

## METODOLOGIA PARA A CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA NA PRESENÇA DE HARMÔNICOS

### RESUMO

*O artigo demonstra uma metodologia para cálculo de filtro de harmônico objetivando a correção do fator de potência, a fim de evitar ou atenuar problemas de amplificação harmônica (ressonância) nos sistemas elétricos que possuem cargas elétricas especiais, ou seja, na presença de harmônicos.*

### ABSTRACT

*The article demonstrates a methodology for calculation of harmonic filter objectifying the correction of the power factor, kindred of to avoid or to attenuate problems of harmonic amplification (resonance) in the electric systems that they possess special electric loads, that is to say, in the presence of harmonic.*

### 1. INTRODUÇÃO

Com a proliferação das cargas que distorcem as formas de onda da tensão e da corrente, cargas não-lineares nos sistemas elétricos, tanto as concessionárias como os consumidores, passaram a conviver com o problema da distorção da forma de onda e suas conseqüências. O uso de equipamentos que distorcem as formas de onda da tensão e corrente (harmônicos) estão presentes nos sistemas elétricos, principalmente devido ao avanço da eletrônica de potência nos

últimos anos, a qual proporcionou o uso crescente de dispositivos a base de semicondutores.

A instalação de equipamentos com características não-lineares de operação, provocam distorções nas formas de onda da tensão e corrente do sistema alimentador, provocando o aparecimento do que chamamos de harmônicos (frequências múltiplas da fundamental - 60 [Hz]).

Os componentes harmônicos provocados pelas cargas

**José Batista Siqueira  
Filho**

---

Professor Assistente  
Universidade de Fortaleza  
- Mestre (EFEI)

Sócio-Gerente da SEI&P-  
Engenharia S/C Ltda.

não-lineares, cargas elétricas especiais – CEE, como: conversores e inversores de frequência, fornos a arco, lâmpadas não-incandescentes, retificadores, no-break, propagam-se através da rede elétrica, provocando efeitos maléficis a equipamentos e operação dos sistemas, dentre tais danos, tem-se:

- Operação incorreta de equipamentos de controle, proteção e medidores.
- Aquecimento (aumento de perdas) em equipamentos (transformadores, motores, cabos, reatores, etc.), principalmente em bancos de capacitores que são equipamentos muito sensíveis aos harmônicos;
- Interferência em sistema de comunicação.
- Problemas de ressonância, sobretensões ou sobrecargas.

## 2. RESSONÂNCIA

De um modo bastante simplificado pode-se dizer que as impedâncias de um sistema elétrico são compostas por combinações série e paralelo de resistências, capacitâncias e indutâncias. Seu comportamento com a frequência, apresenta portanto, pontos de ressonância, isto é, frequências para as quais as impedâncias do sistema assume um valor máximo (ressonância paralela) ou mínimo (ressonância série), nestes casos podem surgir sobretensões ou sobrecargas respectivamente.

A frequência de sintonia em um circuito ideal LC é obtida quando:

$$X_L = X_C \quad (1)$$

onde:

$X_L$  - Reatância indutiva;

$X_C$  - Reatância capacitiva.

A frequência de ressonância é dada por:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L.C}} \quad (2)$$

onde:

$f_n$  - Frequência que provocará ressonância no sistema.

L - Indutância do circuito, em [H];

C - Capacitância do circuito, em [F].

De (3) e (4) pode-se obter:

$$n = \frac{f_n}{f_1} \quad (3)$$

onde:

$f_1$  - Frequência industrial do sistema (no Brasil, 60 [Hz]).

n - ordem do harmônico;

As duas formas de ressonância que podem ser consideradas são: ressonância série ou paralela.

Quando um circuito, encontra-se em ressonância série, a corrente torna-se elevada e a tensão mínima no trecho compreendido entre a reatância capacitiva e a reatância indutiva, conseqüentemente a impedância limitante do trecho será representada apenas por sua resistência, que em tensões superiores a 1000 V é pequena com relação a reatância. Do ponto de vista prático, a condição de ressonância série, pode ocorrer entre um banco de capacitores e a fonte (transformador do sistema), vale salientar, que ressonâncias perfeitas ( $X_L = X_C$ ) são na prática difíceis de acontecer. A figura 3 mostra o resultado de uma simulação para o sistema apresentado na figura 2. Observe que, à medida que a frequência vai se aproximando da frequência de ressonância, que neste caso é o sétimo harmônico, a tensão na barra 1 da figura 3 vai diminuindo, caracterizando-se um curto-circuito.

A condição para que ocorra a ressonância paralela é igual a da ressonância série, isto é,  $X_L = X_C$ . A figura 4 mostra um circuito para a condição de ressonância paralela. A impedância para o caso de ressonância paralela é uma impedância infinitamente alta no ponto de ressonância, ocasionando-se sobretensões perigosas a integridade do sistema.

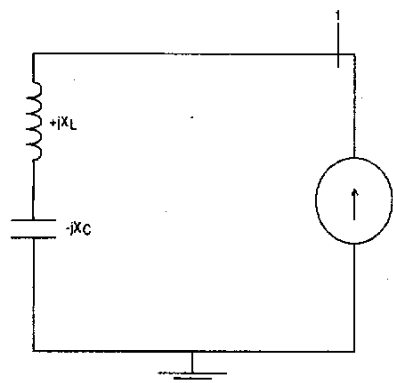


Figura 2 - Ressonância série

A figura 5, mostra uma simulação do caso da figura 4, onde se observa que, a medida que a frequência aproxima-se da frequência de ressonância, que neste caso, também é o sétimo harmônico, a tensão vai se tornando elevada, caracterizando impedância infinita.

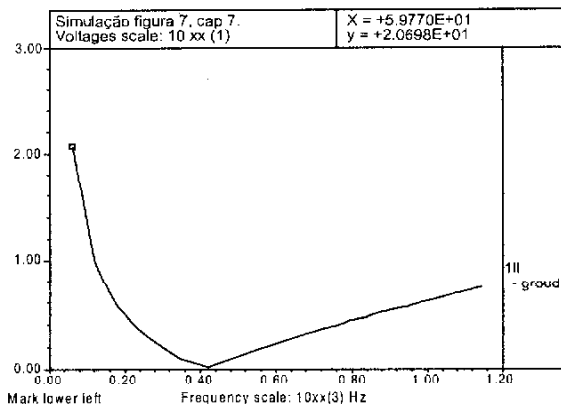


Figura 3 - Simulação de ressonância série

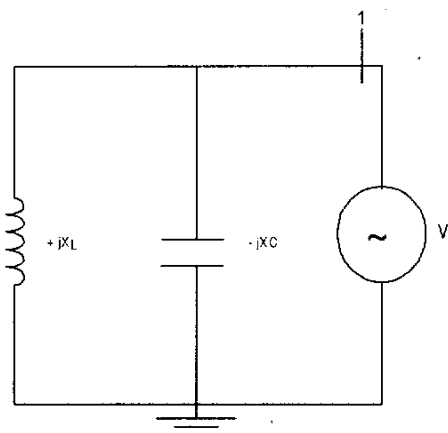


Figura 4- Ressonância paralela

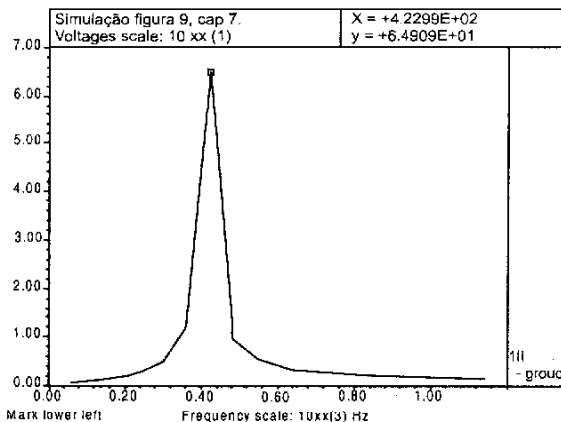


Figura 5- Simulação de ressonância paralela

### 3. RESSONÂNCIA NOS SISTEMAS ELÉTRICOS

Em sistemas elétricos, quando a carga de CEE for no mínimo em torno da ordem de 20% da carga total instalada, há probabilidade de ocorrer fenômenos de ressonância.

Para fins práticos, a ordem do harmônico que provocará uma ressonância em um sistema elétrico pode ser dado pela equação 4.

$$n_s = \sqrt{\frac{S_{CC}}{Q_{BC}}} \quad (4)$$

onde:

$S_{CC}$ - Potência de curto-circuito na barra no qual está conectado o banco de capacitores em [MVA];

$Q_{BC}$ - Potência do banco de capacitores em [MVAR];

A equação 1, pode ser reescrita como:

$$n_s = \sqrt{\frac{S_{TN}}{X_{TH1} \cdot Q_{BC}}} \quad (5)$$

Onde:

$X_{TH1}$  Reatância do transformador onde o banco de capacitores encontra-se instalado.

$S_{TN}$  Potência nominal do transformador onde o banco de capacitores encontra-se instalado.

A figura 1 mostra a variação da ordem do harmônico para uma determinada potência do banco de capacitores com relação a potência do transformador.

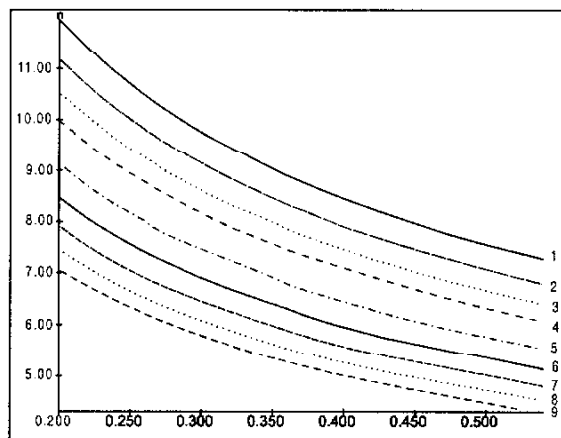


Figura 1 - Ordem do harmônico em função potência do banco de capacitores (Pb)/ transformador (Pt)

Onde:

As curvas do gráfico:

curva 1 .....	$X_{TH1} = 3,5\%$
curva 2 .....	$X_{TH1} = 4,0\%$
curva 3 .....	$X_{TH1} = 4,5\%$
curva 4 .....	$X_{TH1} = 5,0\%$
curva 5 .....	$X_{TH1} = 6,0\%$
curva 6 .....	$X_{TH1} = 7,0\%$
curva 7 .....	$X_{TH1} = 8,0\%$
curva 8 .....	$X_{TH1} = 9,0\%$
curva 9 .....	$X_{TH1} = 10,0\%$

#### 4. FILTROS DE HARMÔNICOS PARA A CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

A correção do fator de potência em sistemas elétricos na presença de harmônicos não pode ser realizada através do método tradicional, ou seja, o triângulo de potência. Por esta razão, a instalação de bancos de capacitores de forma aleatória para corrigir o fator de potência em sistema onde harmônicos estão presentes é um risco na atualidade, pois propiciará o surgimento de possíveis ressonâncias perigosas a integridade do sistema, conseqüentemente surgirão possíveis problemas sérios de sobretensões e/ou sobrecargas nos sistemas elétricos.

A situação de ressonância é bastante complicada para uma previsão segura de que a instalação dos bancos não propiciará tal problema, isto porque há variação ao longo de 24 horas diárias dos harmônicos e das cargas no sistema, alterando assim o ponto de ressonância. Para uma solução da correção do fator de potência de modo a evitar ao máximo a possibilidade do surgimento de ressonância, seria a instalação de filtros de harmônicos sintonizados em uma frequência de ressonância não característica do sistema.

Tendo-se em vista esse problema, deve-se instalar indutores em série com o banco de capacitores de modo a promover uma ressonância série para o harmônico que provocaria uma ressonância paralela, ou seja, filtro de harmônico para correção do fator de potência ocasionaria dessintonia para o harmônico do qual estaria provocando uma ressonância paralela. Tais filtros podem ser projetados para uma frequência de sintonia não característica de sistemas elétricos, sendo 4,1 a 4,5 os mais utilizados.

A figura 7 mostra um sistema simplório e fictício como base para a simulação do problema apresentado. O sistema possui no barramento uma CEE (inversor dc 6 pulsos), um banco de capacitores e quatro motores. As amplitudes dos harmônicos injetados pela CEE estão apresentados na tabela 1.

Harmônicos	Amplitude [A]	Harmônicos	Amplitude [A]
5	80	13	11
7	50	17	7
11	20	19	5

Tabela 1 - Harmônicos de corrente injetados no sistema pela CEE

Foi instalado um banco de capacitores de 210 kVAr no barramento 2 de modo a corrigir o fator de potência para 0,94. Utilizando-se um simulador de fluxo de carga harmônico (FCH-MICROTRAN), a situação de ressonância para o sistema operando com os Inversores, os quatro motores e sem bancos de capacitores é apresentado na figura 8. Note que na figura 9 a distorção máxima individual é ocasionada pelo 5º harmônico com valor de 2,2 V, ou seja, 0,95%. Nesta situação a distorção está dentro dos limites de distorção dos harmônicos sugerida pelo CIGRE (tabelas 2 e 3).

Na instalação dos bancos de capacitores, a impedância equivalente do sistema sofreu alteração, portanto a ressonância do sistema foi então alterada para o 11º harmônico. Tal situação poderia ser aproximadamente prevista utilizando a equação 6.

$$n = \sqrt{\frac{27,27 \text{ MVA}}{0,210 \text{ MVAr}}} = 11,9 \quad (6)$$

onde:

$$S_{cc} \cong 27,27 \text{ MVA}$$

Utilizando-se novamente um FCH, quando na instalação dos bancos de capacitores, a ressonância do sistema da figura 6 saiu do harmônico de 5ª ordem para 11ª ordem, sendo que a distorção individual anterior do sistema era de 0,95% no 5º harmônico e foi para 7,12% (15,96 V) no 11ª harmônica, ocorrendo então, o que chamamos de amplificação harmônica. Vale salientar que neste caso, a amplificação harmônica na 11ª ordem de 7,12% é considerada acima dos limites admissíveis por normas (ver tabelas 1 e 2).

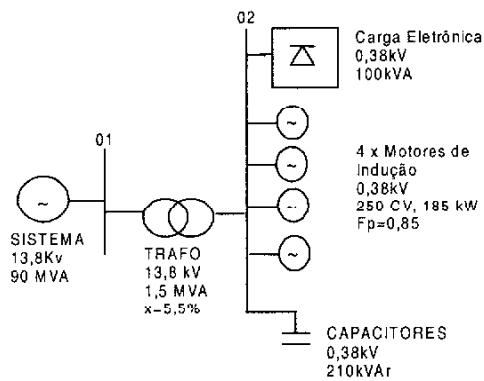


Figura 7 - Esquema de simulação de ressonância

Um fato problemático em sistemas com cargas elétricas especiais que aparentemente não apresentaram problemas imediatos de amplificações harmônicas quando instalados de bancos de capacitores, é a possibilidade de ressonância temporária. Deve-se ter a convicção, de que os sistemas podem sofrer alterações em sua impedância ao longo das 24 horas de trabalho, ou seja, seu ponto de ressonância poderá sofrer alteração devido a variação das cargas elétricas, possibilitando alguma ressonância temporária perigosa a integridade do sistema e aos equipamentos. Desta forma, a garantir o não acontecimento deste fato, seria prudente a instalação do banco de capacitores no formato de filtro de harmônicos para correção do fator de potência, fazendo com que o banco de capacitores do filtro não provoque ressonâncias em momento algum na jornada de trabalho do sistema elétrico ao longo da 24 horas.

U < 69 [kV]				U > 69 [kV]			
ÍMPARES		PARES		ÍMPARES		PARES	
Ordem	$du_n$ (%)	Ordem	$Fdu_n$ (%)	Ordem	$Fdu_n$ (%)	Ordem	$Fdu_n$ (%)
3,5,7	5	2,4,6	2	3,5,7	2	2,4,6	1
9,11,13	3			9,11,13	1,5		
5 A 25	2	>=8	1	5 A 25	1	>=8	0,5
>=27	1			>=27	0,5		
FDu = 6 (%)				FDu = 3 (%)			

Tabela 2 - Limites globais de tensão expressos em porcentagem da tensão fundamental [1]

U < 69 [kV]				U > 69 [kV]			
ÍMPARES		PARES		ÍMPARES		PARES	
Ordem	$Fdu_n$ (%)	Ordem	$Fdu_n$ (%)	Ordem	$Fdu_n$ (%)	Ordem	$Fdu_n$ (%)
3 A 25	1,5	Todos	0,6	3 A 25	0,6	Todos	0,3%
>= 27	0,7			>= 27	0,4		
FDu = 3%				FDu = 1,5%			

Tabela 3 - Limites de tensão por consumidor expressos em porcentagem da tensão fundamental

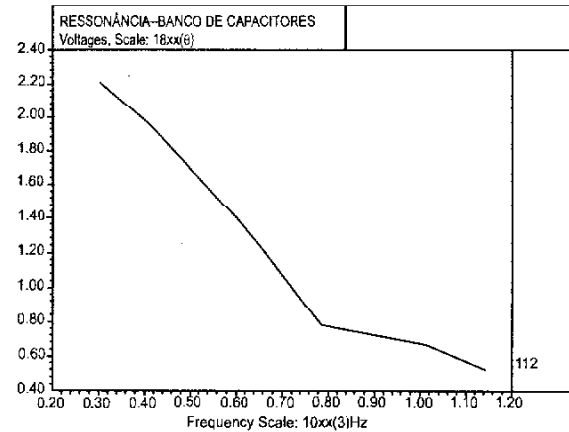


Figura 8 - Amplitude dos harmônicos no sistema com motores operando sem bancos de capacitores.

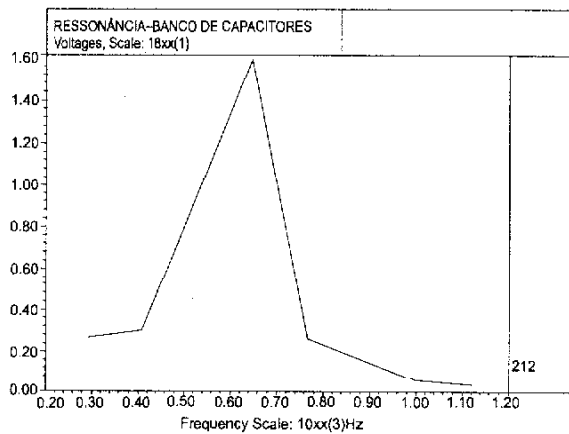


Figura 9 - Amplitude dos harmônicos no sistema com motores operando com bancos de capacitores.

## 5. CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA NA PRESENÇA DE HARMÔNICOS

De posse de todos os dados do sistema, e os harmônicos de corrente injetados pelas cargas elétricas especiais, as potências ativas

e reativas consumidos pelo sistema, o cálculo do banco necessário a efetuar a correção do fator de potência ao valor desejado (recomendado é 0,94) é feito a seguir.

Através definição da potência ativa e reativa o fator de potência é feita da seguinte forma.

$$FP_A = \cos\left[\operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{Q}{P}\right)\right] \quad (7)$$

onde:

Q - Potência reativa;

F - Potência ativa;

FP<sub>A</sub> - Fator de potência atual (original);

A potência reativa necessária para corrigir o fator de potência de modo a atingir o valor desejado pode ser dado pela equação abaixo.

$$Q_1 = P(\operatorname{tg}(\cos^{-1}(FP_A)) - \operatorname{tg}(\cos^{-1}(FP_D))) \quad (8)$$

onde:

Q<sub>1</sub> - Potência reativa necessária a correção do fator de potência em situação senoidal;

FD<sub>D</sub> - Fator de potência desejado (a ser corrigido);

Fpa - Fator de potência atual.

Determinada a potência inicial dos bancos de capacitores para corrigir o fator de potência, deve-se determinar a potência e a tensão dos bancos de capacitores necessária à suportar os harmônicos.

As equações 9 e 10 determinam o nível de tensão e potência dos bancos de capacitores, que suportaram a presença dos harmônicos. Será considerado nos modelos matemáticos apenas os módulos dos harmônicos, ou seja, desprezando os ângulos.

$$U_f \geq a \cdot U_1 \left[ 1 + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{I_n}{I_1} \cdot \frac{1}{n} \right] \quad (9)$$

$$Q_f = Q_1 \cdot \left[ \frac{U_f}{U_1} \right]^2 \quad (10)$$

onde:

$$a = \frac{n^2}{n^2 - 1} \text{ Elevação do nível de tensão no banco}$$

de capacitores, provocado por um indutor em série com o mesmo, para uma frequência de

ressonância (n) imposta ao filtro de harmônico (4,1 a 4,5).

U<sub>F</sub> e Q<sub>F</sub> - Tensão e potência do filtro considerando os harmônicos;

U<sub>1</sub> e Q<sub>1</sub> - Tensão e potência do filtro fundamental (60 Hz);

I<sub>n</sub> - Corrente do Harmônico de ordem n;

I<sub>1</sub> - Corrente na frequência fundamental.

## 6. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Sabendo-se que, o banco de capacitores necessário para corrigir o fator de potência para 0,94 em uma situação senoidal é de 0,38 kV e 210 kVAr e utilizando-se destes dados para o cálculo de um filtro básico para uma frequência de ressonância de 4,1, tem-se um reator do filtro de 0,11 mH (equação 11). Nestas condições, inserindo-se o filtro básico de harmônico no sistema da figura 7 no local do banco de capacitores, e utilizando-se o simulador de fluxo de carga harmônico no sistema, tem-se os harmônicos de correntes passantes no filtro básico (ver tabela 3), no qual proporcionam um aumento de potência e tensão do banco de capacitores do mesmo.

Utilizando-se as equações 9 e 10 respectivamente, e os harmônicos de correntes do filtro básico da tabela 2, especificaremos o filtro de harmônico definitivo de modo a corrigir o fator de potência na presença de harmônicos, tem-se portanto, a potência do filtro é de Q<sub>F</sub> = 236 kVAr com tensão de U<sub>F</sub> = 14,67 kV.

$$U_f = 1,06 * 13,8 * \left( 1 + \frac{0,0052}{9,87 * 5} + \frac{0,0018}{9,87 * 7} + \frac{0,0006}{9,87 * 11} + \frac{0,0003}{9,87 * 13} + \frac{0,0002}{9,87 * 17} + \frac{0,0001}{9,87 * 19} \right)$$

$$Q_f = 0,21 * \left[ \frac{14,67}{13,8} \right]^2 = 0,237 \text{ MVAr}$$

Aplicando-se a equação 11 a uma frequência de ressonância de 4,1, sendo o termo 1,03 uma pequena dessintonia na frequência de sintonia do filtro, de modo a não criar um filtro perfeito, ou seja, um "para-raios" sintonizado, tem-se o novo reator do filtro.

$$X_r = 1,03 \cdot \frac{X_c}{n^2} \quad (11)$$

logo:

$$X_r = 1,03 \cdot \frac{\left( \frac{14,67^2}{0,237} \right)}{4,1^2} = 147 \text{ mH}$$

Observe que, na presença de harmônicos, os bancos de capacitores possuem uma potência e tensão maior do que os especificados em situações senoidais, onde o triângulo de potência é validado. Caso não seja o banco de capacitores especificado com estas características superiores de tensão e potência, certamente o mesmo sofrerá danos prematuros.

Harmônicos	Amplitude [A]	Harmônicos	Amplitude [A]
5	0,0052	13	0,0003
7	0,0018	17	0,0002
11	0,0006	19	0,0001

Tabela 3 – Harmônicos de corrente no filtro

Com o filtro de harmônico inserido no local do banco de capacitores com as novas especificações, e utilizando-se novamente o simulador de fluxo de carga harmônico, o sistema não sofreu ampliações harmônicas, onde a distorção individual do 11<sup>º</sup> ordem de 7,12% com banco de capacitores, caiu com o filtro para 0,78% (ver tabela 4), ficando o fator de potência em 0,94 no sistema.

Harmônicos	Distorção individual da barra 2 em %	Harmônicos	Distorção individual da barra 2 em %
5	1,08	13	0,38
7	0,94	17	0,32
11	0,59	19	0,25

Distorção individual da barra 2 = 1,65%

Tabela 4 – Distorção individual e total na barra 2 após instalação do filtro

Caso a instalação do banco de capacitores fosse no lado de baixa tensão, no qual não é muito usual, teríamos as seguintes conclusões:

- Potência do filtro -  $Q_F=250$  kVar;
- Tensão do filtro -  $U_F=0,41$  kV;
- Reator - 0,11 mH.

Harmônicos	Distorção individual da barra 2 em %	Harmônicos	Distorção individual da barra 2 em %
5	0,78	13	0,33
7	0,79	17	0,28
11	0,51	19	0,22

Distorção total da barra 2 = 1,31%

Tabela 5 – Distorção individual e total na barra 2 após instalação do filtro

## 7. CONCLUSÃO

Desta forma, quando os sistemas possuírem cargas elétricas especiais, normalmente acima de 20% da carga total instalada, na instalação de bancos de capacitores para correção do fator de potência, um fluxo de carga harmônico deverá ser utilizado na determinação de possíveis ressonâncias (sobrecargas ou sobretensões) no sistema. Em situação de possível ressonância determinará a especificação de filtros de harmônicos para correção do fator de potência.

A metodologia apresentada para a realização de uma correção do fator de potência na presença de harmônicos, utiliza-se de simuladores de fluxo carga de harmônico, já que, determinam a presença de possíveis fenômenos de amplificação harmônica provocados pelos bancos de capacitores necessários à correção do fator de potência, bem como, a determinação dos harmônicos de corrente passantes pelo filtro básico no sistema de modo, há especificar do filtro definitivo. Desta forma, há uma garantia de que bancos de capacitores na presença de CEE não provocará danos à integridade de equipamentos e sistemas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BATISTA, J.Siqueira Filho, "**Bancos de Capacitores na Presença de Harmônicos**", Trabalho de Dissertação de Mestrado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá- EFEI, 1995.

COGO, J. R., "**Critérios para dimensionamento de filtros de harmônicos**", Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI, Itajubá, Minas gerais, Brasil.

COGO, J.Roberto, "**Correção do Fator de Potência**", apostila do Curso da Qualidade da Tensão em Sistemas Elétricos, pós-graduação, Itajubá, EFEI, 1995.

STEEPER, D.E., Stratford, R.P., "**Reactive compensation and harmonic supression for industrial power system using thyristor converters**", IEEE transactions on industry applications, vol IA-12,no.3, may/june, 1976.