

HARMÓNICAS

Manuel Bolotinha; MSc – Engenheiro Electrotécnico (IST)*ⁱ

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. O QUE SÃO HARMÓNICAS	1
3. CARACTERIZAÇÃO DA DISTORÇÃO HARMÓNICA	4
4. EFEITOS DAS HARMÓNICAS E PRINCIPAIS FONTES	5
5. MEDIÇÃO E COMPENSAÇÃO DE HARMÓNICAS EM INSTALAÇÕES MT E BT ..	7

1. INTRODUÇÃO

A qualidade de serviço, isto é, a qualidade de energia fornecida pelas redes e sistemas eléctricos é afectada por **perturbações electromagnéticas**. Entre essas *perturbações* destacam-se as **harmónicas**, que se verificam em **qualquer nível de tensão** e cujo estudo, determinação dos valores aceitáveis e métodos de correcção se encontram definidos na Norma IEC 61000-2-4: *Electromagnetic compatibility (EMC)¹ – Environment – Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances*.

Assim, este artigo procura clarificar o que são harmónicas, as principais fontes desta perturbação electromagnética, os seus efeitos, como são quantificadas e os métodos mais habituais para minimizar os seus efeitos

2. O QUE SÃO HARMÓNICAS

Os alternadores produzem tensões (**U**) e correntes alternadas (**I**), com uma onda de *forma sinusoidal* e uma *frequência (f)* de **50 Hz** ou **60 Hz** (*frequência fundamental*, ou *harmónica de ordem 1*, habitualmente designada como *frequência industrial*), como se ilustra na Figura 1.

¹ **Compatibilidade electromagnética** é a capacidade de um equipamento funcionar satisfatoriamente num “ambiente” electromagnético sem introduzir qualquer tipo de perturbações electromagnéticas nos restantes equipamentos e sistemas existentes naquele ambiente.

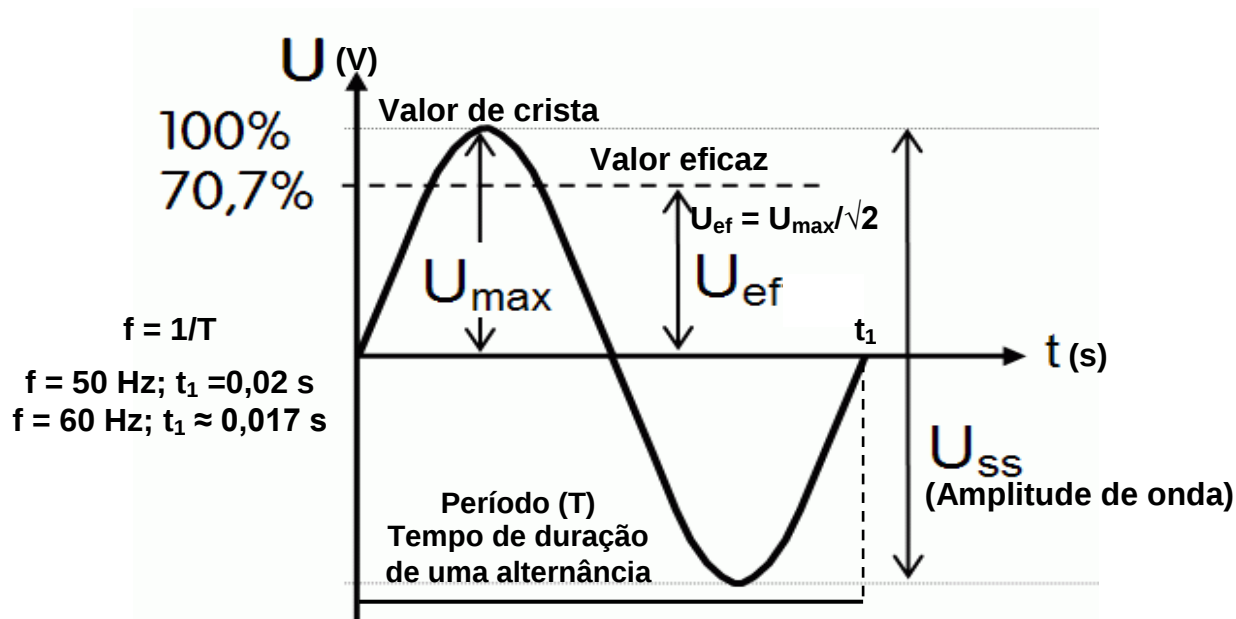


Figura 1 – Tensão alternada sinusoidal

Contudo, devido às características dos equipamentos que estão integrados na rede, podem ser induzidas outras tensões (ou correntes) com **frequências múltiplas** da frequência fundamental (**habitualmente múltiplos de ordem ímpar**) que são as *harmônicas*, isto é: **3ª harmônica – 150 Hz ou 180 Hz; 5ª harmônica – 250 Hz ou 300 Hz; 7ª harmônica – 350 Hz ou 420 Hz; etc.** A Figura 2 ilustra um exemplo da *frequência fundamental* e da 3ª e 5ª harmônica.

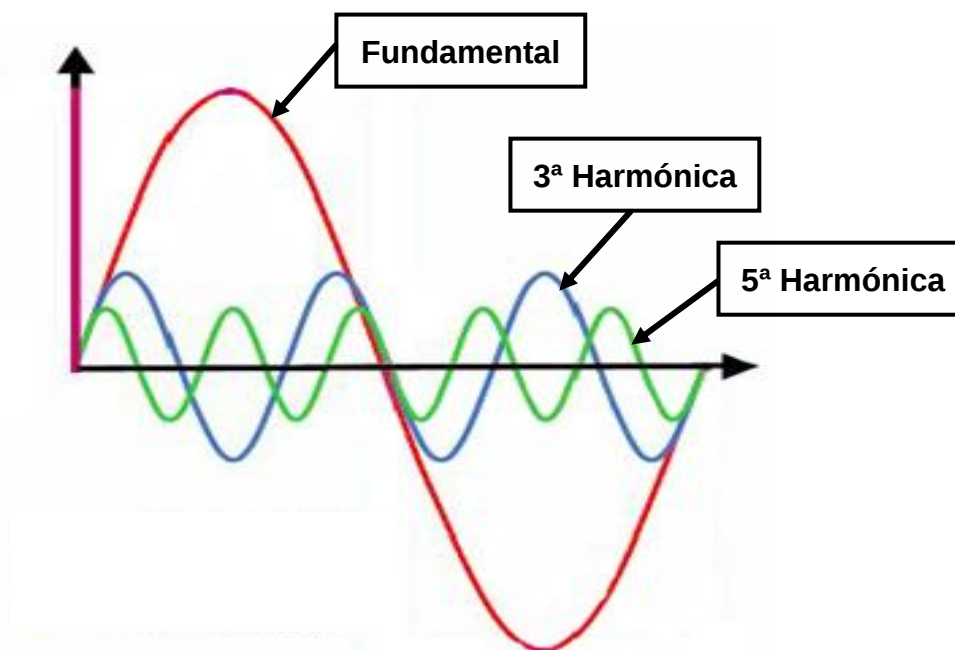


Figura 2 – Ondas de frequência fundamental e da 3ª e 5ª harmônica

A onda de tensão (ou corrente) resultante é uma onda distorcida – **distorção harmónica** – como se representa na Figura 3, sendo o seu valor em cada instante – $u(t)$ – calculado por uma série de Fourier², cuja expressão é.

$$u(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos \omega t + b_n \sin \omega t)$$

Onde:

- t é o tempo
- $\omega = 2\pi f$
- $A_0 = \frac{1}{T} \times \int_0^T s(t) dt = \sqrt{(a_n^2 + b_n^2)}$

$$a_n = \frac{2}{T} \times \int_0^T s(t) \cos(2\pi n f_0) dt$$

- $b_n = \frac{2}{T} \times \int_0^T s(t) \sin(2\pi n f_0) dt$
- T é o período
- f_0 é a frequência fundamental
- $s(t)$ é uma função periódica e integrável no intervalo $[0, T]$

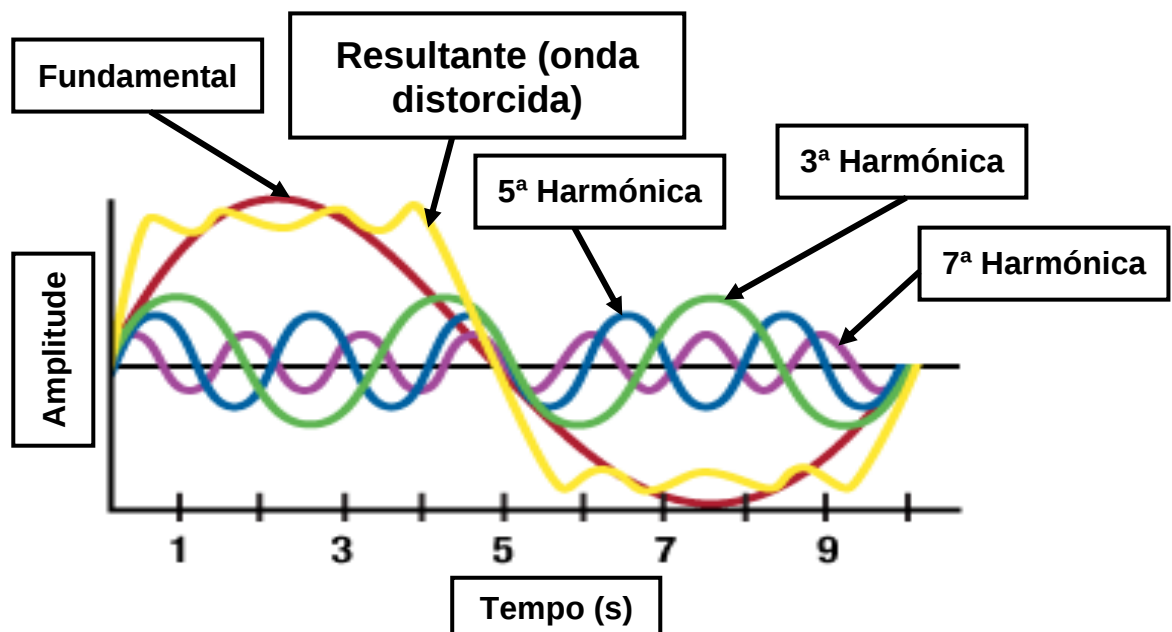


Figura 3 – Distorção harmónica

Habitualmente a **3ª harmónica** é a **mais prejudicial** para o *funcionamento dos equipamentos e sistemas*, mas a **5ª e a 7ª harmónicas**, em certas condições, **não devem ser negligenciadas**.

² As **séries de Fourier** são *séries trigonométricas convergentes* utilizadas para representar a soma de funções sinusoidais.

3. CARACTERIZAÇÃO DA DISTORÇÃO HARMÓNICA

De acordo com a Norma IEC 61000-2-4 a **distorção harmónica** é caracterizada pelo parâmetro **THD** (sigla inglesa de *Total Harmonic Distortion* – **Distorção Harmónica Total**), calculado pela seguinte expressão:

$$\text{THD} = \frac{Q_h}{Q_1} = \frac{\sqrt{Q_2^2 + Q_3^2 + Q_4^2 + \dots + Q_n^2}}{Q_1} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n Q_i^2}}{Q_1}$$

Onde Q_1 representa a tensão ou corrente à frequência fundamental e Q_i a harmónica de ordem i da tensão ou corrente.

A mesma norma define ainda os seguintes parâmetros:

- **TDC** (sigla inglesa de *Total Harmonic Content* – **Quantidade de Distorção Harmónica**), cujo valor eficaz é calculado pela seguinte expressão:

$$\text{TDC} = \sqrt{Q^2 - Q_1^2}$$

Onde Q_1 representa o valor eficaz da tensão ou corrente à frequência fundamental e Q valor eficaz total da tensão ou corrente.

- **TDR** (sigla inglesa de *Total Harmonic Ratio* – **Relação de Distorção Harmónica**) – relação entre o valor eficaz de **TDC** e o valor eficaz da tensão ou corrente à frequência fundamental (Q_1), calculado pela expressão:

$$\text{TDR} = \frac{\text{TDC}}{Q_1}$$

Habitualmente os cálculos são feitos para a tensão, tendo em atenção os valores da potência mínima de curto-circuito trifásico simétrico (S_{cc}) da rede e os valores máximos (em Ω) das impedâncias de curto-circuito nos pontos onde se calcula a THD (Z_{cc} ; R_{cc} ; X_{cc} ³), utilizando software específico.

A Norma IEC 61000 considera o “ambiente” electromagnético dividido em três classes:

- a) **Classe 1** – Aplica-se a alimentações e respectiva compatibilidade para níveis baixos da distorção harmónica, menores que as da rede pública. Está relacionada com equipamentos sensíveis, tais como instrumentação eléctrica e electrónica, sistemas de protecção e comando e equipamento de laboratório.
- b) **Classe 2** – Aplica-se na generalidade a **PCCs** e a **IPCs** em ambiente industrial ou em redes não públicas. Os níveis de compatibilidade desta classe são idênticos aos da rede pública, admitindo a utilização de equipamentos com características semelhantes aos utilizados para a rede pública.

PCC é a sigla inglesa de *point of common coupling* – ponto de uma rede pública electricamente próximo de uma carga particular, á qual outras estão ligadas ou possam vir a ser ligadas

IPC é a sigla inglesa de *in-plant point of coupling* – ponto de uma rede incluída num sistema eléctrico, ou uma instalação, electricamente próximo de uma carga particular, á qual outras estão ligadas ou possam vir a ser ligadas.

³ Na falta dos valores de R_{cc} e X_{cc} da rede, considera-se que $R_{cc}/X_{cc} = 0,1$ (valor empírico) e utiliza-se a expressão $Z_{cc} = \sqrt{(R_{cc}^2 + X_{cc}^2)}$.

Normalmente o *IPC* é o ponto onde se estuda a *compatibilidade electromagnética*.

- c) **Classe 3** – Aplica-se apenas a *IPC* em **ambiente industrial**. Os níveis de compatibilidade **são superiores aos da Classe 2**, para certo tipo de perturbações, devendo ser considerado quando: a maior parte das cargas é alimentada a partir de *conversores de tensão e/ou frequência*; *são utilizadas várias máquinas de soldar*; *existem motores de potência elevada com arranques frequentes*; *existem variações rápidas das cargas*.

Os níveis de compatibilidade harmónica⁴ (U_h [%]) para frequências ímpares **múltiplas de 3** e **não múltiplas de 3** são indicadas nas Tabelas 1 e 2

Tabela 1 – Níveis de compatibilidade harmónica para frequências ímpares múltiplas de 3

Ordem da harmónica (n)	U_h [%]		
	Classe 1	Classe 2	Classe 3
3	3	5	6
9	1,5	1,5	2,5
15	0,3	0,5	2
21	0,2	0,4	1,75
$21 < n \leq 45$	0,2	0,3	1

Tabela 2 – Níveis de compatibilidade harmónica para frequências não ímpares múltiplas de 3

Ordem da harmónica (n)	U_h [%]		
	Classe 1	Classe 2	Classe 3
5	3	6	8
7	3	5	7
11	3	3,5	5
13	3	3	4,5
17	2	2	4
$17 < n \leq 49$	$2,27 \times (17/n) - 0,27$	$2,27 \times (17/n) - 0,27$	$4,5 \times (17/n) - 0,5$

Os **níveis de compatibilidade** da *THD* para cada uma das classes são:

- *Classe 1* – **5%**.
- *Classe 2* – **8%**.
- *Classe 3* – **10%**.

4. EFEITOS DAS HARMÓNICAS E PRINCIPAIS FONTES

As *harmónicas*, para além da **distorção das ondas de tensão**, têm os seguintes efeitos nefastos para os sistemas e equipamentos eléctricos:

- Afectam o funcionamento dos sistemas de comando e protecção

⁴ O nível de compatibilidade indica o nível máximo de perturbação electromagnética que se prevê que fique submetido um equipamento ou um sistema, sob determinadas condições.

- Aumento do efeito pelicular⁵
- Vibrações e oscilações mecânicas nas máquinas eléctricas, designadamente transformadores e motores
- Diminuição do factor de potência da instalação
- Degradação do isolamento, devido a envelhecimento precoce e a consequente perda da sua rigidez dieléctrica
- Mau funcionamento dos equipamentos, sobreaquecimento e aumento das perdas, designadamente em cabos e transformadores
- Diminuição da vida útil dos equipamentos.

A **distorção das ondas de tensão**, quando **aplicadas a cargas não lineares**, *provoca a circulação de harmónicas nessas cargas, dando origem ao seu mau funcionamento*, como seja o caso dos *sistemas de comando e protecção*, devido a **interferências electromagnéticas**, e a *diminuição do binário dos motores eléctricos*, devido à **circulação de correntes induzidas nos materiais condutores**, quando estes se encontram *sob a acção de um fluxo magnético variável (correntes de Foucault)*.

Em **sistemas trifásicos desequilibrados**, a *presença de harmónicas* pode provocar **uma corrente no neutro superior à soma vectorial das correntes das três fases à frequência industrial**, no que pode resultar **uma sobrecarga no condutor de neutro**.

O **aumento do efeito pelicular aumenta a resistência dos condutores** e, *consequentemente, o aumento da queda de tensão e das perdas por efeito de Joule*. Esta questão é particularmente sensível **nas linhas aéreas MAT⁶ com comprimentos superiores a 800 km**. Para *ultrapassar o problema a solução habitualmente utilizada* é fazer o **transporte de energia em corrente contínua**, onde *não se verifica o efeito pelicular*.

As **vibrações e oscilações mecânicas nos motores** podem dar origem a **desalinhamento do veio e à destruição dos elementos constituintes do estator e do rotor, também das chumaceiras**.

O **aumento das perdas nos transformadores** verifica-se quer **nas perdas em vazio (ou no ferro)**, devido à **circulação de correntes de Foucault** e às **perdas por histerese⁷**, que são *proporcionais à frequência*, quer nas **perdas no cobre**, devido ao *efeito pelicular*.

As **cargas não lineares⁸** constituem a **principal fonte de harmónicas nas redes e sistemas eléctricos**, *salientando-se os fornos a arco, utilizados na indústria de fundição de metais, máquinas de soldar a arco e os equipamentos electrónicos de potência, tais como os rectificadores (designadamente os utilizados em tracção*

⁵ O **efeito pelicular** é um fenómeno que se caracteriza pela repulsão entre linhas de corrente electromagnética (corrente alternada), criando a tendência para que a corrente flua na superfície dos condutores.

⁶ **MAT**: *Muito Alta Tensão*; $U \geq 150 \text{ kV}$.

⁷ A **histerese** é o fenómeno resultante do facto de que quando um campo magnético é aplicado a um material ferromagnético (o que é o caso dos núcleos dos transformadores), este fica permanentemente magnetizado, assim permanecendo mesmo na ausência do campo magnético.

⁸ Uma carga é considerada **não linear** se a sua impedância varia com a tensão aplicada.

eléctrica) e os conversores estáticos. Para minimizar a geração de harmónicas as pontes rectificadoras são **preferencialmente dodecafásicas**.

Os grupos de tracção eléctrica dodecafásicos **geram tipicamente corrente harmónica nas frequências de ordem 5ª, 7ª, 17ª e 19ª** que resultam de valores práticos devido a desequilíbrios dos díodos (tolerâncias) e impedâncias das redes. Teoricamente inexistentes, estes valores **têm pequena magnitude**, pelo que em condições normais de fabrico do equipamento e de funcionamento das redes de distribuição, terão contribuição marginal, desde que não exista ressonância em torno dessa frequência.

As **manobras de baterias de condensadores e transformadores de potência**, designadamente a sua entrada em serviço, e transformadores com sobrecarga permanente **são também fontes de harmónicas**.

A **ligação em estrela** de ambos os enrolamentos dos transformadores MAT/MAT e MAT/AT⁹, para permitir a ligação directa à terra do neutro nos enrolamentos primário e secundário¹⁰, e dos transformadores de tensão são igualmente uma fonte de harmónicas.

Para minimizar as harmónicas, para **valores toleráveis**, os transformadores MAT/MAT e MAT/AT dispõem de um **terceiro enrolamento MT**¹¹ (terciário), ligado em triângulo, que é normalmente utilizado para a alimentação do Transformador dos Serviços Auxiliares da Subestação. Já no caso dos transformadores de tensão, mais particularmente em instalações MT, estes têm um **enrolamento secundário adicional com ligação em triângulo aberto**, onde é ligada uma **resistência de compensação**.

5. MEDIÇÃO E COMPENSAÇÃO DE HARMÓNICAS EM INSTALAÇÕES MT E BT

Em redes públicas de distribuição de energia ou em redes privadas de instalações industriais com configuração radial ou em anel aberto, as **correntes harmónicas tendencialmente fluem da carga geradora de harmónicas para as fontes de energia do sistema**, uma vez que a impedância da rede a montante da carga em questão é normalmente a menor vista por aquelas correntes harmónicas.

Com base neste princípio é possível determinar a **fonte de harmónicas** e os **respectivos valores**, usando **analísadores de rede** (*analísadores de qualidade de energia*), como o que se representa na Figura 4. Estes equipamentos, medem várias grandezas eléctricas de redes MT e BT¹². Através do visor frontal é possível configurar e visualizar parâmetros eléctricos e valores medidos, análise de harmónicas, controlar remotamente o produto, detectar picos e cortes de tensão, entre outras funções.

⁹ AT: Alta Tensão; 60 kV ≤ U < 150 kV

¹⁰ Nas redes de transporte MAT e AT o objectivo é **reduzir o valor das sobretensões e diminuir a espessura do isolamento dos equipamentos** para valores próximos aos correspondentes do ponto de neutro da rede.

¹¹ MT: Média Tensão; 1 kV < U < 60 kV.

¹² BT: Baixa Tensão; U ≤ 1 kV (ca)



Figura 4 – Analisador de rede portátil (esquerda) e para montagem em calha DIN (direita)

Os parâmetros mais habitualmente medidos e controláveis por este equipamento são:

- Tensão simples e composta.
- Tensão referencia *Terra-Neutro*.
- Intensidade de corrente.
- Frequência.
- Potência activa.
- Potência reactiva (indutiva e capacitiva)
- Potência aparente.
- Factor de potência.
- Pedido máximo de potência activa
- Pedido máximo de potência aparente
- Pedido máximo de corrente.
- Corrente de neutro.
- **Harmónicas e THD da tensão e da corrente.**
- Energia activa.
- Energia reactiva (indutiva e capacitiva).
- Energia aparente.
- Factor de pico (tensão).
- Desequilíbrios de tensão e corrente.
- Assimetria de fases (tensão e corrente).

A **existência de baterias de condensadores**, para *compensação do factor de potência*, origina que **parte das harmónicas de corrente migre para a bateria**,

sendo necessário desligar temporariamente as referidas baterias de condensadores, para se proceder a uma localização fiável das fontes de harmónicas.

Numa instalação com *baterias de condensadores* é necessário verificar se existe o **risco de ressonância harmónica devido às harmónicas próprias da bateria**, sendo este o *primeiro componente da instalação a ser investigado antes de optar por uma solução para a compensação de harmónicas*.

Comprovada a existência de harmónicas e que o **valor da THD ultrapassa os limites** impostos pela *Norma IEC 61000-2-4* e/ou **pelo distribuidor de energia eléctrica**, é necessário proceder à sua *compensação*, **dependendo a solução a implementar das características da instalação**.

Uma solução possível em **BT**, e a *mais simples*, é a **utilização de reactâncias constituídas por bobinas em cobre**, como se representa na Figura 5, que actuam como **filtro das altas frequências** e, *sobretudo*, **limitam a corrente de arranque dos rectificadores alimentados pelo mesmo transformador e restringem a sua interferência mútua**.



Figura 5 – Reactância de compensação de harmónicas

A indutância (**L**) de cada uma das fases é calculada pela expressão:

$$L = \frac{\Delta U_L \times U_n}{2\pi\sqrt{3} \times f_n \times I_n} \times 100 \text{ [mH]}$$

Onde:

- ΔU_L é a queda de tensão interna da reactância [%]
- U_n é a tensão composta da rede [V]
- f_n é a frequência industrial da rede [Hz]
- I_n é a corrente de serviço [A]

Em **redes ou instalações muito poluídas**, onde se verifica a relação $G_n/S_n > 60\%$ (G_n é a potência aparente de todas as cargas não lineares responsáveis pela produção de harmónicas da instalação e S_n a potência aparente do(s) transformador(es) a montante e ligados ao mesmo barramento que as cargas) é

recomendável a utilização de **filtros de harmónicas**, como o que se representa na Figura 6.



Figura 6 – Filtro de harmónicas

Esta compensação pode ser realizada de forma **centralizada**, no *quadro (MT ou BT) de entrada da instalação*, ou **descentralizada ou local**, localizando os filtros *junto dos equipamentos* que constituem as principais fontes de harmónicas, como se representa na Figura 7.

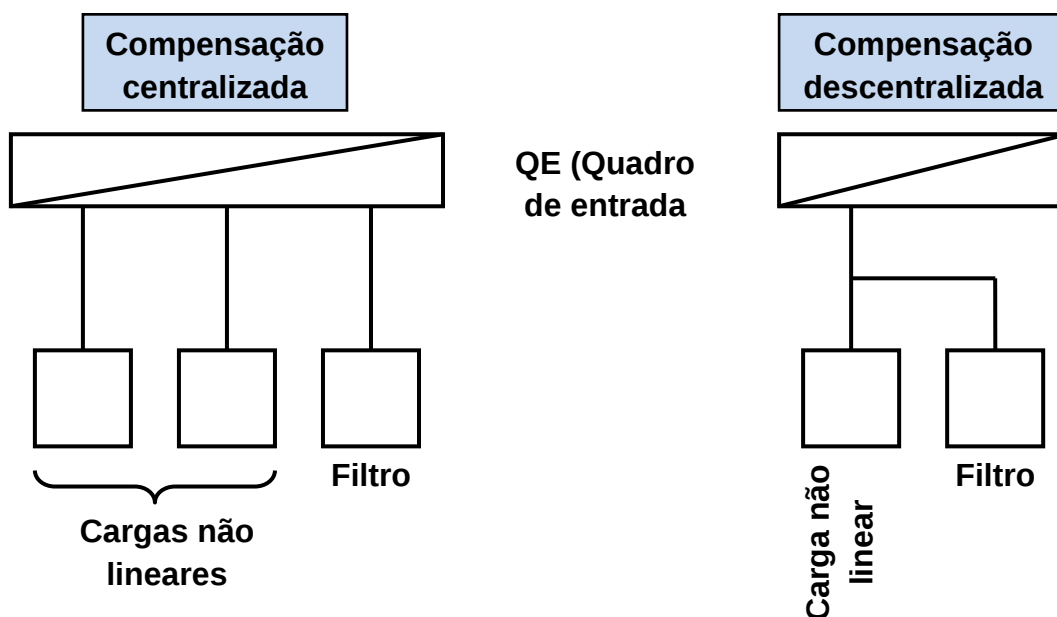


Figura 7 – Localização do filtro de harmónicas

Os *filtros de harmónicas* classificam-se em **três categorias**:

- *Passivos.*
- *Activos.*
- *Híbridos.*

Os *filtros passivos* são constituídos por **circuitos LC série**, *sintonizados para cada uma das harmónicas a compensar*, utilizados mais habitualmente para as **harmónicas de ordem 5, 7 e 11**, e apresentando as seguintes características principais:

- Não há limite da corrente harmónica a eliminar.
- Fazem compensação de energia reactiva.
- Risco de amplificação das harmónicas em caso de modificações na rede.
- Risco de sobrecarga causada por poluição electromagnética externa.

Com este tipo de filtros o sentido da corrente harmónica é indicado na Figura 8.

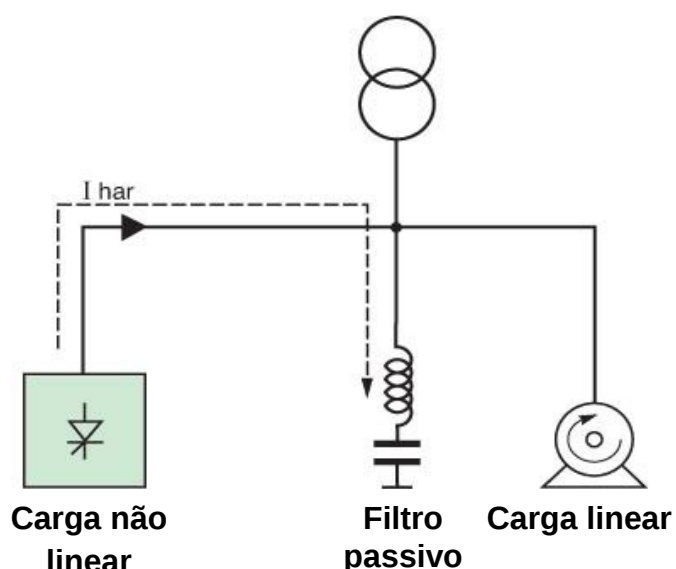


Figura 8 – Sentido da corrente harmónica com filtro passivo

Os *filtros activos* são constituídos por **componentes electrónicos e microprocessadas**, controlando as correntes harmónicas, numa gama que se estende entre as **harmónicas de ordem 2 e 50**, e gerando, *para cada gama de frequência*, uma **corrente igual e em oposição de fase à corrente harmónica**. Adaptam-se facilmente às modificações da rede, das cargas e do espectro de harmónicas, sendo particularmente indicados para a compensação descentralizada ou local.

Com este tipo de filtros o sentido da corrente harmónica é indicado na Figura 9.

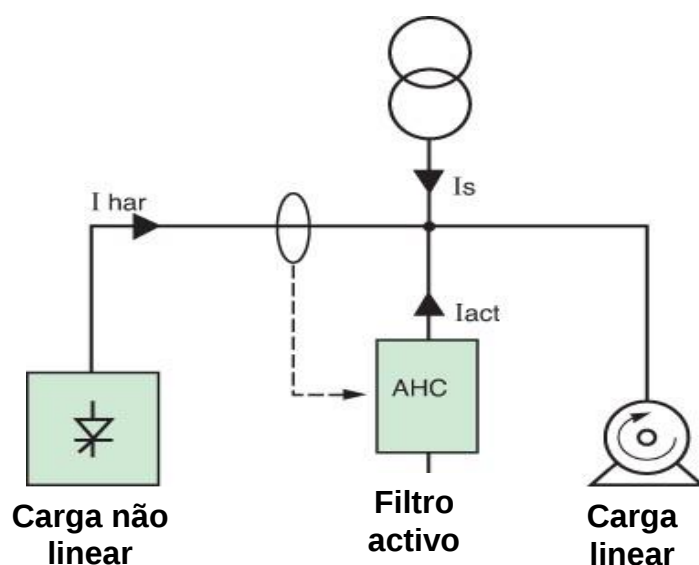


Figura 9 – Sentido da corrente harmónica com filtro activo

Os *filtros híbridos* são uma combinação de **filtros passivos e activos**, fazendo a compensação numa gama que se estende entre as **harmónicas de ordem 2 e 25**, fazendo também a compensação do factor de potência.

O sentido das correntes harmónicas com este tipo de filtros indica-se na Figura 10.

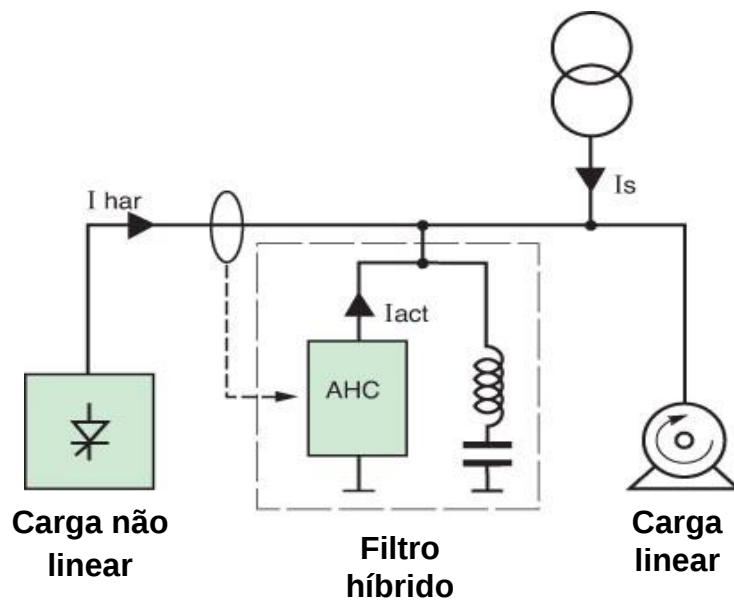


Figura 10 – Sentido da corrente harmónica com filtro híbrido

ⁱO Autor não utiliza o Novo Acordo Ortográfico