

Universidade Federal de Mato Grosso  
Faculdade de Engenharia Elétrica

# Fator de Potência

Orientadora: Prof. Dr. Tereza

Autor: Eng. Valdecir Mateus

Cuiabá, Outubro de 2001

## Introdução

Este trabalho vem apresentar uma das questões da qualidade da energia elétrica, o fator de potência (FP), não só por questões técnicas, mas, principalmente econômicas.

O FP é utilizado para quantificar e tarifar a energia ativa e reativa presentes no sistema elétrico em praticamente todo o mundo, estudos comprovam que sua definição precisa de algumas considerações se aplicada a sistemas que não possuam formas de onda senoidais para a tensão e/ou corrente. Ou seja, desvios nas condições ideais de operação que podem ocasionar falhas na medição e tarifação.

Ademais, o FP também é um dos responsáveis para a minimização de perdas no sistema elétrico, o que é de grande utilidade no momento.

## Fator de Potência

Fator de potência é definido como a relação entre a potência ativa e a potência aparente consumidas por um dispositivo ou equipamento, independentes das formas que as ondas de tensão e corrente apresentem. Os sinais variantes no tempo devem ser periódicos e de mesma frequência.

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{\frac{1}{T} \int v_i(t) \cdot i_i(t) \cdot dt}{V_{rms} \cdot I_{rms}} \quad (1.1)$$

Em um sistema com formas de onda senoidais (sistema ideal), a equação (1.1) torna-se igual ao co-seno da defasagem entre as ondas de tensão e de corrente ( $\mathbf{f}$ ). Analisando em termos das componentes da energia ativa, reativa e aparente, pode-se, a partir de uma descrição geométrica destas componentes (figura 1.1), determinar o fator de potência como:

$$FP = \frac{kW}{kVA} = \cos(\arctg(\frac{kVAr}{kW})) = \cos \mathbf{f} \quad (1.2)$$

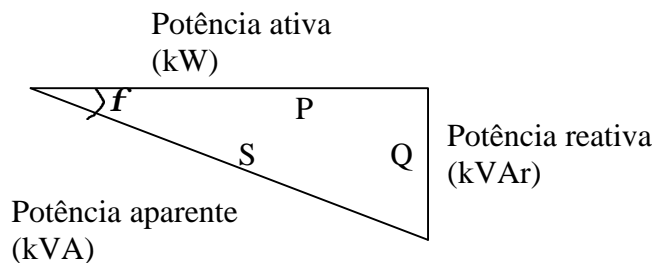


Fig.1.1 – Triângulo das potências

Este é o modelo tradicional para utilizado no estudo do FP.

A figura 1.2 mostra sinais deste tipo, com defasagem nula. O produto das senóides dá como resultado o valor instantâneo da potência. O valor médio deste produto é a potência ativa. A amplitude deste sinal é numericamente igual à potência aparente. Quando a defasagem é nula o produto (potência instantânea) será sempre maior ou igual a zero.

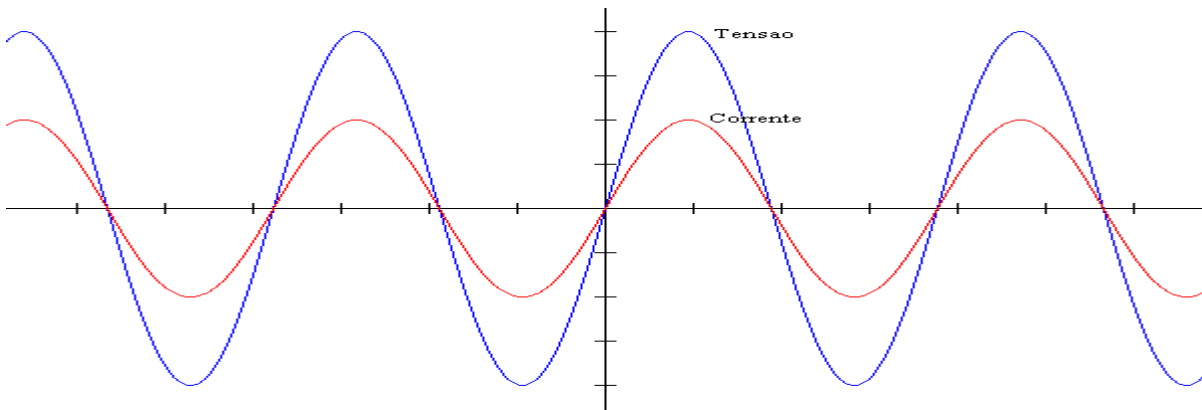
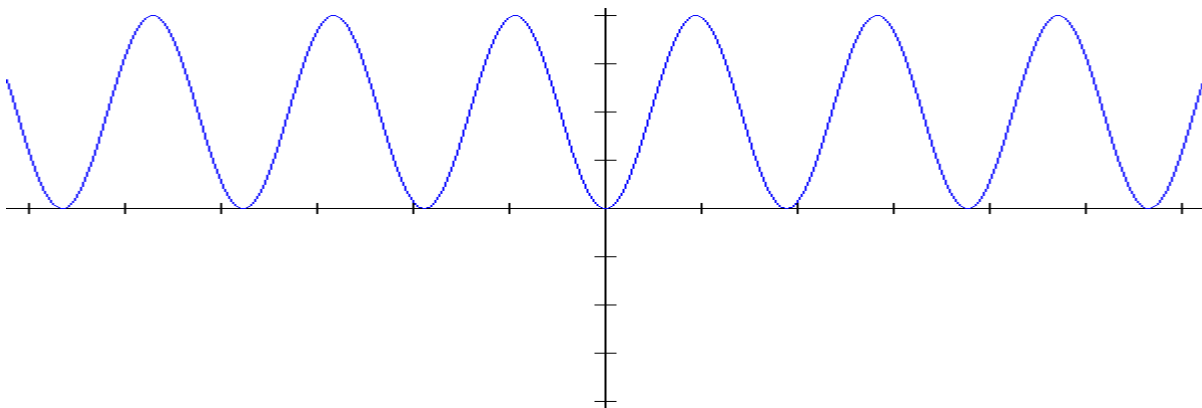


Gráfico da Tensão e Corrente em Fase ( $f=0$ )

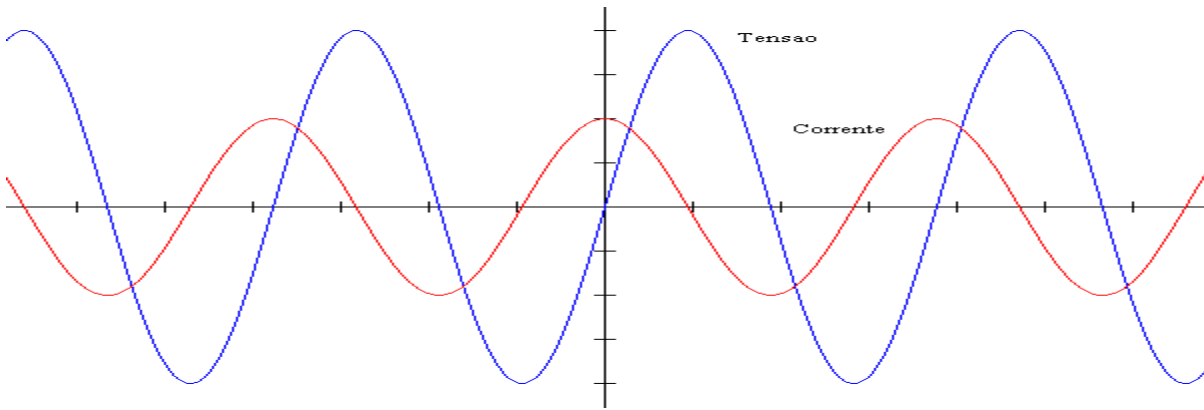


Potência Instantânea (Sempre positiva)

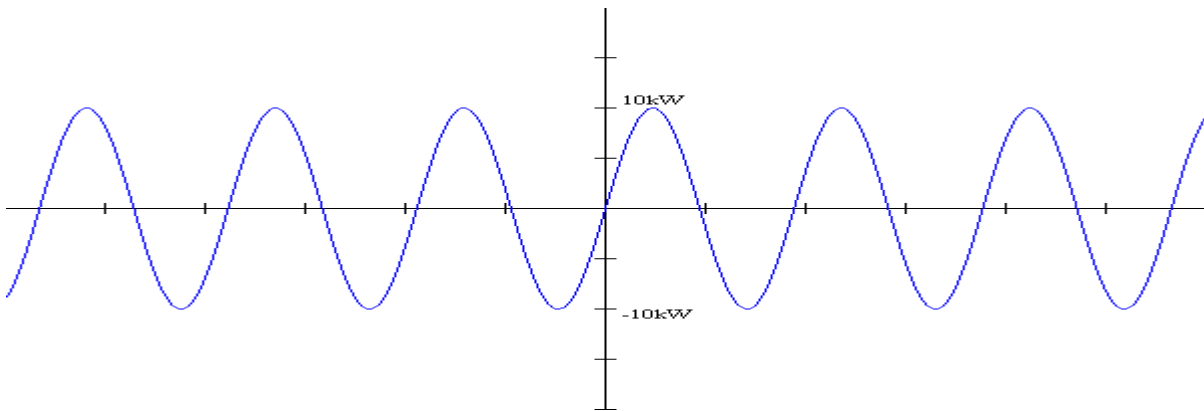
Fig 1.2

Considerando  $v=200$  V e  $i=100$  A, então  $v_{rms}=141,4$  V e  $i_{rms}=70,7$  A. O valor calculado da potência aparente é de 10kW.

A figura 1.3 mostra uma situação semelhante, porém, com um ângulo de defasagem de  $90^\circ$  entre os sinais. A potência instantânea apresenta-se com um valor médio nulo, mostrando que a potência ativa também é nula, como é de se esperar. A amplitude da onda é numericamente igual a potência aparente.



Sinais de tensão e corrente defasados de  $90^\circ$



Potência instantânea (média é nula)

Fig 1.3

A figura 1.4 mostra um caso intermediário, com um ângulo de defasagem de  $45^\circ$ . Neste caso a potência instantânea assume valores positivos e negativos, mas o valor médio (que corresponde a potência ativa) é positivo. Utilizando a equação 1.2, a potência ativa será de  $7,07\text{kW}$ .

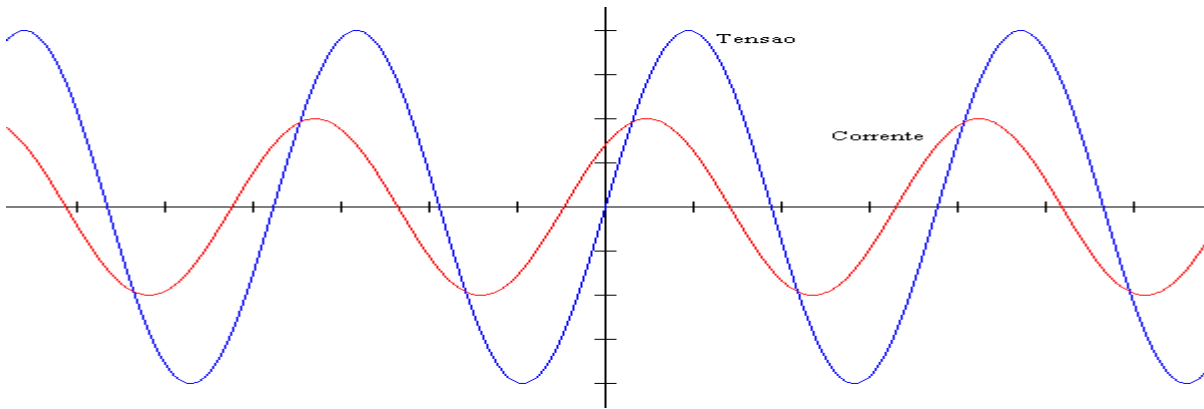


Gráfico de Tensão e corrente defasados de  $45^\circ$

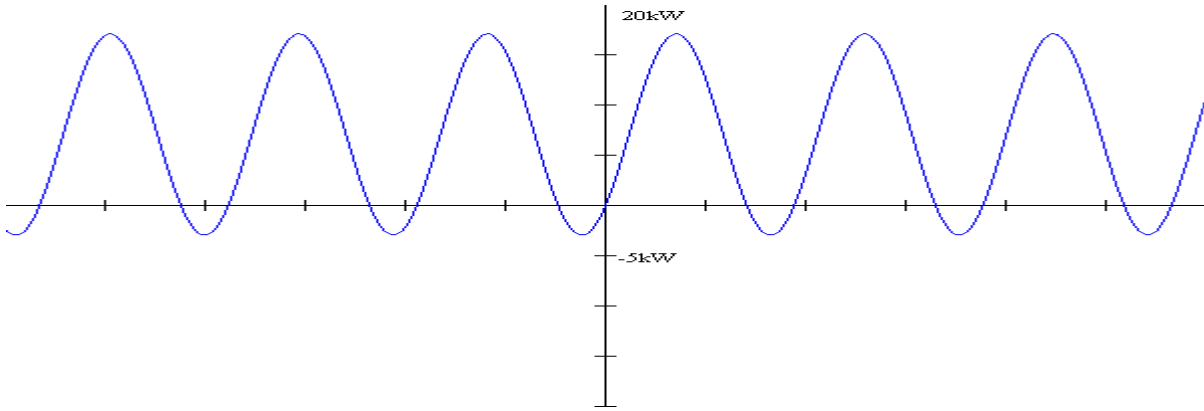


Gráfico da potência instantânea (oscilando entre positivo e negativo, média é positiva)

Fig. 1.4

Agora vamos considerar não o casos ideais, mas casos reais, onde as formas de onda da tensão e corrente possuem formas de onda não senoidais, pela utilização de equipamentos eletrônicos como: conversores, inversores de frequência, reatores eletrônicos, máquinas de solda, etc.

No caso em que apenas a tensão de entrada for senoidal, o fator de potência (FP) é expresso por:

$$FP_{V_{sen}} = \frac{I_1}{I_{rms}} \cdot \cos f_1 \quad (1.3)$$

Onde:

$I_1$  Primeira harmônica da Corrente

$I_{rms}$  Corrente total

$f_1$  Defasagem entre a primeira harmônica da corrente e a tensão.

A figura 1.5 mostra um situação em que se tem uma corrente quadrada. A potência instantânea, nesse caso, não aparece como uma onda senoidal, mas sim como uma senóide retificada.

A potência ativa é dada pelo produto da tensão (senoidal) por todas as componentes harmônicas da corrente (não senoidal). Este produto é nulo para todas as harmônicas exceto para a fundamental, devendo-se ponderar tal produto pelo co-seno da defasagem entre a tensão e a primeira harmônica da corrente. Desta forma, o fator de potência é expresso como a relação entre o valor RMS da

componente fundamental da corrente e a corrente RMS de entrada, multiplicado pelo co-seno da defasagem entre a tensão e a primeira harmônica da corrente.

Os valores eficazes de tensão e corrente são, respectivamente, 141,4 V e 100 A. Portanto, a potência aparente é de 14,14kW. No entanto a potência média é de 12,7kW. Este valor corresponde ao produto do valor eficaz da tensão pelo valor eficaz da componente fundamental da onda de corrente, já que a defasagem é nula. O valor de pico da componente fundamental é de 127,3 A, correspondendo a um valor eficaz de 90A.

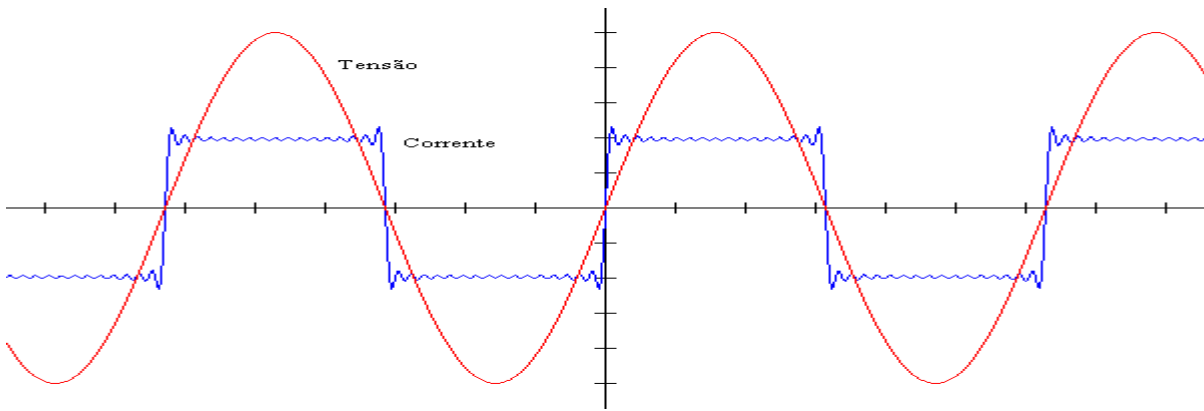
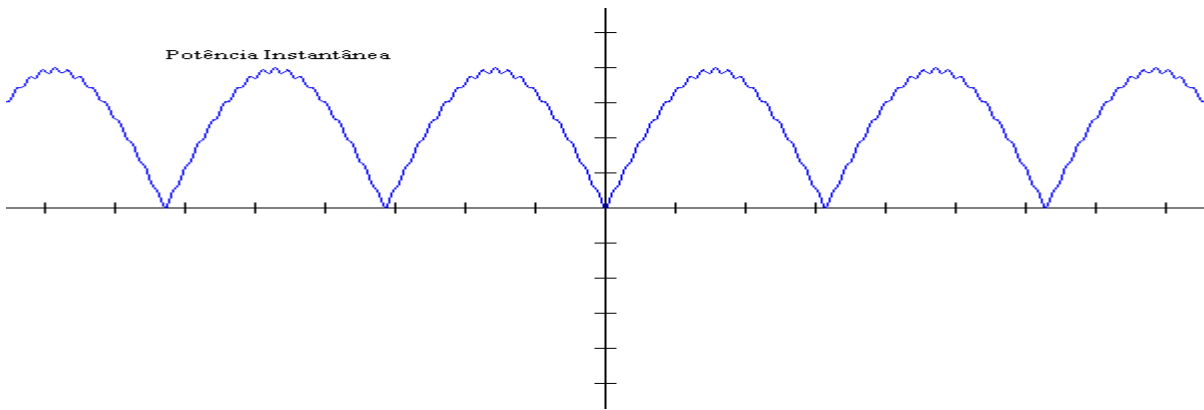
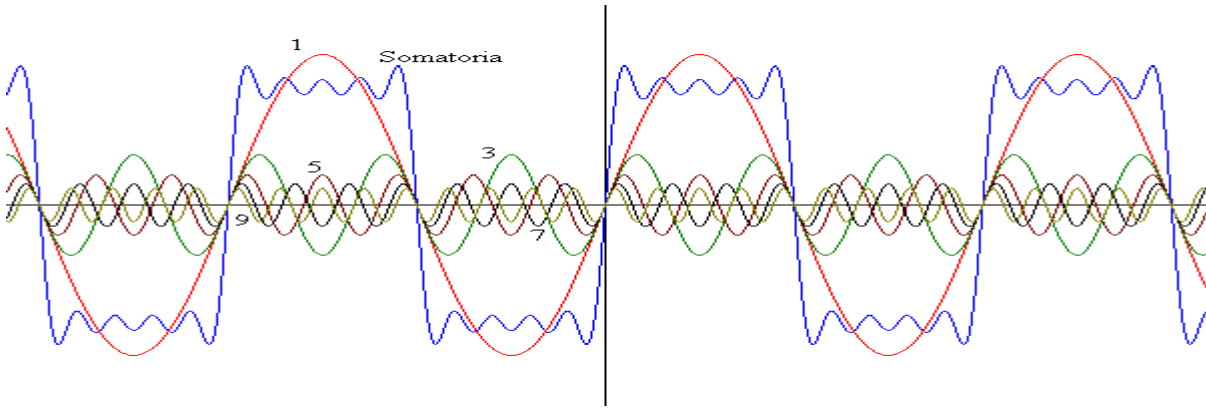


Gráfico de tensão e corrente (sinal quadrado)



Potência instantânea  
Fig 1.5

A figura 1.6 mostra uma decomposição da onda quadrada, indicando as componentes harmônicas (até a nona ordem). Observe que se for feito o produto da onda fundamental por qualquer das harmônicas, o valor médio será nula, uma vez que se alternarão intervalos positivos e negativos de mesma área.



Decomposição Harmônica (Série de Fourier) de onda quadrada até a 9ª ordem.

Fig. 1.6

O valor da corrente RMS pode ser expresso em função das componentes harmônicas:

$$I_{rms} = \sqrt{I_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} \quad (1.4)$$

Define-se a Taxa de Distorção Harmônica (TDH) como sendo a relação entre o valor RMS das componentes harmônicas da corrente e a fundamental:

$$TDH = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (1.5)$$

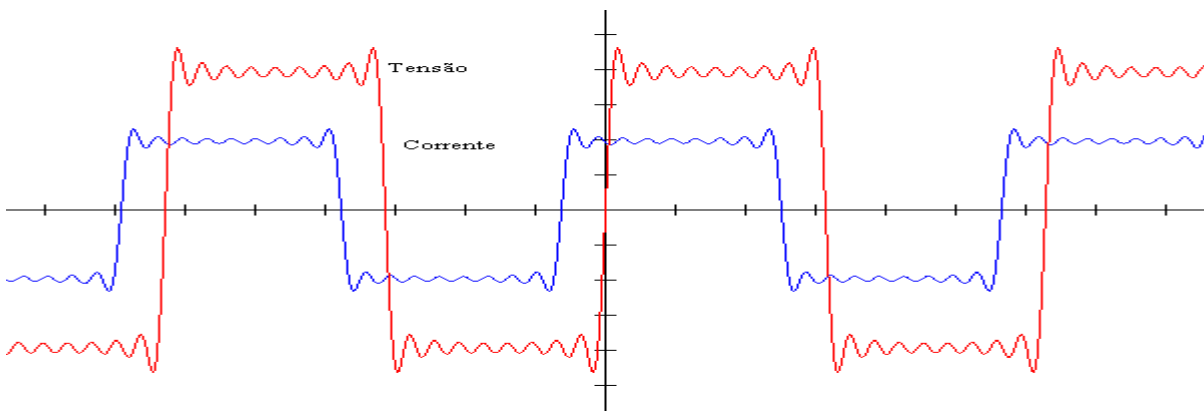
Assim o FP pode ser escrito como:

$$FP = \frac{\cos \phi_1}{\sqrt{1 + TDH^2}} \quad (1.6)$$

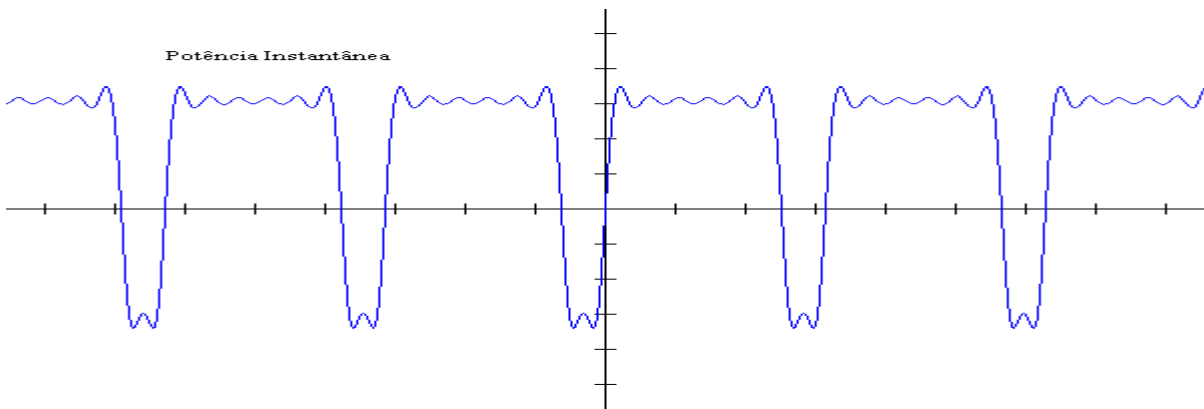
No caso de tensão e corrente não senoidais, o cálculo do FP, deve seguir a equação (1.1), ou seja, é necessário obter o valor médio do produto dos sinais a fim de se conhecer a potência ativa. Num caso genérico, tanto a componente fundamental quanto as harmônicas podem produzir potência, desde que existam as mesmas componentes espectrais na tensão e na corrente, e que sua defasagem não seja 90°.

A figura 1.7 mostra sinais de tensão e de corrente quadrados e defasados. Os valores são, respectivamente, 200 V e 100 A. O que leva a uma potência aparente de 20kVA.

Os valores eficazes das componentes fundamentais são, respectivamente, 180V e 90 A. A defasagem entre a tensão e a corrente é de  $36^\circ$ . Se o cálculo da potência ativa fosse feito considerando somente estes dados, o valor obtido para a potência ativa seria de 13,1 kW. No entanto, a potência média obtida na figura, e que corresponde à potência ativa é de 11,9 kW. O motivo da discrepância é devido ao valor médio a ser produzido por cada componente harmônica presente tanto na tensão quanto na corrente. Valores médios negativos são possíveis desde que a defasagem entre sinais seja superior a  $90^\circ$ . E é o que ocorre neste exemplo, levando a uma potência ativa menor do que aquela que seria produzida se apenas as componentes fundamentais estivessem presentes.



Sinais quadrados de Tensão e Corrente defasados de  $36^\circ$



Potência instantânea

Fig. 1.7



## **Desvantagens do baixo fator de potência e da alta distorção da corrente.**

Podem ser citadas como desvantagens de um baixo FP e elevada distorção, entre outros, os seguintes fatos:

- A máxima potência absorvível da rede é fortemente limitada pelo FP.
- As harmônicas de corrente exigem um sobre dimensionamento da instalação elétrica e dos transformadores, além de aumentar as perdas (efeito pelicular);
- A componente de 3ª harmônica da corrente, em sistema trifásico com neutro, pode ser muito maior do que o normal;
- O achatamento da onda de tensão, devido ao pico da corrente, além da distorção da forma de onda, pode causar mau funcionamento de outros equipamentos conectados à mesma rede;
- As componentes harmônicas podem excitar ressonâncias no sistema de potência, levando a picos de tensão e de corrente, podendo danificar dispositivos conectados a linha.

## **Efeitos de harmônicas em componentes do sistema elétrico**

O grau com que harmônicas podem ser toleradas no sistema de alimentação depende da susceptibilidade da carga (ou da fonte de potência). Os equipamentos menos sensíveis, geralmente, são os de aquecimento (carga resistiva), para os quais a forma de onda não é relevante. Os mais sensíveis são aqueles que, em seu projeto, assumem a existência de uma alimentação senoidal, como, por exemplo, equipamentos de comunicação e processamento de dados. No entanto, mesmo para cargas de baixa susceptibilidade, a presença de harmônicas (de tensão ou corrente) podem ser prejudiciais, produzindo maiores esforços nos componentes e isolantes.

### ***Motores e geradores***

O maior efeito dos harmônicos em máquinas rotativas (indução e síncrona) é o aumento do aquecimento devido ao aumento das perdas no ferro e no cobre. Afeta-se, assim, sua eficiência e o torque disponível. Além disso, tem-se um possível aumento do ruído audível, quando comparado com alimentação senoidal.

## ***Transformadores***

Também neste caso tem-se um aumento nas perdas. Harmônicos na tensão aumentam as perdas no ferro, enquanto harmônicos na corrente elevam as perdas no cobre. A elevação das perdas no cobre deve-se principalmente ao efeito pelicular, que implica numa redução da área efetivamente condutora à medida que se eleva a frequência da corrente.

Normalmente as componentes harmônicas possuem amplitude reduzida, o que colabora para não tornar esses aumentos de perdas excessivos. No entanto, podem surgir situações específicas (ressonâncias, por exemplo) em que surjam componentes de alta frequência e amplitude elevada.

Além disso o efeito das reatâncias de dispersão fica ampliado, uma vez que seu valor aumenta com a frequência.

Tem-se ainda uma maior influência das capacitâncias parasitas (entre espiras e entre enrolamento) que podem realizar acoplamentos não desejados e, eventualmente, produzir ressonâncias no próprio dispositivo.

## ***Cabos de alimentação***

Em razão do efeito pelicular, que restringe a seção condutora para componentes de frequência elevada, também os cabos de alimentação têm um aumento de perdas devido às harmônicas de corrente. Além disso tem-se o chamado "efeito de proximidade", o qual relaciona um aumento na resistência do condutor em função do efeito dos campos magnéticos produzidos pelos demais condutores colocados nas adjacências.

Além disso, caso os cabos sejam longos e os sistemas conectados tenham suas ressonâncias excitadas pelas componentes harmônicas, podem aparecer elevadas sobre-tensões ao longo da linha, podendo danificar o cabo.

## ***Capacitores***

O maior problema aqui é a possibilidade de ocorrência de ressonâncias (excitadas pelas harmônicas), podendo produzir níveis excessivos de corrente e/ou de tensão. Além disso, como a

reatância capacitiva diminui com a frequência, tem-se um aumento nas correntes relativas às harmônicas presentes na tensão.

As correntes de alta frequência, que encontrarão um caminho de menor impedância pelos capacitores, elevarão as suas perdas ôhmicas. O decorrente aumento no aquecimento do dispositivo encurta a vida útil do capacitor.

### ***Equipamentos eletrônicos***

Alguns equipamentos podem ser muito sensíveis a distorções na forma de onda de tensão. Por exemplo, se um aparelho utiliza o cruzamento com o zero (ou outros aspectos da onda de tensão) para realizar alguma ação, distorções na forma de onda podem alterar, ou mesmo inviabilizar, seu funcionamento.

Caso as harmônicas penetrem na alimentação do equipamento por meio de acoplamentos indutivos e capacitivos (que se tornam mais efetivos com a aumento da frequência), eles podem também alterar o bom funcionamento do aparelho.

### ***Aparelhos de medição***

Aparelhos de medição e instrumentação em geral são afetados por harmônicas, especialmente se ocorrerem ressonâncias que afetam a grandeza medida.

Dispositivos com discos de indução, como os medidores de energia, são sensíveis a componentes harmônicas, podendo apresentar erros positivos ou negativos, dependendo do tipo de medidor e da harmônica presente. Em geral a distorção deve ser elevada (>20%) para produzir erro significativo.

### ***Relés de proteção e fusíveis***

Um aumento da corrente eficaz devida a harmônicas sempre provocará um maior aquecimento dos dispositivos pelos quais circula a corrente, podendo ocasionar uma redução em sua vida útil e, eventualmente, sua operação inadequada.

Em termos dos relés de proteção não é possível definir completamente as respostas devido à variedade de distorções possíveis e aos diferentes tipos de dispositivos existentes.

## **Normas Relativas à Corrente de Linha: Fator de Potência e Harmônicas de Baixa Frequência**

### ***Fator de potência***

A atual regulamentação brasileira do fator de potência estabelece que o mínimo fator de potência (FP) das unidades consumidoras é de 0,92. A partir de abril de 1996 o cálculo do FP deve ser feito por média horária. O consumo de reativos além do permitido (0,425 VARh por cada Wh) é cobrado do consumidor. No intervalo entre 6 e 24 horas isto ocorre se a energia reativa absorvida for indutiva e das 0 às 6 horas, se for capacitiva.

Conforme foi visto anteriormente, as componentes harmônicas da corrente também contribuem para o aumento da corrente eficaz, de modo que elevam a potência aparente sem produzir potência ativa (supondo a tensão senoidal). Assim, uma correta medição do FP deve levar em conta a distorção da corrente, e não apenas a componente reativa (na frequência fundamental).

### ***Norma IEC 1000-3-2: Limites para emissão de harmônicas de corrente ( $\leq 16$ A por fase)***

Esta norma refere-se às limitações das harmônicas de corrente injetadas na rede pública de alimentação. Aplica-se a equipamentos elétricos e eletrônicos que tenham uma corrente de entrada de até 16 A por fase, conectado a uma rede pública de baixa tensão alternada, de 50 ou 60 Hz, com tensão fase-neutro entre 220 e 240 V. Para tensões inferiores, os limites não foram ainda estabelecidos (1996).

Os equipamentos são classificados em 4 classes:

*Classe A:* Equipamentos com alimentação trifásica equilibrada e todos os demais não incluídos nas classes seguintes.

*Classe B:* Ferramentas portáteis.

*Classe C:* Dispositivos de iluminação, incluindo reguladores de intensidade (dimmer).

*Classe D:* Equipamento que possua uma corrente de entrada com a forma mostrada na figura 2.1. A potência ativa de entrada deve ser inferior a 600W, medida esta feita obedecendo às condições de

ensaio estabelecidas na norma (que variam de acordo com o tipo de equipamento). Um equipamento é incluído nesta classe se a corrente de entrada, em cada semi-período, se encontra dentro de um envelope como mostrado na fig. 2.1, num intervalo de pelo menos 95% da duração do semi-período. Isto significa que formas de onda com pequenos picos de corrente fora do envelope são consideradas dentro desta classe.

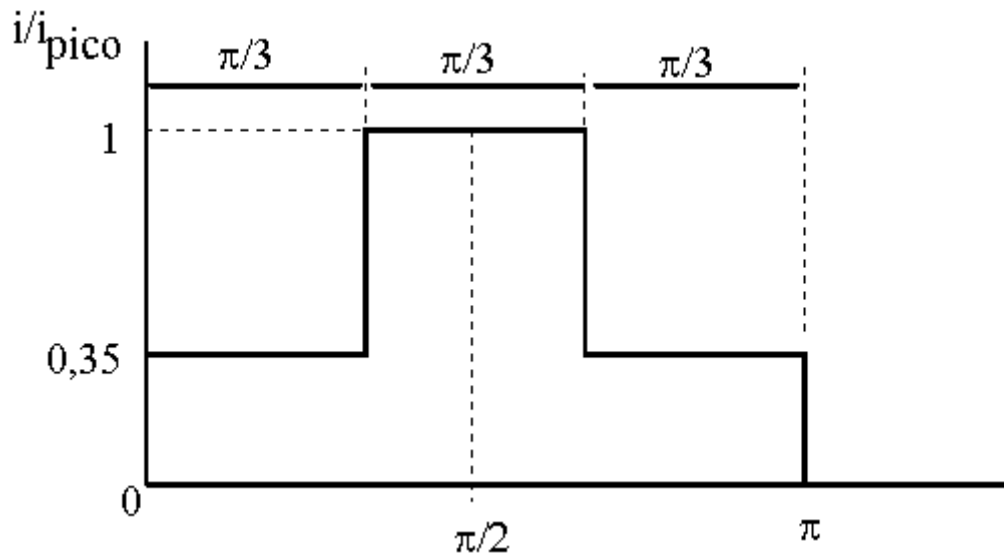


Fig. 2.1 Envelope da corrente de entrada que define um equipamento como classe D.

Independentemente da forma da corrente de entrada, se um equipamento for enquadrado nas classes B ou C, ele não será considerado como de classe D. Isto também vale para aparelhos que contenham motor ca nos quais se faça ajuste de velocidade por controle de fase (SCR ou Triac).

Estes limites não se aplicam (ainda estão em estudo) a equipamentos de potência maior do que 1kW, utilizados profissionalmente.

Para as harmônicas de ordem superior a 19, observa-se globalmente o espectro. Se este estiver dentro de um envelope com decaimento monotônico, ou seja, se suas componentes diminuïrem com o aumento da freqüência, as medições podem ser restritas até a 19ª harmônica. As correntes harmônicas com valor inferior a 0,6% da corrente de entrada (medida dentro das condições de ensaio), ou inferiores a 5 mA não são consideradas.

A Tabela II.1 indica os valores máximos para as harmônicas de corrente, com o equipamento operando em regime permanente. Para o regime transitório, as correntes harmônicas que surgem na partida de um aparelho e que tenham duração inferior a 10s não devem ser consideradas.

Já para as harmônicas pares entre a 2ª e a 10ª e as ímpares entre a 3ª e a 19ª, valores até 1,5 vezes os dados pela tabela são admissíveis para cada harmônica, desde que apareçam em um intervalo máximo de 15 segundos (acumulado), em um período de observação de 2 minutos e meio.

Os valores limites para a classe B são os mesmos da classe A, acrescidos de 50%.

Para tensões menores sugere-se usar a seguinte expressão para encontrar o novo valor dos limites das harmônicas:

$$I_{n(x)} = I_n \cdot \frac{230}{V_x} \quad (2.1)$$

Tabela II.1  
Limites para as Harmônicas de Corrente

Ordem da Harmônica n	Classe A Máxima corrente [A]	Classe B Máxima corrente [A]	Classe C (>25W) % da fundamental	Classe D (>10W, <300W) [mA/W]	Classe D [A]
Harmônicas Ímpares					
3	2,30	3,45	30.FP	3,4	2,3
5	1,14	1,71	10	1,9	1,14
7	0,77	1,155	7	1,0	0,77
9	0,40	0,60	5	0,5	0,40
11	0,33	0,495	3	0,35	0,33
13	0,21	0,315	3	0,296	0,21
15 ≤ n ≤ 39			3	3,85/n	2,25/n
Harmônicas Pares					
2	1,08	1,62	2		
4	0,43	0,645			
6	0,3	0,45			
8 ≤ n ≤ 40					

FP: fator de potência

### **Recomendação IEEE para práticas e requisitos para controle de harmônicas no sistema elétrico de potência: IEEE-519**

Esta recomendação (não é uma norma) produzida pelo IEEE descreve os principais fenômenos causadores de distorção harmônica, indica métodos de medição e limites de distorção. Seu enfoque é diverso daquele da IEC, uma vez que os limites estabelecidos referem-se aos valores medidos no Ponto

de Acoplamento Comum (PAC), e não em cada equipamento individual. A filosofia é que não interessa ao sistema o que ocorre dentro de uma instalação, mas sim o que ela reflete para o exterior, ou seja, para os outros consumidores conectados à mesma alimentação.

Os limites diferem de acordo com o nível de tensão e com o nível de curto-circuito do PAC. Obviamente, quanto maior for a corrente de curto-circuito ( $I_{cc}$ ) em relação à corrente de carga, maiores são as distorções de corrente admissíveis, uma vez que elas distorcerão em menor intensidade a tensão no PAC. À medida que se eleva o nível de tensão menores são os limites aceitáveis.

A grandeza TDD (Total Demand Distortion) é definida como a distorção harmônica da corrente, em % da máxima demanda da corrente de carga demanda de 15 ou 30 minutos. Isto significa que a medição da TDD deve ser feita no pico de consumo.

Harmônicas pares são limitadas a 25% dos valores acima. Distorções de corrente que resultem em nível cc não são admissíveis.

Tabela II.2  
Limites de Distorção da Corrente para Sistemas de Distribuição (120V a 69kV)

Máxima corrente harmônica em % da corrente de carga ( $I_o$ – valor da componente fundamental)						
Harmônica ímpares:						
$I_{cc}/I_o$	<11	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 < n$	TDD(%)
<20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20<50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50<100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100<1000	12	5,5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20

Tabela II.3  
Limites de Distorção da Corrente para Sistemas de Sub-distribuição (69001V a 161kV)

Limites para harmônicas de corrente de cargas não-lineares no PAC com outras cargas						
Harmônica ímpares:						
$I_{cc}/I_o$	<11	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 < n$	TDD(%)
<20	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
20<50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4
50<100	5	2,25	2	0,75	0,35	6
100<1000	6	2,75	2,5	1	0,5	7,5
>1000	7,5	3,5	3	1,25	0,7	10

Tabela II.4  
Limites de distorção de corrente para sistemas de alta tensão (>161kV) e sistemas de geração e cogeração isolados.

Harmônica ímpares:						
I <sub>cc</sub> /I <sub>o</sub>	<11	11≤n<17	17≤n<23	23≤n<35	35<n	THD(%)
<50	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
≥50	3	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75

Para os limites de tensão, os valores mais severos são para as tensões menores (nível de distribuição).

Estabelece-se um limite individual por componente e um limite para a distorção harmônica total.

Tabela II.5  
Limites de distorção de tensão

	Distorção individual	THD
69kV e abaixo	3%	5%
69001V até 161kV	1,5%	2,5%
Acima de 161kV	1%	1,5%

## Conclusão

Vimos que o cálculo e correção do FP sem considerações sobre o comportamento do sistema elétrico não representam a realidade. Portanto nós engenheiros eletricitas devemos nos reciclar e levar em consideração os desvios do modelo ideal que nos é apresentado em cada estudo, para que assim possamos realizar um trabalho que, realmente, venha a trazer benefícios econômicos e técnicos para nossos clientes e, em conseqüência, para o sistema elétrico como um todo, disponibilizando maior quantidade de energia elétrica. Visto que os investimentos no setor de geração são escassos e que nosso governo, infelizmente, vem ignorando esse setor a muito tempo.



## Referência Bibliográfica

FERNANDO PINHABEL MARAFÃO, Artigo: “Fator de Potência em sistemas elétricos desbalanceados e sob formas de onda não-senoidais”, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação. (foto cópia fornecida por orientador)

JOSÉ ANTENOR POMILIO, Apostila: “Harmônicos e Fator de Potência: um Curso de Extensão”, Universidade Estadual de Campinas, publicação FEEC, Maio de 1997, site na internet: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/harmo.html>.