THF

Em certos países, onde os hábitos são diferentes, utilizamos uma outra função para caracterizar a distorção substituindo o valor fundamental da tensão  $U_1$  ou da corrente  $I_1$  por seus valores eficazes respectivos  $U_{\text{ef}}$  ou  $I_{\text{ef}}$ .

Para fazer a distorção, notaremos THF (fator harmônica total) no lugar do THD.

Exemplo do THF em tensão:

$$THF_u = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_{\text{eff}}}$$

O THF (em tensão ou em corrente) é frequentemente inferior a 100%. Permitindo uma medição analógica dos sinais mais fácil, esta notação é contudo cada vez menos utilizada. No caso, quando o sinal é pouco deformado, este valor é pouco diferente do THD definido anteriormente. Em compensação, é pouco adaptada nos casos de medição de sinais muito deformados pois não pode ultrapassar um valor de 100%, contrariamente ao THD definido anteriormente.

#### 2.5.4 Relação entre fator de potência e THD

Com uma tensão senoidal ou quase senoidal, podemos considerar:

$$P \# P_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \phi_1$$

$$\text{Em consequência: } FP = \frac{P}{S} \# \frac{U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \phi_1}{U_1 \cdot I_{\text{eff}}}$$

$$\text{ou: } \frac{I_1}{I_{\text{eff}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_I^2}}$$

de onde:

$$FP \# \frac{\cos \phi_1}{\sqrt{1 + THD_I^2}}$$

de onde a representação de  $FP/\cos \phi$  em função do THDi.  $FP/\cos \phi = f(THDi)$

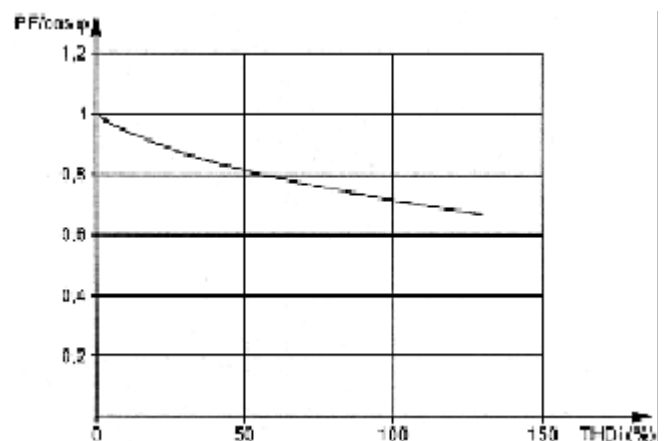


Fig. 13: variação de  $PF/\cos \phi$  segundo THDi com  $THDu = 0$ .



## 2.6 Interesse de cada um dos indicadores

*"O indicador essencial é o THD que traduz através de uma só grandeza a deformação da onda em tensão ou em corrente.*

*O espectro mostra a característica do sinal deformado".*

■ **O THD em tensão** caracteriza a deformação da onda de tensão.

Valor do THDu medido e fenômenos absorvidos em uma instalação:

Um valor de THDu inferior a 5% é considerado como normal. Algum disfuncionamento não é temido.

Um valor de THDu compreendido entre 5 e 8% revela uma poluição harmônica significativa. Quaisquer disfuncionamentos são possíveis.

Um valor de THDu superior a 8% revela uma poluição harmônica considerável. Disfuncionamentos são prováveis. Uma análise aprofundada e a colocação de dispositivos de atenuação são necessários.

■ **O THD em corrente** caracteriza a deformação de onda de corrente.

A procura do poluidor se efetua medindo o THD em corrente na entrada e em cada uma das saídas de diferentes circuitos, afim de se orientar em direção ao perturbador.

Valor do THDi medido e fenômenos absorvidos em uma instalação:

Um valor de THDi inferior a 10% é considerado como normal. Algum disfuncionamento não é temido.

Um valor de THDi compreendido entre 10 e 50% revela uma poluição harmônica significativa. Existe risco de aquecimento, este que implica o sobredimensionamento dos cabos e das fontes.

Um valor de THDi superior a 50% revela uma poluição harmônica considerável. Desfuncionamentos são prováveis. Uma análise aprofundada e a colocação de dispositivos de atenuação são necessários.

■ **O fator de potência** FP permite avaliar o sobredimensionamento à aplicar a alimentação de uma instalação.

■ **O fator de crista** é utilizado para caracterizar a aptidão de um gerador a fornecer correntes instantâneas de valor elevado. O material informático por exemplo absorve uma corrente muito deformada cujo o fator de crista pode atender 3.

■ **O espectro** (decomposição em frequência do sinal) dada uma outra representação de sinais elétricos, e permite avaliar sua deformação.

## 3 A medição dos indicadores

### 3.1 Quais aparelhos para medir estes indicadores?

#### 3.1.1 A escolha de um aparelho

Somente os analisadores numéricos, aparelhos de tecnologia recente, permitem determinar de maneira suficientemente precisa o valor do conjunto desses indicadores.

Para relembrar, falaremos de outros métodos de observação e de medição:

■ **observação por meio de um osciloscópio**

Uma primeira indicação da deformação do sinal pode ser obtido visualizando a corrente ou a tensão sobre um osciloscópio.

A forma de onda, se ele difere de uma senóide, coloca em evidência a presença de harmônicas. Os picos de tensão ou de corrente podem ser assim visualizados.

É necessário notar que esta aproximação não permite uma quantificação precisa das componentes harmônicas.

■ **os analisadores de espectro analógicos**

Baseados em uma tecnologia antiga, estes aparelhos são constituídos por filtros passa-faixa associados a um voltímetro em valor eficaz.

Estes aparelhos, hoje ultrapassados, tem performances médios, e não fornecem informações de defasagem.

#### 3.1.2 Funções asseguradas pelos analisadores numéricos

Os microprocessadores equipam os analisadores numéricos:

■ **calculando os valores dos indicadores do nível de harmônicas** (fator de potência, fator de crista, potência de distorção, THD),

■ **realizam diversas funções complementares** (correções, detecções estatísticas, gestão de medição, visualização, comunicação,...),

■ **podem, se eles são multicanais, fornecer quase em tempo real as decomposições espectrais simultâneas de tensões e de correntes.**

#### 3.1.3 Princípio dos analisadores, modo de tratamento de dados

Os sinais analógicos são convertidos em uma sequência de valores numéricos.

Um algoritmo utilizando a Transformada de Fourier Compacta (em inglês Fast Fourier Transform, FFT) calcula a partir desses valores as amplitudes e as fases das harmônicas para um grande número de janelas temporais de observação.

O mais tardar analisadores numéricos medem as harmônicas até as ordens 20 ou 25 para o cálculo do THD.

O tratamento dos valores sucessivos calculados pelo FFT (classificação, estatísticas) pode ser efetuado pelo aparelho de medição ou realizado por um programa externo.

### 3.2 Procedimento para a análise harmônica da rede

Esta tomada de medição se efetua no setor industrial ou comercial:

- a título preventivo:
  - para fazer a estimação global do estado da rede (cartografia da rede),
- a título corretivo:
  - para diagnosticar um problema de perturbação, e encarar soluções para o suprimir,
  - para verificar a conformidade de uma solução (seguido de uma modificação da rede para verificar a diminuição das harmônicas).

#### *Procedimento*

Estudamos a tensão e a corrente no nível:

- da fonte de alimentação,
- do jogo de barras do quadro de distribuição principal (ou do jogo de barras AT),
- e de cada uma das entradas do quadro de distribuição principal (ou do jogo de barras AT).

Quando de medições, é necessário conhecer as condições precisas da instalação, em particular o estado dos bancos de capacitores serviço, número de crescente de disparos).

O resultado da análise será:

- o desclassificação eventual do material a instalar, ou bem,
- a quantificação das proteções e filtragem contra as harmônicas à posicionar sobre a rede,
- a comparação dos valores medidos aos valores de referência dos distribuidores de energia: valores limites de taxa de harmônicas, valores aceitáveis, valores de referência.

#### *Utilização de aparelho de medição*

Os aparelhos servem para indicar os efeitos instantâneos e os efeitos a longo termo das harmônicas.

Temos necessidade de valores integrados sobre durações indo de quaisquer segundos à quaisquer minutos, para períodos de observação de quaisquer dias.

As grandezas a recuperar são:

- as amplitudes de tensões e correntes harmônicas,
- a taxa de harmônica para cada ordem de correntes e de tensões,
- a taxa de distorção harmônica da corrente e da tensão,
- eventualmente o valor da defasagem entre tensão e corrente harmônicas de mesma ordem, e a fase de harmônicas em relação a uma referência comum (a tensão fundamental por exemplo).

### 3.3 Antecipar a luta contra as harmônicas

Os indicadores do nível de harmônica podem ser medidos:

- por aparelhos instalados permanentemente sobre a rede,
- por um perito para uma visão pontual.

#### 3.3.1 Privilegiar os aparelhos de medição instalados permanentemente sobre a rede

Por várias razões, a instalação para permanência de aparelhos de medição sobre a rede resta privilegiar:

- uma intervenção pontual do perito, quando ocorrer medições em diferentes pontos da instalação e em um período determinado longo (1 semana a um mês) dão uma

visão global do funcionamento da instalação, e levam em conta todos os casos mostrados que podem se apresentar seguindo:

- a flutuação da fonte de alimentação,
- as variações de funcionamento da instalação,
- aos novos equipamentos acrescentados a instalação.
- os aparelhos de medição instalados sobre a rede preparando e facilitando o diagnóstico dos peritos, reduzindo assim a duração e o número de suas intervenções,
- os aparelhos de medição em substituição detectarão as novas perturbações causadas à instalação de novos equipamentos, a de novos modos de funcionamento, ou à flutuações da rede de alimentação.

#### 3.3.2 Tirar proveito de aparelhos de medição ou de detecção integrados

Os aparelhos de detecção ou medição integrados aos equipamentos de distribuição elétrica:

- no caso de estimação global da rede de distribuição (análise preventiva), evitam:
  - a locação de material de medição,
  - intervenções de peritos,
  - as conexões e desconexões dos materiais de medição.

Para a estimação global da rede, a estimação feita ao nível dos quadros gerais de distribuição (TGBT) pode tipicamente ser realizada pelo aparelho de entrada e/ou os aparelhos de medição integrados a cada saída.

- no caso da análise corretiva os aparelhos permitem:
  - reencontrar as condições de funcionamento que existirá no momento do incidente,
  - uma cartografia da rede, e a relação da solução substituição.

O diagnóstico será completo pela utilização de materiais adaptados ao problema avaliado.

## 4 Principais efeitos das harmônicas nas instalações

*"As harmônicas tem um impacto econômico considerável nas instalações:*

- *aumento das despesas com energia,*
- *envelhecimento dos materiais,*
- *perdas de produtividade".*

### 4.1 Fenômeno de ressonância

A associação sobre as redes de elementos capacitivos e indutivos ocasionam a aparição de fenômenos de ressonância. Manifestado por valores extremamente elevados ou extremamente fracos das impedâncias. Estas variações de impedância vão modificar as correntes e tensões presentes sobre a rede.

Não consideramos aqui não mais que fenômenos de tipo ressonância paralela que são mais frequentes.

Consideramos o esquema simplificado seguinte, representando uma instalação compreendendo:

- um transformador de alimentação,
- cargas lineares,
- cargas não-lineares geradoras de correntes harmônicas,
- capacitores de compensação.

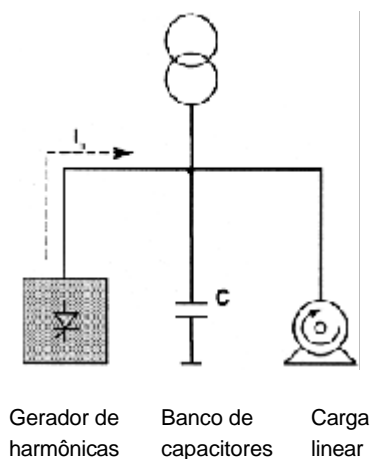
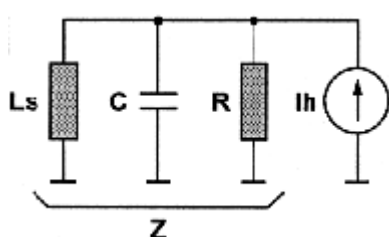


Fig. 14: análise harmônica.

Para uma análise harmônica, o esquema equivalente é o seguinte:



Ls: indutância da alimentação (rede + transfo + linha)  
C: capacidade de compensação  
R: resistência das cargas lineares  
Ir: corrente harmônica.

Fig. 15: análise harmônica.

$$Z = \frac{jL_s \omega}{1 - L_s C \omega^2} \text{ desprezando R}$$

Existe ressonância quando o denominador  $1 - L_s C \omega^2$  tende a zero. A frequência correspondente é então chamada frequência de ressonância do circuito. Tendo esta frequência, a impedância terá seu valor máximo. Existe então uma aparição de tensões harmônicas consideráveis e então uma forte distorção de tensão. Estas distorções de tensões se acompanham de circulações de correntes harmônicas em circuitos  $L_s + C$  superiores às correntes harmônicas injetadas.

A rede de alimentação assim como que os capacitores de compensação são submetidos às correntes harmônicas consideráveis e então à riscos de sobrecarga.

## 4.2 Aumento das perdas

### 4.2.1 Perdas nos condutores

A potência ativa transmitida a uma carga é função da corrente fundamental. Quando a corrente absorvida pela carga contém harmônicas, o valor eficaz dessa corrente,  $I_{\text{eff}}$ , é superior a fundamental  $I_1$ .

A definição do THD da:

$$\text{THD} = \sqrt{\left(\frac{I_{\text{eff}}}{I_1}\right)^2 - 1}$$

de onde deduzimos:

$$I_{\text{eff}} = I_1 \sqrt{1 + \text{THD}^2}$$

Sobre a figura seguinte temos representados, em função da taxa de distorção harmônica:

- o crescimento da corrente eficaz  $I_{\text{ef}}$  por uma carga absorvendo uma corrente fundamental dada,
- o crescimento das perdas Joule, P Joules, sem levar em conta o efeito de contato.

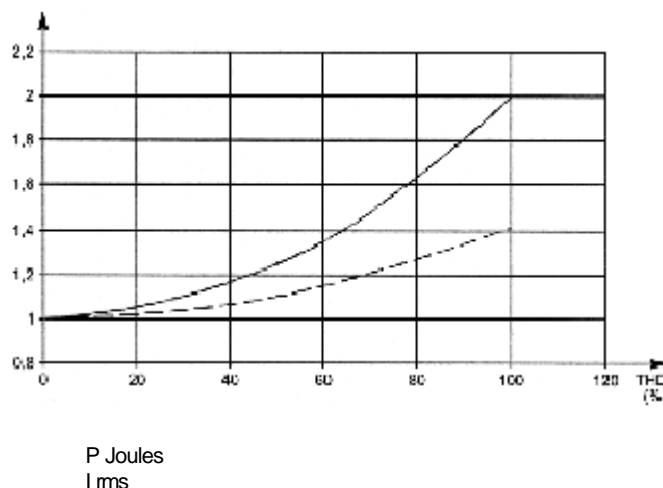


Fig. 16: evolução da corrente eficaz e das perdas Joule em função do valor do THD.

### 4.2.2 Perdas nas máquinas assíncronas

As tensões harmônicas aplicadas às máquinas assíncronas provocam a circulação de correntes de frequências superiores a 60 Hz, no rotor. Estas correntes são então responsáveis por perdas suplementares, proporcionais a  $U_h^2/h$ .

■ Ordens de grandeza:

- uma tensão de alimentação quase retangular provoca um aumento das perdas de 20%,
  - uma tensão de alimentação com as taxas de harmônicas de ordem  $h$   $u_h$  seguintes:
    - $u_5$ : 8% de  $U_1$ ,  $U_1$  seria a harmônica de ordem 1 (ou tensão fundamental),
    - $u_7$ : 5% de  $U_1$ ,
    - $u_{11}$ : 3% de  $U_1$ ,
    - $u_{13}$ : 1% de  $U_1$ ,
- (seja um THD para a tensão igual a 10%) implica um aumento das perdas de 6%.

### 4.2.3 Perdas nos transformadores

As correntes harmônicas circulam nos transformadores provocando um aumento das perdas nas bobinas pelo efeito Joule e perdas no ferro pelas correntes de Foucault.

Por outro lado, as tensões harmônicas são responsáveis por perdas no ferro por histeresis.

Na primeira aproximação, podemos considerar que as perdas nas bobinas variam como o quadrado de THD em corrente, e as perdas no núcleo linearmente em função do THD em tensão.

■ Ordem de grandeza:

- aumento das perdas de 10 a 15% para os transformadores de distribuição pública, onde as taxas de distorção são limitadas.

#### 4.2.4 Perdas nos capacitores

As tensões harmônicas aplicadas aos capacitores provocam a circulação de correntes proporcionais a frequência harmônica. Estas correntes são responsáveis por perdas suplementares.

##### ■ Exemplo:

Caso de uma tensão de alimentação com as taxas de harmônicas de ordem  $h$   $u_h$  seguintes: tensão fundamental (ou harmônica de ordem 1):  $U_1$ , tensões harmônicas:

- $u_5$ : 8% de  $U_1$ ,
- $u_7$ : 5% de  $U_1$ ,
- $u_{11}$ : 3% de  $U_1$ ,
- $u_{13}$ : 1% de  $U_1$ ,

(este que representa um THD para a tensão igual à 10%).

$$I_1 = U_1 \cdot C \cdot \omega$$

$$I_5 = U_5 \cdot C \cdot 5 \cdot \omega = u_5 \cdot 5 \cdot I_1$$

$$I_7 = U_7 \cdot C \cdot 7 \cdot \omega = u_7 \cdot 7 \cdot I_1$$

$$I_{11} = U_{11} \cdot C \cdot 11 \cdot \omega = u_{11} \cdot 11 \cdot I_1$$

$$I_{13} = U_{13} \cdot C \cdot 13 \cdot \omega = u_{13} \cdot 13 \cdot I_1$$

$$I_{\text{eff}}^2 = I_1^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2$$

$$I_{\text{eff}}^2 = I_1^2 (1 + (u_5 \cdot 5)^2 + (u_7 \cdot 7)^2 + (u_{11} \cdot 11)^2 + (u_{13} \cdot 13)^2) = 1,19$$

$$I_1$$

Neste exemplo, as perdas joule são multiplicadas por  $1,19^2 = 1,4$

#### 4.3 Sobrecarga dos materiais

##### 4.3.1 Alternadores

Os alternadores alimentam cargas não-lineares devendo ser desclassificados em razão das perdas suplementares geradas pelas correntes harmônicas. Este desclassificação é de ordem de 10% para um alternador alimentando 30% de cargas não-lineares, de onde a necessidade de sobredimensionar o aparelho.

Definimos nos casos de fontes (alternadores e transformadores) um coeficiente de desclassificação.

É necessário notar que este coeficiente não é definido da mesma maneira no caso de um alternador ou no caso de um transformador, o coeficiente de desclassificação de um alternador seria mais penalizante.

##### 4.3.2 No-break

A corrente absorvida pelo material informático apresenta um fator de crista elevado. Um no-break dimensionado sobre o único valor de corrente eficaz corre o risco de não poder fornecer a crista de corrente necessária e de se encontrar em sobrecarga.

##### 4.3.3 Máquinas assíncronas

A norma IEC 60892 define uma taxa de harmônicas ponderada (Harmonic Voltage Factor) cuja a expressão e o valor máximo são dados abaixo:

$$HVF = \sqrt{\sum_{h=2}^{13} \frac{U_h \Delta}{h^2}} \leq 0,02$$

##### ■ Exemplo:

Caso de uma tensão de alimentação com as taxas de harmônicas de ordem  $h$   $u_h$  seguintes:

- tensão fundamental: (ou harmônica de ordem 1)  $U_1$ ,
- tensões harmônicas:

-  $u_3$ : 2% de  $U_1$ ,

-  $u_5$ : 3% de  $U_1$ ,

-  $u_7$ : 1% de  $U_1$ ,

seja um THD para a tensão igual a 3,7% e HVF=0,018.

Neste exemplo, a taxa de harmônicas ponderada é muito próxima do valor limite além da qual a máquina deve ser desclassificada.

Uma regra prática consiste a não ultrapassar um  $THD_u$  de 10% para a alimentação da máquina.

#### 4.3.4 Transformadores

A curva seguinte mostra o desclassificação típico à aplicar a um transformador alimentando cargas eletrônicas.

Exemplo: desclassificação de 40% se o transformador alimenta 40% de cargas eletrônicas.

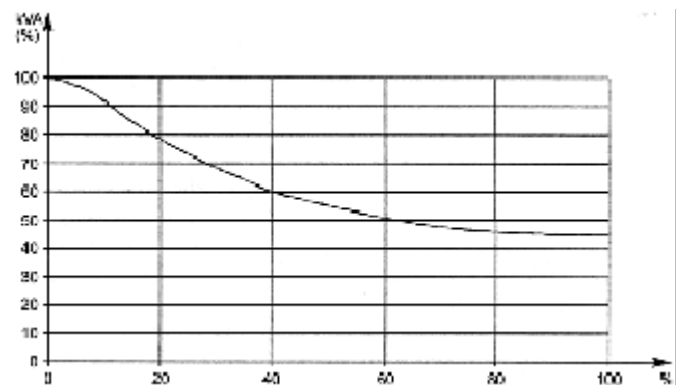


Fig. 17: taxa de desclassificação a aplicar a um transformador alimentando cargas eletrônicas.

■ a norma UTE C15-112 fornece um fator de desclassificação dos transformadores em função das correntes harmônicas:

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,1 \left( \sum_{h=2}^{40} h^{16} \cdot T_h^2 \right)}}$$

$$T_h = \frac{I_h}{I_1}$$

Valores típicos:

□ corrente de forma retangular (espectro em  $1/h$  (\*)):  $k = 0,86$ ,

□ corrente tipo inversor de frequência (THD = 50%):  $k = 0,80$ .

(\*) na realidade, a forma do sinal da corrente se aproxima de uma forma retangular; é o caso para todo retificador de corrente (retificador trifásico).

##### ■ fator k

A norma ANSI C57.110 define um coeficiente de desclassificação chamado fator k pela fórmula seguinte:

$$K = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 \cdot h^2}{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} = \sum_{h=1}^{\infty} \left( \frac{I_h}{I_{\text{eff}}} \right)^2 \cdot h^2$$

Este coeficiente de desclassificação k-factor é mais utilizado na América do norte.

No exemplo seguinte, obtemos um fator k igual a 13:

Ordem h	$I_h$ (%)
5	30
7	20
11	14
13	11
17	8
19	7
23	5
25	4

O sobrecusto de um transformador dimensionado com um tal fator k varia de 30 a 60% seguindo os calibres, em uma região compreendida entre 15 e 500 kVA.

#### 4.3.5 Capacitores

A corrente eficaz circulando nos capacitores não deve exceder segundo a norma, 1,3 vezes sua corrente nominal.

■ Tomando o exemplo acima:

□ uma tensão de alimentação com as taxas de harmônicas de ordem h  $u_h$ ,

□ tensão fundamental: (ou harmônica de ordem 1)  $U_1$ ,

□ tensões harmônicas:

-  $u_5$ : 8% de  $U_1$ ,

-  $u_7$ : 5% de  $U_1$ ,

-  $u_{11}$ : 3% de  $U_1$ ,

-  $u_{13}$ : 1% de  $U_1$ ,

(seja um THD para a tensão igual a 10%),

conduzido à  $\frac{I_{eff}}{I_1} = 1,19$ , a tensão nominal.

Para um valor de tensão igual a 1,1 vezes a tensão nominal,

o limite de  $\frac{I_{eff}}{I_1} = 1,3$  é atendido, devemos então rever o

dimensionamento dos capacitores.

#### 4.3.6 Condutores de neutro

Consideramos o sistema constituído de uma fonte trifásica equilibrada e de 3 cargas monofásicas idênticas conectadas entre fase e neutro:

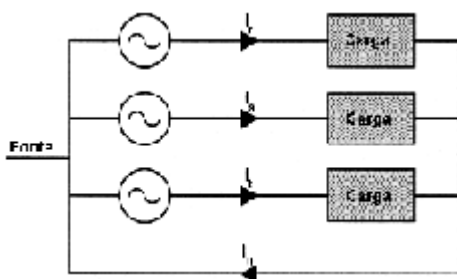


Fig. 18: princípio de circulação das correntes em diferentes condutores religados a uma fonte trifásica.

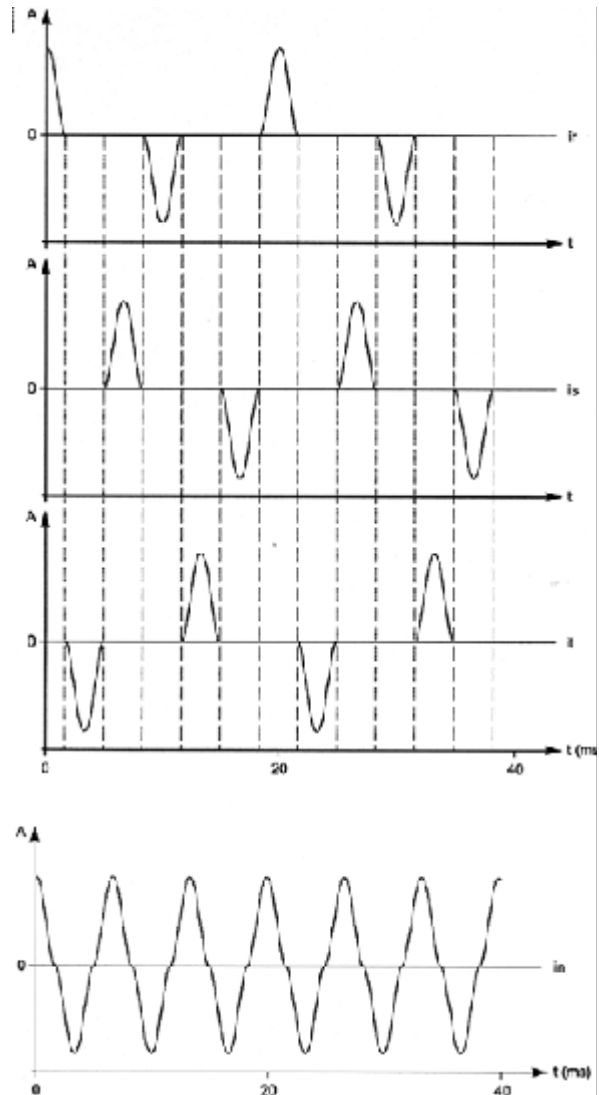


Fig. 19: exemplo de valores de correntes circulando em diferentes condutores ligados a uma carga trifásica: temos  $I_n = i_1 + i_2 + i_3$ .

Neste exemplo, a corrente no condutor de neutro tem um valor eficaz  $\sqrt{3}$  vezes superior a da corrente em uma fase. O condutor de neutro deve então ser reforçado em consequência.

#### ■ Dimensionamento

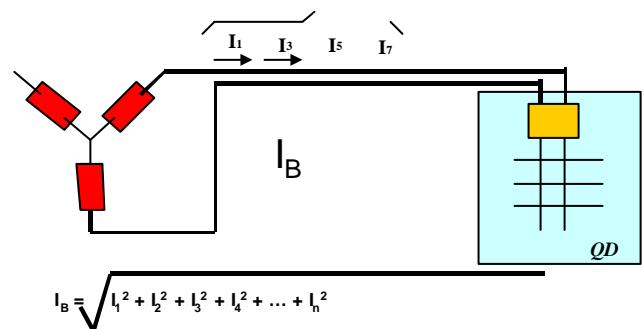


Fig. 20: dimensionamento de condutores fase

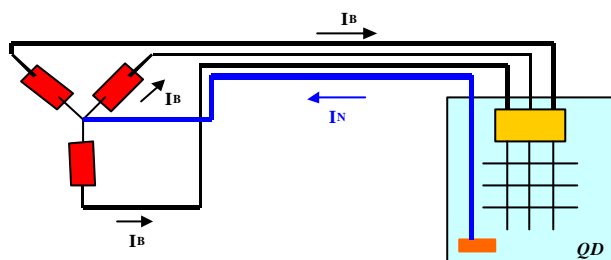


Fig.21: dimensionamento do condutor neutro

$I_N$  = harmônicas de ordem 3 e suas múltiplas se somam algebricamente + correntes de desequilíbrio de cargas monofásicas.

## 4.4 Perturbações das cargas sensíveis

### 4.4.1 Efeito da deformação da tensão de alimentação

■ A deformação da tensão de alimentação pode perturbar o funcionamento de aparelhos sensíveis:

- dispositivos de regulação (temperatura,...),
- material informático,
- dispositivos de controle-comando (relés de proteção).

### 4.4.2 Degradação dos sinais telefônicos

■ As harmônicas geram nos circuitos em corrente fracas perturbações indutivas. O nível dessas perturbações é função da duração do sentido em paralelo dos cabos de potência e de sinal, da distância entre os circuitos e da frequência harmônica.

## 4.5 Impacto econômico

### 4.5.1 Perdas energéticas

As perdas por efeito Joule induzidas pelas correntes harmônicas nos condutores e equipamentos têm origem de perdas energéticas suplementares.

### 4.5.2 Custo adicional da contratação de serviço

A presença de corrente harmônica necessita aumentar o nível de potência necessária, e o custo adicional de contratação de serviço.

Os distribuidores de energia terão cada vez mais tendência a penalizar os produtores de harmônicas.

### 4.5.3 Sobredimensionamento dos materiais

■ O desclassificação das fontes de energia (geradores, transformadores e no-break's) necessita de seu sobredimensionamento.

■ Os condutores devem ser dimensionados de maneira a permitir a circulação das correntes harmônicas: como as frequências dessas harmônicas são mais elevadas que da fundamental, as impedâncias vistas por estas correntes são mais elevadas; para evitar perdas por efeito Joule importantes, é necessário sobredimensionar os condutores.

■ A circulação de harmônicas em condutor de neutro necessita seu sobredimensionamento.

### 4.5.4 Redução da vida dos materiais

Quando a tensão da alimentação apresenta uma taxa de distorção próximo de 10%, a duração da vida dos aparelhos é reduzido de maneira sensível. Seguindo o tipo de aparelho, estimamos a redução da vida em:

- 32,5% para as máquinas trifásicas,
- 18% para as máquinas trifásicas,
- 5% para os transformadores.

Conservar a duração da vida correspondendo a carga nominal implica sobredimensionar estes aparelhos.

### 4.5.5 Disparos intempestivos e parada da instalação

Os disjuntores de uma instalação são submissos a pontos de correntes causadas por harmônicas.

Estes pontos de correntes provocam disparos intempestivos, e induzem perdas de produções assim como custos ligados ao tempo de parada na reposição em funcionamento da instalação.

### 4.5.6 Quaisquer exemplos

Para os casos de instalações citados abaixo, visto as consequências econômicas, temos de recorrer a utilização de filtros de harmônicas.

■ Centro de cálculo de uma companhia de segurança: Neste centro de cálculo, o disparo intempestivo de um disjuntor ocasionará uma perda estimada em R\$ 17 000 por hora de interrupção.

■ Laboratório farmacêutico: As harmônicas tem provocado o enfraquecimento de um grupo eletrogêneo, e interrupção de uma fase de teste de longa duração sobre um novo medicamento: a consequência é uma perda estimada à R\$ 2 500 000.

■ Usina metalúrgica: Forno à indução tem provocado a sobrecarga e a destruição de 3 transformadores de 1500 e 2500 kVA em um ano e custos de parada de produção estimados em R\$ 2 000 por hora.

■ Fabricação de móvel de jardim: O enfraquecimento de inversores tem provocado paradas de produção no total de R\$ 1 000 por hora.

## 5 Os dispositivos normativos/ o meio ambiente normativo e regulamentar

"As emissões harmônicas são submissas a diferentes dispositivos normativos e regulamentares:

- normas de compatibilidade adaptadas as redes,
- normas de emissão aplicáveis aos produtos geradores de harmônicas,
- recomendações dos distribuidores de energia aplicáveis as instalações".

Afim de atenuar rapidamente efeitos da poluição harmônica, um triplo dispositivo normativo e regulamentar está atualmente em vigor, e se encontra nos elementos seguintes.



## 5.1 Normas de compatibilidade entre redes elétricas e produtos

Estas normas dão diretrizes, para a compatibilidade entre as redes elétricas e os produtos, este significa que:

- as harmônicas geradas por um aparelho não devem perturbar a rede além de níveis especificados.
- cada aparelho deve poder funcionar normalmente na presença das perturbações iguais aos níveis especificados.

Harmônicas ímpares não múltiplas de 3				Harmônicas ímpares múltiplas de 3				Harmônicas pares			
Gama h	BT	MT	AT	Gama h	BT	MT	AT	Gama h	BT	MT	AT
5	6	6	2	3	5	2.5	1.5	2	2	1.5	1.5
7	5	5	2	9	1.5	1.5	1	4	1	1	1
11	3.5	3.5	1.5	15	0.3	0.3	0.3	6	0.5	0.5	0.5
13	3	3	1.5	21	0.2	0.2	0.2	8	.5	0.2	0.2
17	2	2	1	>21	0.2	0.2	0.2	10	0.5	0.2	0.2
19	1.5	1.5	1					12	0.2	0.2	0.2
23	1.5	1	0.7					>12	0.2	0.2	0.2
25	1.5	1	0.7								
>25	0,2+25h	0,2+25h	0,1+25h								

## 5.3 Normas de qualidade da rede

- A norma EN 50160 precisa as características da tensão fornecida para as redes públicas baixa tensão,
- IEEE 519 (Recommended practices for harmonics control in electrical power systems), é uma aproximação conjunta entre o distribuidor de energia e o cliente para limitar o impacto das cargas não-lineares.

Por outro lado, os distribuidores de energia encorajam as ações de prevenção afim de reduzir as degradações da qualidade da eletricidade, os aquecimentos e as alterações do fator de potência. Refletindo cada vez mais a possibilidade de taxar os clientes poluidores.

## 5.4 Normas de produtos

- IEC 61000-3-2 ou EN 61000-3-2 para os aparelhos baixa tensão absorvendo uma corrente inferior a 16A,
- IEC 61000-3-4 ou EN 61000-3-4 para os aparelhos baixa tensão absorvendo uma corrente superior a 16A.

## 6 As soluções para atenuar as harmônicas

"As soluções possíveis para atenuar os efeitos harmônicos são de três naturezas diferentes:

- adaptações da instalação,
- utilização de dispositivos particulares na alimentação (indutâncias, transformadores especiais),
- filtragem".

### 6.1 Soluções de base

Para limitar a propagação das harmônicas na rede, disposições podem ser levados em conta, e estão à observar em particular no caso de uma nova instalação.

#### 6.1.1 Posicionar as cargas poluentes a montante da rede

A perturbação harmônica global criada quando a potência de curto-circuito diminui.

- IEC 1000-2-2 para as redes públicas em baixa tensão.
- IEC 1000-2-4 para as instalações industriais baixa tensão e média tensão.

## 5.2 Valores máximos de harmônicas aceitáveis

Resultados de estudos internacionais tem permissão de reunir um certo número de dados cuja análise conduz a uma estimativa do valor típico de harmônicas podendo ser encontradas nas redes de fornecimento.

Fora de toda consideração econômica, é então preferível conectar as cargas poluentes a montante possível.

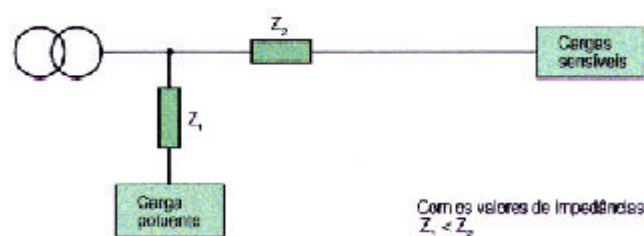


Fig. 22: alimentação a mais em a montante possível das cargas não-lineares (esquema aconselhado).

### 6.1.2 Reagrupar as cargas poluente

Quando estabelecemos o esquema unifilar, encontraremos para separar os equipamentos perturbadores: na prática, alimentaremos cargas poluentes e não poluentes por jogos de barras diferentes.

Assim, reagrupando as cargas poluentes, aumentaremos a possibilidade de aumentar o volume angular. A soma vetorial das correntes harmônicas é mais fraca que sua soma algébrica.

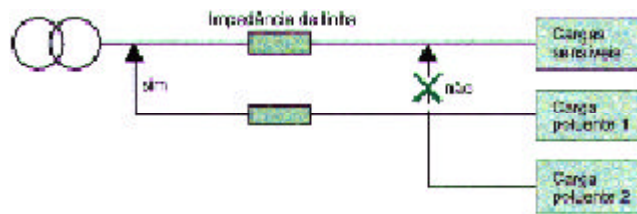


Fig. 23: reagrupamento das cargas não lineares e alimentação a mais em amontante possível (esquema aconselhado).

Evitaremos igualmente que as correntes harmônicas não percorram os cabos, este que limitará as quedas de tensão e os aquecimentos nos cabos.

### 6.1.3 Separar as fontes

Na luta contra as harmônicas, um melhoramento suplementar é obtido realizando uma alimentação pelo transformador separado, segundo o esquema seguinte.

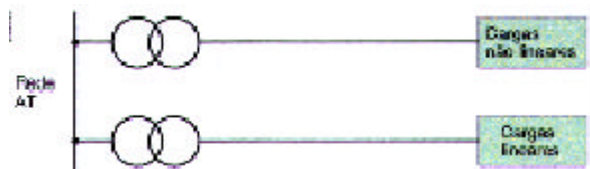


Fig. 24: alimentação das cargas perturbadoras pelo transformador separado.

#### 6.1.4 Utilizar transformadores em conjugados isolados

O efeito de conjugado de transformadores permite a supressão de certas ordens de harmônicas.

Vejamos quais ordens de harmônicas são fixadas, em função dos tipos de conjugados:

- um conjugado Dyd fixado as harmônicas de ordens 5 e 7,
- um conjugado Dy fixa as harmônicas de ordem 3 (as harmônicas circulam em cada uma das fases, e se reencontram pelo neutro do transformador),
- um conjugado DZ<sub>5</sub> fixa as harmônicas de ordem 5 (para juntar-se no circuito magnético).



Fig. 25: a utilização de um transformador Dyd stoppe a propagação das harmônicas de gamas 5 e 7 versus a montante da rede.

#### 6.1.5 Inserir indutâncias na instalação

No caso da alimentação de inversores de frequência, podemos suavizar a corrente colocando indutâncias de linha. Aumentando a impedância do circuito de alimentação, limitemos a corrente harmônica.

A colocação de selfs anti-harmônicas sobre os bancos de capacitores permite aumentar a impedância do conjunto self e capacitor, para as harmônicas de frequências elevadas.

#### 6.1.6 Escolher um esquema de aterramento adaptado

##### ■ Caso do regime TNC

No caso do regime de neutro TNC, um único condutor (PEN) assegura a proteção em caso de defeito (terra) e assegura a circulação das correntes de desequilíbrio.

Em regime permanente, as correntes harmônicas circulam no PEN. Tem uma certa impedância, esta que implica em pequenas diferenças de potencial (de ordem de quaisquer volts) entre aparelhos, e pode ter como consequência o disfuncionamento dos equipamentos eletrônicos.

O regime TNC deve então ser reservado a alimentação dos circuitos de potência, no início da instalação, e é prescrito no caso da alimentação de cargas sensíveis.

##### ■ Caso do regime TNS

É aconselhado no caso de presença de harmônicas.

O condutor de neutro e o condutor de proteção PE seriam completamente separados, o potencial da rede é muito melhor fixo.

## 6.2 Ações no caso de ultrapassagem dos valores limites

### 6.2.1 Filtro passivo

#### ■ Aplicações típicas:

- instalações industriais com um conjunto de geradores de harmônicas de potência total superior a 200 kVA (inversores de frequência, alimentações sem interrupções, retificadores,...),
- instalação apresentando uma necessidade de compensação de energia reativa,
- necessita de redução da taxa de distorção em tensão para evitar a perturbação de receptores sensíveis,
- necessita de redução da taxa de distorção em corrente para evitar as sobrecargas.

#### ■ Princípio de funcionamento:

Substituímos um circuito LC ajustado sobre cada frequência de harmônica a filtrar, em paralelo sobre o gerador de harmônicas.

Este circuito de derivação absorve as harmônicas e evita que elas circulem na alimentação.

Em geral, o filtro passivo é ajustado sobre uma ordem de harmônica próxima da harmônica a eliminar. Várias ligações de filtros em paralelo podem ser utilizadas quando desejamos uma redução forte da taxa de distorção sobre várias ordens.

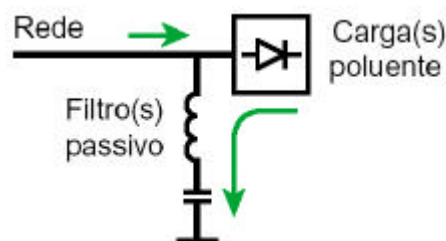


Fig. 26: filtro passivo

### 6.2.2 Filtro ativo (ou compensador ativo)

#### ■ Aplicações típicas:

- instalações comerciais com geradores de harmônicas de potência total inferior a 200 kVA (inversores de frequência, alimentações sem interrupções,...),
- necessita de redução da taxa de distorção em corrente para evitar as sobrecargas.

#### ■ Princípio de funcionamento.

Estes são sistemas eletrônicos de potência instalados em série ou em paralelo com a carga não-linear, visando a compensar seja as tensões harmônicas, seja as correntes harmônicas geradas pela carga.

O filtro ativo reinjetado em oposição de fases as harmônicas apresentam sobre a alimentação da carga, de tal sorte que a corrente de linha  $I_s$  seja senoidal.

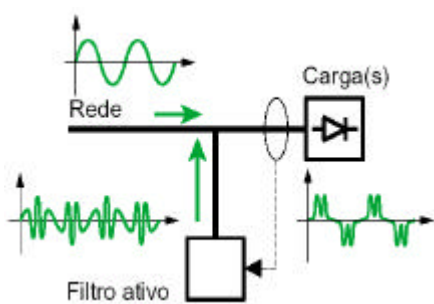


Fig. 27: filtro ativo

### 6.2.3 Filtro híbrido

#### ■ Aplicações típicas:

- instalações industriais com um conjunto de geradores de harmônicas de potência total superior a 200 kVA (inversores de frequência, alimentações sem interrupções,...),
- instalação apresentando uma necessidade de compensação de energia reativa,
- necessita de redução da taxa de distorção em tensão para evitar a perturbação de receptores sensíveis,
- necessita de redução da taxa de distorção em corrente para evitar as sobrecargas,
- encontra conformidade a limites estritos de emissão harmônica.

#### ■ Princípio de funcionamento.

Os dois tipos de dispositivos anteriores podem ser associados a um mesmo equipamento e constituir um filtro híbrido. Esta nova solução de filtragem permite acumular as vantagens das soluções existentes e de cobrir um largo domínio de potência e de performances.

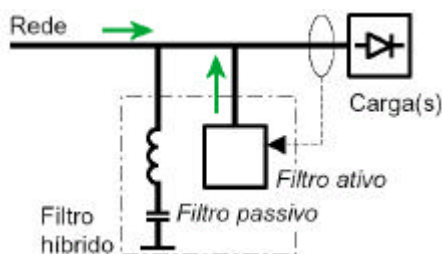


Fig. 28: filtro híbrido

### 6.2.4 Critérios de escolha

#### ■ O filtro passivo permite (ao mesmo tempo):

- a compensação de energia reativa,
- uma grande capacidade de filtragem em corrente.

A instalação onde substituímos o filtro deve apresentar uma estabilidade suficiente, com pouco de flutuação da carga.

Se a potência reativa fornecida é importante, é aconselhado colocar fora de tensão o filtro passivo durante os período de fraca carga.

O estudo de ligação de um filtro deve levar em conta a presença eventual de um banco de compensação e pode conduzir a sua supressão.

■ O compensador ativo permite a filtragem das harmônicas sobre uma larga faixa de frequência. Ele se adapta a não importa qual carga. Entretanto, sua potência harmônica é limitada.

■ O filtro híbrido reuni o conjunto das performances dos filtros passivos e ativos.

## 7 Os dispositivos de detecção

### 7.1 A detecção

A poluição harmônica passa antes pela medição. Em função de cada instalação, diferentes tipos de materiais trazem uma solução.

#### 7.1.1 As centrais de medição

##### PM500

A central de medição PM500 concentra em uma só caixa compact 96 x 96 mm, todas as medições necessárias ao monitoramento de uma instalação elétrica. Ela substitui vantajosamente os indicadores analógicos.



Fig. 29: PM500

Modular e evolutiva, responde de maneira eficaz a necessidade. O usuário escolhe as funções úteis para ele. Os módulos podem ser agrupados em lugares não importa em qual momento para responder a novas necessidades ou para expor os investimentos.

Perfeitamente adaptada às aplicações de medições e de monitoramento, rendimento associado à um sistema Power Logic tornando sua instalação mais clara e mais econômica.

#### Aplicações

- alocação dos custos
- monitoramento à distância da instalação
- monitoramento das harmônicas (THD)

##### CM3000 e CM4000

Os CM's são centrais de medição com performances que oferecem numerosas possibilidades de medições e uma integração assegurada nos sistemas graças à sua conectividade Ethernet e seu servidor Web incluso.

Eles são indereçados aos usuários para que a possibilidade e a qualidade de energia são críticas. Se utilizam geralmente sobre as entradas e sobre as saídas sensíveis. Graças as suas funcionalidades estendidas, incluem notadamente a detecção dos transitórios, permitem resolver rapidamente os problemas ligados a um má qualidade de energia.



Fig. 30: CM3000 e CM4000

São igualmente os produtos ideais para responder as necessidades ligadas a liberalização dos mercados.

#### Aplicações

- alocações dos custos
- monitoramento à distância da instalação
- análise exaustiva da qualidade de energia
- verificação da fatura
- manutenção preventiva

#### Micrologic: centro de medição integrada ao disjuntor

Para as novas instalações, a unidade de controle micrologic H, integrada ao disjuntor de potência Masterpact, é particularmente interessante no caso de uma medição no início da instalação ou sobre a saída.



Fig. 31: Micrologic

A unidade de controle Micrologic H permite uma análise detalhada da qualidade de energia e um diagnóstico detalhado dos acontecimentos.

Permite:

- a medição das correntes, tensões, potência ativa e reativa,
- a medição do THD e THF em corrente e tensão,
- afixar componentes harmônicas em amplitude e em fase até a gama 51 em corrente e tensão,
- registro das formas de onda (osciloperturbografia).

#### 7.1.2 A exploração das centrais de medição

##### Exploração e análise a distância: Programa de exploração e de análise

Na grade mais global de uma rede em supervisão, o mercado oferece a possibilidade de ligar estes diferentes materiais por uma rede de comunicação, autorizando assim centralizar as informações, e de ter uma visão global

das perturbações sobre o conjunto de uma rede.

Poderemos quando, seguindo a aplicação, efetuar medições em tempo real, medir, registrar a forma de onda, prever o disparo de alarmes...

As centrais de medição comunicam seja sobre Modbus seja sobre Bus Digipact para transmitir todos os dados acessíveis.

Este dispositivo visa essencialmente a suportar a identificação e a planificação das tarefas de manutenção. Será vantajosamente substituir para reduzir o tempo de intervenção e o custo de instalação dos materiais pontuais no caso de medições sobre setor ou para o dimensionamento de materiais (filtros).

#### SMS

SMS é um programa muito completo de análise de rede associado aos produtos PowerLogic System. Instalado sobre PC standard, ele permite:

- exibe medições instantaneamente,
- exibe históricos, sobre um período determinado,
- a seleção do modo de representação dos dados (tabelas, curvas de diferentes tipos),
- o tratamento estatístico dos dados (visualização de histogramas)

## 8 As soluções para atenuar as harmônicas

*"O mercado propõe uma oferta de serviço completa para o tratamento das harmônicas:*

- *uma experiência em análise,*
- *dispositivos de medição e supervisão,*
- *dispositivos de filtragem".*

### 8.1 Diagnóstico

A escolha da solução a mais apropriada, tanto do ponto de vista técnico como econômico, é o resultado de um estudo aprofundado.

#### O diagnóstico MT e BT

As etapas do diagnóstico serão:

- a medição das perturbações em corrente e em tensão simples e composta aos níveis de receptores poluidores, saídas perturbadas e fontes de alimentação,
- uma modelização sobre o programa dos fenômenos é realizada permitindo uma explicação precisa de suas causas e uma determinação otimizada das soluções possíveis,
- uma relação de diagnóstico completo é proposto colocando em evidência:
  - os níveis de perturbações atuais,
  - os níveis de perturbação máximo admissível (IEC 61000, IEC34,...),
- uma garantia de performance sobre as soluções é proposta,
- implementação, ao menos de materiais adaptados.

## 8.2 Produtos específicos

### 8.2.1 Filtros passivos

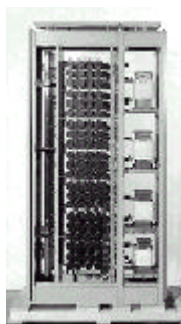


Fig. 32: filtro passivo

### 8.2.2 Filtros ativos



Fig. 33: filtro ativo

### 8.2.3 Filtros híbridos



Fig. 34: filtro híbrido

Visite nosso site: [www.schneider.com.br](http://www.schneider.com.br)

Para acessar esta e as outras Apostilas de Instalações Elétricas e Cardernos Técnicos:

[www.schneider.com.br](http://www.schneider.com.br) → Produtos e sistemas on-line → Download de arquivos (selecione a categoria)