



XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

Olinda - Pernambuco - Brasil

Cargas Lineares e Não-Lineares e Fator de Potência

Rafael Eichelberger	Ronieri Henrique de Oliveira	Enio V Kassick
CELESC Distribuição S. A.	UFSC	UFSC
rafaele@celesc.com.br	ronieri@inep.ufsc.br	kassick@inep.ufsc.br

Palavras-chave

Carga Não-Linear
Fator de Deslocamento
Fator de Distorção
Fator de Potência
Harmônicas

Resumo

O correto entendimento do comportamento dos sistemas elétricos de corrente alternada senoidal alimentando cargas lineares e não-lineares, operando em regime permanente exige o completo entendimento de conceitos básicos como, por exemplo, Cargas Lineares e Não-Lineares, Fator de Potência, Fator de Deslocamento, Fator de Distorção da Corrente e da Tensão e Harmônicas de Tensão e de Corrente. São apresentados de maneira clara e concisa alguns destes conceitos básicos, mas de extrema importância, para o pleno entendimento do tema ligado à Qualidade da Energia Elétrica (*Power Quality*).

1. Introdução

Serão tratados alguns conceitos básicos, a começar pela clara distinção entre cargas linear e não-linear e seus impactos sobre a forma de onda da tensão e da corrente e suas contribuições para as potências aparente, média e reativa. Também será abordada a influência de tais cargas sobre o fator de potência, fator de deslocamento e fator de distorção (FP, FDesl e FDist, respectivamente).

Os conceitos como potência aparente (S), média ou Wattada (P) e reativa (Q), valor eficaz de tensão e de corrente, fator de potência ou $\cos(\varphi)$ foram inicialmente desenvolvidos para sistemas elétricos operando apenas com cargas lineares. Tais conceitos são de pleno domínio de técnicos e de engenheiros que os utilizam na execução de suas tarefas.

A disseminação de cargas não-lineares, inicialmente na indústria mas hodiernamente também nas instalações comerciais e residenciais impõe a estes profissionais o enfrentamento de problemas para os quais, algumas vezes, não estão devidamente preparados. Há que se mencionar o fato que mesmo em nossos dias, não é comum encontrar no *currículum* dos cursos técnicos e de engenharia elétrica, disciplinas voltadas para a análise de circuitos elétricos contendo cargas não-lineares.

Espera-se que a partir desta abordagem simples e direta, mesmo aqueles “não iniciados” no tema, possam deixar de temer o enfrentamento de dificuldades técnicas eventualmente existentes na operação de plantas elétricas modernas.

Busca-se pois contribuir para a desmistificação dos fenômenos ligados à presença de cargas não-lineares.

2. Cargas elétricas lineares e não-lineares

Quando se faz necessária a análise de potência em sistemas elétricos, vem sempre à mente os adjetivos aparente, ativa e reativa, as unidades [VA], [W] e [VAr] e o triângulo de potências que, juntos, qualificam e quantificam as diferentes parcelas da potência elétrica.

De modo geral estes conceitos são bastante claros quando se trata de sistemas ou circuitos elétricos lineares, mas ficam um pouco confusos quando são tratados circuitos elétricos contendo dispositivos não-lineares (conversores estáticos de potência, por exemplo).

Sabendo-se que a potência aparente é obtida pelo produto dos valores eficazes da tensão e da corrente de um dipolo, ou seja, é o resultado da composição das parcelas de potência ativa e reativa, independentemente da natureza da potência reativa, é possível propor dois circuitos extremamente simples (um linear e outro, não-linear) com várias similaridades e também grandes diferenças, analisando-os sob o ponto de vista da potência elétrica. Os dois circuitos são constituídos por três dipolos conectados em série, sendo que em ambos existe uma fonte de tensão senoidal com valor de pico V_p e um resistor de carga R , conectados através de um dipolo específico para cada caso.

No caso do circuito linear mostrado na Figura 1, este dipolo é um indutor linear ideal de valor L , tal que a reatância equivale, na frequência considerada, ao valor R ($\omega L=R$), constituindo este conjunto L - R uma impedância com módulo $\sqrt{2} * R$ e ângulo de 45° , caracterizando $FP = P / S = \sqrt{2} / 2 = \cos(45^\circ)$, onde FP: Fator de Potência, S: Potência aparente (módulo), em [VA] e P: Potência ativa, em [W].

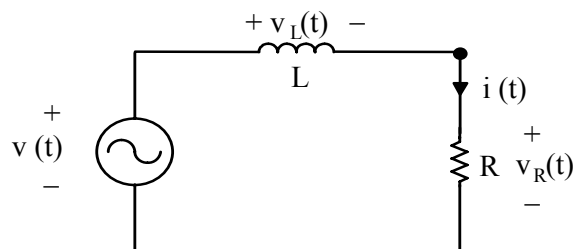


Figura 1: Circuito elétrico linear

Neste circuito, $S = \sqrt{2} * P = \sqrt{2} * Q$, onde Q é a potência reativa indutiva (módulo), em [VAr] e a tensão eficaz sobre o indutor e sobre o resistor valem ambas $V_p/2$. É fácil também mostrar que as parcelas reativa e ativa da potência são desenvolvidas exclusivamente sobre o indutor e sobre o resistor, respectivamente, (lembrar que o indutor é ideal), que a corrente, com valor eficaz $V_p/(2R)$, encontra-se atrasada de 45° em relação à tensão de entrada e que finalmente, a potência instantânea apresenta valores positivos, nulos e negativos, estes últimos caracterizando a presença de potência negativa, i.é, potência reativa devolvida pela carga L - R à fonte de entrada, no intervalo em que a carga L - R atua como gerador de energia, fenômeno bem conhecido quando se trata de carga linear reativa. Na Figura 2 são apresentadas a tensão de entrada v e a corrente i no circuito linear.

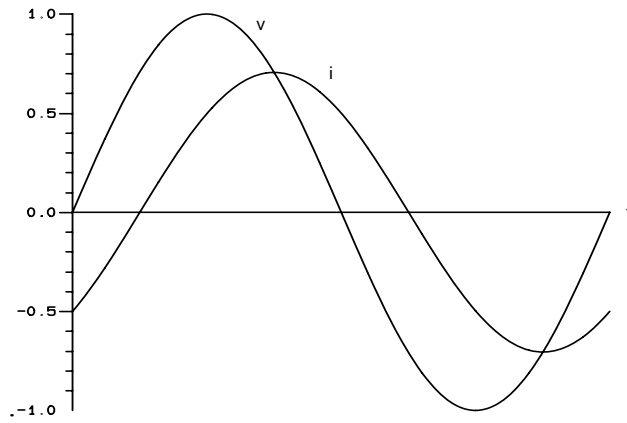


Figura 2: Tensão de entrada v e corrente i no circuito linear.

Observar que corrente i pode ser decomposta em duas componentes i_d e i_q , estando i_d em fase e i_q em quadratura em relação à tensão de entrada v , conforme ilustrado na Figura 3. É claro que se trata de correntes virtuais (componentes i_d e i_q), que permitem a interpretação do comportamento da carga reativa linear.

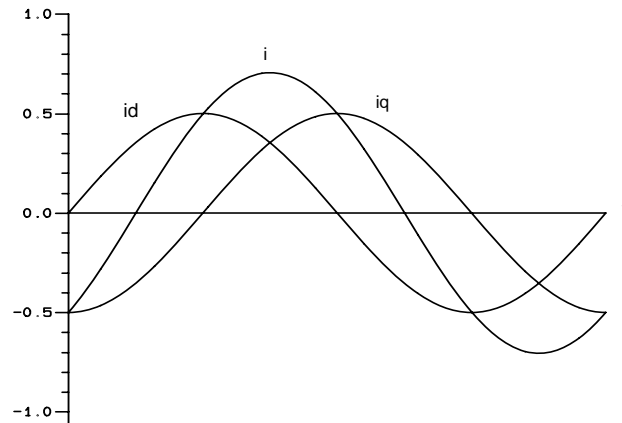


Figura 3: Corrente instantânea i na carga linear e suas componentes (virtuais) em fase i_d e em quadratura i_q com a tensão de entrada.

A decomposição de i em suas componentes i_d e i_q é feita usualmente no domínio dos fasores e corresponde à obtenção de um circuito elétrico equivalente L_{eq} - R_{eq} em paralelo, conforme indicado na Figura 4.

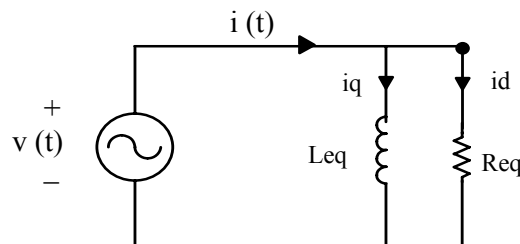


Figura 4: Circuito elétrico equivalente.

Deste modo é possível a obtenção da potência instantânea $p=v*i$, bem como as parcelas p_d e p_q , associadas às componentes i_d (em fase) e i_q (em quadratura) da corrente i , o que é mostrado na Figura 5, sempre relacionadas com a carga linear L-R, onde L é um indutor ideal. Observar ainda na Figura 5 que o valor médio da potência (potência ativa) diz respeito apenas à componente p_d da potência instantânea, ficando claro que a parcela de potência p_q é puramente reativa (valor médio nulo).

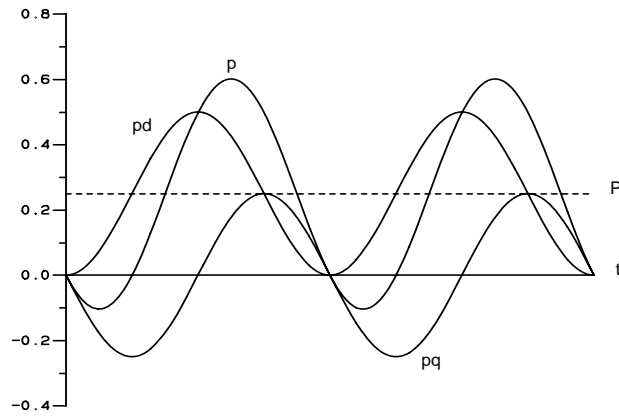


Figura 5: Potência média P e instantânea p na carga linear e suas componentes p_d e p_q , geradas pelas correntes em fase i_d e em quadratura i_q com a tensão de entrada.

O triângulo de potências apresentado na Figura 6 traduz as informações relativas às diferentes parcelas de potência envolvidas neste circuito linear, onde a parcela P representa a potência ativa (média), Q representa a potência reativa indutiva (neste caso, pela presença do indutor L) e S representa a composição destas duas parcelas, ou seja, a potência aparente (módulo).

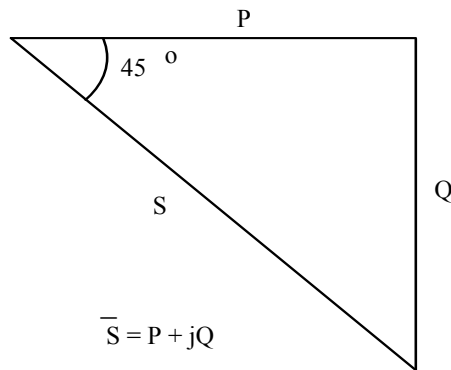


Figura 6: Triângulo de potências do circuito linear.

Observar que se trata de um triângulo retângulo, tendo os dois outros ângulos iguais a 45° , onde a orientação espacial está calcada na representação fasorial das grandezas elétricas do circuito (tensões e correntes). É importante enfatizar a natureza destas parcelas de potência, que variam no tempo com o dobro da frequência da fonte de alimentação.

Já no caso do circuito não-linear mostrado na figura 7, o indutor foi substituído por um diodo ideal D , com o ânodo conectado à fonte de tensão e o cátodo à resistência R , constituindo este conjunto D - R uma carga não-linear para a fonte de entrada, caracterizando $FP = P/S = \sqrt{2}/2$, onde FP : Fator de Potência, S : Potência aparente (módulo), em [VA] e P : Potência ativa, em [W].

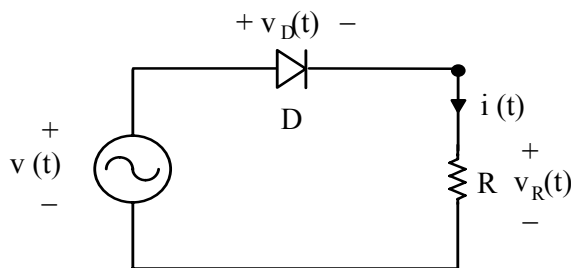


Figura 7: Circuito elétrico não-linear.

Neste circuito, $S = \sqrt{2} * P = \sqrt{2} * H$, onde H (por analogia com o caso linear) é a potência reativa (módulo) em [VAr] e a tensão eficaz sobre o diodo e sobre o resistor valem ambas

$V_p/2$. É fácil também mostrar que as parcelas reativa e ativa da potência são desenvolvidas exclusivamente sobre o diodo e sobre o resistor, respectivamente, (lembrar que o diodo é ideal), que a corrente é não-nula apenas durante o semi-ciclo positivo da tensão de entrada e que finalmente a potência instantânea apresenta apenas valores positivos e nulos (não existem valores negativos), caracterizando a presença de potência sempre não-negativa, i.é, não existe potência reativa devolvida pela carga D-R à fonte de entrada, como verificado no caso de carga linear reativa, ainda que o $FP = \sqrt{2}/2$. Na Figura 8 são apresentadas a tensão de entrada v e a corrente i no circuito não-linear.

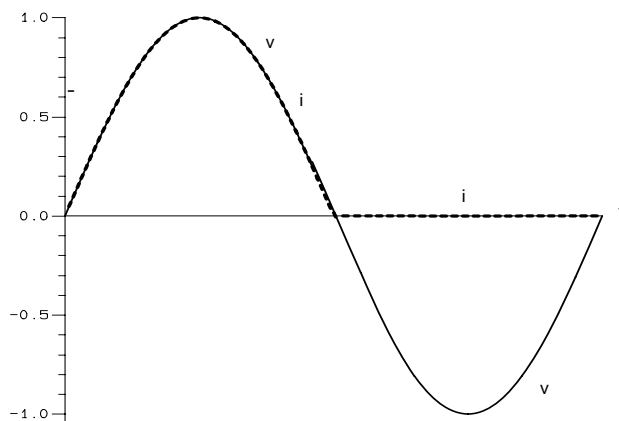


Figura 8: Tensão de entrada v e corrente i no circuito não-linear.

Observar que esta corrente pode ser decomposta (análise de Fourier) em três parcelas i_f , i_{cc} e i_h , sendo i_f a componente alternada na frequência fundamental, i_{cc} a componente contínua e i_h o conjunto de correntes alternadas de frequências múltiplas da frequência fundamental (conjunto de harmônicas), conforme ilustrado na Figura 9.

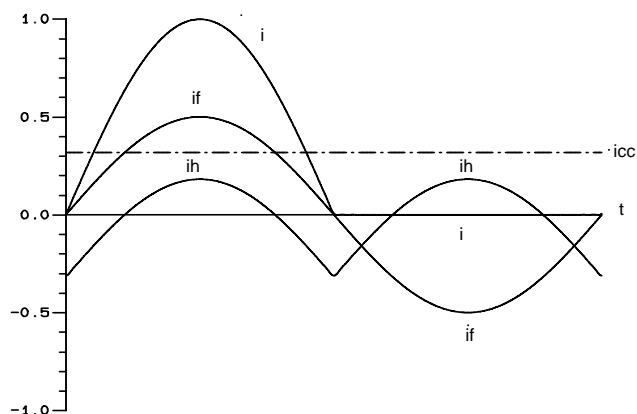


Figura 9: Corrente instantânea i na carga não-linear e suas componentes (virtuais): fundamental i_f , contínua i_{cc} e harmônicas i_h .

A decomposição de i em suas componentes i_f , i_{cc} e i_h corresponde a obtenção de um circuito elétrico equivalente R_{eq} em paralelo com duas fontes de corrente (i_{cc} e i_h), conforme indicado na Figura 10.

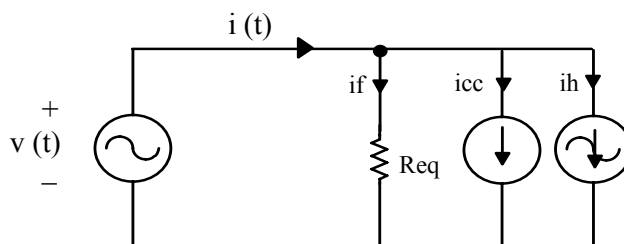


Figura 10: Circuito elétrico equivalente.

Deste modo é possível a obtenção da potência instantânea $p=v*i$, bem como as parcelas pf , pcc e ph , associadas às componentes if (fundamental), icc (contínua) e ih (conjunto das harmônicas) da corrente i , o que é mostrado na Figura 11, sempre relacionadas com a carga D-R original ou seu equivalente elétrico.

Observar ainda na Figura 11, que o valor médio da potência diz respeito apenas à componente pf da potência instantânea, ficando claro que as parcelas de potência pcc e ph são puramente reativas, apresentando valor médio nulo.

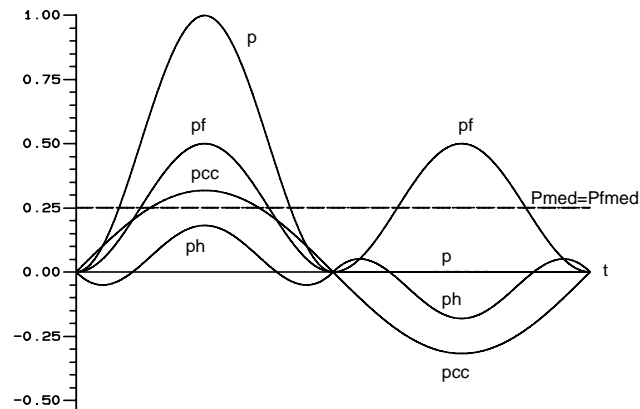


Figura 11: Potência instantânea p na carga não-linear e suas componentes pf , pcc e ph , geradas pelas correntes instantânea e componentes fundamental if , contínua icc e harmônicas ih .

O triângulo de potências apresentado na Figura 12 (por simples analogia gráfica com o caso de carga reativa linear) traduz as informações relativas às diferentes parcelas de potência envolvidas neste circuito não-linear, onde as parcelas reativas pcc e ph estão reunidas e apresentadas pelo termo geral jH , referente à potência reativa total (de distorção).

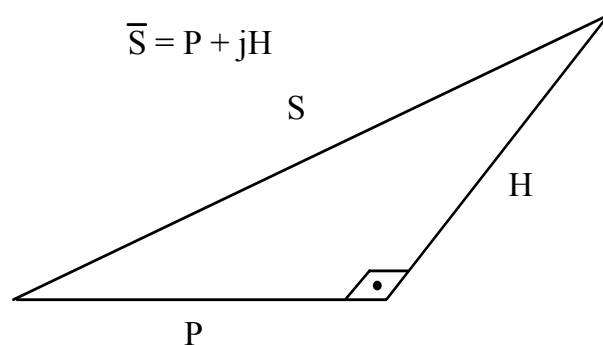


Figura 12: Triângulo de potências do circuito não-linear.

Observar ainda que é possível imaginar este triângulo de potências, que é também triângulo retângulo, com os outros dois ângulos iguais a 45° , porém com orientação espacial diferente do caso linear, justamente para enfatizar a natureza distinta dos reativos linear (de deslocamento) e não-linear (de distorção ou harmônico).

Eis aqui dois circuitos elétricos com diversas similaridades: topologia com três dipolos em série (sendo dois dipolos iguais para ambos os circuitos), valores idênticos para as tensões e correntes eficazes dos dipolos e, por conseqüência, também para as potências aparente, reativa e ativa (idêntico Fator de Potência)!

Porém, como são diferentes estes dois circuitos! Basta analisar o comportamento das grandezas elétricas (tensão, corrente e potência instantâneas) em função do tempo, que salta aos olhos o comportamento totalmente diverso. É deixado para o lazer do leitor a análise dos circuitos propostos e o cálculo dos valores de pico, médio e eficaz das tensões e correntes, bem como os valores de potência média, aparente e reativa aqui mencionados.

É claro que é possível imaginar a fonte de tensão v alimentando simultaneamente as duas cargas aqui propostas, o que resultaria na necessidade de considerar as potências ativa e as reativas de deslocamento e de distorção, para a obtenção da potência aparente. Neste caso, a representação gráfica requer a construção de um paralelogramo de potências, conforme relatado na literatura técnica.

Neste texto não existe a pretensão de esgotar este assunto; trata-se simplesmente de chamar a atenção para a natureza totalmente diversa dos reativos de deslocamento (circuitos lineares) e reativos de distorção (ou harmônicos), referentes à cargas não-lineares.

3. Fator de Potência, Fator de Deslocamento e Fator de Distorção e outros conceitos úteis

Inicialmente é necessário explicitar outros conceitos úteis, ligados ao tema de harmônicas.

3.1. Harmônica h : componente senoidal de uma função periódica com frequência múltipla inteira de uma frequência fundamental f . Tensões e correntes periódicas e distorcidas podem ser representadas por uma série de Fourier com sinusóides (senos e cossenos) puras, nas frequências fundamental e suas múltiplas inteiras chamadas harmônicas, conforme indicado nas expressões (1) e (2), Onde h é a ordem da harmônica e f é a frequência fundamental. Observar que quando $h=0$ e $h=1$ tem-se respectivamente a componente contínua (CC) e a componente fundamental.

$$f_h(t) = V_h \text{sen}(h 2\pi ft + \Theta) \quad (1)$$

$$f_h(t) = V_h \text{cos}(h 2\pi ft + \Theta) \quad (2)$$

Agora é necessário apresentar a expressão geral da tensão e da corrente de um sistema, as quais podem ser não-lineares, i.é, já sendo representadas por uma série de Fourier, onde os termos em seno e cosseno de uma mesma frequência já estão somados e representados por uma função cosseno na frequência das suas componentes seno e cosseno e com amplitude e defasagem convenientes.

Sejam pois as componentes de ordem h de uma função genérica $f(t)$ dadas pelas expressões (3) e (4).

$$f_{hs}(t) = V_{hs} \text{sen}(h 2\pi ft + \Theta) \quad (3)$$

$$f_{hc}(t) = V_{hc} \text{cos}(h 2\pi ft + \Theta) \quad (4)$$

A soma destas duas componentes de mesma frequência, pode ser representada por uma única função sinusoidal (o cosseno, por exemplo), conforme apresentado em (5).

$$f_h(t) = V_h \text{cos}(h 2\pi ft + \Theta_h) \quad (5)$$

Onde:

$$V_h = \sqrt{V_{hs}^2 + V_{hc}^2} \quad (6)$$

$$\Theta_h = \Theta - \text{arctg}\left(\frac{V_{hs}}{V_{hc}}\right) \quad (7)$$

3.2. Distorção Harmônica: refere-se ao fator de distorção de uma tensão ou corrente relativamente a uma sinusóide pura.

3.3. Distorção Harmônica Total THD (Total Harmonic Distortion): quociente entre o valor eficaz do conjunto das harmônicas e o valor eficaz da componente fundamental. Tem valor nulo quando se tratar de sinusóides puras (apenas na frequência fundamental). Na

expressão (8) os termos “ V_{ief} ” ($i=1, 2, 3, 4, \dots$) referem-se ao valor eficaz das componentes harmônicas da grandeza, podendo ser tensão ou corrente, conforme a grandeza analisada.

$$THD = \frac{\sqrt{V_{2ef}^2 + V_{3ef}^2 + V_{4ef}^2 + \dots}}{V_{1ef}} \quad (8)$$

3.4. Fator de Potência FP (ou Fator de Potência Total ou ainda Fator de Potência Verdadeiro): quociente entre a potência média P em [W] e a potência aparente $S = V_{ef} * I_{ef}$ em [VA], onde os valores eficazes da tensão V_{ef} e da corrente I_{ef} são totais, i.é., incluem a fundamental e todas as harmônicas (se houver componentes CC estas também estarão incluídas no cálculo de P e S).

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{V_{ef} * I_{ef}} \quad (9)$$

Aplicando-se a definição de valor médio e valor eficaz de funções, obtém-se a expressão para a potência média P (numerador de (9)) e as expressões do valor eficaz da tensão e da corrente (denominador de (9)), obtendo-se a expressão (10).

$$FP = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)i(t)dt}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t)dt} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t)dt}} \quad (10)$$

A tensão e a corrente expressas por série de Fourier, na sua forma mais genérica e completa, tomam a forma apresentada pelas expressões (11) e (12) respectivamente. É importante ressaltar que nos casos práticos, onde os semi-ciclos positivo e negativo de uma forma de onda são iguais (condição de simetria), não existe componente contínua nem as componentes harmônicas pares.

$$v(t) = V_{CC} + \sqrt{2}V_{1ef} \cos(1*2\pi ft + \theta_{v1}) + \sqrt{2}V_{2ef} \cos(2*2\pi ft + \theta_{v2}) + \sqrt{2}V_{3ef} \cos(3*2\pi ft + \theta_{v3}) + \dots \quad (11)$$

$$i(t) = I_{CC} + \sqrt{2}I_{1ef} \cos(1*2\pi ft + \theta_{i1}) + \sqrt{2}I_{2ef} \cos(2*2\pi ft + \theta_{i2}) + \sqrt{2}I_{3ef} \cos(3*2\pi ft + \theta_{i3}) + \dots \quad (12)$$

Efetuada as operações indicadas em (10), utilizando as funções genéricas dadas por (11) e (12), resulta a expressão genérica (13) para o Fator de Potência FP, válido para qualquer tipo de circuito (linear ou não-linear) e qualquer tipo de tensão e corrente.

$$FP = \frac{V_{CC} I_{CC} + V_{1ef} I_{1ef} \cos(\theta_{v1} - \theta_{i1}) + V_{2ef} I_{2ef} \cos(\theta_{v2} - \theta_{i2}) + \dots}{\sqrt{V_{CC}^2 + V_{1ef}^2 + V_{2ef}^2 + V_{3ef}^2 + \dots} * \sqrt{I_{CC}^2 + I_{1ef}^2 + I_{2ef}^2 + I_{3ef}^2 + \dots}} \quad (13)$$

4. Determinação da expressão do Fator de Potência em função da severidade da distorção harmônica

A expressão (13) abriga todos os casos particulares possíveis, sendo os mais comuns descritos a seguir:

4.1. Circuito linear em Corrente Contínua (ausência de componentes CA), caracterizando fator de potência sempre unitário, conforme expressão (14).

$$FP = \frac{V_{CC} I_{CC}}{(V_{CC}) * (I_{CC})} = 1 \quad (14)$$

Este é o caso de circuitos em corrente contínua, onde, em regime permanente, os indutores e capacitores comportam-se como curtos-circuitos e circuitos abertos (respectivamente).

4.2. Circuito linear em Corrente Alternada (existe apenas a componente fundamental de tensão e de corrente; ausência de componentes CC e harmônicas). Neste caso o Fator de Potência FP confunde-se com o Fator de Deslocamento FDesl, conforme expressão (15) onde φ_1 é o ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente (16).

$$FP = \frac{V_{1ef} I_{1ef} \cos(\theta_{v1} - \theta_{i1})}{(V_{1ef}) * (I_{1ef})} = \cos(\theta_{v1} - \theta_{i1}) = \cos(\varphi_1) \quad (15)$$

$$FP = \cos(\varphi_1) = FDesl \quad (16)$$

Este é o caso comumente tratado nos cursos técnicos e de engenharia elétrica, que corresponde a plantas elétricas tradicionais com cargas lineares (motores de indução, fornos resistivos, iluminação com lâmpadas incandescentes ou lâmpadas com reatores eletromagnéticos,...), onde o FP é corrigido pela colocação de bancos de capacitores.

4.3. Circuito não-linear em Corrente Alternada, com fonte de tensão CA ideal (tensão isenta de harmônicas e componente CC).

$$FP = \frac{V_{1ef} I_{1ef} \cos(\theta_{v1} - \theta_{i1})}{(V_{1ef}) * \sqrt{I_{CC}^2 + I_{1ef}^2 + I_{2ef}^2 + I_{3ef}^2 + \dots}} = \frac{I_{1ef} \cos(\theta_{v1} - \theta_{i1})}{\sqrt{I_{CC}^2 + I_{1ef}^2 + I_{2ef}^2 + I_{3ef}^2 + \dots}} \quad (17)$$

Levando (15) e (16) em (17), resulta:

$$FP = \frac{I_{1ef} \cos(\varphi_1)}{\sqrt{I_{1ef}^2 + I_{2ef}^2 + I_{3ef}^2 + \dots}} = \frac{\cos(\varphi_1)}{\sqrt{1 + THD_i^2}} = \frac{FDesl}{\sqrt{1 + THD_i^2}} \quad (18)$$

Definindo o Fator de Distorção da corrente FDist_i conforme expressão (19) e substituindo na expressão (18) obtém-se o Fator de Potência como produto do Fator de Deslocamento e o Fator de Distorção da corrente, expresso pela expressão (20).

$$FDist_i = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_i^2}} \quad (19)$$

$$FP = FDesl * FDist_i \quad (20)$$

Observar que na ausência de distorção (sinusóides puras), THD = 0 e FP=FDesl = cos(φ_1); na ausência de defasagem entre a tensão e a corrente, o FDesl = cos(0°) = 1 e o Fator de Potência confunde-se com o Fator de Distorção (FP = FDist). Finalmente, na ausência de defasagem (FDesl = 1) e de harmônicas (FDist = 1) o Fator de Potência é unitário (FP = 1*1 = 1).

Observar que os fatores de deslocamento e de distorção assim definidos tem valor unitário (valor máximo) na ausência de defasagem entre tensão e corrente e na ausência de harmônicas, respectivamente, o que equivale à carga resistiva linear.

O fator de deslocamento assume o valor zero quando a defasagem é de 90°, indicando carga indutiva ou capacitiva pura. Já o fator de distorção tende à zero, à medida que o conteúdo harmônico THD tende ao infinito (carga infinitamente não-linear).

Observar também que neste caso, a correção do FP pode requerer a correção tanto do FDesl quanto a do FDist_i.

A Figura 13 apresenta o comportamento do Fator de Distorção de uma forma de onda (FDist) em função da Distorção Harmônica Total (THD), dada em % no gráfico.

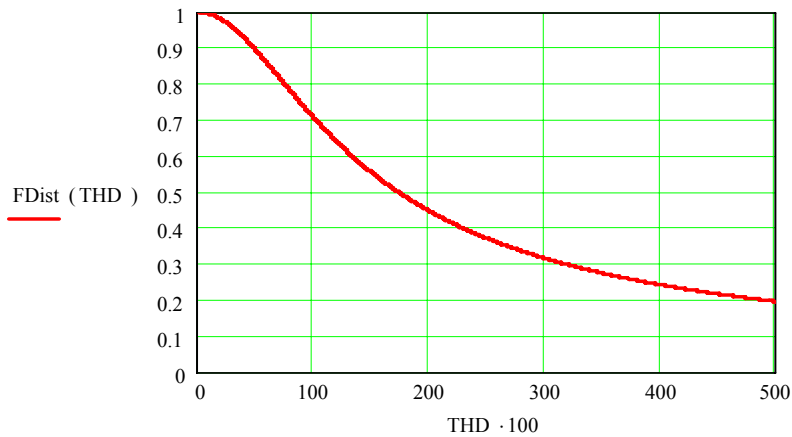


Figura 13: Fator de Distorção em Função da Distorção Harmônica Total (em %)

Este é um caso bastante comum, onde a distorção harmônica na corrente é acentuada, porém a forma de onda da tensão permanece praticamente senoidal pura (pequena distorção de tensão). Corresponde à plantas elétricas contendo cargas lineares e não-lineares (conversores estáticos, retificadores, acionamentos elétricos,...). Neste caso, nem sempre é possível corrigir o FP pela simples colocação de bancos de capacitores (os quais corrigem apenas o FDesl), sendo necessária a colocação de filtros de harmônicas, que podem simultaneamente corrigir o FDesl e o FDist.

Observar que se a corrente apresentar THD>42%, o fator de distorção será inferior a 0,92 (FDist<0,92), o que indica que, nestas condições, mesmo que o fator de deslocamento tenha sido plenamente corrigido (pela inserção de bancos de capacitores), i.é, FDesl=1, o fator de potência será inferior a 0,92 (FP<0,92).

4.4. Circuito não-linear em Corrente Alternada, com fonte de tensão CA isenta de componente CC (existe distorção acentuada na tensão e na corrente).

$$FP = \frac{V_{1ef} I_{1ef} \cos(\theta_{v1} - \theta_{i1}) + V_{2ef} I_{2ef} \cos(\theta_{v2} - \theta_{i2}) + \dots}{\sqrt{V_{1ef}^2 + V_{2ef}^2 + V_{3ef}^2 + \dots} * \sqrt{I_{1ef}^2 + I_{2ef}^2 + I_{3ef}^2 + \dots}} \quad (21)$$

Levando (8) em (21) e após algumas manipulações algébricas, resulta:

$$FP = \frac{I_{1ef}}{\sqrt{I_{1ef}^2 + I_{2ef}^2 + I_{3ef}^2 + \dots}} * \frac{V_{1ef}}{\sqrt{V_{1ef}^2 + V_{2ef}^2 + V_{3ef}^2 + \dots}} * \left[\frac{S_1 \cos(\varphi_1) + S_2 \cos(\varphi_2) + S_3 \cos(\varphi_3) + \dots}{S_1} \right] \quad (22)$$

Definindo o Fator de Distorção da tensão FDist_v conforme expressão (23) e levando ainda a expressão (19) em (23), obtém-se o Fator de Potência como o triplo produto envolvendo o

Fator de Distorção da corrente, o Fator de Distorção da tensão e o quociente entre a potência média total e a potência aparente gerada pelas componentes fundamentais de tensão e corrente, conforme expresso pelas expressões (24) e (25).

$$FDist_v = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_v^2}} \quad (23)$$

$$FP = FDist_i * FDist_v * \left[\frac{P_1 + P_2 + P_3 + \dots}{S_1} \right] \quad (24)$$

$$FP = FDist_i * FDist_v * \frac{P_T}{S_1} \quad (25)$$

Das expressões (24) e (25), verifica-se que se a potência média P_1 for muito maior que a soma das potências médias geradas pelas componentes harmônicas de tensão e de corrente (de mesma frequência), então a potência média total P_T , pode ser representada aproximadamente por (26) e lembrando que $P_1/S_1 = \cos(\phi_1) = FDesl$, resulta a expressão (27).

$$P_T \approx P_1 \quad (26)$$

$$FP = FDesl * FDist_i * FDist_v \quad (27)$$

Este é um caso de extrema distorção harmônica de corrente que acarreta grande distorção harmônica na tensão. Corresponde à plantas elétricas contendo cargas não-lineares de grande potência (conversores estáticos, retificadores, acionamentos elétricos,...). Neste caso, nem sempre é possível corrigir o FP pela simples colocação de bancos de capacitores (os quais corrigem apenas o FDesl), sendo necessária a colocação de filtros de harmônicas, que podem simultaneamente corrigir o fator de deslocamento FDesl e o fator de distorção da corrente FDist_i, tal que a filtragem (confinamento) das componentes harmônicas da corrente reduza a distorção da tensão (correção do FDist_v).

5. Condições para a escolha do “Fator de Potência” adequado

Os casos 4.2 a 4.4 são os que apresentam maior interesse e podem ser, de maneira arbitrária, utilizados em função da severidade da distorção harmônica da tensão e da corrente, conforme indicado na Tabela 1. É claro que os limites indicados são meramente orientativos; o erro cometido ao utilizar expressões simplificadas para o FP pode ser facilmente calculado.

Quando a THD da tensão e da corrente for igual ou inferior a 5% ficam atendidos os valores máximos de distorção harmônica de tensão e de corrente segundo (IEEE Std 519-1992, IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems (ANSI)) e o produto FDist_i * FDist_v resulta igual ou inferior a 0,99875. Neste caso, adotar o FP representado pela expressão (16): caso 4.2.

Quando a THD da tensão for igual ou inferior a 5% e a THD da corrente for maior do que 5%, adotar o FP representado pela expressão (20): caso 4.3.

Quando a THD da tensão e da corrente for maior que 5%, adotar o FP representado pela expressão (27): caso 4.4.

Tabela 1: Escolha da expressão do FP em função da distorção harmônica

THD _v	FDist _v	THD _i	FDist _i	Expressão para o FP
≤ 5%	≥ 0,998752	≤ 5%	≥ 0,998752	(16), caso 4.2
≤ 5%	≥ 0,998752	> 5%	< 0,998752	(20), caso 4.3
> 5%	< 0,998752	> 5%	< 0,998752	(27), caso 4.3

6. Conclusões

Os profissionais ligados a área de energia elétrica, sobretudo aqueles que concluíram sua formação técnica há mais tempo, nem sempre estão familiarizados e adequadamente preparados para lidar com diversos conceitos e fenômenos relacionados com cargas não-lineares.

Desta forma, conceitos como distorção harmônica, THD, Fator de distorção e outros, usualmente empregados na área de *power quality* podem causar algumas dificuldades no trato de situações profissionais.

Buscou-se neste texto, apresentar alguns destes conceitos de maneira simples e direta (tanto quanto possível), no intuito de desmistificar o assunto, indicando que, apesar da complexidade adicional, sistemas elétricos alimentando cargas não-lineares são passíveis de análise usando-se ferramentas clássicas obtidas nos bancos escolares.

7. Referências bibliográficas e/ou bibliografia

IEEE Std 519-1992, IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems (ANSI).

ANEEL Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, p. 14-17, versão de 27/08/2007 (documento ainda em fase de discussão), acessado em 25/02/2008, disponível em http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/dspListaDetalhe.cfm?attAnoAud=2008&attIdeFasAud=282&id_area=13&attAnoFasAud=2008.

Roger C. Dugan; Mark F. McGranaghan; Surya Santoso; H. Wayne Beaty. Electrical Power Systems Quality. McGraw-Hill.