

Procedimentos para determinação de Filtros Harmônicos Sintonizados, incluindo Análises de Desempenho e de Suportabilidade

R. P. Nascimento e J. W. Resende, Universidade Federal de Uberlândia, MG

Resumo: Este trabalho propõe diretrizes para a elaboração de procedimentos sistemáticos que conduzem ao projeto de filtros harmônicos sintonizados, a partir de um programa de fluxo harmônico. Tais procedimentos são desenvolvidos por meio de técnicas que considerem o desempenho de filtragem, a dessintonia dos filtros, o fator de qualidade, bem como aspectos normativos referentes a suportabilidade dos componentes frente às grandezas elétricas do sistema.

Palavras-Chave: Filtros harmônicos sintonizados, fluxo harmônico, projeto de filtros, qualidade da energia elétrica.

I. INTRODUÇÃO

ESTE artigo apresenta uma seqüência de procedimentos que visam a determinação de filtros harmônicos sintonizados, priorizando a minimização das potências reativas e a garantia de suportabilidade dos mesmos.

Os procedimentos a serem apresentados compreendem a execução de diversas etapas de cálculos, os quais culminarão com as análises do desempenho e da suportabilidade do filtro, além dos valores nominais dos componentes R, L e C.

De uma maneira geral, a presença de um ou mais filtros harmônicos em uma barra certamente promoverá:

- Redução dos índices de distorção harmônica do sistema;
- Geração de reativos para o sistema (visando melhoria do fator de potência).

Por outro lado, no que concerne à questão de dimensionamento de filtros, devido às eventuais mudanças que podem ocorrer na topologia das redes ao longo do tempo, um aspecto importante na fase de projeto é o conhecimento do comportamento das impedâncias harmônicas da barra onde se pretende instalar o filtro. Neste sentido, para sistemas elétricos industriais ou de distribuição, costuma-se obter as impedâncias harmônicas a partir do nível de curto-circuito da barra. Isso pode ser assumido porque estes sistemas, em geral, não sofrem grandes variações em sua topologia, além de possuírem uma grande quantidade de alimentadores curtos, os quais apresentam características indutivas ao longo de todas as frequências harmônicas. Para sistemas de transmissão, no entanto, será necessário conhecer com mais detalhes o comportamento da rede.

Devido à exigüidade de espaço, nos procedimentos propostos neste artigo, o sistema elétrico será considerado apenas a partir do nível de curto-circuito da barra onde os filtros serão instalados. No entanto, para sistemas de transmissão, os procedimentos gerais não serão diferentes do que aqui será apresentado. Após a escolha do tipo de representação a ser adotado para o sistema elétrico, o próximo

passo será determinar *qual* dos dois objetivos será priorizado com a inserção dos filtros sintonizados: (1) redução dos índices de distorção harmônica do sistema a níveis pré-fixados ou (2) a correção do fator de potência para um valor também pré-determinado.

II. PROCEDIMENTOS GERAIS PARA A DETERMINAÇÃO DE FILTRO SINTONIZADO MÍNIMO

Neste artigo, os procedimentos que levarão à obtenção de filtros de menor potência possível (ou Filtro Mínimo) serão ilustrados a partir da condição (1) acima mencionada, que visa, prioritariamente, a redução de distorções harmônicas de tensão a níveis pré-fixados.

Além das escolhas da forma de representação do sistema elétrico e do objetivo prioritário a ser atingido com a inserção dos filtros, também será necessário o conhecimento dos seguintes dados:

- Escolha da barra onde será(ão) instalado(s) o(s) filtro(s) sintonizado(s);
- Escolha da(s) ordem(ns) harmônica(s) para a(s) qual(is) se deseja projetar filtro(s) sintonizado(s);
- Determinação do(s) valor(es) da(s) máxima(s) distorção(ões) harmônica(s) individual(is) de tensão possível(eis) de ocorrer com a inserção do(s) filtro(s) sintonizado(s) na(s) ordem(ns) escolhida(s).

A partir das informações acima, cada filtro sintonizado será dimensionado separadamente, ordem por ordem, de modo iterativo. Este processo iterativo será iniciado para o filtro sintonizado da menor ordem harmônica “*n*” escolhida. Para iniciar o processo iterativo, outros 3 dados devem ser fornecidos, a saber:

- O **fator de qualidade inicial do filtro** ($Q^{(0)}$) (o índice “*0*” significa que o dado informado é uma estimativa inicial (pois trata-se de um cálculo iterativo);
- A **potência reativa fundamental inicial** do capacitor do filtro ($Q_{CAP}^{(0)}$).
- A **dessintonia máxima** permitida ao filtro (d);

Com relação à dessintonia máxima, é oportuno mencionar que, se um filtro sintonizado é dimensionado para para uma dada frequência, três fatores independentes contribuem para dessintonizar o circuito para a harmônica correspondente:

- a) variação da frequência do sistema c.a.;
- b) erro de sintonia inicial, devido ao reator do filtro (dada à sua própria característica de fabricação);

c) variação da capacitância total, devido à variação da temperatura, ou devido à falha de um ou mais elementos de capacitor.

A pior hipótese de dessintonização acontecerá quando todos os fatores descritos forem cumulativos. Os valores que ocorrem na prática situam-se, normalmente, na faixa de 1,5 a 3%.

2.1. Cálculo da potência reativa fundamental mínima do filtro

De posse destas informações, determinam-se, para a i -ésima iteração da potência reativa do capacitor, os componentes C , L e R do filtro (equações (1), (2) e (3)).

$$C^{(i)} = Q_{CAP}^{(i)} \cdot \left(\frac{(n-d)^2 - 1}{(n-d)^2} \right) \quad (1)$$

$$L^{(i)} = \frac{1}{(n-d)^2 \cdot C^{(i)}} \quad (2)$$

$$R^{(i)} = \frac{\sqrt{L^{(i)} / C^{(i)}}}{Q^{(i)}} \quad (3)$$

Onde:

$Q_{CAP}^{(i)}$ = Potência reativa fundamental do capacitor do filtro sintonizado na iteração “ i ”

n = Freqüência harmônica de sintonia do filtro

d = Dessintonia máxima do filtro sintonizado na ordem “ n ”

$C^{(i)}$ = Capacitância, em pu , do filtro sintonizado na iteração “ i ”

$L^{(i)}$ = Indutância, em pu , do filtro sintonizado na iteração “ i ”

$Q^{(i)}$ = Fator de qualidade inicial do filtro sintonizado

$R^{(i)}$ = Resistência, em pu , do filtro sintonizado na iteração “ i ”

A partir destas estimativas, inicia-se o cálculo iterativo. O objetivo desta etapa dos procedimentos é encontrar a potência reativa fundamental mínima do capacitor do filtro que atenda à meta de distorção harmônica individual de tensão pré-estabelecida para a primeira ordem harmônica “ n ” escolhida. Neste processo iterativo, a variável que terá seu valor alterado a cada iteração (na prática, aumentado), será a *potência reativa* do capacitor (vide fluxograma na figura 1). O valor do fator de qualidade do filtro no valor inicial estipulado, ao longo de todas as iterações desta etapa. Na próxima etapa dos cálculos (item 2.2) este fator de qualidade será modificado.

Assim que o dimensionamento do filtro sintonizado desta ordem estiver concluído, passa-se para o dimensionamento do filtro da próxima ordem escolhida e, assim, sucessivamente, até chegar ao último filtro ou ao filtro da maior ordem escolhida.

Ressalte-se que a freqüência de sintonia “ n ” do filtro é aquela na qual os valores das impedâncias dos componentes do filtro (capacitor e reator) são iguais. Esta também é denominada de *freqüência de ressonância* do filtro e, quando a mesma é expressa em pu , esta freqüência assume um valor inteiro múltiplo da freqüência fundamental (por exemplo, a freqüência de sintonia $n = 300Hz$, em pu será $n = 5$).

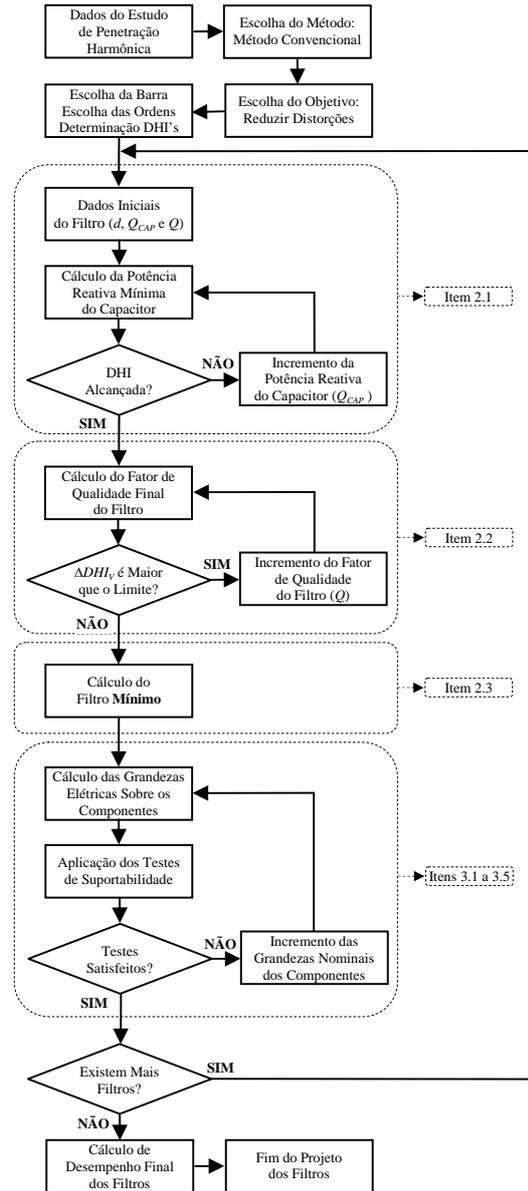


Figura 1 – Fluxograma básico referente ao projeto de filtros sintonizados pelo método convencional objetivando reduzir distorções harmônicas a níveis pré-fixados.

Se os valores de n , d e $Q_{CAP}^{(i)}$ forem dados em pu de suas respectivas grandezas base, então os resultados das equações (1), (2) e (3) serão fornecidos em pu . A partir desses valores, podem ser calculadas as reatâncias fundamentais dos componentes para a iteração “ i ” (equações (4) e (5)), em pu .

$$X_C^{(i)} = \frac{1}{C^{(i)}} \quad (4)$$

$$X_L^{(i)} = L^{(i)} \quad (5)$$

Onde:

$X_C^{(i)}$ = Reatância capacitiva fundamental do capacitor do filtro sintonizado na iteração “ i ”

$X_L^{(i)}$ = Reatância indutiva fundamental do indutor do filtro sintonizado na iteração “ i ”

Cabe aqui ressaltar que, em geral, é recomendável que o valor da freqüência de ressonância do filtro, adotado nas

equações (1) e (2), não seja exatamente “ n ”, e sim a diferença entre o valor dessa frequência de sintonia e o valor da dessintonia máxima à qual o filtro poderá ser submetido, ou seja, $n - d$. Este procedimento fará com que o valor adotado para a frequência de ressonância do filtro seja sempre um pouco menor do que a ordem harmônica de filtragem para a qual o filtro se destina. Pretende-se, assim, evitar que um filtro sintonizado, ao perder algumas de suas unidades capacitivas, passe a ter uma impedância de característica *capacitiva* na frequência de sintonia “ n ”. Nestas condições, (filtro com impedância capacitiva) poderá ocorrer uma ressonância paralela do filtro com o sistema elétrico (o qual, para sistemas de distribuição e sistemas industriais é indutivo). Desta forma, este filtro, que possui sua maior eficiência para a harmônica de ordem “ $n - d$ ” deverá ser projetado para ter grande eficiência também para a harmônica de ordem “ n ”.

No próximo passo será feita a correção harmônica dos valores da resistência do filtro e o cálculo das reatâncias para a referida frequência de sintonia “ n ” do filtro. Pode-se definir os valores corrigidos e calculados como sendo:

$$\begin{aligned} R_{(n)}^{(i)} &= \text{Resistência do filtro sintonizado corrigida para a ordem} \\ &\quad \text{“}n\text{” e na iteração “}i\text{”} \\ X_{C(n)}^{(i)} &= \text{Reatância capacitiva do filtro sintonizado calculada para} \\ &\quad \text{a ordem “}n\text{” e na iteração “}i\text{”} \\ X_{L(n)}^{(i)} &= \text{Reatância indutiva do filtro sintonizado calculada para a} \\ &\quad \text{ordem “}n\text{” e na iteração “}i\text{”} \end{aligned}$$

Deste modo, o valor da impedância do filtro, na frequência de sintonia “ n ”, para a iteração “ i ” será:

$$Z_{F(n)}^{(i)} = R_{(n)}^{(i)} + j(X_{L(n)}^{(i)} - X_{C(n)}^{(i)}) \quad (6)$$

Prosseguindo, calcula-se o correspondente valor da admitância do filtro ($Y_{F(n)}^{(i)}$), para a frequência de sintonia “ n ”, na iteração “ i ”. Esta admitância, por sua vez, é inserida na Matriz Admitância do sistema [$Y_{S(n)}$] (ainda sem filtros), na frequência de sintonia “ n ”. Esta matriz é obtida na etapa do estudo de Penetração Harmônica, realizada antes da determinação dos filtros e que também está indicada na figura 1. Obtém-se, assim, a Matriz Admitância resultante [$Y_{T(n)}^{(i)}$], para a iteração “ i ”.

Na seqüência, determina-se a Matriz Impedância total [$Z_{T(n)}^{(i)}$], resultante do sistema com o filtro, para a frequência de sintonia “ n ”, na iteração “ i ”.

Sendo conhecida a Matriz das Correntes harmônicas [$I_{H(n)}$] (cujas correntes são inseridas no sistema pelas fontes harmônicas, também na correspondente frequência de sintonia “ n ”), determina-se a Matriz das Tensões harmônicas individuais resultantes [$V_{H(n)}^{(i)}$] (equação (7)), para esta frequência, na iteração “ i ”.

$$[V_{H(n)}^{(i)}] = [Z_{T(n)}^{(i)}] \cdot [I_{H(n)}] \quad (7)$$

A determinação da Matriz das Correntes harmônicas [$I_{H(n)}$] também é oriunda da etapa do estudo de penetração harmônica, a qual deve ser realizada antes do início do projeto dos filtros.

Na Matriz das Tensões harmônicas obtida em (7), cada linha corresponde ao valor da tensão harmônica (na

correspondente frequência de sintonia “ n ”), de cada barra do sistema.

O passo final deste processo iterativo (que, recorde-se, procura obter a potência reativa fundamental mínima do filtro que consiga reduzir a distorção harmônica de tensão individual relativa a este filtro) será *comparar* o módulo do valor da tensão resultante (na barra onde o filtro foi inserido), com o valor pré-fixado da tensão harmônica máxima permitida após a inserção do filtro sintonizado, na referida frequência de sintonia “ n ”. Caso este valor estipulado da tensão harmônica, para esta ordem, seja ultrapassado, será dado prosseguimento ao cálculo iterativo, aumentando-se a potência reativa fundamental do capacitor do filtro sintonizado. Neste caso, na próxima iteração “ i ” a potência reativa ganhará um pequeno incremento conhecido, e o seu valor será o seguinte:

$$Q_{CAP}^{(i+1)} = Q_{CAP}^{(i)} + \Delta Q_{CAP} \quad (8)$$

Onde:

$$\begin{aligned} Q_{CAP}^{(i+1)} &= \text{Potência reativa fundamental do capacitor do filtro} \\ &\quad \text{sintonizado para a próxima iteração “}i\text{”} \\ Q_{CAP}^{(i)} &= \text{Potência reativa fundamental do capacitor do filtro} \\ &\quad \text{sintonizado para a iteração “}i\text{” anterior} \\ \Delta Q_{CAP} &= \text{Incremento conhecido da potência reativa fundamental} \\ &\quad \text{do capacitor do filtro sintonizado} \end{aligned}$$

Assim sendo, para a i -ésima iteração da potência reativa $Q_{CAP}^{(i)}$, repetem-se, sucessivamente, todas as etapas do cálculo do filtro sintonizado (descritos desde a equação (1) até a equação (7)), com o valor agora recalculado de potência reativa fundamental. Ao final de cada iteração, compara-se o valor da distorção de tensão obtido com o valor estipulado. Repete-se o processo iterativo até conseguir-se o atendimento do nível especificado de tensão harmônica na frequência de sintonia “ n ” do filtro.

Os procedimentos descritos neste item estão indicados no fluxograma básico da figura 2, como “Item 2.1”.

2.2. Cálculo do fator de qualidade final do filtro

Uma vez determinada a potência reativa fundamental Q_{CAP} do filtro sintonizado, com o fator de qualidade $Q^{(0)}$, capaz de atender ao limite de tensão harmônica especificado, parte-se para a obtenção do *fator de qualidade final*. A determinação deste é recomendada visando melhorar a eficiência do filtro, conforme poderá ser percebido, com o auxílio da figura 2. Nesta figura tem-se a variação da distorção harmônica individual (DHI) de tensão *versus* o fator de qualidade, para um filtro sintonizado que já possua uma determinada capacitância e sua correspondente indutância.

Observa-se que a DHI de tensão pode ser *reduzida* ainda mais com o aumento do fator de qualidade. Na prática, este aumento é conseguido com o decréscimo da resistência ôhmica do filtro. Entretanto, a partir de um determinado valor do fator de qualidade, ao se prosseguir aumentado o mesmo, como resultado ter-se-ão em melhorias muito pequenas em sua eficiência de filtragem.

O fator de qualidade final será obtido por método iterativo, semelhante ao descrito para a obtenção do filtro mínimo. Para

isso, será mantida a potência reativa fundamental do filtro Q_{CAP} (obtida na etapa anterior) e, na primeira iteração “ k ” adotar-se-á um novo valor inicial para o fator de qualidade do filtro, $Q^{(k)}$, o qual poderá um valor bem baixo (por exemplo, 1 (um)). A partir deste valor, obtém-se a nova resistência do filtro (porém, mantendo-se os valores de C e L do mesmo). Em seguida, calcula-se o novo valor da distorção harmônica individual de tensão de ordem “ n ” na barra onde o filtro está inserido.

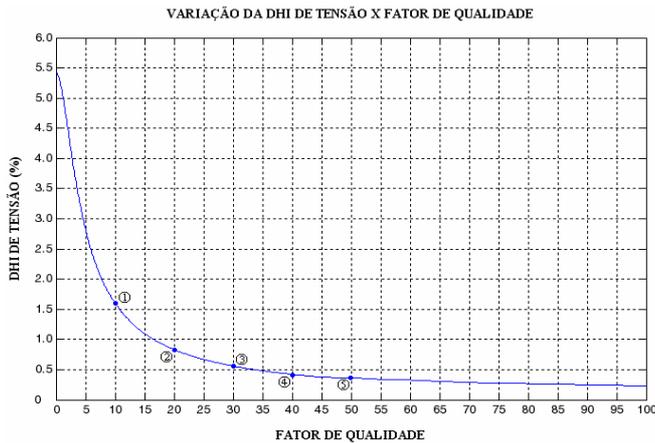


Figura 2 - Curva da variação da distorção harmônica individual de tensão versus o fator de qualidade do filtro.

Na seqüência, para a nova iteração “ k ”, o fator de qualidade $Q^{(k)}$ receberá um incremento ΔQ , (equação (9)).

$$Q^{(k+1)} = Q^{(k)} + \Delta Q \quad (9)$$

Onde:

$Q^{(k+1)}$ = Fator de qualidade do filtro para a próxima iteração “ k ”

$Q^{(k)}$ = Fator de qualidade do filtro para a iteração “ k ” anterior

ΔQ = Incremento conhecido do fator de qualidade do filtro

Ao final desta segunda iteração “ k ”, calcula-se o valor da variação da máxima distorção harmônica individual de tensão de ordem “ n ” ($\Delta DHI_{V(n)}$) na barra escolhida para inserção do filtro. Esta variação é obtida de acordo com a equação (10).

$$\Delta DHI_{V(n)} = DHI_{V(n)}^{(k)} - DHI_{V(n)}^{(k+1)} \quad (10)$$

Onde:

$\Delta DHI_{V(n)}$ = Variação da distorção harmônica individual de tensão de ordem “ n ” na barra do filtro

$DHI_{V(n)}^{(k)}$ = Distorção harmônica individual de tensão de ordem “ n ” na barra do filtro para a iteração “ k ” anterior

$DHI_{V(n)}^{(k+1)}$ = Distorção harmônica individual de tensão de ordem “ n ” na barra do filtro para a iteração “ k ” seguinte

Na seqüência, compara-se o valor calculado da variação $\Delta DHI_{V(n)}$ com um valor mínimo de variação ΔDHI_{Vmin} , tomado como referência. Esta variação mínima de referência é igual a 0,01%. Enquanto o valor calculado da variação $\Delta DHI_{V(n)}$ for maior que esta referência, incrementa-se o fator de qualidade $Q^{(k)}$ do filtro (equação (9)) e repete-se todo o processo de cálculo iterativo até que esta condição seja satisfeita. Desta

forma, ao final da última iteração “ k ”, tem-se o fator de qualidade calculado, a partir do qual conseguiu-se uma variação da tensão harmônica de ordem “ n ” (na barra do filtro) menor que o valor de referência mínimo ΔDHI_{Vmin} . Este será considerado como o *fator de qualidade final* do filtro.

Os procedimentos descritos neste item estão indicados no fluxograma básico da figura 1, como “Item 2.2”.

Ao final da busca deste fator de qualidade final, a DHI_V obtida na barra do filtro deve ter decrescido para um valor abaixo daquele originalmente desejado. Assim, caso se deseje retornar ao DHI_V original, deve-se *reduzir* a potência reativa do capacitor (em um processo iterativo), mantendo-se sempre o fator de qualidade final, de maneira similar ao que já foi descrito no item 2.1 (porém, lembrando que, agora, a potência reativa será reduzida).

2.3. Cálculo do filtro final

A associação das duas últimas etapas ilustra os procedimentos do cálculo iterativo de obtenção do filtro *mínimo* com um fator de qualidade final, para a frequência de sintonia “ n ”. Nestes procedimentos, os cálculos referentes ao filtro sintonizado são feitos somente para a ordem de sintonia “ n ” e não para todas as ordens harmônicas. Isso porque, nos cálculos iterativos, a preocupação se concentra apenas na busca do dimensionamento dos elementos do filtro que atenda às exigências individuais de tensão na frequência de ordem “ n ”. Assim, para que este filtro possa ser inserido nas matrizes harmônicas do sistema (equações (6) e (7)), os cálculos serão realizados para todas as ordens harmônicas consideradas no estudo.

Desta forma, serão obtidas as matrizes das impedâncias harmônicas totais $[Z_T]$ (resultantes da associação das impedâncias do sistema com a impedância do filtro, para *todas* as ordens harmônicas), bem como as matrizes das tensões harmônicas resultantes $[V_H]$. Estes resultados são armazenados e passam a ser os novos valores harmônicos do sistema elétrico sob estudo. O mesmo vale para o filtro. Isto é, os dados calculados do filtro final de ordem “ n ” também são armazenados.

O armazenamento destes novos resultados é importante porque os cálculos subsequentes dos filtros harmônicos das próximas ordens escolhidas (se houverem) serão feitos levando-se em consideração os dados do sistema contendo o filtro sintonizado já calculado e não apenas os dados do sistema original, sem filtro algum. Os procedimentos descritos no presente item estão indicados no fluxograma básico da figura 1, como “Item 2.3”.

III. TESTES DE SUPORTABILIDADE DO BANCO DE CAPACITORES DO FILTRO

Esta etapa se justifica porque os capacitores são os componentes mais sensíveis do filtro, o que os tornam mais suscetíveis a danos e perda da vida útil, principalmente quando operando sob tensões acima da nominal.

3.1 Aplicação dos testes de suportabilidade

Esta etapa também é iterativa. O capacitor será submetido a

5 testes de suportabilidade diferentes e independentes [5]. Portanto, serão adotados 5 valores limites (ver a Tabela I) a serem obedecidos. Assim, ao final de cada iteração, serão 5 comparações a serem realizadas. Caso os limites máximos estipulados sejam ultrapassados, é feita então uma nova iteração, na qual alteram-se os valores de uma ou mais grandezas dos componentes do filtro. Na seqüência, é feita uma nova comparação, até que o objetivo seja alcançado.

TABELA I
LIMITES DOS TESTES DE SUPORTABILIDADE DO CAPACITOR

Limite de corrente eficaz no capacitor	$\frac{I_{F(RMS)}}{I_{C(1n)}} \leq 1,8$
Limite de corrente de pico no capacitor	$\frac{I_{F(Pico)}}{\sqrt{2} \cdot I_{C(1n)}} \leq 1,3$
Limite de tensão eficaz sobre o capacitor	$\frac{V_{C(RMS)}}{V_{C(1n)}} \leq 1,1$
Limite de tensão de pico sobre o capacitor	$\frac{V_{C(Pico)}}{\sqrt{2} \cdot V_{C(1n)}} \leq 1,2$
Limite de potência reativa do capacitor	$\frac{S_{C(M)}}{Q_{CAP(1n)}} \leq 1,35$

3.2 Cálculo das grandezas fundamentais sobre o capacitor

A primeira das etapas relativas à verificação de suportabilidade do capacitor consiste no cálculo das grandezas corrente e tensão (na frequência fundamental) às quais ele será submetido. Essas grandezas são determinadas pelas equações (11) e (12):

$$I_{F(1)} = \frac{V_{B(1)}}{Z_{F(1)}} \quad (11)$$

$$V_{C(1)} = I_{F(1)} \cdot X_{C(1)} \quad (12)$$

Onde:

- $I_{C(1)}$ = Corrente fundamental no capacitor
- $V_{B(1)}$ = Tensão fundamental na barra do filtro
- $Z_{F(1)}$ = Impedância total fundamental do filtro
- $V_{C(1)}$ = Tensão fundamental sobre o capacitor
- $X_{C(1)}$ = Reatância fundamental do capacitor

3.3 Cálculo das grandezas harmônicas sobre o capacitor

De forma semelhante, as grandezas harmônicas às quais o capacitor será submetido, serão determinadas pelas equações (13) e (14). Porém, o cálculo ora desenvolvido difere do anterior pelo fato das grandezas não serem calculadas apenas para uma ordem e sim para cada ordem harmônica “h” existente no sistema.

$$I_{F(h)} = \frac{V_{B(h)}}{Z_{F(h)}} \quad (13)$$

$$V_{C(h)} = I_{F(h)} \cdot X_{C(h)} \quad (14)$$

Onde:

- $I_{C(h)}$ = Corrente harmônica de ordem “h” no capacitor
- $V_{B(h)}$ = Tensão harmônica de ordem “h” na barra do filtro
- $Z_{F(h)}$ = Impedância total de ordem “h” do filtro
- $V_{C(h)}$ = Tensão harmônica de ordem “h” no capacitor
- $X_{C(h)}$ = Reatância de ordem “h” do capacitor

3.4 Cálculo das grandezas eficazes e de pico sobre o capacitor

Estas grandezas são resultantes de todos os valores individuais já calculados, tanto para a frequência fundamental quanto para as demais frequências harmônicas. Os cálculos das mesmas estão indicados nas equações (15) a (19):

$$I_{C(RMS)} = \sqrt{\left(I_{C(1)}\right)^2 + \sum_{h=2}^{h_{MAX}} \left(I_{C(h)}\right)^2} \quad (15)$$

$$I_{C(Pico)} = \sqrt{2} \cdot \left(I_{C(1)} + \sum_{h=2}^{h_{MAX}} I_{C(h)}\right) \quad (16)$$

Onde:

$I_{C(RMS)}$ = Corrente harmônica eficaz total no capacitor

$I_{C(Pico)}$ = Corrente harmônica de pico total no capacitor

$$V_{C(RMS)} = \sqrt{\left(V_{C(1)}\right)^2 + \sum_{h=2}^{h_{MAX}} \left(V_{C(h)}\right)^2} \quad (17)$$

$$V_{C(Pico)} = \sqrt{2} \cdot \left(V_{C(1)} + \sum_{h=2}^{h_{MAX}} V_{C(h)}\right) \quad (18)$$

Onde:

$V_{C(RMS)}$ = Tensão harmônica eficaz total no capacitor

$V_{C(Pico)}$ = Tensão harmônica de pico total no capacitor

$$S_{C(M)} = 3 \cdot I_{F(RMS)} \cdot V_{C(RMS)} \quad (19)$$

Onde:

$S_{C(M)}$ = Potência trifásica aparente média no capacitor

3.5 Cálculo das grandezas nominais do capacitor

A tensão fundamental nominal do capacitor do filtro, $V_{C(1n)}$, é a própria tensão fundamental da barra ($V_{B(1)}$) onde está ligado o filtro:

$$V_{C(1n)} = V_{B(1)} \quad (20)$$

A potência reativa fundamental nominal do capacitor é a potência fundamental (Q_{CAP}), que foi determinada durante o cálculo do filtro ótimo. Assim, o cálculo da corrente fundamental nominal do capacitor do filtro, $I_{C(1n)}$, será dado por:

$$I_{C(1n)} = \frac{Q_{CAP(1n)}/3}{V_{C(1n)}} \quad (21)$$

Caso algum dos 5 limites mostrados na Tabela I não seja satisfeito, o capacitor, bem como todos os demais componentes do filtro precisarão ser redimensionados [3]. Para isso, a próxima etapa consistirá na determinação de novos valores nominais fundamentais de tensão e potência reativa do capacitor. Estes valores devem ser fornecidos a cada iteração (ou a cada reprova nos testes) até que todos os testes de suportabilidade sejam satisfeitos, e devem ser compatíveis com capacitores disponíveis em produção industrial. Dessa forma, o cálculo do filtro será totalmente refeito, partindo-se da nova reatância capacitiva do filtro:

$$X_C^{(Novo)} = \frac{\left(V_{C(1n)}^{(Novo)}\right)^2}{Q_{CAP(1n)}/3} \quad (22)$$

Onde:

$X_C^{(Novo)}$ = Nova reatância capacitiva fundamental do capacitor

$V_{C(1n)}^{(Novo)}$ = Nova tensão fundamental nominal do capacitor

$Q_{CAP(1n)}^{(Novo)}$ = Nova potência reativa fundamental nominal do capacitor

Como todos os dados são operados em pu, tem-se:

$$C^{(Novo)} = \frac{1}{X_C^{(Novo)}} \quad (23)$$

Onde:

$C^{(Novo)}$ = Nova capacitância do capacitor

A partir desse ponto, seguindo-se os mesmos passos da determinação do filtro mínimo, o cálculo dos demais componentes do filtro será feito reutilizando-se as equações (2) até (5). Da mesma forma, nas equações (6) e (7), os cálculos serão realizados para todas as ordens harmônicas.

As novas matrizes obtidas das impedâncias harmônicas totais $[Z_T]$ e também as matrizes das tensões harmônicas resultantes $[V_H]$ (para cada uma das ordens harmônicas) serão, então, os novos resultados finais do sistema elétrico sob estudo.

Na seqüência, todos os testes de suportabilidade serão novamente aplicados. Em caso de reprova em algum deles, uma nova iteração será processada a partir de novos valores nominais de entrada para o capacitor. Quando todos os testes forem satisfeitos, o filtro sintonizado calculado será o filtro definitivo para esta ordem harmônica e seus dados armazenados. Caso existam mais filtros sintonizados a serem projetados (para outras ordens harmônicas superiores), os mesmos serão dimensionados de acordo com todas as etapas descritas até aqui. Os procedimentos descritos nos últimos cinco sub-itens estão indicados no fluxograma básico da figura 2, como "Itens 3.1 a 3.5".

IV. CÁLCULO DE DESEMPENHO DE FILTRAGEM FINAL DOS FILTROS SINTONIZADOS

Após a determinação de todos os filtros sintonizados definitivos para todas as ordens harmônicas de sintonia escolhidas, finalmente se poderá calcular o desempenho de filtragem *global* de todos os filtros sintonizados juntos.

Esta etapa consistirá de um teste final em relação ao desempenho individual de filtragem de cada um dos filtros, atuando no conjunto de filtros sintonizados inseridos na barra. Através de testes comparativos idênticos àqueles realizados ao final da etapa iterativa descrita no item 2.1, os limites das distorções harmônicas máximas pré-fixados são novamente comparados com as distorções harmônicas calculadas do sistema. A aplicação desta etapa final de desempenho de filtragem individual dos filtros é necessária para que se observe possíveis inadequações dos filtros sintonizados quando atuando em conjunto (um filtro pode provocar ressonâncias paralelas com o sistema elétrico em outras frequências bem diferentes da frequência de sintonia).

Portanto, nestas condições, caso algum dos limites de distorção harmônica seja ultrapassado, recomenda-se que se

redimensionem os filtros sintonizados daquelas ordens que estiverem apresentando problemas quanto a este desempenho final de filtragem.

V. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma proposta de procedimentos sistemáticos voltados à determinação de filtros harmônicos sintonizados. Seguindo-se as etapas propostas, os autores esperam ter contribuído para que projetos de filtros sintonizados possam ser realizados com melhor aproveitamento da potência dos bancos de capacitores adotados e, muito provavelmente, a custos mais baixos.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. C. B. Alves, *Análise de problemas e procedimentos na determinação de filtros harmônicos*, Dissertação de Mestrado – UFU – Uberlândia - MG, 1991.
- [2] R. C. Dugan, M. C. Mc Granaghan, *Electrical power system quality*, Segunda Edição. Editora McGraw-Hill, Estados Unidos da América, 2002.
- [3] IEEE Standard 1531-2003, *IEEE Guide for application and specification of harmonic filters*.
- [4] IEEE Standard 18-2002, *IEEE Standard for shunt power capacitors*.
- [5] G. Wakileh, *Power systems harmonics: fundamentals, analysis and filter design*. Editora Springer-Verlag, Alemanha, 2001.

VII. BIOGRAFIAS

Rogério Pinto do Nascimento, É engenheiro eletricista formado pela Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) em 2003. Mestrado em Engenharia Elétrica, na área Qualidade e Racionalização da Energia Elétrica, pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU), em 2007.

Dr. José Wilson Resende. Graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (1975). Mestrado em Engenharia Elétrica pela antiga EFEI (hoje, Universidade Federal de Itajubá), em 1979. *Ph.D* pela *University of Aberdeen*, Escócia (1986). É professor da Faculdade de Engenharia Elétrica da UFU desde que se graduou. Principais áreas de pesquisas: Qualidade da Energia Elétrica, com especial interesse em análise harmônica e compensação reativa de sistemas elétricos.