

CAPÍTULO 2

MEDIÇÃO DE HARMÔNICAS

1. INTRODUÇÃO

Na prática, nos perguntamos muitas vezes quais harmônicas devem ser medidas e reduzidas?

Em redes residenciais, comerciais e industriais, os harmônicas que encontramos com maior frequência e, portanto, os mais problemáticos, são os harmônicas de ordem ímpar.

Acima da ordem 50, as intensidades harmônicas são desprezáveis e a sua medida não é significativa.

Assim sendo, uma precisão de medida aceitável obtém-se considerando as harmônicas até a ordem 30.

As empresas de distribuição de energia elétrica medem, geralmente, as harmônicas de ordem 3, 5, 7, 11 e 13.

A compensação dos harmônicas até a ordem 13 é imperativa e uma boa compensação terá em conta as harmônicas até a ordem 25.

A existência de indicadores permite 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.

2. INDICADORES PARA A MEDIÇÃO DE HARMÔNICAS

Estes indicadores são indispensáveis para a determinação das ações corretivas requeridas.

FATOR DE POTÊNCIA

Neste documento se denotará o fator de potência como FP.

O fator de potência define-se como a relação entre a potência ativa (P) e a potência aparente (S).

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

No jargão elétrico, o fator de potência é frequentemente confundido com o cosseno phi ($\cos \varphi$), cuja definição é:

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

Onde:

P_1 = Potência ativa do fundamental.

S_1 = Potência aparente do fundamental.

Portanto, o « $\cos \varphi$ » refere-se somente à frequência fundamental, e na presença de harmônicas, é diferente do fator de potência FP.

Interpretação do valor do fator de potência.- Uma primeira indicação da presença significativa de harmônicas é quando o fator de potência medido é diferente do « $\cos \varphi$ » (o fator de potência será inferior a « $\cos \varphi$ »).

FATOR DE CRISTA (FC)

Define-se como a relação entre o valor pico do sinal de corrente ou de tensão (I_p ou U_p) e o valor eficaz (rms).

$$FC = \frac{I_p}{I_{rms}}$$

$$FC = \frac{U_p}{U_{rms}}$$

Para um sinal senoidal, o fator de crista é igual a $\sqrt{2}$. Para um sinal não senoidal, o fator de crista pode ter um valor superior ou inferior a $\sqrt{2}$.

Este fator é particularmente útil para detectar a presença de valores de crista excepcionais com relação ao valor eficaz.

Interpretação do valor do fator de crista.- O fator de crista típico de correntes absorvidas por cargas no lineares é muito maior que $\sqrt{2}$; pode tomar valores iguais a 1,5 ou 2, chegando inclusive ao valor de 5 em casos críticos.

Um fator de crista muito elevado implica sobre intensidades pontuais importantes. Estas sobreintensidades são detectadas pelos dispositivos de proteção de tempo instantâneo, como disjuntores, que podem ser a origem de desligamentos indesejados.

POTÊNCIA ATIVA (P)

A potência ativa "P" de um sinal distorcido por harmônicas é a soma das potências ativas correspondentes às tensões e intensidades da mesma ordem.

A decomposição da tensão e a intensidade em seus componentes harmônicas pode ser escrita como:

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

Sendo φ_h ou defasagem entre a tensão e a intensidade do harmônica de ordem h.

Nota:

- Supõe-se que o sinal não contém componente contínua: $U_{dc} = I_{dc} = 0$,
- Na ausência de harmônicas, a equação $P = U_1 I_1 \cos \varphi_1$ indica a potência de um sinal senoidal, onde $\cos \varphi_1$ é igual a «cosφ».

POTÊNCIA REATIVA (Q):

A potência reativa define-se somente para a fundamental e vem dada pela equação:

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

POTÊNCIA DE DISTORÇÃO (D):

Consideramos a potência aparente S:

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

Na presença de harmônicas, pode-se reescrever a equação como:

$$S^2 = \left(\sum_{n=1}^{\infty} (U_n)^2 \right) \left(\sum_{n=1}^{\infty} (I_n)^2 \right)$$

Consequentemente, na presença de harmônicas, a relação $S^2 = P^2 + Q^2$ não é válida. Define-se a potência de distorção D de tal forma que: $S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$. Assim sendo:

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

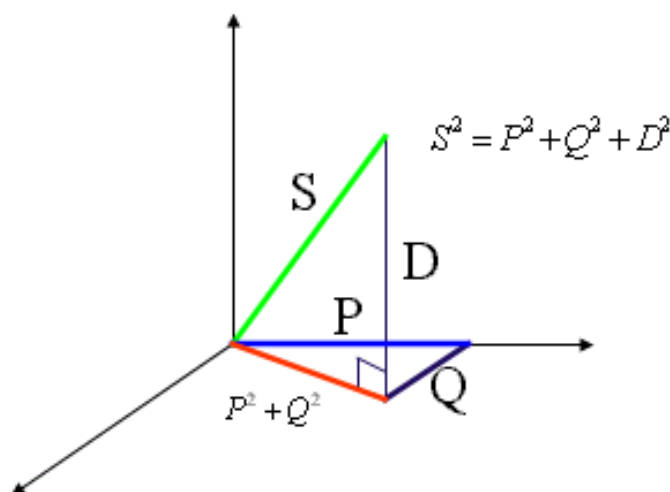


Figura 2.1 Potência de distorção.

3. ESPECTRO DE FREQUÊNCIA E TAXA DE HARMÔNICAS

PRINCÍPIO.- Cada aparelho que causa harmônicas tem suas próprias correntes harmônicas com amplitudes e defasagens diferentes.

Estes valores, sobretudo a amplitude de cada ordem harmônica, são essenciais para a análise da distorção harmônica.

DISTORÇÃO HARMÔNICA INDIVIDUAL OU DE ORDEM H.- A distorção harmônica individual define-se como o nível de distorção, em porcentagem, de ordem h , com relação à fundamental.

$$u_{h(\%)} = 100 \cdot \frac{U_h}{U_1}$$

$$i_h(\%) = 100 \cdot \frac{I_h}{I_1}$$

3.1 O ESPECTRO EM FREQUÊNCIA

Representando a amplitude de cada ordem harmônica em um gráfico, obtém-se uma representação gráfica do espectro em frequência. Esta técnica denomina-se análise espectral.

A figura 2.2 mostra a análise espectral de um sinal retangular.

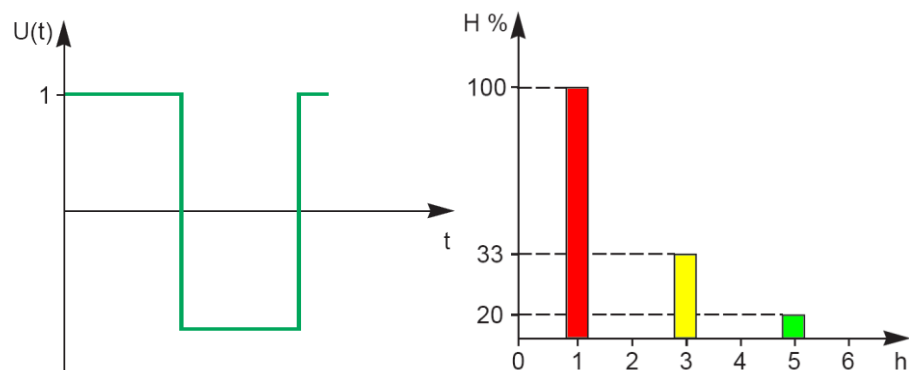


Figura 2.2 Análise espectral de um sinal retangular, para a tensão $U(t)$.

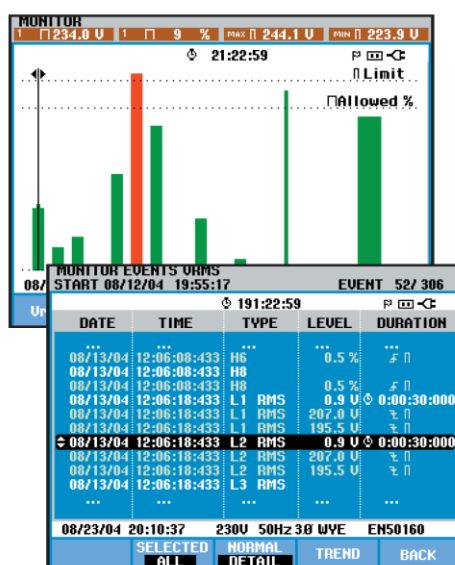


Figura 2.3 Tela de um analisador de redes.

VALOR EFICAZ: o valor eficaz de corrente ou de tensão pode ser calculado em função dos valores eficazes das diferentes ordens de harmônicas:

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

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

A figura 2.4 mostra a leitura de dois alicates amperimétricos da mesma marca. A pinça com característica TRUE RMS leva em conta na sua leitura de

542 a presença de harmônicas, enquanto o alicate que somente leva em conta a componente fundamental mostra uma leitura 425 A.



Figura 2.4 Diferença de leituras empregando dois alicates amperimétricos, uma delas TRUE RMS (a de maior leitura).

3.2 TAXA DE DISTORÇÃO HARMÔNICA

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

Há duas formas de quantificar o THD:

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

Esta definição cumpre com a norma IEC 61000-2-2.

Nota 1: o valor de THD_f pode ser superior a 100%.

De acordo com a norma, geralmente se pode limitar h a 50.

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

Esta definição cumpre com a norma IEEE 519-2.

A taxa de distorção harmônica geralmente se expressa em um valor percentual.

A THD_r representa o grau de distorção harmônica total com relação ao sinal total, enquanto a THD_f indica a distorção harmônica total com relação à componente fundamental.

Nota 2: a THD_r (de tensão ou corrente) sempre é inferior a 100%. Esta permite medidas analógicas dos sinais, mais simples, mas quando o sinal é pouco distorcido, o resultado é muito parecido ao de THD_f . Além disso, não está bem adaptado para o caso de sinais muito deformados, já que não pode ultrapassar o valor de 100%, contrariamente à THD_f .

THD_f DE INTENSIDADE OU TENSÃO.

Quando se trata de harmônicas de intensidade, a expressão se converte em:

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

Esta equação é equivalente à mostrada a seguir, a qual é mais direta e fácil de utilizar quando se conhece o valor eficaz total:

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

Quando se trata com harmônicas de tensão, a expressão se converte em:

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

Como exemplo, determinaremos o valor de THD_f para um sinal de corrente que possui as seguintes características medidas em um ponto dado do circuito:

Ordem	Valor em A
h_1	3,63
h_3	2,33
h_5	0,94
h_7	0,69
h_9	0,50
h_{11}	0,41
h_{13}	0,33
Total	4,53

Tabela 2.1 Exemplo de correntes harmônicas em um sinal dado.

Da tabela 2.1 temos:

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

RELAÇÃO ENTRE O FATOR DE POTÊNCIA E A THD

Quando uma tensão é senoidal ou praticamente senoidal, pode-se considerar que

$$P = P_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1$$

Em consequência:

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1}{U_1 \cdot I_{rms}}$$

$$\frac{I_1}{I_{rms}} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_I^2}}$$

Portanto:

$$PF = \frac{\cos \varphi_1}{\sqrt{1 + THD_I^2}}$$

E a representação de FP/cos φ em função de THD_I (vide a figura 2.5).

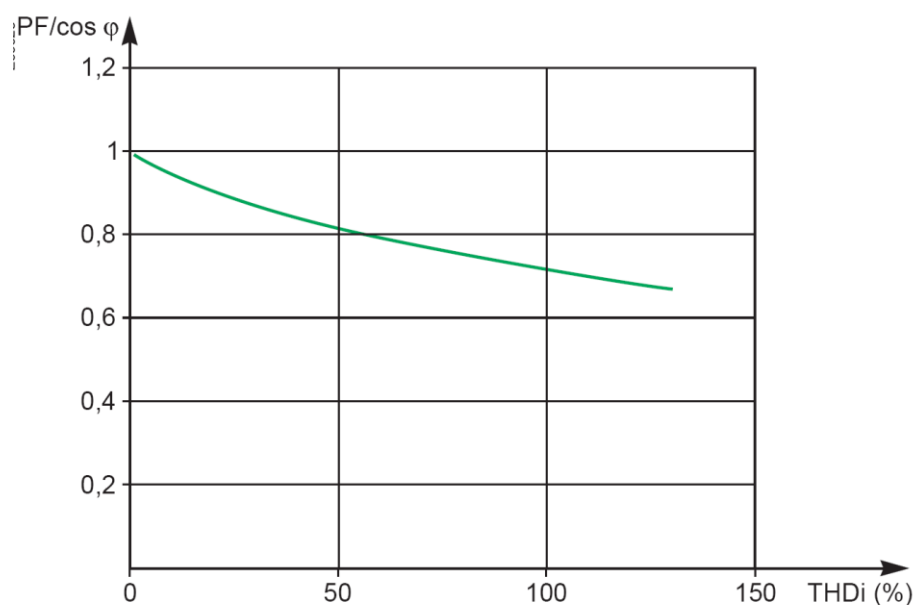


Figura 2.5 Variação de FP/Cosφ em função de THD_I, onde THD_U=0.

UTILIDADE DE CADA UM DOS INDICADORES

O indicador essencial é a THD, um valor que reflete o nível de distorção nas ondas de tensão e corrente.

O espectro da uma imagem do sinal deformado.

O ESPECTRO (decomposição em frequência do sinal) da uma representação diferente dos sinais elétricos, e permite avaliar a distorção.

4. SELEÇÃO DE EQUIPAMENTOS

4.1 SELEÇÃO DO DISPOSITIVO DE MEDIDA

Somente os **analísadores digitais**, baseados nas últimas tecnologias, proporcionam medidas suficientemente precisas para os indicadores apresentados anteriormente.

Há alguns anos utilizavam-se outros aparelhos de medição.

- **OSCILOSCOPIOS PARA OBSERVAÇÕES**

Pode-se obter uma indicação geral da distorção de um sinal visualizando a corrente ou a tensão em um osciloscópio.

Quando a forma de onda não é senoidal, o sinal é distorcido por harmônicas. Os picos de tensão e corrente podem ser visualizados na tela.

É importante ter em conta que com um osciloscópio não é possível quantificar com exatidão as componentes harmônicas.

- **ANALISADORES ESPECTRAIS ANALÓGICOS**

Implementados com uma tecnologia antiquada, estes dispositivos são compostos de um filtro passa-faixa combinado com um voltímetro de valor eficaz.

Estes aparelhos, atualmente obsoletos, dão resultados insuficientes e não proporcionam nenhuma informação sobre a defasagem.

Os aparelhos de medição empregados atualmente têm características digitais.

• ANALISADORES DIGITAIS

Os microprocessadores utilizados nos analisadores digitais:

- Calculam os valores dos indicadores de harmônicas (**fator de potência, fator de crista, potência de distorção, THD**).
- Oferecem múltiplas funções adicionais (correção, detecção estatística, gestão de medições, visualização, comunicação, etc.).
- Quando são aparelhos multicanal, proporcionam simultaneamente e praticamente em tempo real a **análise espectral** de tensões e correntes.



Figura 2.6 Analisador de redes digital trifásico.

4.2 METODOLOGIA DE MEDIÇÃO

As medições de tensão e corrente devem ser tomadas:

- Na fonte de alimentação.
- No conjunto de barras do quadro de distribuição principal.
- Em cada uma das saídas do quadro de distribuição principal.

Quando se tomam as medidas, é necessário ter informação precisa das condições, em particular o estado das baterias de capacitores (em serviço/horas serviço).

USO DOS APARELHOS DE MEDIÇÃO

Os aparelhos mostram tanto os efeitos instantâneos das harmônicas quanto os que são produzidos em longo prazo.

Uma análise correta requer valores integrados sobre tempos, que vão de alguns segundos a alguns minutos, para períodos de observação na rede, alguns poucos dias.

Os valores requeridos são:

- A amplitude das harmônicas de tensão e corrente.
- A distorção individual harmônica de cada ordem, tanto para corrente quanto para tensão.
- A distorção total harmônica tanto para corrente quanto para tensão.
- Quando for pertinente, a defasagem entre as harmônicas de tensão e corrente da mesma ordem e a fase das harmônicas com relação a uma referência comum (por exemplo, a tensão fundamental).



Figura 2.7 Aparelho de medição de harmônicas com alicates.

4.3 ANÁLISE DE RESULTADOS

As medições tomam-se como:

- Medição preventiva:
 - Para obter uma avaliação global da extensão do problema (mapa do sistema de distribuição).
- Medição de identificação:
 - Para determinar a origem de uma perturbação e pensar soluções para corrigir o problema.

- Para controlar que as soluções implementadas realmente produzem o efeito desejado.

O resultado da análise será:

- A reclassificação eventual do equipamento já instalado.
- A quantificação da proteção e das soluções de filtragem harmônica que devem ser instaladas.
- A comparação dos valores medidos com os de referência da rede pública (limites de distorção harmônica, valores aceitáveis, valores de referência).

A partir dos resultados de THD, fator de potência e fator de crista, pode-se chegar a algumas conclusões a respeito. Por isso são dados como referência os seguintes indicadores:

- **A THD de tensão;** indica a distorção da onda de tensão.
A THDu medida proporciona informação sobre fenômenos observados em uma instalação:

- Um valor de THDu inferior a 5% pode ser considerado normal. Praticamente não existe risco de mau funcionamento nos equipamentos.
- Um valor de THDu compreendido entre 5% e 8% indica uma distorção harmônica significativa. Podem ocorrer funcionamentos anômalos nos equipamentos.
- Um valor de THDu superior a 8% revela uma distorção harmônica importante. Os funcionamentos anômalos nos equipamentos são prováveis. Uma análise profunda e um sistema de atenuação tornam-se necessários.

- **A THD de corrente;** indica a distorção da onda de corrente.
Para identificar a carga que causa a distorção, a THD de corrente deve ser medida na entrada e em cada uma das saídas dos diferentes circuitos.

A THDi medida proporciona informação sobre fenômenos observados em uma instalação:

- Um valor de THDi inferior a 10% pode ser considerado normal. Praticamente não existe risco de funcionamento anômalo nos equipamentos.
- Um valor de THDi compreendido entre 10% e 50% revela uma distorção harmônica significativa. Existe o risco de que aumente a temperatura, o que implica o sobredimensionamento dos cabos e das fontes.

- Um valor de THDi superior a 50% revela uma distorção harmônica importante. É provável o funcionamento anômalo dos equipamentos. Uma análise profunda para um sistema de atenuação é necessário.

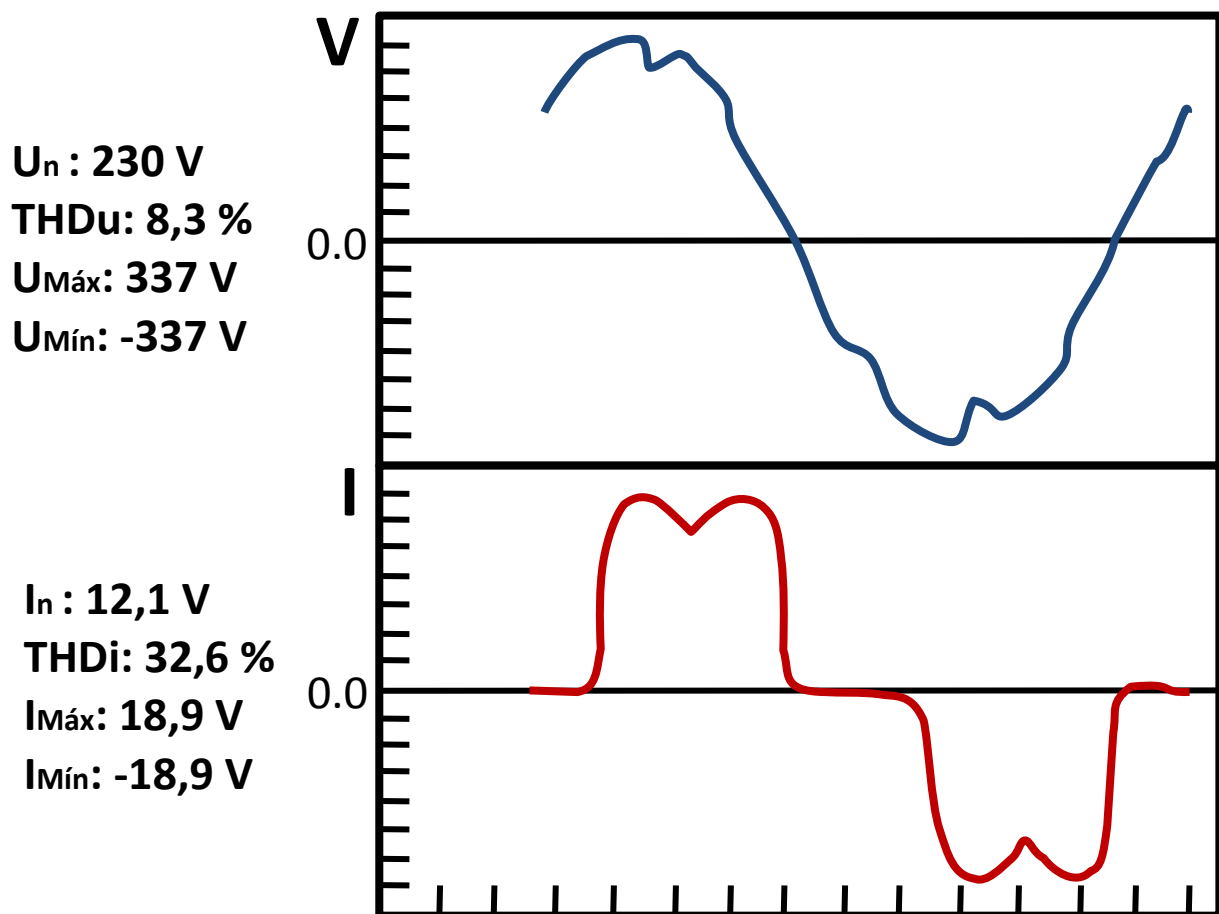


Figura 2.8 Curvas de tensão e corrente com harmônicas.

- **O fator de potência;** FP permite avaliar o sobredimensionamento que se deve aplicar à alimentação de uma instalação.
- **O fator de crista;** utiliza-se para caracterizar a amplitude de um gerador (ou alternador) para proporcionar intensidades instantâneas de valor elevado. Os equipamentos informáticos, por exemplo, absorvem intensidades muito distorcidas, onde o fator de crista pode ser 3 ou inclusive 5.

ANOTAÇÕES:

[illegible]

