



## **Grupo de Estudo de Desempenho de Sistemas Elétricos-GDS**

### **Conversão de Bancos de Capacitores em Filtros de Harmônicas**

**MARCELO DE ALMEIDA BARBOSA(1);**  
**B&A(1);**

#### RESUMO

As plantas industriais e, mais recentemente, as plantas eólicas, possuem bancos de capacitores para correção do fator de potência. Com o passar do tempo e o crescimento de cargas não lineares nesses sistemas começaram a surgir problemas devido às harmônicas, verificando-se a necessidade da instalação de filtros.

Este trabalho tem por objetivo apresentar, através de dois estudos de casos, uma solução alternativa e muito interessante do ponto de vista técnico-econômico, na transformação dos bancos de capacitores existentes em filtros de harmônicas utilizando-se de engenharia reversa.

#### PALAVRAS-CHAVE

Capacitores, Harmônicas, Filtros

#### 1.0 - INTRODUÇÃO

As plantas industriais e, mais recentemente, as plantas eólicas, possuem bancos de capacitores para correção do fator de potência e atendimento da legislação vigente, mais especificamente as resoluções normativas da ANEEL 414/2010 e 569/2013. Muitos bancos de capacitores foram implantados para cumprir a referida legislação, evitando-se o faturamento da energia reativa (multa), sem muita preocupação com a presença de harmônicas na instalação. Em alguns casos, devido a pouca presença de cargas não-lineares, foram instalados apenas reatores de dessintonização ou simplesmente o sobretensionamento de capacitores era suficiente. Quando em operação back-to-back foram instalados também apenas pequenos reatores para limitação das correntes transitórias de inrush. Com o passar do tempo e a implantação de novos equipamentos geradores de harmônicas (cargas não lineares) como conversores estáticos de potência; fornos a arco elétrico; retificadores de potência; etc., começaram a aparecer problemas na planta industrial como sobretensões, geralmente causadas por ressonância paralela, queima de equipamentos, ou, ainda, mau funcionamento de sistemas, inclusive levando alguns processos ao colapso. Além disso, o conteúdo harmônico da instalação veio a crescer, violando os limites individuais e totais impostos pelos Procedimentos de Rede. Assim, nesses casos, estudos de penetração harmônica são realizados com o objetivo de diagnosticar esses problemas e, geralmente, as soluções recomendam a implantação de filtros de harmônicos de alto custo.

Uma solução alternativa e muito interessante do ponto de vista técnico-econômico é o retrofit dos bancos de capacitores existentes, utilizando-se de engenharia reversa, transformando-os em filtros de harmônicas. Esses filtros são utilizados no sistema com a finalidade de absorver as harmônicas de corrente, proporcionando um caminho de baixa impedância para essas harmônicas e continuando com o seu objetivo original de compensação

reativa e manutenção do fator de potência mínimo requerido pela legislação e agregando ao sistema as funções de filtragem de harmônicas com consequente redução do conteúdo harmônico da instalação.

Este trabalho tem por objetivo mostrar dois estudos de casos reais, sendo o primeiro em uma planta industrial eletrointensiva e o segundo em um parque eólico, onde os bancos de capacitores em média tensão foram convertidos em filtros de harmônicas, incluindo: os estudos realizados; o redimensionamento dos filtros; as modificações necessárias e a implementação de reatores e resistores; o reaproveitamento de equipamentos dos bancos de capacitores existentes e espaços necessários; e, finalmente o ganho na redução do investimento com o reaproveitamento de equipamentos, especialmente capacitores, em relação a filtros novos.

## 2.0 - CRITÉRIOS PRÁTICOS DE PROJETOS DE FILTROS

### 2.1 Considerações gerais

Os filtros, com relação a uma determinada carga, podem ser classificadas pela sua localização; pelo modo de conexão ao sistema elétrico; pela largura de faixa de sintonia e, pelo número e frequências de suas ressonâncias.

Neste trabalho estaremos nos referindo sempre aos filtros “shunt” que são ligados em paralelo com o sistema de forma a propiciar um caminho “shunt” de baixa impedância para as frequências harmônicas, evitando com isso a sua penetração no resto do sistema. Na prática, é o filtro mais utilizado pela sua menor complexidade e custo, pois é dimensionado para suportar a corrente harmônica para a qual está sintonizado somada a uma corrente fundamental muito menor que aquela do circuito principal. Ver Figura 1.

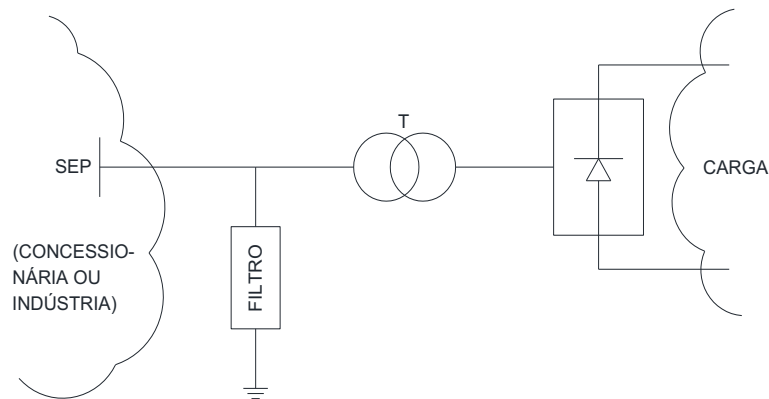


FIGURA 1 – Filtro tipo “shunt”

Uma grande vantagem dos filtros “shunt” é que na frequência fundamental fornecem a potência reativa necessária para correção do fator de potência.

#### 2.1.1 Largura de faixa de sintonia

Quanto à largura de faixa de sintonia, dois tipos de filtros são usados: (a) o filtro sintonizado em faixa bastante estreita para uma ou duas das frequências harmônicas mais baixas e (b) o filtro amortecido (filtro de baixo Q) que oferece uma baixa impedância sobre uma larga faixa de frequências, geralmente superiores.

#### 2.1.2 Fator de qualidade

Um filtro “shunt” está sintonizado para uma determinada frequência, quando nesta frequência as reatâncias indutiva e capacitiva são iguais.

Portanto, deve ser introduzido o conceito de qualidade de um filtro, medido pelo fator Q, determinante da largura de faixa de sintonia do filtro. Com relação ao fator Q, os filtros podem ser do tipo de alto Q e de baixo Q.

No caso de um filtro sintonizado, “Q” é definido como a relação de reatância indutiva (ou capacitiva)  $X_r$  na ressonância, pela resistência R, ou seja:

$$Q = X_r / R$$

Nos filtros amortecidos passa-alta o fator de qualidade Q é inverso do filtro sintonizado.

## 2.2 Filtro sintonizado simples

Um filtro sintonizado simples é um circuito série RLC, ver Figura 2, sintonizado na frequência de uma harmônica (geralmente uma harmônica característica mais baixa). Neste filtro o fator de qualidade é praticamente o fator de qualidade natural do reator.

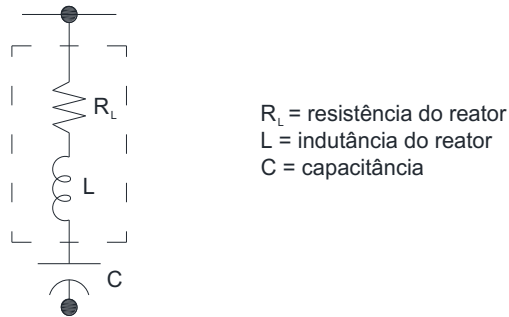


FIGURA 2 – Filtro sintonizado simples

## 2.3 Filtro amortecido

Existem vários tipos de filtro amortecido porém o filtro de 2ª ordem é o mais utilizado apresentando um melhor desempenho de filtragem. Neste filtro o fator de qualidade é reduzido com a colocação de um resistor em paralelo com o reator conforme mostrado na Figura 3.

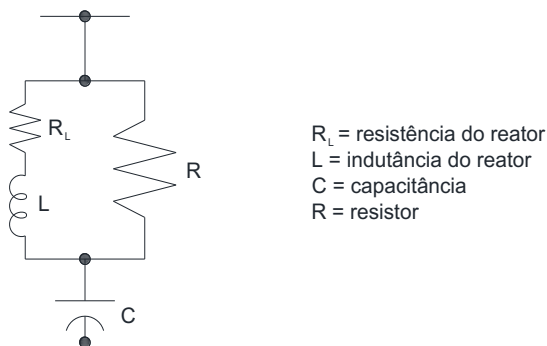


FIGURA 3 – Filtro amortecido

Atualmente, tem-se utilizado cada vez mais a obtenção do filtro amortecido somente com o capacitor e o reator, incorporando-se  $R$  a  $L$ , respeitados os limites práticos relativos ao fator de qualidade do reator. As vezes colocando-se reatores com anéis do tipo “Q-ring” fatores de qualidade de 20 a 25 são possíveis de serem fabricados. Com isto elimina-se o resistor convencional, retirando um elemento que sempre apresenta problemas em filtros e necessita de manutenção periódica. Os reatores são praticamente livres de manutenção.

## 2.4 Engenharia reversa

Os estudos que definem as necessidades dos filtros a serem instalados estabelecem os parâmetros básicos dos filtros ou sejam:

- O tipo (sintonizado ou amortecido).
- A frequência de sintonia (Hz).
- A potência reativa (MVar).
- A resistência do resistor ( $\Omega$  no caso de filtro amortecido).
- A indutância do reator (mH).
- A capacitância do banco de capacitores ( $\mu\text{F}$ ).
- O fator de qualidade do filtro.

Com relação ao objeto deste trabalho é possível, muitas vezes, rearranjar as unidades capacitivas dos bancos de capacitores existentes de forma a manter a potência reativa requerida e compor o mesmo filtro solicitado no estudo somente recalculando e reajustando a indutância do reator a partir de uma capacitância pré-fixada para o banco de

capacitores. Com isso pode-se obter uma economia significativa na implantação do filtro, reaproveitando também os equipamentos de manobra e proteção. Exemplos desta aplicação estão mostrados nos dois estudos de casos a seguir.

### 3.0 - ESTUDO DE CASO Nº 1 – FÁBRICA ELETROINTENSIVA

Nesta planta industrial existem dois bancos de capacitores de 6,0 MVar – 23 kV (potência efetiva de 5,6 MVar), configuração dupla estrela isolada, duas unidades em paralelo por fase, instalados no secundário do transformador auxiliar de 30 MVA – 66/23 kV.

Nesta aplicação específica, a conversão dos dois bancos de capacitores em dois filtros de harmônicas sintonizados na 11ª e 13ª ordens, que são harmônicas fortes no sistema, devido a presença de retificadores de alta potência de 12 pulsos; propiciaram:

- Redução do conteúdo harmônico da instalação como um todo, principalmente vindo a atender os limites de tensões harmônicas individuais e total no PAC;
- Redução drástica nas correntes de inrush em função dos novos reatores, podendo agora os dois filtros operarem em contraposição o que não era possível;
- Fornecimento da potência reativa necessária para correção do fator de potência e eliminação de multas o que não era possível devido às harmônicas, que impediam a operação de um dos bancos e a utilização parcial do outro banco de capacitores.

A nova configuração conforme construída está mostrada na Figura 4.



FIGURA 4 – Fotografia do novo arranjo com o filtro

A Tabela 1 apresenta as características dos filtros após a conversão.

TABELA 1 – Características dos filtros após conversão

Características	Tipo	Sintonizado (11ª ordem)	Sintonizado (13ª ordem)
Potência reativa nominal		6,0 MVar	6,0 MVar
Tensão nominal		27,71 kV	27,71 kV
Tensão de operação		23 kV	23 kV
Potência reativa efetiva		4,13 MVar	4,13 MVar
Frequência		50 Hz	50 Hz
Frequência de sintonia harmônica		520 Hz	620 Hz
Tipo de conexão		Dupla estrela isolada	Dupla estrela isolada
Proteção de desequilíbrio		Através de TC	Através de TC
Instalação		Externa	Externa
Capacitância nominal		24,876 $\mu$ F	24,876 $\mu$ F
Indutância por fase		3,766 mH	2,649 mH
Tolerância de indutância		$\pm$ 3%	$\pm$ 3%
Fator de qualidade do reator		40	40

Na Tabela 1 observe a utilização de um filtro sintonizado simples porém com um fator de qualidade mais baixo ( $Q=40$ ). Para isto foi necessário utilizarmos reatores anéis “Q-ring”, que tem as seguintes principais vantagens:

- O resultado final em termos de filtragem foi praticamente o mesmo, principalmente na interface com a concessionária na barra de 220 kV, comparando-se com um filtro amortecido de baixo fator  $Q$ ;
- O resistor sempre foi um ponto fraco de filtros de harmônicas e nesse caso foi eliminado utilizando-se os anéis “Q-ring”, retirando um equipamento com necessidade de manutenção periódica;
- Os reatores são elementos praticamente livres de manutenção;
- Os custos de resistores novos e o acréscimo de anéis “Q-ring” nos reatores são próximos.

#### 4.0 - ESTUDO DE CASO Nº 2 – PARQUE EÓLICO

O diagrama da Figura 5 mostra o unifilar simplificado do parque eólico onde estão instalados dois bancos de capacitores de 4,5 MVar – 34,5 kV nas barras 1 e 2.

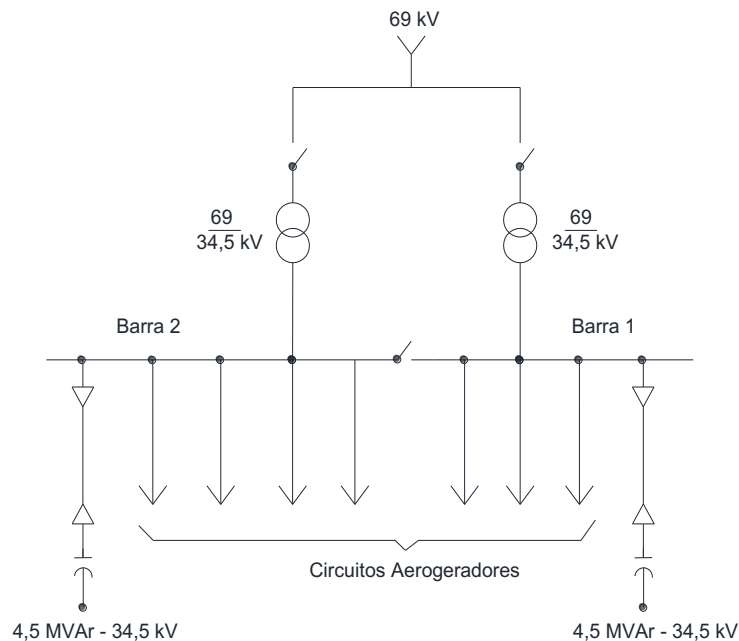


FIGURA 5 – Unifilar simplificado

Cada banco de capacitores está ligado em configuração dupla estrela isolada com TC de desequilíbrio de neutro, composto por 12 unidades capacitivas de 460 kVar – 10.960 V conforme mostrado na Figura 6.

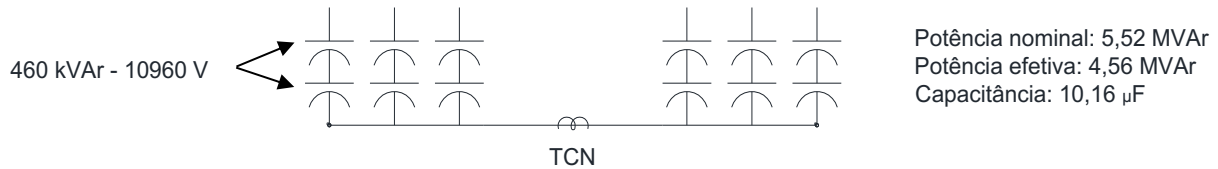


FIGURA 6 – Configuração do banco de capacitores

Após a campanha de medições de harmônicas os estudos recomendaram os seguintes filtros da Tabela 2.

TABELA 2 – Características dos filtros após estudo

Barra	Tipo	Frequência de sintonia (Hz)	Potência efetiva (MVar)	Resistor ( $\Omega$ )	Capacitância ( $\mu\text{F}$ )	Reator (mH)	Fator de qualidade do reator
1	Amortecido	300	2,25	115	4,814	58,467	80
1	Sintonizado	135	3,78	-	6,773	205,22	80
2	Amortecido	300	2,95	85	6,311	44,594	80

#### 4.1 Engenharia reversa

Para o filtro sintonizado da barra 1, verificou-se o reaproveitamento dos capacitores existentes. Para isto foi necessário um novo arranjo dos capacitores de forma a suportar a tensão imposta pelos reatores conforme Figura 7.

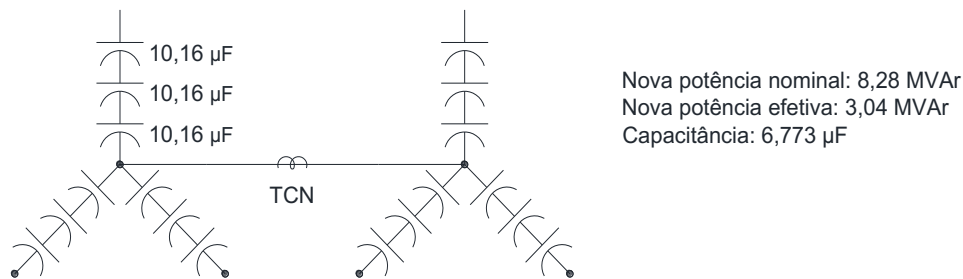


FIGURA 7 – Nova configuração do banco de capacitores para filtro sintonizado

A seguir calcula-se a tensão sobre os capacitores, conforme mostrado na Figura 8.

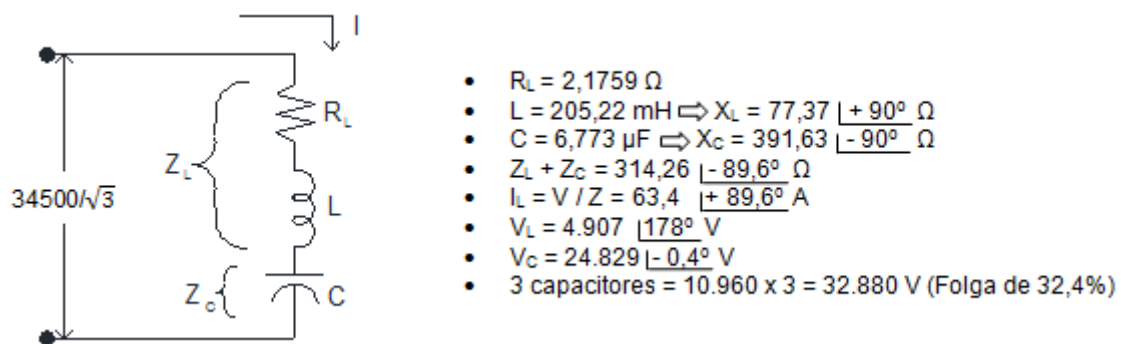


FIGURA 8 – Circuito RLC – Filtro sintonizado barra 1

Observa-se neste primeiro filtro que no novo arranjo a nova capacitância já ficou no valor requerido pelo filtro não necessitando ajuste da indutância do reator. A colocação de mais um capacitor em série para o filtro implica no reaproveitamento das 12 unidades capacitivas existentes e a aquisição de somente mais 6 unidades. A potência efetiva de 3,04 MVar, inferior a potência requerida de 3,78 MVar, será compensada nos demais filtros.

Para o filtro amortecido da barra 1, utilizando-se o capacitor padrão existente (10.960 V – 460 kVAr), e uma

configuração estrela simples e proteção de desequilíbrio através de TP, conforme Figura 9.

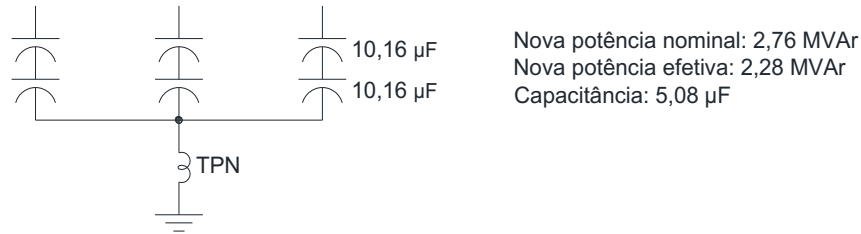


FIGURA 9 – Configuração para filtro amortecido

Da mesma forma anterior, calcula-se a tensão sobre os capacitores, conforme mostrado na Figura 10.

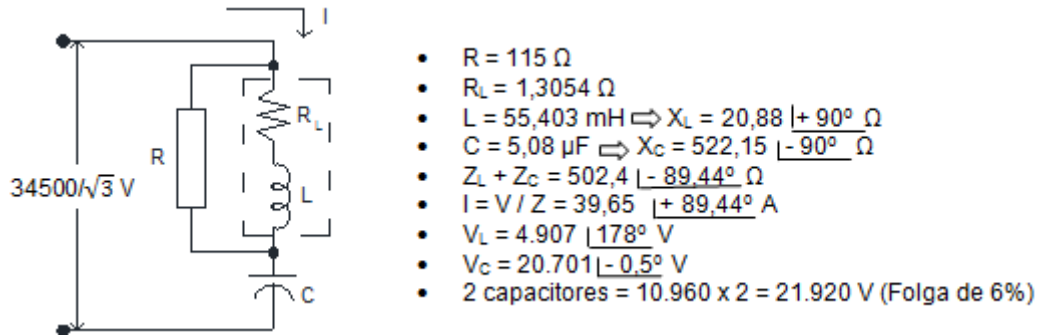


FIGURA 10 – Circuito RLC – Filtro amortecido barra 1

Observa-se nesse segundo filtro a necessidade de ajuste da indutância do reator devido à variação da capacitância. Cuidado especial deve ser dado à especificação da corrente permanente sobre o resistor R e a sua potência, devido a tensão imposta do reator sobre este resistor. Além disso, poderá ser necessário o ajuste na resistência do resistor para manter o fator Q.

Para o filtro amortecido da barra 2 manteve-se a mesma configuração do banco de capacitores existente conforme Figura 6. Neste caso a potência nominal continuou com 5,52 MVar; a potência efetiva em 4,55 MVar e a capacitância em 10,16 µF.

Da mesma forma anterior foi necessário o cálculo reverso para ajustar a indutância do reator para manter a frequência de sintonia em 300 Hz ( $L = 27,702 \text{ mH}$ ). A resistência do resistor foi ajustada para manter o mesmo fator Q.

A Figura 11 mostra a conversão final do banco de capacitores de 4,5 MVar em um filtro de harmônicas e um resumo dos equipamentos que foram reaproveitados e os novos a adquirir.

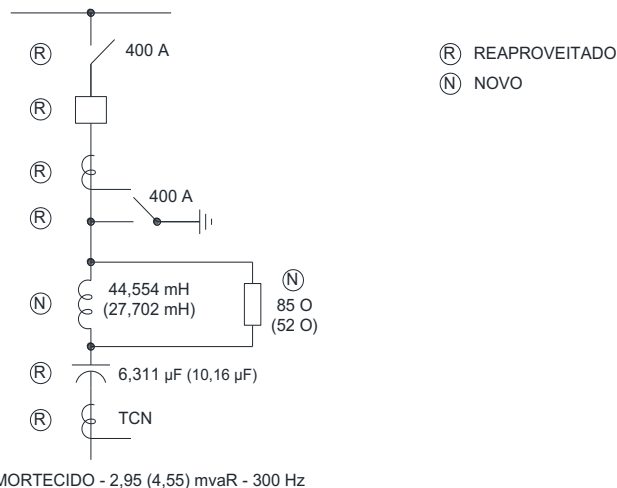


FIGURA 11 – Conversão de um banco de capacitores da barra 2 em um filtro amortecido

A Tabela 3 apresenta as características dos filtros após a conversão.

TABELA 3 – Características dos filtros após conversão

Barra	1	1	2
Tipo	sintonizado	amortecido	amortecido
Características			
Potência reativa nominal	8,28 MVar	2,76 MVar	5,52 MVar
Tensão nominal	56,95 kV	37,97 kV	37,97 kV
Tensão de operação	34,5 kV	34,5 kV	34,5 kV
Potência reativa efetiva	3,04 MVar	2,28 MVar	4,55 MVar
Frequência	60 Hz	60 Hz	60 Hz
Frequência de sintonia harmônica	135 Hz	300 Hz	300 Hz
Tipo de conexão	Dupla estrela isolada	Estrela isolada simples	Dupla estrela isolada
Proteção de desequilíbrio	Através de TC	Através de TP	Através de TC
Instalação	Externa	Externa	Externa
Capacitância nominal	6,773 $\mu$ F	5,08 $\mu$ F	10,16 $\mu$ F
Indutância por fase	205,22 mH	55,403 mH	27,702 mH
Tolerância de indutância	$\pm 3\%$	$\pm 3\%$	$\pm 3\%$
Fator de qualidade do reator	80	80	80
Resistência do resistor	-	109 $\Omega$	52 $\Omega$
Fator de qualidade do filtro na frequência de sintonia	80	1,04	1,63

## 5.0 - CONCLUSÃO

O trabalho mostrou uma solução alternativa e muito interessante do ponto de vista técnico-econômico a partir do retrofit dos bancos de capacitores existentes. Os estudos de caso mostraram uma significativa economia com o reaproveitamento de todos os equipamentos de manobra e proteção, sendo adquiridos apenas os reatores e resistores, devidamente recalculados com engenharia reversa. A economia final pode chegar a 70% no investimento.

Em alguns casos é necessário ampliar a área da subestação para possibilitar a introdução de reatores e resistores. Não foi o caso dos estudos apresentados que haviam espaços disponíveis ao lado dos bancos de capacitores.

Ao se reaproveitar as unidades capacitivas, especial atenção deve ser dada à tensão imposta pelos novos reatores. Por isso pode ser necessário alterar a configuração do banco de capacitores.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ARRILAGA, J. et alii. Power system harmonics. Chichester, J. Wiley, c 1985, 336 p.
- (2) BARBOSA, M.A. Uma avaliação dos estudos de harmônicas para parques eólicos; XVII ERIAC – Encontro Regional Ibero-Americano do CIGRÉ – Ciudad del Leste, 2017.
- (3) BARBOSA, M.A. Harmônicas: análise comparativa entre as normas do IEEE e IEC - Revista Eletricidade Moderna, p. 68-75, 2014.
- (4) BARBOSA, M.A. Mitigação de harmônicas e filtros; XIII ENIE – Encontro Nacional de Instalações Elétricas – São Paulo, 2010.



## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Marcelo de Almeida Barbosa foi graduado em Engenharia Elétrica em 1978 e mestrado em Sistemas Elétricos de Potência em 1988, ambos pela UFMG. Após 15 anos trabalhando na indústria eletrointensiva, fundou a Barbosa e Andrade Engenharia, sendo seu Diretor Técnico até então. Possui sólida experiência profissional em SEP, sendo consultor de várias empresas no Brasil. Trabalha com harmônicas desde 1988, quando defendeu sua tese de mestrado. É membro do IEEE e do CIGRÉ. Possui diversos trabalhos publicados.