

*Confiança e economia
na qualidade da energia.*

**ENGEMATEC EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS
E ELETRÔNICOS DE POTÊNCIA LTDA**

MARCA DE CONFIANÇA

**Harmônicos em Sistemas de Potência:
Entenda os Fundamentos**

Harmônicos – Uma breve definição:

Nos sistemas elétricos define-se harmônicos como frequências múltiplas da forma de onda fundamental, ou seja: quando dizemos que um circuito possui a 5ª ordem harmônica estamos nos referindo a frequência de 300 Hz (num sistema de frequência nominal de 60 Hz).

Como analogia, nos sistemas mecânicos também existem os harmônicos oscilatórios (em motores por exemplo) onde existem vibrações com frequências múltiplas da fundamental (ou internos com frequências múltiplas da frequência de escorregamento) e que neste caso criam fadiga ou ruídos audíveis.

Os harmônicos, principalmente as correntes harmônicas, são gerados por todas as cargas chamadas de não lineares; estas cargas têm esta definição por apresentarem como resposta a um sinal elétrico de frequência fixa (por exemplo uma tensão senoidal) uma forma de onda de frequência diferente do sinal de alimentação – principalmente na forma podendo ou não haver deslocamento. Como exemplo temos a figura 1 que é a corrente medida de um conversor de potência quando alimentado por uma tensão senoidal.

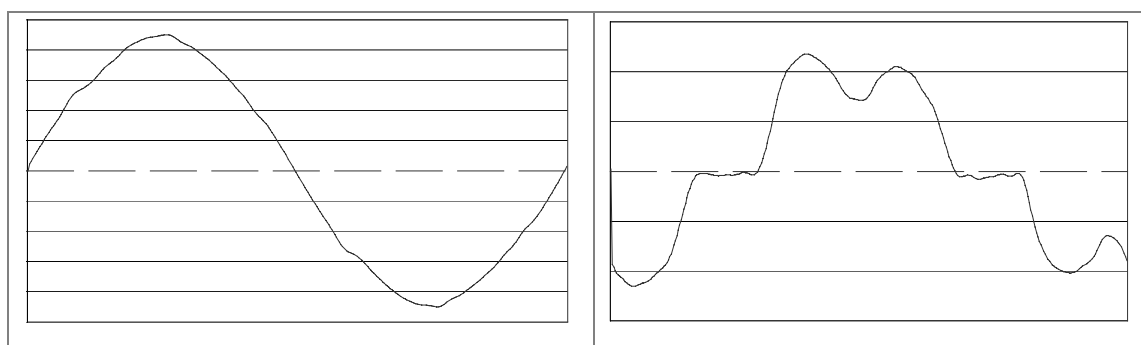


Figura 1

Formas de onda: Tensão de alimentação e corrente de um conversor (AC/DC)

Como carga não linear podemos reconhecer os fornos de indução e a arco, lâmpadas de descarga, softstart, conversores, inversores de frequência, máquinas de solda, computadores pessoais, e uma infinidade de equipamentos que utilizem eletrônica de potência, ou seja, quase todos.

Vê-se claramente que a partir de uma alimentação senoidal a corrente absorvida pelo conversor possui uma forma de onda diferente da alimentação.

Histórico: Jean Baptiste Joseph Fourier, em 1822 publicou sua “*Théorie analytique de la chaleur*”, na qual ele baseia-se no raciocínio da “Lei de Newton da Refrigeração”; Neste trabalho mostrou que todas as funções de uma variável, se contínuas ou não, podem ser expandidas em uma série de senos dos múltiplos da variável

Esta ferramenta matemática, também utilizada para a decomposição de formas de onda periódicas em funções matemáticas simples - decomposição de uma forma de onda qualquer em uma somatória (pelo teorema da superposição) de senos e cossenos, e que pode ser aplicada com facilidade na análise dos fenômenos harmônicos.

Fórmula de Fourier:

$$v(t) = Y_0 + \sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n \sqrt{2} \sin(n\omega t - \varphi n)$$
 onde: Y_0 é o valor do componente CC, geralmente nulo; Y_n é a componente harmônica de ordem “n”; n é a ordem harmônica; ωt é a velocidade angular e φ é a defasagem da componente harmônica de ordem “n”. O gráfico da figura 2 mostra de forma sucinta o teorema de Fourier, onde a forma de onda resultante é uma somatória de componentes senoidais múltiplas de 60 Hz.

Com base nas formulações de Fourier, a forma de onda do conversor da figura 1 poderia ser expressa (em função do valor da corrente fundamental) conforme a gráfico da figura 3:

Outra definição largamente utilizada é a que expressa a distorção total de uma determinada forma de onda em função de sua componente fundamental (por exemplo 60 Hz), sendo:

$$DHT(\%) = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n^2}}{Y_1}$$

onde Y_n é a componente de ordem harmônica (>1) e Y_1 é a componente fundamental

Esta fórmula, de reconhecimento universal apenas dá uma ordem de grandeza sobre a existência ou não de problemas harmônicos. De uma maneira geral ela exprime percentualmente o quanto uma forma de onda está deformada quando comparada com o seu valor fundamental.

Por exemplo a forma de onda do conversor do exemplo acima (figura 1) possui uma deformação (distorção harmônica total – THD) de aproximadamente 32%.

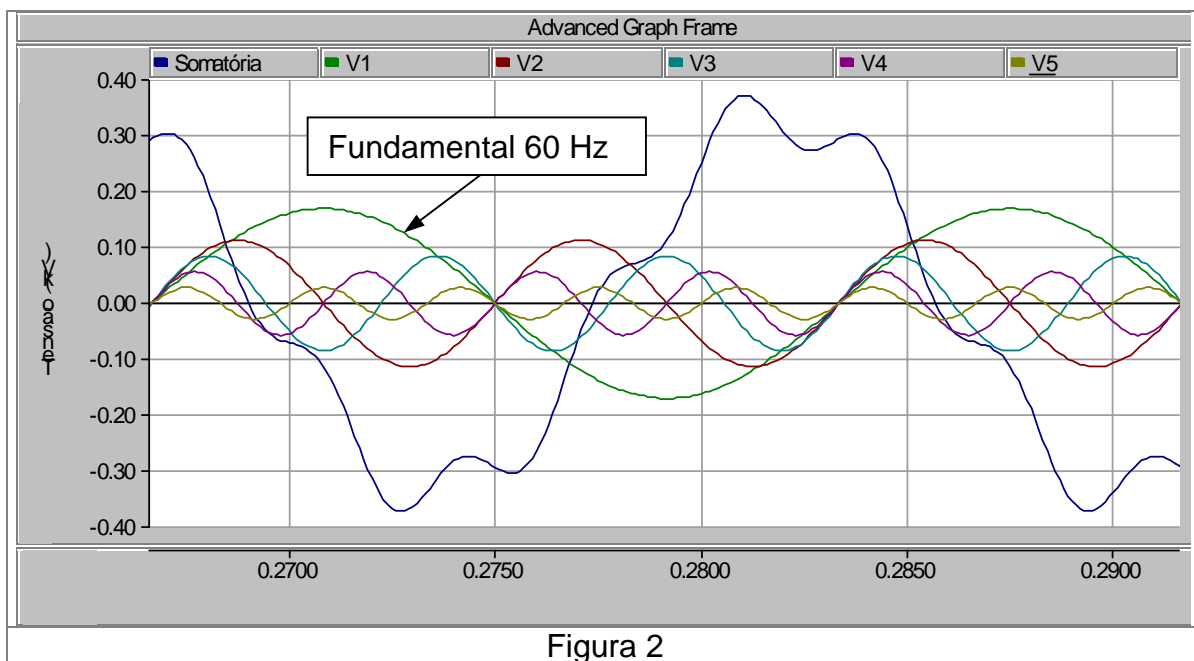


Figura 2

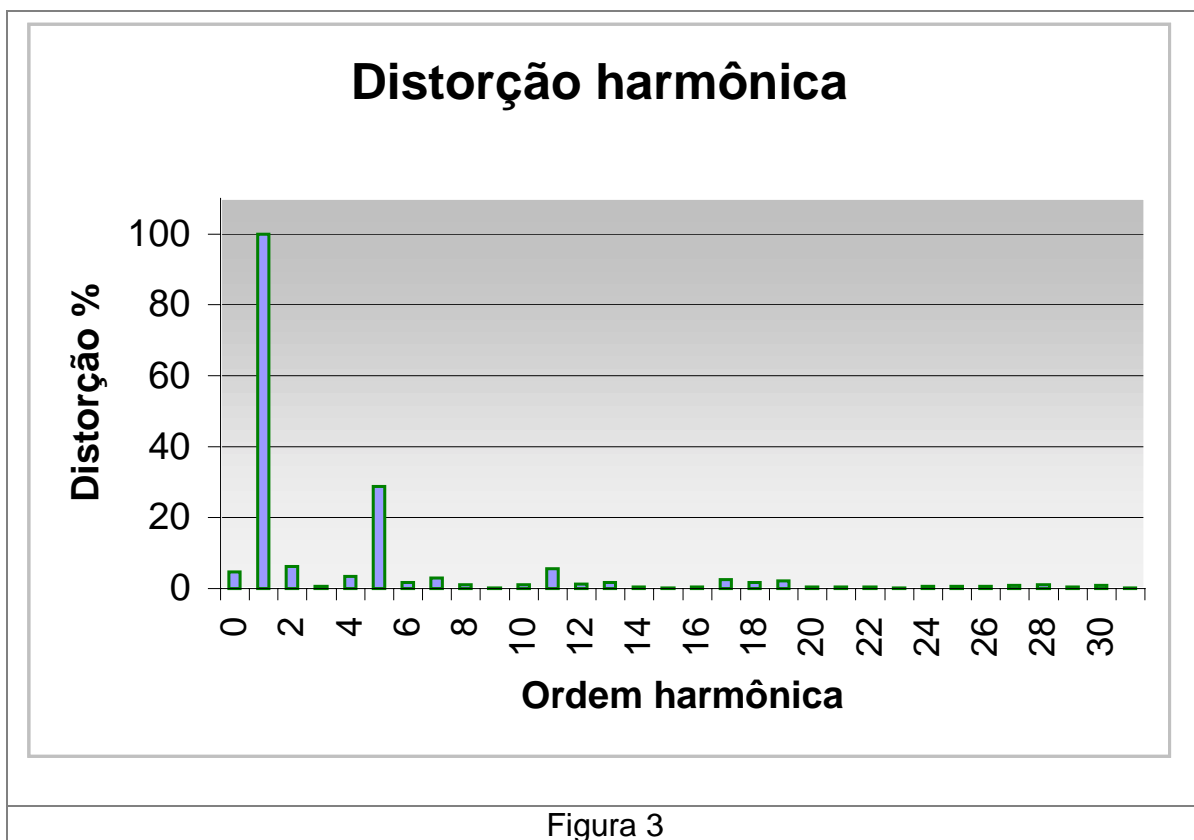


Figura 3

Os problemas causados pelos harmônicos:

A maioria dos equipamentos elétricos é projetado para operar numa condição de tensão eficaz (por exemplo 380V, 440V, etc, com variação de aproximadamente $\pm 5\%$) e numa frequência fixa como por exemplo 60 Hz. Sempre que ocorrem variações na tensão, corrente e/ou frequência de alimentação os equipamentos estarão sujeitos a apresentar falhas, mau funcionamento, queima, fadiga, etc.

Fazendo analogia à mecânica, quando projetamos um acoplamento, necessitamos dos dados da velocidade, momento de inércia, torque, etc. Se alguma dessas características for alterada pela carga motora (ou motriz) também poderemos ter problemas mecânicos ou danos irreversíveis neste acoplamento.

De uma maneira geral o que define a suscetibilidade de um equipamento elétrico a uma falha, é a temperatura e seu dielétrico (isolamento). Se o equipamento opera com uma temperatura acima do seu valor de projeto o mesmo estará sujeito a uma fadiga adicional com possibilidade de degradação ou destruição.

Já no caso do dielétrico (valor de isolamento pelo qual um equipamento garante que não haverá um “curto circuito” interno), quando o mesmo opera fora de seu valor de projeto (como no caso da existência de harmônicas) é de esperar uma perda adicional da capacidade de seu dielétrico, podendo levar o material à fadiga e destruição.

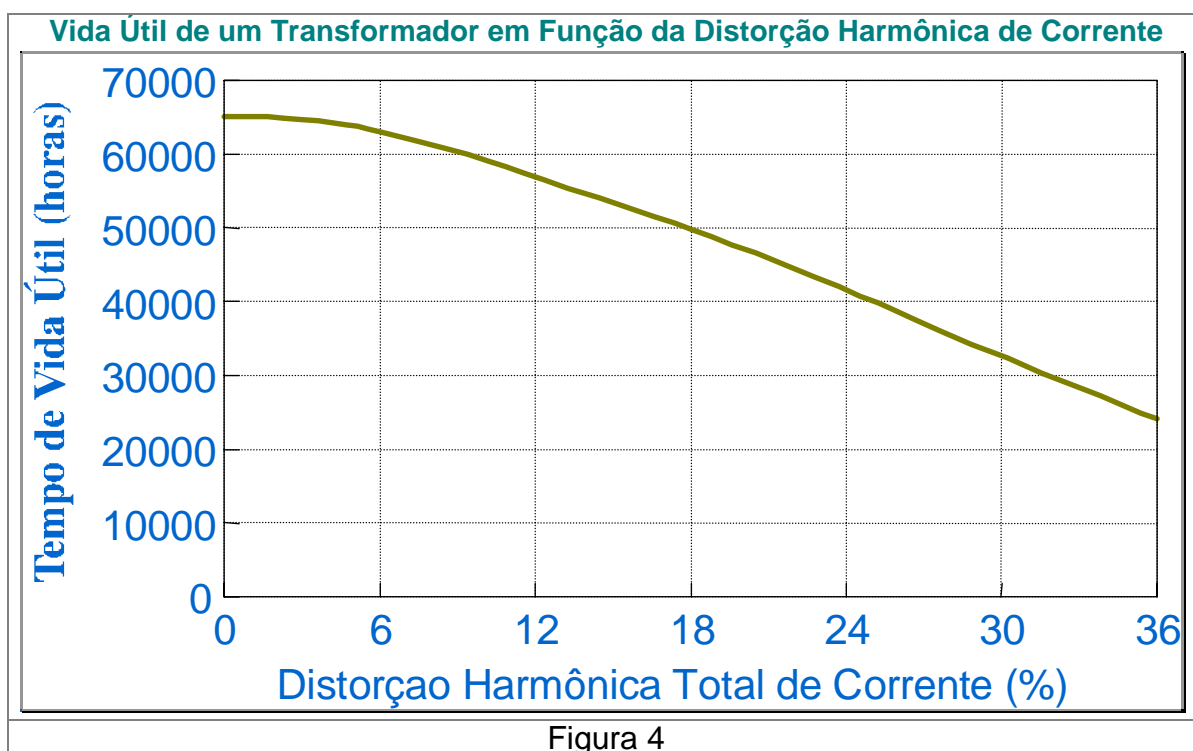
As principais normas que definem os limites harmônicos para equipamentos e sistemas são:

- IEEE Std 1036-1992, IEEE Guide for Application of Shunt Power Capacitors
- IEC 831-1, Shunt power capacitors of the self-healing type for a.c. systems having a rated voltage up to and including 1000V.
- IEEE Std 18, IEEE Standard for Shunt Power Capacitors
- NBR 5060, Guia para Instalação e Aplicação de Capacitores de Potência
- IEEE Std 519-1992 Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems
- NEMA - National Electrical Manufacturers Association Electrical - Power Systems Quality - *Application Guide For AC Adjustable Speed Drive Systems*
- [IEEE C57.12.00-1987, IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers (ANSI)]
- NEMA - National Electrical Manufacturers Association - MG1-1998 Motors and Generators
- IEEE STD C57.110-1998 - IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonlinear Load Currents

Um número internacionalmente aceito é 5% de distorção harmônica total – para os níveis de tensão. Este número na realidade exprime de uma maneira geral a capacidade que os equipamentos elétricos e eletrônicos têm de suportar os níveis harmônicos sem degradação ou falha prematura.

Por exemplo, a NEMA define como um máximo aceitável o valor de 5% de distorção de tensão para os “Drivers” (Adjusted Speed Drivers) conhecidos como inversores de frequência, conversores AC/DC e equipamentos similares como os Softstart. Já o IEEE 519 define o mesmo percentual para cargas sensíveis como computadores, CLP, controles numéricos, entre outros.

Como exemplo a figura 4 demonstra a perda da vida útil de um transformador em função dos níveis harmônicos de corrente, e a figura 5 demonstra as perdas nos motores em função dos níveis harmônicos de tensão.



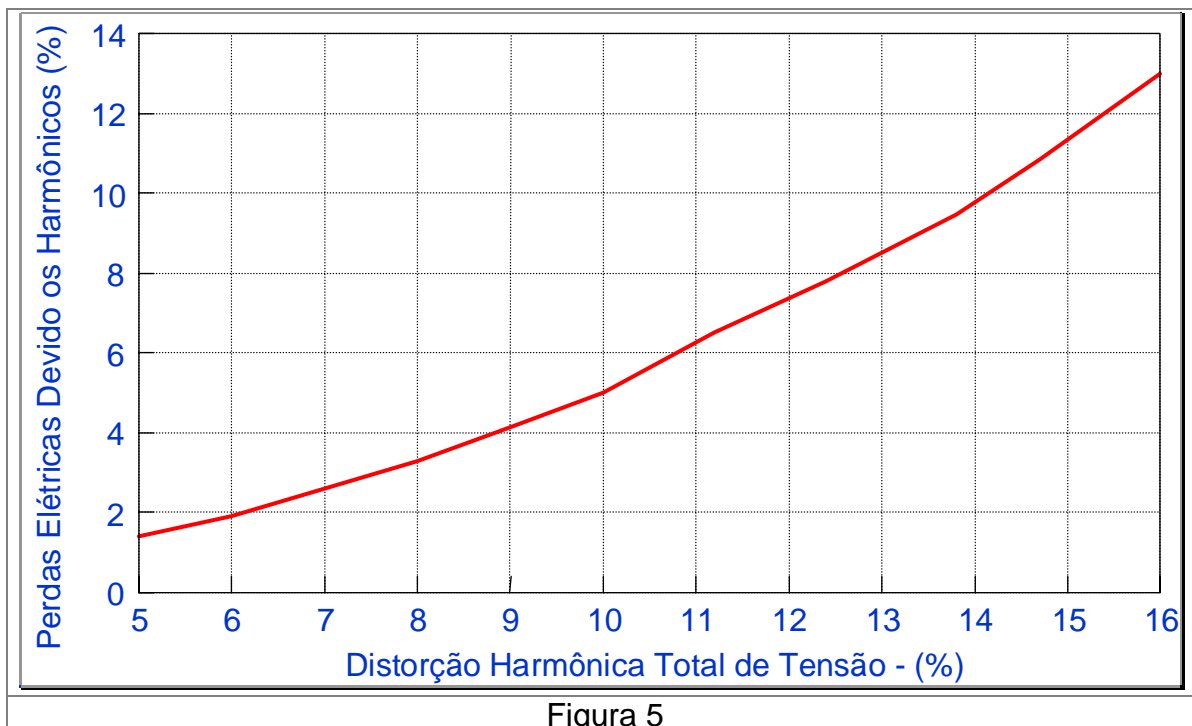


Figura 5

Vamos quantificar os fenômenos harmônicos de uma forma básica; para isso utilizaremos a universal lei de Ohm.

Pela lei de Ohm podemos utilizar algumas formulações básicas:

- 1 – $V = R \times I$ sendo V em Volts, I em Amperes e R em Ohm
- 2 – $P = R \times I^2$ sendo P em Watts

As impedâncias das componentes indutiva e capacitiva tem a formulação:

- 3 – $Z_L = 2\pi fL$ sendo f a frequência da rede (Hz) e L a indutância (H)
- 4 – $Z_C = 1/2\pi fC$ sendo f a frequência da rede e C a capacitância (F)

Tomemos como base um diagrama básico de uma planta industrial (figura 6), onde para uma frequência de 60 Hz a concessionária é a única fonte de energia e para as ordens harmônicas (com frequências maiores que 60 Hz) a carga não linear é a fonte de energia – corrente. O transformador tem saída na baixa tensão de 380 Volts.

Com base nas fórmulas dadas acima, podemos tirar as seguintes definições para as tensões harmônicas superiores a 2:

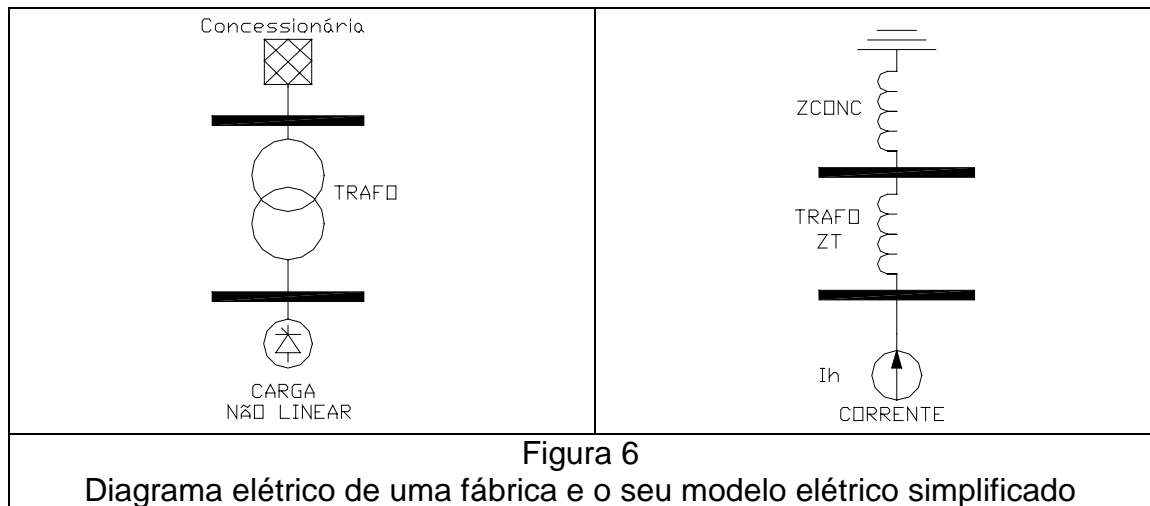
$V_h = I_h \times Z_T + Z_{CONC}$ (pelas fórmulas 1 e 3), e cada impedância Z deve ser corrigida para a frequência harmônica correspondente.

Vamos supor que a corrente harmônica medida seja de 15A (5ª harmônica), que a impedância Z_{CONC} da concessionária seja de 0,1 Ω para a mesma ordem e que a impedância Z_T do transformador seja 2 Ω , todas referidas ao secundário do trafo; temos então pela equação acima:

$V_5 = 15 \times (2 + 0,1) \therefore V_5 = 31,5$ Volts de 5ª harmônica (300 Hz).

Se utilizarmos a definição dada para a distorção harmônica total, teríamos na baixa tensão do transformador a seguinte deformação (distorção):

$$DHT(\%) = 100 \frac{\sqrt{31,5^2}}{380} \therefore DHT = 8,29\%$$



O fenômeno da ressonância:

Este fenômeno é caracterizado quando a reatância capacitiva se iguala à reatância indutiva (predominantemente do transformador). Se houver correntes harmônicas no sistema que coincidam com a frequência de ressonância, os níveis de tensão harmônicos serão maximizados - para uma ressonância paralela -, ou minimizados, para uma ressonância série - como é o caso dos filtros.

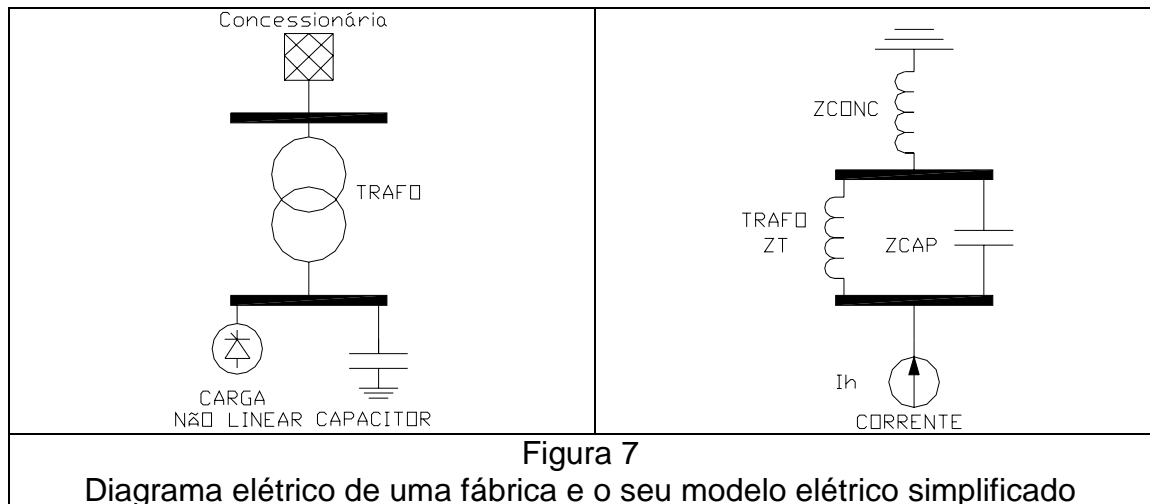
Resumidamente temos:

$$XL = XC \rightarrow 2\pi f L = \frac{1}{2\pi f C} \quad \text{Existirá uma frequência na qual essas duas}$$

impedâncias serão iguais, e portanto:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Consideremos o exemplo onde é instalado um capacitor para a correção do fator de potência. Supondo que a impedância do capacitor seja $1,5 \, \Omega$ (já corrigida para a 5ª ordem harmônica) e que as demais impedâncias sejam as mesmas do exemplo anterior; nosso diagrama unifilar passa a ser o representado pela figura 7.



Primeiramente devemos encontrar a impedância equivalente dos componentes em paralelo (transformador e capacitor).

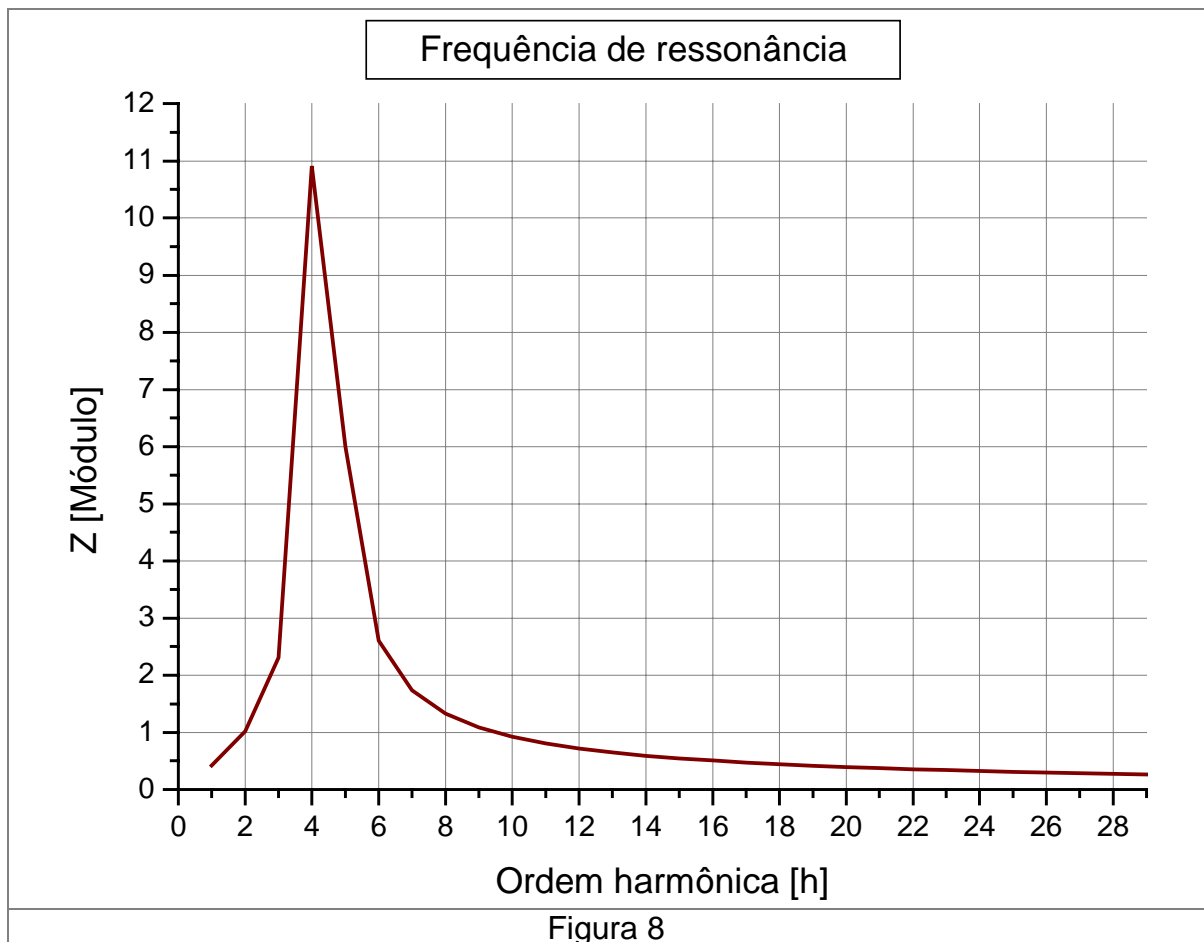
$Z_{\text{PARALELO}} = 1,29\Omega$ (em módulo) e então a tensão harmônica de 5ª ordem na baixa tensão será:

$$V_5 = 15 \times (0 - j0,5,99 + j0,1) \therefore V_5 = 88,50 \text{ Volts de } 5^\circ \text{ harmônica (300 Hz)}$$

Se utilizarmos novamente a definição para a distorção harmônica total, teríamos na baixa tensão do transformador a seguinte deformação (distorção):

$$DHT(\%) = 100 \frac{\sqrt{88,50^2}}{380} \therefore DHT = 23,30\% \text{ e neste caso houve uma amplificação dos níveis harmônicos em quase 3 vezes, isto somente devido a instalação do capacitor.}$$

A figura 8 representa a variação da impedância deste exemplo com a variação da frequência, e como a ressonância ocorre próximo a 5ª ordem esta será maximizada.



Filtragem dos harmônicos:

O objetivo da filtragem é evitar (principalmente) que as correntes harmônicas se propaguem pelo sistema, elevando os valores de tensão, e consequentemente a distorção harmônica total (DHT), o que conforme abordado acima, degradaria os equipamentos conectados.

O princípio básico de funcionamento do filtro harmônico (passivo) é o de absorver determinadas correntes harmônicas evitando que estas se propaguem pelo sistema (principalmente transformadores) minimizando desta maneira a distorção harmônica de tensão (DHT).

Resumidamente, o filtro é um conjunto série de indutor e capacitor, sendo que seus elementos são escolhidos de forma a proporcionar uma baixa impedância (Z) para a frequência que se deseja atenuar.

Utilizando as equações de Norton – onde a somatória das correntes que entram num nó é igual as correntes que saem deste nó – se analisarmos a figura 9, a corrente harmônica I_h se divide em três correntes $I_{\text{Motor}} + I_{\text{Filtro}} + I_{\text{Trafo}}$ (para harmônicas $>1^a$).

Se o filtro tiver uma impedância desprezível para a ordem harmônica que se quer eliminar, as correntes harmônicas que circularão pelo transformador e motor serão aproximadamente zero. Este é o princípio de funcionamento da filtragem harmônica.

A fórmula para o cálculo da sintonia do filtro (frequência que se quer eliminar) é a mesma descrita anteriormente no fenômeno da ressonância; temos então:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Consideremos o exemplo abaixo onde no lugar do capacitor para a correção do fator de potência instalamos um filtro visando a absorção da corrente harmônica gerada pela carga não linear.

Utilizando os mesmos dados dos exemplos anteriores onde $Z_T = 2\Omega$, $Z_{CONC} = 0,1\Omega$, X_C do filtro é $1,5\Omega$. Temos então a figura 10.

Como queremos que o filtro apresente uma impedância próxima a zero para a ordem harmônica que se quer atenuar, o valor da indutância X_L deverá ter nesta frequência específica uma impedância igual ao valor da impedância X_C definida acima, então temos:

$$X_L = 1,5625\Omega \text{ (para uma frequência de ressonância em 4,8h) e } Q \text{ de } 30.$$

Novamente devemos encontrar a impedância equivalente dos componentes em paralelo (transformador e filtro).

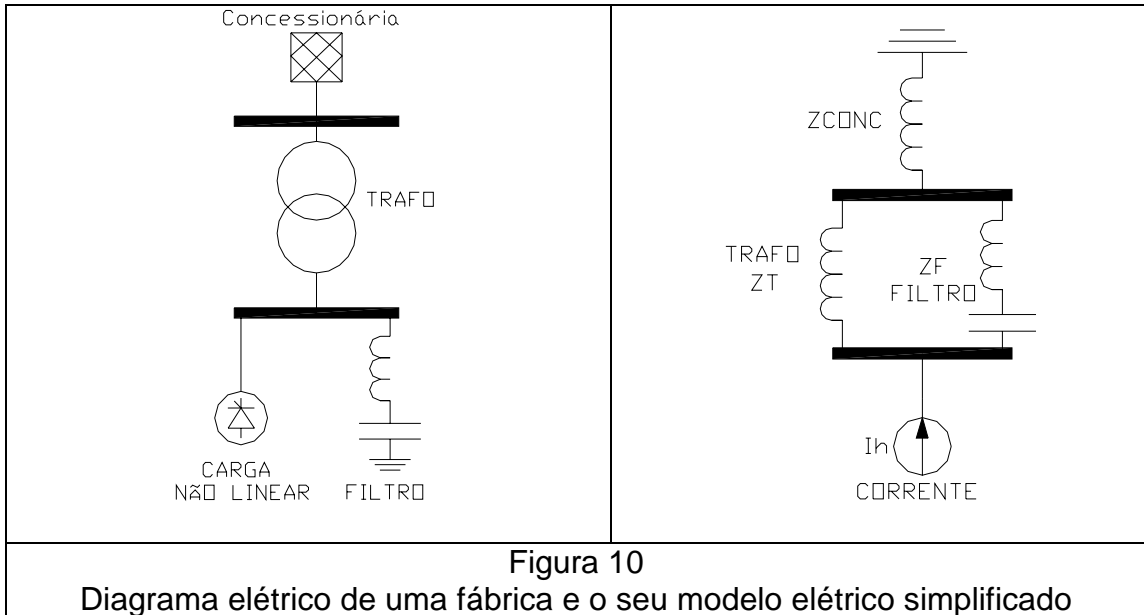
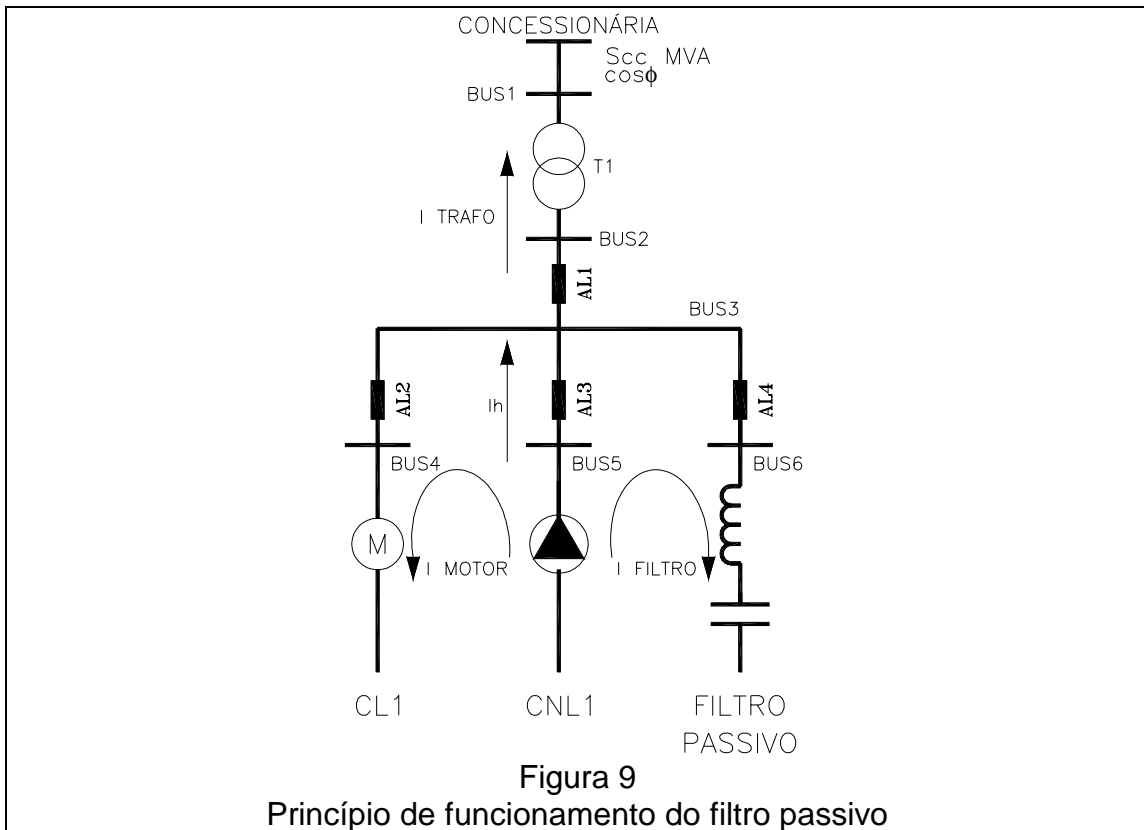
$Z_{PARALELO} = 0,0120\Omega$ (em módulo) e então a tensão harmônica de 5ª ordem na baixa tensão será:

$$V_5 = 15 \times (8,84E^{-3} + j0,220 + j0,1) \rightarrow V_5 = 15 \times (0,221) \therefore V_5 = 3,303 \text{ Volts de } 5^a \text{ harmônica (300 Hz)}$$

Se utilizarmos novamente a definição dada para a distorção harmônica total , teríamos na baixa tensão do transformador a seguinte deformação (distorção):

$$DHT(\%) = 100 \frac{\sqrt{3,303^2}}{380} \therefore DHT = 0,870\% \text{ e neste caso houve uma redução}$$

dos níveis harmônicos em quase 10 vezes quando comparado com o primeiro exemplo (sem capacitores), isto somente devido a instalação do filtro.



O sistema anti-ressonante (ou dessintonizado):

Quando os níveis de tensões harmônicas presentes num sistema elétrico são baixos, ou quando existir a possibilidade de ressonância paralela entre o banco de capacitores e as demais cargas o que poderia amplificar esses níveis harmônicos há a necessidade de instalação de indutores em série com os bancos de capacitores visando evitar esta condição de ressonância.

O princípio da dessintonia é idêntico ao do dimensionamento do filtro, porém a frequência que deve haver a ressonância série (indutor/capacitor) geralmente é escolhida abaixo da frequência gerada pelas cargas não lineares, ou seja:

Se a principal ordem harmônica presente no sistema for a 5ª, geralmente a sintonia do conjunto é escolhida como 3,4ª ou seja, abaixo da 5ª ordem harmônica.

Exemplificando, vamos considerar novamente os mesmos dados dos exemplos anteriores onde $Z_T = 2\Omega$, $Z_{CONC} = 0,1\Omega$, X_C do filtro é $1,5\Omega$, também conforme a figura 10.

Como queremos uma ressonância na 3,4ª ordem o valor da reatância indutiva X_L será de $2,206\Omega$ com Q de 30.

Devemos encontrar a impedância equivalente dos componentes em paralelo (transformador e capacitor com indutor de dessintonia).

$Z_{PARALELO} = 1,074\Omega$ (em módulo) e então a tensão harmônica de 5ª ordem na baixa tensão será:

$$V_5 = 15 \times (2,856E^{-3} + j1,032 + j0,1) \rightarrow V_5 = 15 \times (1,032) \therefore \\ V_5 = 15,48 \text{ Volts de } 5^a \text{ harmônica (300 Hz)}$$

Pela definição dada da distorção harmônica total, teríamos na baixa tensão do transformador a seguinte deformação (distorção):

$$DHT(\%) = 100 \frac{\sqrt{15,48^2}}{380} \therefore DHT = 4,08\% \text{ e neste caso houve uma redução}$$

dos níveis harmônicos em quase 10 vezes quando comparado com o primeiro exemplo (sem capacitores), isto somente devido a instalação do filtro.

Como fica evidente a instalação de indutores de dessintonia não elimina os problemas com harmônicos, apenas pode amenizá-los. Geralmente numa instalação industrial com cargas não lineares existem outras ordens harmônicas como 3ª, 7ª, 11ª características entre outras.

Um projeto consistente deve avaliar todas as condições, principalmente as de ressonância e somente após isto definir o melhor equipamento a ser instalado, visando manter o sistema elétrico dentro dos limites toleráveis de distorção e definidos pelas normas aplicáveis.

Uma outra informação importante acerca dos níveis harmônicos é o aumento do consumo de energia e potência elétrica em kW. Conforme definido anteriormente a potência pode ser expressa diretamente por RxI^2 e se correntes harmônicas estiverem presente, maiores serão as perdas nos componentes da instalação e principalmente a potência de entrada (expressa em kW), que será aumentada.

Trabalho elaborado pelo Engº Paulo Henrique Tavares, baseado nas seguintes fontes:

- Correção do Fator de Potência e Aplicação de Capacitores na Presença de Harmônicos; Tavares, Paulo Henrique; Target/ABNT
- Palestra Qualidade da Energia Elétrica Conceitos, Impactos Técnicos e Efeitos Econômicos; Tavares, Paulo Henrique; diversas localidades

Este material é de propriedade da Engematec® Capacitores, sendo proibida sua reprodução total ou parcial sem prévia autorização.

www.engematec.com.br
suporte@engematec.com.br

Av. Gov. Pedro de Toledo, 2020
Campinas - SP
Tel: (19) 3242-9176