

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO - UNICAMP EE 833 ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

MÓDULO 1

RETIFICADORES NÃO CONTROLADOS E FATOR DE POTÊNCIA

ASPECTOS TEÓRICOS

Neste Módulo o estudante terá contato com o conversor de potência do tipo CA-CC, ou seja, um retificador. Serão estudados retificadores não controlados, ou seja, os que utilizam apenas diodos, verificando os comportamentos para diferentes tipos de cargas conectadas no lado CC do retificador. Serão analisados conversores monofásicos e trifásicos. Será também discutida a questão e a importância do "Fator de Potência" enquanto indicativo de *qualidade* da energia elétrica.

Na parte experimental tem-se, além do conteúdo específico deste módulo, a introdução ao uso de equipamentos e métodos de medição que serão utilizados durante o curso.

1.1 Retificadores não controlados monofásicos

O fornecimento de energia elétrica é feito, essencialmente, a partir de uma rede de distribuição em corrente alternada, devido, principalmente, à facilidade de adaptação do nível de tensão por meio de transformadores.

Em muitas aplicações, no entanto, a carga alimentada exige uma tensão contínua. A conversão CA-CC é realizada por conversores chamados *retificadores*.

Os retificadores podem ser classificados segundo a sua capacidade de ajustar o valor da tensão de saída (controlados x não controlados); de acordo com o número de fases da tensão alternada de entrada (monofásico, trifásico, hexafásico, etc.); em função do tipo de conexão dos elementos retificadores (meia ponte x ponte completa).

Os retificadores não controlados, tema desta experiência, são aqueles que utilizam diodos como elementos de retificação.

Os diodos de potência diferem dos diodos de sinal por terem uma capacidade superior em termos de nível de tensão de bloqueio (podendo atingir até alguns kV, num único dispositivo), e poderem conduzir correntes de até alguns kA.

Nas aplicações em que a tensão alternada é a da rede, tais diodos não precisam ter seu processo de desligamento muito rápido, uma vez que a frequência da rede é baixa (50 ou 60 Hz).

Usualmente topologias em meia ponte não são aplicadas. A principal razão é que, nesta conexão, a corrente média da entrada apresenta um nível médio diferente de zero. Tal nível contínuo pode levar elementos magnéticos presentes no sistema (indutores e transformadores) à saturação, o que é prejudicial ao sistema. Topologias em ponte completa absorvem uma corrente média nula da rede, não afetando, assim, tais elementos magnéticos.

A figura 1.1 mostra o circuito e as formas de onda com carga resistiva para um retificador monofásico com topologia de meia-ponte, também chamado de meia-onda.

A figura 1.2 mostra topologias de onda completa, considerando os três tipos básicos de carga: resistiva, capacitiva e indutiva.

Com carga resistiva (fig. 1.2.a) as formas de onda da tensão e da corrente na saída do retificador e na carga são as mesmas, como mostrado na figura 1.3. A corrente de entrada apresenta-se com a mesma forma e fase da tensão.

O retificador com carga capacitiva (fig. 1.2.b) faz com que a tensão de saída apresente-se alisada, elevando o seu valor médio em relação à carga resistiva. O capacitor carrega-se com a tensão de pico da entrada (desprezando a queda nos diodos). Quando a tensão de entrada se torna menor do que a tensão no capacitor os diodos ficam bloqueados e a corrente de saída é fornecida

exclusivamente pelo capacitor, o qual vai se descarregando, até que, novamente, a tensão de entrada fique maior, recarregando o capacitor. A forma de onda da corrente de entrada é muito diferente de uma senóide, apresentando pulsos de corrente nos momentos em que o capacitor é recarregado, como mostrado na figura 1.4.

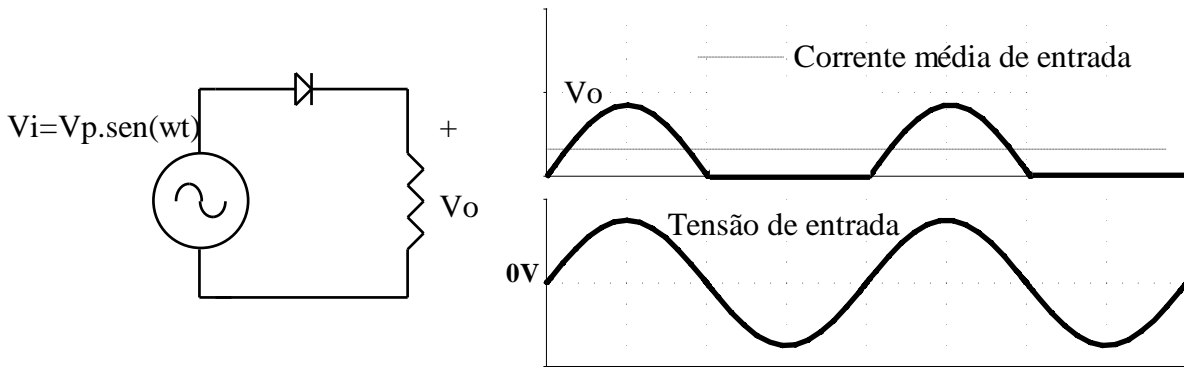


Figura 1.1 Topologia e formas de onda (com carga resistiva) de retificador monofásico não controlado, meia-onda.

Para o retificador com carga indutiva (fig. 1.2.c), a carga se comporta como uma fonte de corrente. Dependendo do valor da indutância, a corrente de entrada pode apresentar-se quase como uma corrente quadrada, como mostrado na figura 1.5. Para valores reduzidos de indutância, a corrente tende a uma forma que depende do tipo de componente à sua jusante. Se for apenas uma resistência, tende a uma senóide. Se for um capacitor, tende à forma de pulso, mas apresentando uma taxa de variação (di/dt) reduzida.

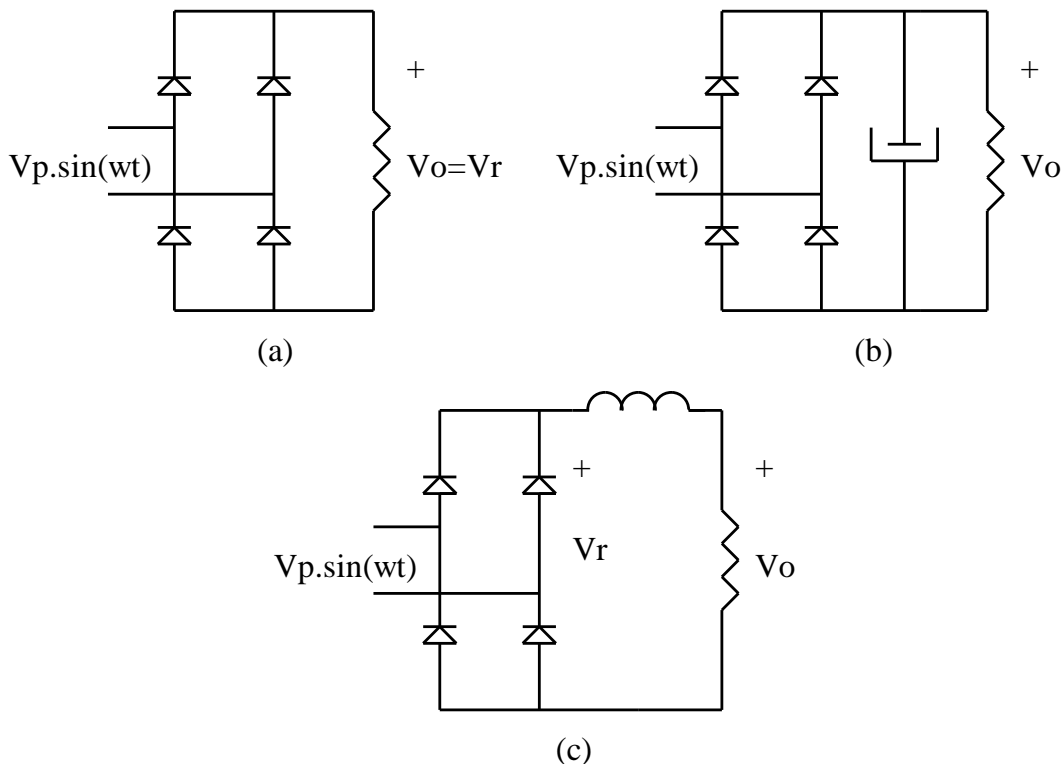


Figura 1.2 Retificadores monofásicos não controlados, de onda-completa.

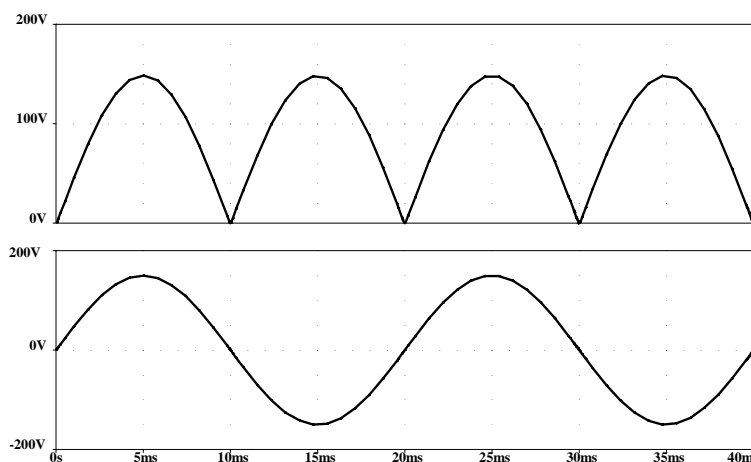


Figura 1.3. Formas de onda para retificador com carga resistiva.

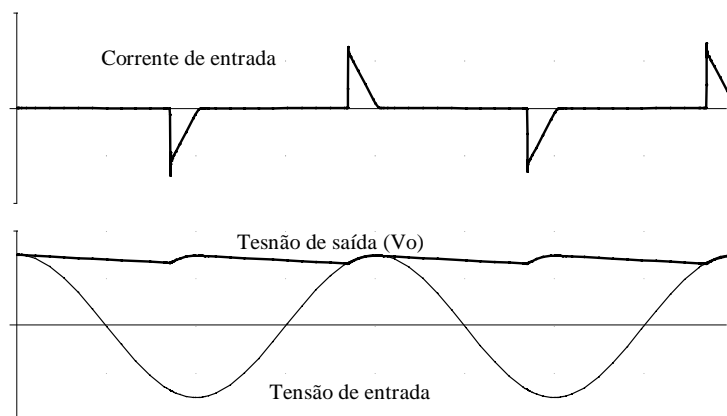


Figura 1.4 Formas de onda para retificador monofásico não controlado, onda completa, com carga capacitiva.

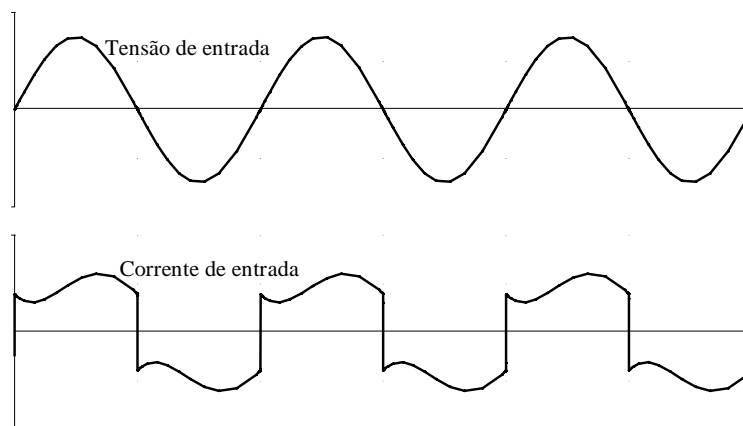


Figura 1.5. Formas de onda para retificador monofásico, onda-completa, não controlado, alimentando carga indutiva.

1.2 Retificadores não controlados com entrada trifásica

Quando a potência da carga alimentada se eleva, normalmente são utilizados retificadores trifásicos a fim de, distribuindo a corrente entre as três fases, evitar desequilíbrios que poderiam ocorrer caso a corrente fosse consumida de apenas uma ou duas fases.

Neste caso a corrente é fornecida, a cada intervalo de 60 graus, por apenas duas das três fases. Poderão conduzir aquelas fases que tiverem, em módulo, as duas maiores tensões. Ou seja, a fase que for mais positiva, poderá levar o diodo a ela conectado, na semiponte superior, à condução. Na semiponte inferior poderá conduzir o diodo conectado à fase com tensão mais negativa.

1.3 Comutação

Para qualquer tipo de retificador, nos instantes que ocorre a transferência de corrente de um par de diodos para outro, caso exista alguma indutância presente na conexão de entrada, esta transição não pode ser instantânea.

Quando a alimentação é feita por meio de transformadores este fenômeno se acentua, embora ocorra sempre, uma vez que as linhas de alimentação sempre apresentam alguma característica indutiva. Em tais situações, que representam os casos reais, durante alguns instantes estão em condução simultânea o diodo que está entrando em condução e aquele que está sendo desligado. Isto significa, do ponto de vista da rede, um curto-circuito aplicado após as indutâncias de entrada, L_i . A tensão efetiva na entrada do retificador será a **média** das tensões presentes nas fases. Tal distorção é mostrada na figura 1.6, num circuito trifásico alimentando carga indutiva. A soma das correntes pelas fases em comutação é igual à corrente drenada pela carga.

Quando termina o intervalo de comutação, a tensão retorna à sua forma normal (neste caso em que o di/dt em regime é nulo).

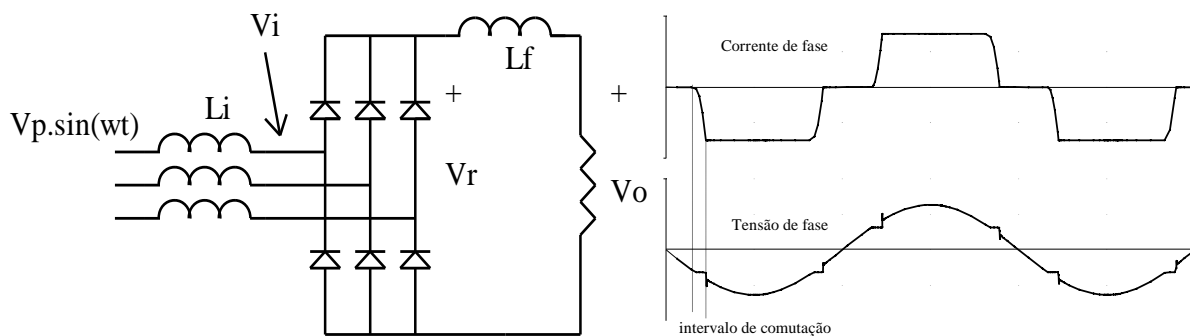


Figura 1.6. Topologia de retificador trifásico, não controlado, com carga indutiva. Formas de onda típicas, indicando o fenômeno da comutação.

Quando a carga é capacitiva, as indutâncias de entrada atuam no sentido de reduzir a derivada inicial da corrente, como mostrado na figura 1.7. Neste caso, como a corrente apresenta-se variando, as mesmas indutâncias apresentarão uma queda de tensão, de modo que a tensão V_i mostra-se significativamente distorcida. Como a corrente circula, em cada intervalo, apenas em duas fases, não se configura o fenômeno da comutação.

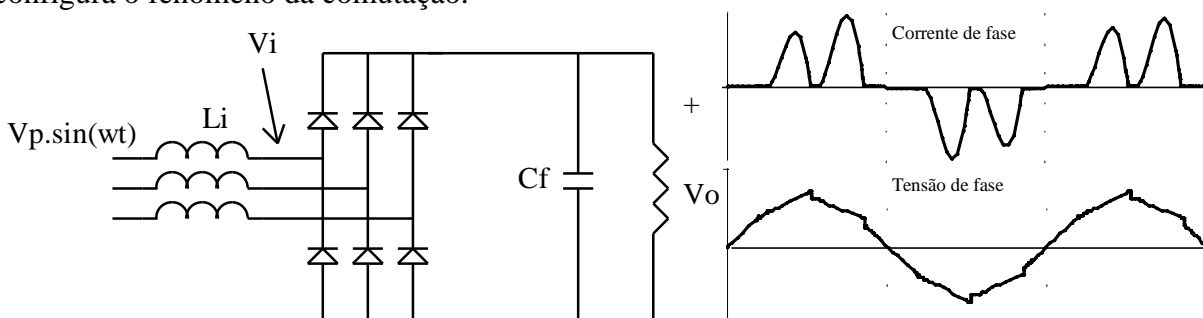


Figura 1.7. Topologia de retificador trifásico, não controlado, com carga capacitiva e formas de onda típicas, indicando o fenômeno da distorção da tensão devido à distorção da corrente.

1.4 Desempenho de retificadores

1.4.1 Lado CC

O que normalmente se deseja no lado CC de um retificador é que a tensão apresente o nível médio especificado com uma ondulação (*ripple*) dentro de limites dados pela aplicação.

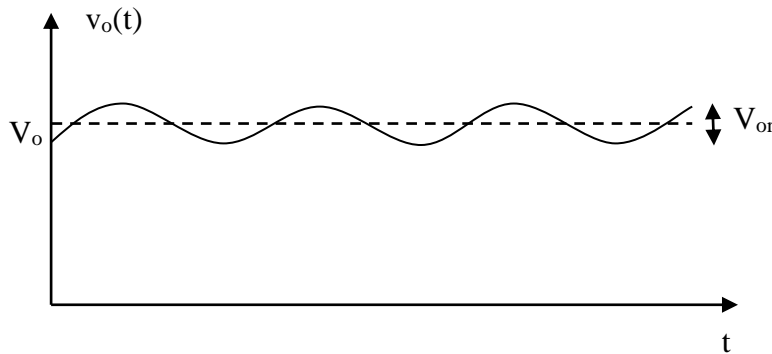


Figura 1.8 Forma de onda esquemática da tensão de saída de um retificador

Definições:

V_o : valor médio da tensão de saída

V_{or} : Valor pico-a-pico apenas da ondulação da tensão de saída

V_{oCA} : Valor eficaz apenas da ondulação da tensão de saída

V_{oef} : Valor eficaz da tensão de saída (inclui valor médio e ondulação)

$$V_{oef} = \sqrt{V_o^2 + V_{oCA}^2}$$

1.4.1.1 Fator de Forma da tensão de saída

$$FF_o = \frac{V_{oef}}{V_o}$$

Quanto mais FF_o se aproxima da unidade, mais bem filtrada é a tensão de saída.

1.4.1.2 Fator de “ripple”

$$FR = \frac{V_{oCA}}{V_o}$$

Quanto mais o FR se aproxima de zero, melhor a filtragem da tensão de saída.

Ambos os fatores estão, obviamente, relacionados. No entanto, pode-se encontrar seja uma ou a outra definição nas especificações de uma fonte CC.

1.4.2 Rendimento

Rendimento é a relação entre a potência ativa de saída e a potência ativa na entrada do conversor. Ou seja, seu complemento representa as perdas do conversor. Uma vez que as perdas dependem da corrente, o valor é especificado à potência nominal. Em inglês usa-se o termo “efficiency”.

$$\eta = \frac{P_o}{P_i}$$

No lado CC, sob a hipótese de que a ondulação da tensão seja pequena (menor que 10%), a potência ativa pode ser calculada com pequeno erro a partir do valor médio V_o . Caso a ondulação seja elevada, um valor mais preciso se obtém utilizando o valor eficaz, V_{oef} .

1.4.3 Lado CA

1.4.3.1 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, com o cálculo feito por média horária. O consumo de reativos além do permitido (0,425 varh para 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 [1.1].

No entanto, tais definições foram estabelecidas considerando que a corrente tem uma forma senoidal, o que não é a realidade em situações em que se tem um retificador (carga não linear) conectado à rede.

O baixo fator de potência é penalizado, pois implica em uma “ocupação” da rede física com passagem de corrente sem que, junto à carga, se realize o correspondente trabalho (potência ativa). Dado que o sistema é essencialmente remunerado pela energia ativa consumida (Wh), a imposição de limites mínimos de FP representa o objetivo de uso da infraestrutura para, efetivamente, produzir trabalho útil.

Considere, para efeito das definições posteriores, o esquema:

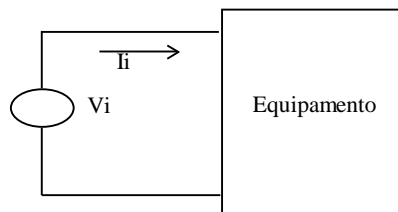


Figura 1.9 Circuito genérico utilizado nas definições de FP

Definição de Fator de Potência

Fator de potência é definido como a relação entre a potência ativa e a potência aparente de um dispositivo ou equipamento, independentemente das formas que as ondas de tensão e corrente apresentem, desde que periódicas (período T).

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

Note-se que a realização deste cálculo a partir de medidores digitais é extremamente simples. A partir da amostragem da tensão e da corrente, determina-se a potência instantânea pelo produto de ambas as amostras. O cálculo da potência ativa é simplesmente resultante da divisão do valor acumulado de potência ativa (portanto tem-se uma medida de energia ativa) pelo número de amostras em um período.

Para obter a potência aparente, preliminarmente são calculados os valores eficazes e depois se faz o produto:

$$V_{ief} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} v_i^2 \cdot dt} \quad I_{ief} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} i_i^2 \cdot dt}$$

Em um sistema com **formas de onda senoidais**, a equação anterior torna-se igual ao cosseno da defasagem entre as ondas de tensão e de corrente:

$$FP_{\text{seno}} = \cos \phi$$

Quando apenas a tensão de entrada for senoidal, o FP é expresso por:

$$FP_{V_{\text{seno}}} = \frac{I_1}{I_{\text{ief}}} \cdot \cos \phi_1$$

Neste caso, a potência ativa de entrada é dada pela média do produto da tensão (senoidal) por todas as componentes harmônicas da corrente (não senoidal). Esta média é nula para todas as harmônicas exceto para a fundamental, devendo-se ponderar tal produto pelo cosseno 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 eficaz da componente fundamental da corrente e a corrente eficaz de entrada, multiplicada pelo cosseno da defasagem entre a tensão e a primeira harmônica da corrente.

A relação entre as correntes é chamada de *fator de forma da corrente* (FFi) e o termo em cosseno é chamado de *fator de deslocamento da fundamental* (FD). Ou seja, no caso de tensão senoidal, o fator de potência é o produto do fator de forma da corrente pelo fator de deslocamento da fundamental.

$$FP_{V_{\text{seno}}} = \text{FFi} \cdot \text{FD}$$

Por sua vez, o valor RMS da corrente de entrada também pode ser expresso em função das componentes harmônicas:

$$I_{\text{ief}} = \sqrt{I_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}$$

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

$$\text{TDH} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1}$$

Assim, o FP pode ser reescrito como:

$$FP = \frac{\cos \phi_1}{\sqrt{1 + \text{TDH}^2}}$$

É evidente a relação entre o FP e a distorção da corrente absorvida da linha. Neste sentido, existem normas internacionais que regulamentam os valores máximos das harmônicas de corrente que um dispositivo ou equipamento pode injetar na linha de alimentação.

Observe que, do ponto de vista do procedimento de cálculo do FP, é muito mais simples utilizar a definição que qualquer outro método.

Quando a forma de onda da corrente se apresenta com simetria de ¼ de onda, ou seja, quando entre 90° e 180° a forma repete, de modo espelhado, o que ocorreu entre 0° e 90° (o mesmo valendo para o semiciclo negativo), pode-se afirmar que a componente fundamental da cruza o zero nos mesmos instantes que a corrente. Com isso é possível determinar “por inspeção”, ou seja, pela observação da forma de onda, o *fator de deslocamento da fundamental*.

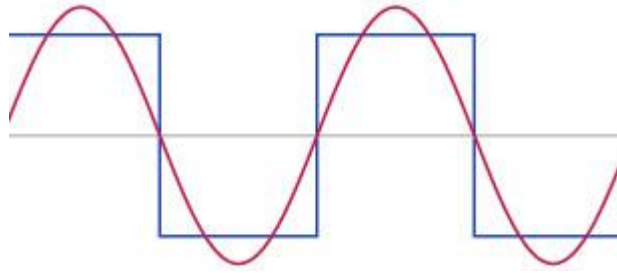


Figura 1.10 Onda quadrada e sua componente fundamental.

1.4.3.2 Fator de Crista

É a relação entre o máximo valor instantâneo atingido pela corrente (I_{ip}) e o valor eficaz.

$$FC = \frac{I_{ip}}{I_{ief}}$$

Assim, uma onda senoidal tem $FC=1,41$; onda quadrada tem $FC=1$.

Essa grandeza é utilizada em algumas aplicações, pois o valor elevado de FC significa que o circuito apresenta um valor instantâneo de corrente muito maior do que o valor eficaz, o que tem implicações sobre o dimensionamento dos componentes que devem conduzir tal corrente.

1.4.4 A necessidade de modernização da legislação

A legislação brasileira (considerando as definições da ANEEL) é anacrônica, uma vez que não usa a potência aparente na definição do FP. Ao invés disso, coloca no denominador “a raiz quadrada da potência (ou energia) ativa ao quadrado somada com a potência (ou energia) reativa ao quadrado”, ou seja:

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$

O principal problema desta formulação é que não existe uma definição precisa do que seja “potência reativa” em situações não senoidais. Note que a definição a partir da potência aparente se aplica a qualquer forma de onda, desde que periódica.

A pergunta é, portanto, por que a legislação não faz uso da definição de potência aparente para definir o Fator de Potência?

A resposta tem a ver com a realidade tecnológica dos primórdios da eletrificação. No início do século passado foram desenvolvidos medidores de potência ativa para tarifação dos usuários. Tais medidores eletromecânicos (“relógios”) se baseiam na produção de um movimento de rotação de um disco metálico o qual, associado a um mecanismo de engrenagens, aciona um contador, registrando, efetivamente, a integral no tempo da potência elétrica, ou seja, a energia ativa (kWh). Tal equipamento ainda é utilizado na maioria das unidades consumidoras no Brasil.

Nas instalações industriais, nas quais se controla a demanda de potência reativa, o medidor eletromecânico segue o mesmo procedimento, mas com uma alteração construtiva que resultava no movimento do disco na presença de corrente defasada de 90° da respectiva tensão.

Com isso, as concessionárias obtêm as energias ativa e reativa, determinando o fator de potência.

Por outro lado, a obtenção da potência aparente exige a medição dos valores eficazes de tensão e corrente. Isso também é facilmente feito com medidores eletromecânicos do tipo “ferro móvel”. No entanto, realizar o produto de ambas as variáveis (analógicas), não é tão simples.

As formas de medição, atualmente, são completamente diferentes, uma vez que os medidores eletrônicos (digitais) são capazes de processar algoritmos quaisquer e, portanto, podem fazer os cálculos que representam exatamente o que se deseja medir.

O que urge é a modernização da legislação brasileira, superando procedimentos antiquados e errados que não mais possuem justificativa conceitual ou tecnológica.

1.5 Normas IEC 61000-3-2: Distúrbios causados por equipamento conectado à rede pública de baixa tensão

Esta norma [1.2] 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 estabelecidos. A Emenda 14, de janeiro de 2001 inseriu algumas alterações nas definições das classes e nos métodos de medidas, devendo vigorar a partir de 2004. Em 2006 tem-se uma nova edição e, em 2009, novas emendas foram adicionadas. As emendas normalmente se referem à inclusão de procedimentos classificatórios de equipamentos ou à definição de novos procedimentos de testes.

Em todas essas versões os equipamentos são classificados em quatro classes:

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

Classe B: Ferramentas portáteis e equipamentos de soldagem não profissionais.

Classe C: Dispositivos de iluminação com potência acima de 25 W.

- Para potência igual ou inferior a 25 W e exclusivamente para lâmpadas de descarga, aplicam-se os limites da classe A ou ainda: a terceira harmônica da corrente, expressa como uma porcentagem da corrente fundamental, não pode exceder 86% e a quinta harmônica não deve exceder a 61%. Além disso, a forma de onda da corrente de entrada deve estar em conformidade com a figura 3.9. Isto é, deve superar os 5% de limiar de corrente antes ou em 60° , ter seu pico, antes ou em 65° e não cair abaixo do limiar de 5% de corrente antes de 90° , com referência a qualquer cruzamento por zero da fundamental da tensão de alimentação.
- Reguladores de intensidade para lâmpadas incandescentes (*dimmer*), aplicam os limites da classe A.

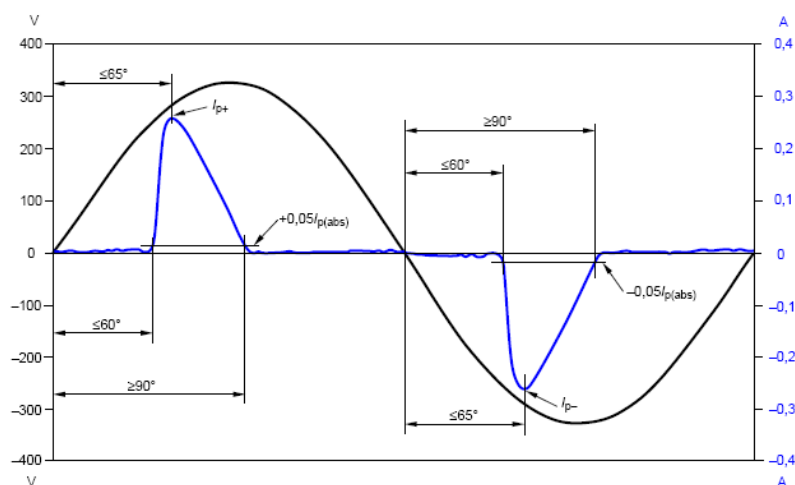


Figura 1.9 Forma de onda referência de corrente para dispositivo de iluminação com lâmpada de descarga e potência menor ou igual a 25 W.

Classe D: Equipamentos de TV, computadores pessoais e monitores de vídeo. A potência ativa de entrada deve ser igual ou inferior a 600 W, medida esta feita obedecendo às condições de ensaio estabelecidas na norma (que variam de acordo com o tipo de equipamento).

A Tabela I indica os valores máximos para as harmônicas de corrente

Tabela I: 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 (≤ 600 W) [mA/W]	Classe D máximo
Harmônicas Ímpares					
3	2,30	3,45	30.FP	3,4	2,30
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	2,25/n	3,375/n	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	1,83/n	2,76/n			

FP: fator de potência

1.5.1 Desvantagens do baixo fator de potência (FP) e da alta distorção da corrente

Consideremos aqui aspectos relacionados com o estágio de entrada de fontes de alimentação. As tomadas da rede elétrica doméstica ou industrial possuem uma corrente (RMS) máxima que pode ser absorvida (tipicamente 15A nas tomadas domésticas).

A figura 1.9 mostra uma forma de onda típica de um circuito retificador alimentando um filtro capacitivo. Notem-se os picos de corrente e a distorção provocada na tensão de entrada, devido à impedância da linha de alimentação. O espectro da corrente mostra o elevado conteúdo harmônico, cujas harmônicas excedem as especificações da norma IEC 61000-3-2.

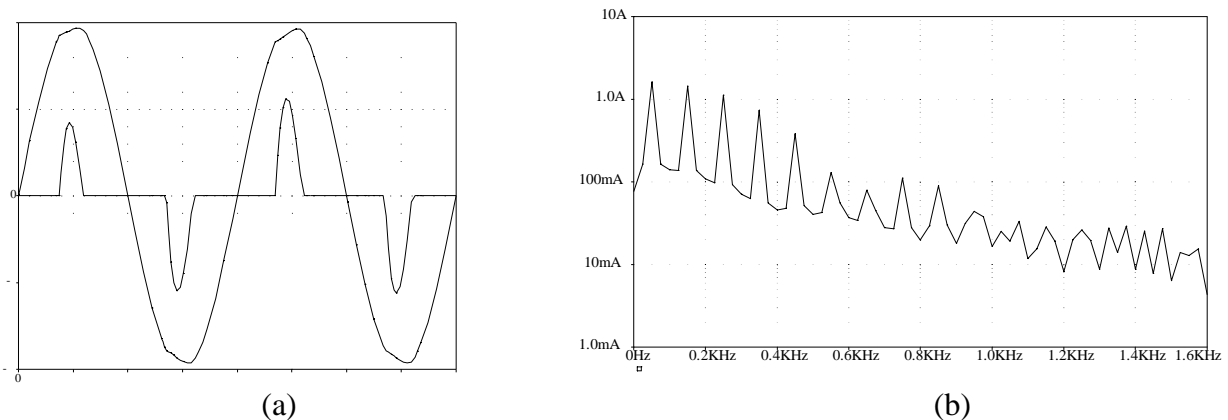


Figura 1.9 (a) Corrente de entrada e tensão de alimentação de retificador alimentando filtro capacitivo. (b) Espectro da corrente.

Consideremos os dados comparativos da tabela II [1.3]

Tabela II: COMPARAÇÃO DA POTÊNCIA ATIVA DE SAÍDA

	Convencional	Com correção de FP
Potência disponível	1440 VA	1440 VA
Fator de potência	0,65	0,99
Eficiência do corretor de fator de potência	100%	95%
Eficiência da fonte	75%	75%
Potência disponível	702 W	1015 W

Nota-se que o baixo fator de potência da solução convencional (filtro capacitivo) é o grande responsável pela reduzida potência ativa disponível para a carga alimentada.

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

- A máxima potência ativa 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 3^a 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 à linha.

1.5.2 Melhoria do Fator de Potência

É possível realizar circuitos retificadores que apresentem uma corrente de entrada senoidal ou que, no mínimo, esteja dentro dos limites da norma [1.3 a 1.10]. Tais soluções podem ser passivas (empregando apenas indutores e capacitores) ou ativas (empregando pelo menos um transistor de potência e outros circuitos associados).

As soluções passivas são, em geral, volumosas, pesadas (devido ao indutor), além de produzirem ruído acústico. Sua vantagem é a confiabilidade.

As alternativas ativas permitem maior densidade de potência (menores volume e massa), além de possibilitarem o controle da tensão CC. Estes retificadores com alto fator de potência são atualmente empregados, por exemplo, em reatores eletrônicos para lâmpadas fluorescentes tubulares.

1.6 Referências Bibliográficas

- [1.1] Mauro Crestani, "Com uma terceira portaria, o novo fator de potência já vale em Abril". *Eletricidade Moderna*, Ano XXII, n° 239, Fevereiro de 1994
- [1.2] International Electrotechnical Commission: EN 61000-3-2:2006+A2:2009: "Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 3: Limits – Section 2: Limits for Harmonic Current Emissions (Equipment input current < 16 A per phase)".
- [1.3] J. Klein and M. K. Nalbant: "Power Factor Correction – Incentives, Standards and Techniques". *PCIM*, June 1990, pp. 26-31
- [1.4] S. B. Dewan: "Optimum Input and Output Filters for a Single-Phase Rectifier Power Supply". *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. IA-17, no. 3, May/June 1981
- [1.5] A. R. Prasad, P. D. Ziogas and S. Manias: "A Novel Passive Waveshaping Method for Single-Phase Diode Rectifier". *Proc. of IECON '90*, pp. 1041-1050
- [1.6] Laís A. Vitoi, Jose A. Pomilio, Danilo I. Brandao, "Analysis of 12-Pulse Diode Rectifier Operating in Aircraft Systems with Constant Frequency", *Proc. 13th Brazilian Power Electronics Conference, COBEP 2017, Juiz de Fora, MG, November 2017.*

- [1.7] I. Suga, M. Kimata, Y. Ohnishi and R. Uchida: “New Switching Method for Single-phase AC to DC converter”. IEEE PCC ‘93, Yokohama, Japan, 1993.
- [1.8] B. Mammano and L. Dixon: “Choose the Optimum Topology for High Power Factor Supplies”. PCIM, March 1991, pp. 8-18.
- [1.9] J. H. A. G. Marafão, J. A. Pomilio e G. Spiazzi: “Improved Three-Phase High-Quality Rectifier with Line Commutated Switches”, IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 19, No. 3, May 2004, Pages 640-648.
- [1.10] J. A. Pomilio: “Pré-reguladores de Fator de Potência”, Publicação FEE 03/95, acessível em <http://www.fee.unicamp.br/dse/antenor/pfp>

Leituras Complementares

S. M. Deckmann e J. A. Pomilio, “Distorção harmônica: causas, efeitos, soluções e normas”, Apostila da disciplina IT012 – Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica”, Disponível em: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/qualidade/a5.pdf>

S. M. Deckmann e J. A. Pomilio, “Normatização e Monitoração da Qualidade da Energia Elétrica”, Apostila da disciplina IT012 – Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica”, Disponível em: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/qualidade/a2.pdf>