

# FILTRO DE DESSINTONIA PARA BANCO DE CAPACITORES

**Henrique Augusto Pereta<sup>1</sup>, Jorge Pereira Landim<sup>2</sup>, Luiz Roberto Nogueira<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup>Universidade do Vale do Paraíba/Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, Av. Shishima Hifumi, 2911, São José dos Campos, São Paulo, <sup>1</sup>hpereta@uol.com.br, <sup>2</sup>araujosoares@ig.com.br, <sup>3</sup>nogueiralr@uol.com.br

**Resumo-** O fator de potência é uma relação entre potência ativa e potência reativa. Ele indica a eficiência com a qual a energia está sendo usada. Um alto fator de potência indica uma eficiência alta e inversamente um fator de potência baixo indica baixa eficiência. Um baixo fator de potência indica que você não está aproveitando plenamente a energia, e a solução para corrigir, é a instalação de Banco de Capacitores, sendo que estes podem criar condições de ressonância; nessas condições, as harmônicas geradas por equipamentos não lineares podem ser amplificadas para valores absurdos e a opção passa a ser a utilização de Filtro de Dessintonia para correção destas harmônicas.

**Palavras-chave:** Filtro, Harmônicas, Capacitores, Fator de Potência

**Área do Conhecimento:** III - Engenharias

## Introdução

Instalações elétricas em sua maioria possuem cargas indutivas. A principal característica das cargas indutivas é que elas necessitam de um campo eletromagnético para operar. Por este motivo, elas consomem dois tipos de potência elétrica: Potência ativa (kW) para realizar o trabalho de gerar calor, luz, movimento, etc e Potência reativa (kVAr) para manter o campo eletromagnético, sendo que esta não produz trabalho útil, mas circula entre o gerador e a carga, exigindo do gerador e do sistema de distribuição de energia elétrica uma corrente adicional. A potência ativa e a potência reativa, juntas, formam a potência aparente (kVA). Quando a potência aparente é maior que a potência ativa, a concessionária precisa fornecer, além da corrente útil (ativa), uma corrente reativa[2].

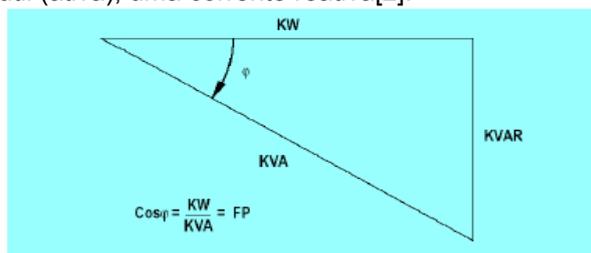


Figura 1- Triângulo Retângulo de Potências

Até bem pouco tempo atrás, todas as cargas eram lineares, com a corrente acompanhando a curva senoidal da tensão. Ultimamente, o número de cargas não lineares, que utilizam pulsos de corrente numa frequência diferente de 60 Hz, tem aumentado significativamente. O aumento das cargas não lineares provocou distorções harmônicas nos sistemas de distribuição elétrica. Embora os capacitores não sejam geradores de harmônicas, eles podem agravar o problema[2].

A existência de correntes harmônicas é um problema específico de cada instalação. Ela resulta de relações complexas entre todos os equipamentos eletro-eletrônicos da instalação e portanto é muito difícil de prever e modelar[2].

Sistemas com harmônicos, dependendo do conteúdo real de distorções e das características do banco de capacitores necessitam de filtros de dessintonia (Banco de Capacitor Dessintonizado) com o qual evitam que as distorções presentes na rede afetem os capacitores e os equipamentos. A figura 2 mostra um exemplo de uma distorção de linha de corrente devido a velocidade variável de um conversor, já a figura 3 mostra que o efeito do filtro na rede de instalação, é uma eliminação de harmônicos e a limpeza de onda senoidal[3]. Portanto mostrou-se a necessidade da utilização de Filtros de Dessintonia e conseqüentemente seu estudo.

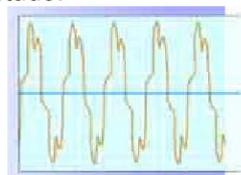


Figura 2  
Linha de Corrente  
Situação inicial

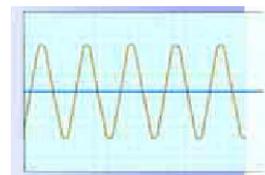


Figura 3  
Linha de corrente  
Filtro

## Metodologia

**A - Considerações Básicas sobre legislação do Fator de Potência**

A Portaria N° 1569/DNAEE (Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica) de 23/12/1993 estabelece as condições para medição e faturamento de energia reativa excedente. O fator de Potência de referência estabelecido como limite para cobrança de energia reativa excedente

por parte da concessionária é de 0,92; independente do sistema tarifário.

**B – Importância do Fator de Potência**

A melhoria do fator de potência está vinculada à inserção de capacitores em paralelo na instalação elétrica, ou na configuração Delta, sob o aspecto trifásico. Os capacitores fornecem energia reativa para o sistema, ao contrário das cargas indutivas (motores) que consomem energia reativa. O fator de potência ( $\cos \phi$ ) indica o quanto a corrente está atrasada da tensão de alimentação.

Com a utilização dos capacitores na instalação, reduz-se a corrente que o sistema retira da rede da concessionária, diminuindo-se assim as perdas nos condutores das contas de energia e aumentando-se a capacidade elétrica do sistema.

Nas indústrias é comum se ter painéis de bancos de capacitores na baixa tensão controlados automaticamente e capacitores individuais geralmente instalados para motores de maior potência.

Descreve-se abaixo um exemplo prático da aplicação de um banco individual de capacitores em um motor trifásico de um compressor.

Dados de placa do motor:

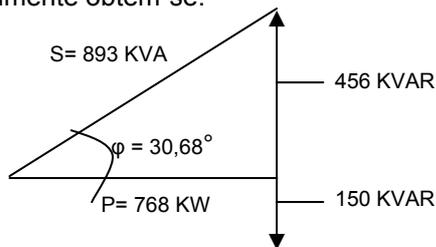
Tensão: 4160V; Corrente Nominal: 124 A; Potência: 730KW ;  $\cos \phi$  : 0,86

Dados de placa do capacitor :

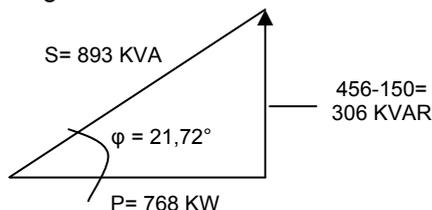
Tensão: 4160V ; Pot.Reativa fornecida: 150 KVAR;  $S(\text{Potência Aparente}) = \sqrt{3} \cdot V \cdot I = 1,732 \cdot 4160 \cdot 124$  ;  $S = 893461 \text{ VA}$ ;

$Q(\text{Potência Reativa}) = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \sin(\text{arc cos } 0,86)$  ;  $Q = 455928 \text{ VAR}$ ;

$P(\text{Potência Ativa}) = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos 0,86$ ;  $P = 768376 \text{ W}$   
Vetorialmente obtém-se:



Como os vetores, referente à Potência reativa estão na mesma direção, porém, em sentidos opostos, realiza-se a subtração de ambos, obtendo-se agora um novo triângulo de Potências citado a seguir:



Novo Fator de potência (F.P.) =  $\cos 21,72^\circ = 0,93$ ; satisfazendo-se assim a Portaria do DNAEE.

Contudo a inserção de capacitores na instalação pode gerar ressonância, principalmente com a presença de harmônicas no sistema, geradas por cargas do tipo retificadores trifásicos (citados adiante) acarretando em sobrecargas, tanto nos trafos como nos bancos de capacitores. Os transformadores na configuração Delta/Estrela, também geram harmônicas de corrente de 3ª ordem, porém, não serão citados neste artigo e serão considerados irrelevantes no decorrer desta metodologia, contudo são importantes numa avaliação mais detalhada, onde haja a predominância da 3ª harmônica em uma instalação.

Os retificadores trifásicos comutados pela rede, porém, não controlados apresentam 0,95 de fator de potência. Já os retificadores controlados apresentam fator de potência de acordo com ângulo de comutação dos elementos de potência (SCR's, tiristores, IGBTs, etc).[4]

**C - Retificador trifásico de 6 pulsos**

Cita-se neste artigo, como exemplo de carga não-linear mais amplamente utilizada pelas indústrias, parte do circuito inversor de frequência ou o próprio conversor estático, o retificador trifásico. Os retificadores trifásicos de 6 pulsos comutados pela rede, porém, não controlados são os maiores geradores de correntes harmônicas em instalações industriais. A Fig.4 mostra o arranjo básico do circuito. Já no contexto deste trabalho dispensa-se uma abordagem mais aprofundada sobre este circuito, visto que seu princípio de funcionamento é bem conhecido[4].

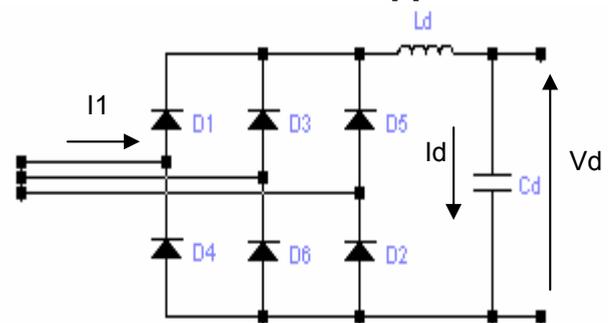


Figura 4- Retificador trifásico

Sob determinadas condições ideais, a corrente média no circuito intermediário (lado de corrente contínua) do retificador será igual a  $I_d$ . Já a relação entre  $I_d$  e o valor eficaz da corrente  $I_1$  no lado de corrente alternada do conversor é :  $I_1 = I_d \cdot \sqrt{2/3}$ [14]. Para a análise em questão faz-se necessário demonstrar as formas de onda idealizadas de corrente e tensão, demonstradas na figura 5, referentes ao lado de corrente alternada para o levantamento do conteúdo harmônico deste circuito. Desconsidera-se neste caso o efeito do retardo de comutação de um diodo para outro[4].

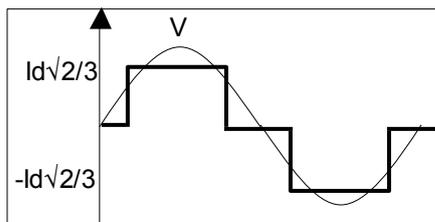


Figura 5- Corrente de linha I1 no retificador

#### D - Série de Fourier

Apesar de várias literaturas já apresentarem de forma direta o espectro de freqüências do retificador de 6 pulsos, salienta-se que a determinação da mesma se faz pelos fundamentos teóricos da série de Fourier. A série de Fourier de uma função periódica  $F(t)$  com período  $T$  pode ser representado pela expressão na sua forma trigonométrica[1]:

$$F(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{h=\infty} F_h \cdot \text{sen}(h\omega t + \phi_h) \quad (1)$$

As amplitudes da componente DC  $a_0$  e das componentes harmônicas  $F_n$  assim como os ângulos de fase são determinados por (2) e (3):

Onde:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} F(t) \cdot dt \quad (2)$$

$$F_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2} \text{ e } \phi_h = \text{tg}^{-1}(a_h/b_h) \quad (3)$$

$$a_h = \frac{2}{T} \int_t^{t+T} F(t) \cdot \cos(h\omega t) \cdot dt \quad (4)$$

$$b_h = \frac{2}{T} \int_t^{t+T} F(t) \cdot \text{sen}(h\omega t) \cdot dt \quad (5)$$

$$T = 1/f;$$

$$W = 2 \cdot \pi \cdot f;$$

$h$  - harmônica;

$f$  - freqüência do sinal.

Em meio a facilitar os cálculos, cita-se algumas propriedades dos coeficientes  $a_0, a_n, b_n$ :

- Se  $f(t) = f(-t)$ , isto é função par, então  $b_n = 0$ , restando-se somente  $a_n$  e  $a_0$ ;
- Se  $f(t) = -f(-t)$ , isto é função ímpar, então  $a_n = a_0 = 0$ ;
- Se  $f(t) = -f(t - T/2)$ , função com simetria de meia onda, então  $a_{2n} = b_{2n} = 0$ , isto é, a função somente apresenta componentes ímpares.

#### E – Conteúdo harmônico do retificador trifásico

Com esta base para a analogia, verifica-se que a forma de onda da corrente de linha no lado AC, assume a seguinte propriedade:

- $I_1(t)$ , que apresenta valor de amplitude igual a  $I_d \sqrt{2}/3$ , é uma função ímpar, portanto  $a_0$  e  $a_n = 0$ , dependendo somente de  $b_n$ .

Desta forma se obtém o espectro harmônico referente ao retificador, que apresenta apenas harmônicas ímpares, conforme demonstrado na figura 6.

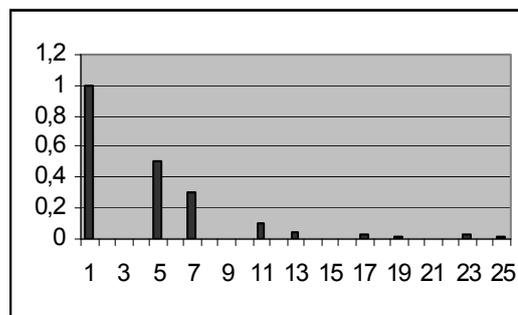


Figura 6 - Conteúdo harmônico de corrente do retificador

#### F – Filtro de dessintonia para banco de capacitores

A filtragem dessintonizada com correção de fator de potência é o meio utilizado para evitar a ressonância entre o circuito LC formado pelo banco de capacitores e pelo transformador de potência mais próximo, causada por uma componente harmônica gerada pelas próprias cargas não lineares da instalação. Sem o filtro de dessintonia pode haver a ocorrência de ressonância já citada e a circulação de uma alta corrente sobre os ramos do circuito do banco de capacitores e transformador, causando sobrecarga em ambos. A queima de fusíveis de proteção do banco e até mesmo dano total de capacitores com ocorrência de explosão, são sintomas da ressonância causada pela presença de harmônicos na instalação.

O filtro consiste na inserção de um reator em série com os capacitores, obtendo-se um circuito ressonante com uma freqüência de ressonância para o qual o sistema oferece um caminho de baixa impedância e sintonizada abaixo da primeira harmônica existente. Para o caso do retificador trifásico, tem-se a quinta harmônica como primeira harmônica gerada existente. Ou seja o filtro de dessintonia opera em ressonância abaixo da quinta harmônica.[5]. Porém, dependendo da freqüência de dessintonia, mais ou menos harmônicas serão absorvidas pelos filtros.

A tendência, com a instalação do filtro sintonizado abaixo da 5ª harmônica para este caso, é a obtenção de distorção harmônica de tensão em baixa tensão DHT-V, conforme estabelecido por normas internacionais (IEEE-519), abaixo de 5% e distorção harmônica de corrente DHT-I abaixo de 10%. [5], [6].

O cálculo para a obtenção da distorção é simples, conforme demonstrado:

$$DHT(V) \% = \sqrt{\sum_{n=0}^{n=\infty} \frac{V_n^2}{I_1^2}} \cdot 100$$

$$DHT(I) \% = \sqrt{\sum_{n=0}^{n=\infty} \frac{I_n^2}{I_1^2}} \cdot 100$$

Onde:

$V_1, I_1$  – Tensão e corrente fundamental;

$V_n, I_n$  – Tensão e correntes harmônicas.

Analísadores de espectro e aparelhos de medição modernos como os da Fluke, mesmo os relativamente simples podem informar estes parâmetros e conseqüentemente constatar a existência de harmônicos no determinado ponto de medição da instalação.

De maneira mais prática, pode-se também estimar a freqüência de ressonância de um ramo da instalação baseando-se na seguinte fórmula:

Onde:

$$h = \sqrt{\frac{kVA_{sys}}{kVA_r}}$$

$kVA_{sys}$  - Potência de curto circuito nos terminais banco de capacitores;

$kVA_r$  - Potência reativa do banco;

$h$  - ordem harmônica relativa à fundamental de 60 Hz.

Caso obtenha-se um valor de  $h$  o mais próximo possível das harmônicas ímpares de maior amplitude geradas pelo retificador de 6 pulsos, então a distorção harmônica aumenta consideravelmente com a ressonância do circuito.

A figura 7 demonstra um arranjo básico e simples de um filtro de dessintonia em banco de capacitores em formato de diagrama unifilar [5].

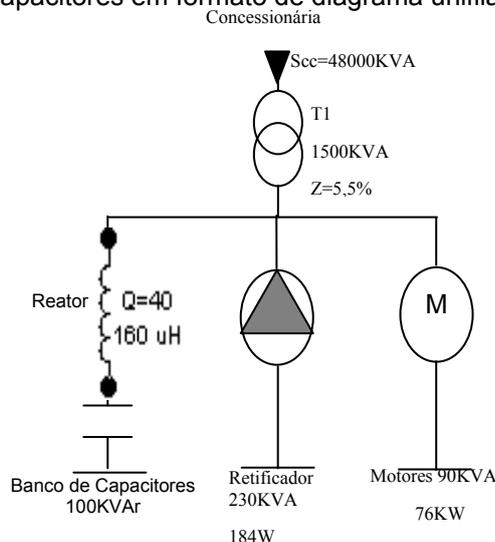


Figura 7- Diagrama Unifilar com Filtro

## Resultados

Os testes e simulações computacionais realizados com o EWB e o Multsim 7(laboratório da UNIVAP) ainda não foram suficientes para análise completa do circuito, pois ambos apresentaram “bugs” de tempo. Em contrapartida muitos componentes para o teste do circuito não são encontrados na forma trifásica nestes simuladores. Foi indicado pelo Orientador e mestres da Faculdade UNIFEI, envolvidos em projetos similares, softwares como o ATP Draw e o B2 Spice A/D, porém, ainda estão sendo obtidos e pesquisados. Segundo informações, a versão 9 do Multisim apresenta mais recursos e componentes trifásicos. O mesmo será adquirido para testes.

## Conclusão

Apesar das dificuldades encontradas, citadas nos resultados, pôde-se concluir que o avanço do trabalho têm sido satisfatório, em virtude da própria busca na pesquisa de novos materiais e softwares para simulações computacionais. Concluiu-se até então que os harmônicos de corrente gerados por circuitos não lineares, através de simulações de circuitos computacionais, neste caso o retificador trifásico de seis pulsos, geram uma distorção harmônica considerável, na ordem de 32%, que pode vir a causar a ressonância em instalações que possuam bancos de capacitores. Daí a necessidade da utilização de filtro de dessintonia.

## Referências

- SPIEGEL, M. R.; FARIAS, A. A. Análise de Fourier. São Paulo: McGraw – Hill do Brasil, 1976. 249p.
- Schneider Electric. Correção do Fator de Potência Automático. Catálogo, 2007. 14p.
- ABB Ltda. Qualidade em Sistemas de Baixa Tensão. Folheto Técnico. 2003. Disponível em: <http://www.tecnaut.com.br/downloads/abb/Cat> Acesso em: 22 jan 2007.
- Souza de Sá, Jocélio. Acionamento Elétricos, Controle de motores de corrente alternada. FUPAI, 1996.
- EPCOS. Correção do Fator de Potência. Catálogo, 2004. 16p.
- IEEE Std. 519-1992 IEE Standard 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonics Control in Electrical Power Systems.