

Harmônicos em instalações elétricas.

O objetivo deste documento é o de alertar sobre os possíveis problemas de ressonância e distorções harmônicas na aplicação de capacitores para a correção do fator de potência na presença de cargas deformantes. Estudos detalhados devem ser efetuados visando a avaliação das condições elétricas da planta, cargas e capacitores, para evitar danos ao sistema elétrico.

1. Introdução

Antes de entrarmos no tema correção do fator de potência e consequências, devemos fazer uma breve explanação sobre as fontes de harmônicos: suas causas e efeitos.

1.1. Cargas Lineares:

Uma carga linear pode ser definida como aquela em que há uma relação linear (equação diferencial linear com fatores constantes) entre corrente e tensão. Em termos mais simples, uma carga linear absorve uma corrente senoidal quando é alimentada por uma tensão senoidal. Essa corrente pode estar defasada por um ângulo φ em relação à tensão. Como exemplo ver as figuras 1.0 para uma carga puramente resistiva e figura 1.1, para uma carga mista (resistiva e indutiva).

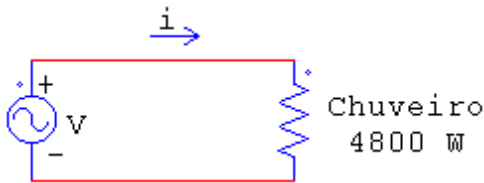
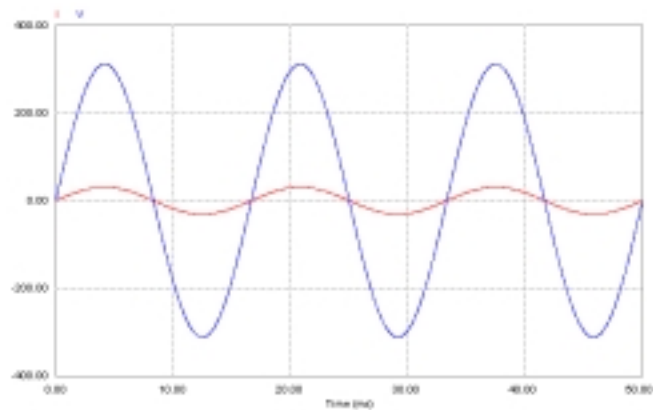


FIG 1.0



FORMA DE ONDA FIG 1.0

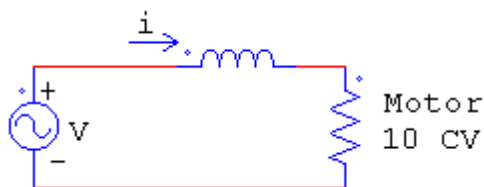
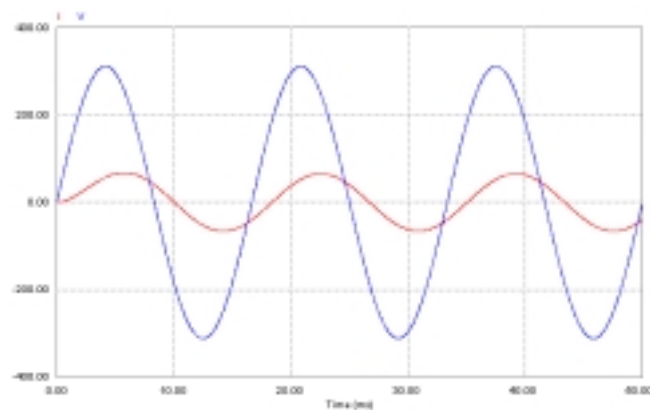


FIG 1.1



FORMA DE ONDA FIG 1.1

1.2. Cargas Não Lineares

Quando a relação entre corrente e tensão num determinado componente não é descrita por uma equação linear, esta carga é denominada não-linear. Ela absorve uma corrente não senoidal e, portanto, correntes harmônicas, mesmo quando é alimentada por uma tensão puramente senoidal.

Como exemplo ver as figuras 1.2 para uma carga puramente resistiva e figura 1.21, para uma carga mista (resistiva e indutiva). Para efeito de comparação, serão utilizados as mesmas cargas das figuras 1.0 e 1.1, porém controle do ângulo de disparo.

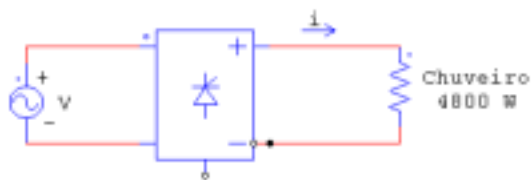
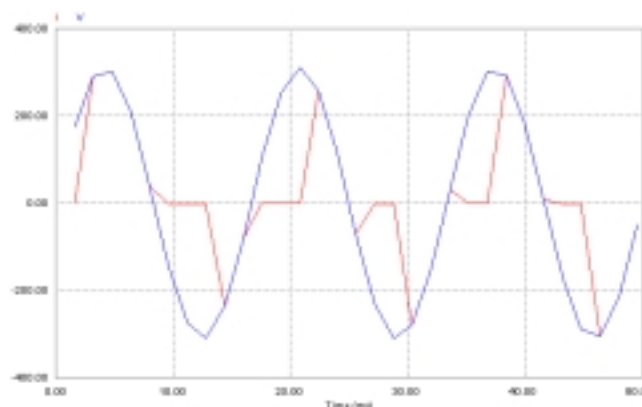
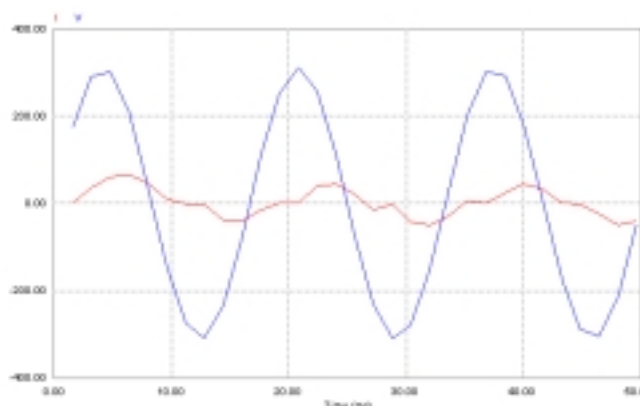


FIG 1.2



FORMA DE ONDA FIG 1.21

Para uma carga mista como um motor, com controle de tensão (softstart por exemplo) têm-se a forma de descrita na fig 1.22:



FORMA DE ONDA FIG 1.22

1.3.Principais fontes de correntes Harmônicas

A maioria das cargas que causam deformações são conversores estáticos, os quais podem ser de grande potência e em pequena quantidade ou de baixa potência e em grande número. Alguns exemplos de cargas deformantes são:

- Lâmpadas fluorescentes, *dimmers*;
- Computadores;
- Eletrodomésticos (aparelhos de TV, microondas, fornos elétricos com controle eletrônico de potência, etc);

Numa planta industrial podemos citar os variadores de velocidade (inversores de frequência), softstart's, fornos de recozimento e fundição por indução eletromagnética, lâmpadas de descarga, fornos de fundição por arco voltaico, controladores de tensão estáticos, grupos retificadores, entre outros.

Os fornos a arco voltaico, lâmpadas de descarga e as demais cargas que operam através de "curto circuitos" possuem um espectro de correntes com componentes inter-harmônicas, ou seja, as componentes das correntes de tais equipamentos são compostas por múltiplos inteiros e *não inteiros* da corrente fundamental.

1.4. Definição e características quantitativas dos harmônicos

Joseph Fourier provou que todas as funções periódicas não senoidais podem ser representadas por uma soma de termos senoidais. O primeiro desses termos, à frequência de recorrência da função é chamado de fundamental e os outros, definidos como múltiplas da frequência fundamental, são chamados de harmônicos. Uma componente CC pode completar esses termos puramente senoidais.

- **Fórmula de Fourier:**

$$v(t) = Y_0 + \sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n \sqrt{2} \operatorname{sen}(n\omega t - \varphi_n)$$

onde:

Y_0 = valor da componente CC, geralmente nulo;

Y_n = valor eficaz da componente harmônica de ordem "n";

ω = frequência angular da componente fundamental;

φ_n = defasagem da componente harmônica de ordem "n";

A noção de harmônicas se aplica a todos os fenômenos periódicos, independente de sua natureza, e, particularmente, à corrente CA.

- **Valor eficaz de uma quantidade não senoidal:**

Há similaridade entre a expressão normal desse valor eficaz, calculado a partir da evolução no tempo da quantidade alternada ($y(t)$), e a expressão calculada utilizando seu conteúdo harmônico:

$$Y_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T y^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n^2}$$

Note que, quando harmônicas estão presentes, os instrumentos de medição devem apresentar uma grande largura de banda (>1KHz).

- **Distorção harmônica total:**

As definições e formulação exata para harmônicos em sistemas de potência podem ser verificadas nas referências [1] e [2].

A distorção harmônica total é um parâmetro que define de modo global a distorção de uma quantidade alternada:

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

Há uma outra definição que substitui a fundamental Y_1 pelo valor eficaz total Y_{ef} . Essa definição é utilizada por alguns instrumentos de medição.

- **Relação harmônica individual:**

Essa quantidade representa a relação entre o valor de uma harmônica sobre o valor da fundamental (Y_1), de acordo com a definição padrão ou em relação ao valor da quantidade alternada (Y_{ef}).

$$Hn\% = \frac{Yn}{Y1}$$

- **Espectro (de frequência):**

Representação da amplitude harmônica em função de sua ordem: o valor das harmônicas é normalmente expresso como uma porcentagem da fundamental.

- **Fator de potência (FP) e fator de potência de defasagem (FPD).**

Quando harmônicos estão presentes, é importante não confundir estes dois termos, na medida em que eles são equivalentes apenas quando as correntes e tensões são completamente senoidais.

O fator de potência (λ) é a relação entre a potência ativa P e a potência aparente S:

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

- fator de potência de defasagem ($\cos \varphi_1$) está relacionado a quantidades fundamentais, ou seja:

$$(\cos \varphi_1) = \frac{P1}{S1}$$

Em onda com forma de onda puramente senoidal: $\cos \varphi_1 = \cos \varphi = \cos \lambda$

- **Fator de distorção:**

A norma de referência [3] define este fator a relação entre o fator de potência e o fator de defasagem:

$$\cos \varphi : v = \frac{\lambda}{\cos \varphi_1}$$

Ele é sempre ≤ 1 .

- **Fator de crista:**

É a relação entre o valor de crista e o valor eficaz de uma quantidade periódica.

2. Efeitos nocivos das harmônicas:

2.1.1. Efeitos em dispositivos e sistemas de baixa corrente

A distorção harmônica pode causar:

Mau funcionamento de aparelhos que utilizam a forma de onda da tensão (ou corrente) senoidal como referência para gerar o controle de semicondutores ou como base de tempo para sincronizar certos sistemas.

Distúrbios por meio da criação de campos eletromagnéticos; linhas de potência em que circulam harmônicas podem induzir correntes em linhas de transmissão de dados que estejam dispostas nas vizinhanças da primeiras. Essas correntes induzidas podem causar mau funcionamento dos equipamentos aos quais as linhas de dados estão conectadas.

Finalmente, a circulação de correntes harmônicas no neutro da instalação provocará uma queda de tensão neste condutor. No caso de um sistema de aterramento tipo TN-C (**onde o neutro e proteção são o mesmo condutor**), o potencial de terra dos diversos dispositivos não estarão mais na mesma referência, interferindo na troca de informação e sinais entre dispositivos (como sensores, CLP's, microcomputadores, SDCD, detetores, etc). Além disso, a corrente circulante nas estruturas metálicas da edificação criará campos eletromagnéticos perturbadores (irradiados).

2.1.2. Efeitos em capacitores

A princípio, a função dos capacitores é a correção do fator de potência de uma instalação. A impedância de um capacitor diminui com o aumento da frequência. Se a tensão é distorcida, altas correntes harmônicas serão absorvidas pelos capacitores. Além disso, as reatâncias da instalação elétrica podem trazer riscos de ressonância com esses capacitores, o que pode aumentar consideravelmente a amplitude das harmônicas em todos os equipamentos.

2.1.3. Efeitos em transformadores

As harmônicas geram perdas adicionais nos transformadores como segue:

Perdas devido ao efeito Joule nos enrolamentos, acentuadas pelo efeito pelicular. Perdas por histerese e correntes parasitas nos circuitos magnéticos. Visando levar em conta essas perdas, utiliza-se a fórmula empírica normalizada para calcular o fator de depreciação K a ser aplicado ao transformador.

$$K = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,1 \sum_{n=2}^{n=\infty} H_n^2 n^{1,6}}}, \text{ onde, } H_n = \frac{I_n}{I_1}$$

Por exemplo, onde $H_5=25\%$, $H_7=14\%$, $H_{11}=9\%$ e $H_{13}=8\%$, o fator K é de 0,91.

A referência [4] O define: "O fator de redução de potência (depreciação) K pode ser definido":

$$K = \frac{\sum (I_h^2 x h^2)}{\sum I_h^2}$$

A norma em referência, propõe um limite para as harmônicas de corrente sobre um transformador. O limite para uma distorção de corrente é de 5% quando operando na corrente nominal do transformador.

Para tensão, o limite RMS recomendado é de: 5% para aplicação com carga nominal e 10% para um transformador em vazio. As harmônicas de corrente (para uma tensão nominal) não devem provocar resultados na tensão RMS que ultrapasse esses limites.

2.1.4. Efeitos em geradores CA

Da mesma maneira que para os transformadores, as harmônicas causam perdas adicionais nos enrolamentos e no circuito magnético.

Além disso, criam torques pulsantes (numa frequência diferente da gerada pelo alternador), geram vibrações e sobreaquecimentos nos enrolamentos de amortecimento. Devido o fato da reatância subtransitória X_d'' ser relativamente alta, a distorção harmônica total de tensão aumenta rapidamente com o acréscimo das correntes harmônicas.

Normas técnicas, como a referência [5] recomendam uma distorção harmônica entre 3 e 5% com valor máximo de 5%. A porcentagem é usualmente especificada como a distorção total de “fase-fase”, com um máximo de 3% para cada harmônica. A referência [6] recomenda uma THDV % $\leq 3,0\%$.

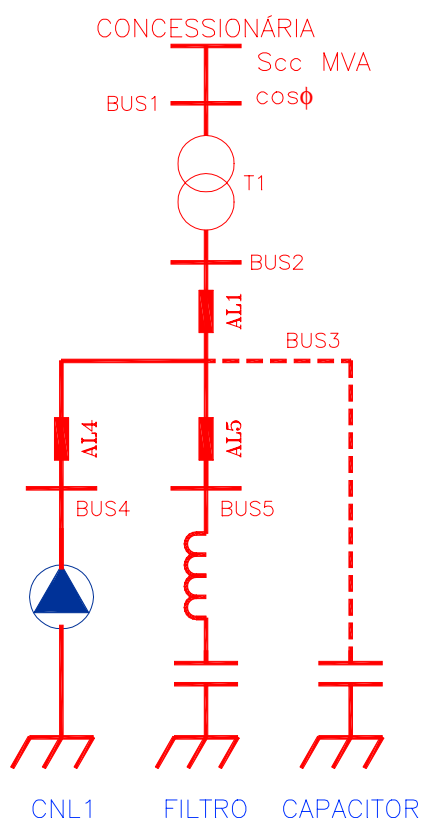
2.1. Efeitos em circuitos e, particularmente, no condutor neutro

As correntes harmônicas criam perdas adicionais nos condutores, acentuadas pelo efeito pelicular. As perdas são ainda maiores quando cargas monofásicas absorvem correntes harmônicas triplas - 3ª ordem e seus múltiplos. Essas correntes estão em fase e são somadas no condutor neutro. Por exemplo, com uma 3ª harmônica de 75%, a corrente em cada fase é 1,25 vezes a fundamental, enquanto que a corrente que circula no neutro é 2,25 vezes a fundamental.

Deve-se, portanto, prestar muita atenção no dimensionamento do condutor neutro quando cargas não-lineares estão presentes. Aconselha-se a não utilização do sistema de aterramento tipo TN-C.

3. Exemplo dos efeitos das correntes harmônicas

Considere uma planta com o diagrama unifilar abaixo.



As principais fontes harmônicas (CLN1) são compostas por inversores de frequência de seis pulsos, utilizados para acionamento e controle de motores trifásicos das injetoras de plástico. A carga total também é composta por iluminação em pequena quantidade (<5%) e cargas motoras.

Uma análise prévia da instalação e das grandezas elétricas, não indica a necessidade de cuidados adicionais com filtros harmônicos ou ressonância; verifica-se que a distorção harmônica de corrente THFI (%) é apenas de 10 %, enquanto que a distorção de tensão THDV (%) é inferior a 4,5% , portanto, dentro dos limites recomendados.

A carga medida no barramento BUS-3 é: 344 + j 171 kVAR @ 380V; O espectro harmônico medido no barramento 3 (carga) segue na tabela abaixo:

Ordem harmônica (h)	(%) de In	Corrente (A)
1	100,00	588,00
3	3,00	17,64
5	9,00	52,92
7	6,00	35,28
9	1,00	5,88
11	3,00	17,64
13	2,00	11,76
15	1,00	5,88

TABELA 1

Valor rms (A)	592,13
THDI (%)	11,875

As harmônicas medidas são esperadas, visto que as cargas são na maioria trifásicas e equilibradas; as harmônicas triplas verificadas, são em sua maioria provenientes dos circuitos de iluminação (lâmpadas de descarga e reatores eletrônicos para fluorescentes).

O cliente já possuía um banco automático de capacitores com potência nominal Q= 120 kVAR, com estágios de 30 kVAR, sendo que este banco é suficiente para a elevação do fator de potência acima de 0,92 indutivo .

Utilizando o banco automático de capacitores existente para a correção do fator de potência, o load flow harmônico da planta forneceu como resultados, valores elevados de distorções harmônicas em todas as barras de baixa tensão, com valor mais acentuados junto a carga, como segue:

Ordem harmônica (h)	(%) de Vn	Tensão (V)
1	100,00	380,00
3	3,00	2,13
5	9,00	10,79
7	6,00	12,65
9	1,00	4,07
11	3,00	17,21
13	2,00	7,79
15	1,00	2,05

TABELA 2

Valor RMS (V)	592,13
THDV (%)	6,755

Como a simples aplicação de capacitores para a correção do fator de potência não resultou em valores satisfatórios, visto que os níveis de distorção harmônica ultrapassam os limites recomendados pelas referências [1] e [2], a solução técnica adotada foi a instalação de 01 filtro harmônico na barra de baixa tensão, sintonizado em h=4,8 mantendo o banco de capacitores instalado para o ajuste "fino" do fator de potência, não havendo contudo prejuízo à mitigação das harmônicas.

O filtro sintonizado possui a seguinte característica:

Q = 60 kVAR @ 380V
 XC = 2,410 Ω @ 60 Hz
 C = 1.102,00 μ F
 L = 278 μ H
 XL = 108 mH @ 60 Hz

A simulação através de software obteve os resultados apresentados na tabela 3 abaixo, no barramento da carga, para a ligação apenas do filtro harmônico:

Ordem harmônica (h)	(%) de Vn	Tensão (V)
1	0,44	1,67
3	0,44	1,67
5	1,50	5,70
7	0,45	1,71
9	1,36	5,17
11	1,11	4,22
13	0,80	3,04
15	1,00	2,05

TABELA 3

Valor RMS (V)	380,12
THDV (%)	2,562

A condição mais desfavorável simulada, foi obtida com o filtro harmônico na barra e o banco de capacitores corrigindo o fator de potência (com valor de 0,95 na baixa tensão e 0,94 na média tensão). O valor obtido também é inferior aos limites recomendados para as harmônicas individuais ($\leq 3,0\%$) e para a THD ($\leq 5,0\%$).

Ordem harmônica (h)	(%) de Vn	Tensão (V)
1	100,00	380,00
3	0,45	1,71
5	0,45	1,71
7	1,73	6,57
9	0,64	2,43
11	2,13	8,09
13	2,18	8,28
15	1,71	6,50

TABELA 4

Valor RMS (V)	380,30
THDV (%)	4,003

Os dados simulados através do load flow harmônico foram posteriormente confrontados com medições de campo, sendo que a tabela 5 representa os valores obtidos apenas com o filtro harmônico na barra e a tabela 6 com o filtro e o banco de capacitores ligados.

Ordem harmônica (h)	(%) de Vn	Tensão (V)
1	100,00	380,00
2	0,00	0,00
3	0,20	0,76
4	0,00	0,00
5	2,90	11,02
6	0,00	0,00
7	0,60	2,28
8	0,00	0,00
9	0,20	0,76
10	0,00	0,00
11	0,80	3,04
12	0,00	0,00
13	0,60	2,28
14	0,00	0,00
15	0,20	0,76

TABELA 5

(%) de Vn	Tensão (V)
100,00	380,00
0,00	0,00
0,30	1,14
0,00	0,00
3,40	12,92
0,00	0,00
0,50	1,90
0,00	0,00
0,30	1,14
0,00	0,00
1,20	4,56
0,00	0,00
0,60	2,28
0,00	0,00
0,00	0,00

TABELA 6

Conclusão: Como foi verificado, a simples medição dos níveis de distorção de tensão e corrente presentes não são suficientes para avaliar os impactos no sistema elétrico com a aplicação de capacitores para a correção do fator de potência. Um estudo detalhado sempre se faz necessário visando manter a funcionalidade dos equipamentos elétricos, uma vez que altas distorções harmônicas comprometem o funcionamento de equipamentos como motores, transformadores e principalmente os sistemas eletrônicos.

Referências:

- [1] IEEE Std 519-1992 Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems
- [2] IEC 1000-2-2 ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY (EMC) Section 2: Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems
- [3] IEC 146-1-1 Semiconductor converters - General requirements and line commutated converters - Part 1-1: Specifications of basic requirements
- [4] IEEE C57.12.00-1987, IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers (ANSI)
- [5] ANSI/IEEE Std 446-1987, IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power System for Industrial and Commercial Applications
- [6] NBR 14664 Grupos geradores - Requisitos gerais para telecomunicações

Engenharia de Aplicações



Confiança e economia
na qualidade da energia.

Equipamentos Elétricos e Eletrônicos de Potência Ltda.

e-mail: engematec@engematec.com.br

WWW.ENGEMATEC.COM.BR