



## XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

Olinda - Pernambuco – Brasil

### A experiência da ESCELSA no projeto e instalação de filtros harmônicos passivos em redes aéreas de média tensão

<b>José Rubens Macedo Jr.</b>	<b>José Wilson Resende</b>	<b>Milton Itsuo Samesima</b>
<b>ENERGIAS DO BRASIL</b>	<b>UNIV. FED. UBERLÂNDIA</b>	<b>UNIV. FED. UBERLÂNDIA</b>
jrmacedo@enbr.com.br	jwresende@ufu.br	samesima@ufu.br

#### Palavras-chave

Distorção harmônica  
Filtros passivos sintonizados  
Redes aéreas de média tensão

#### Resumo

O presente artigo descreve a experiência da ESCELSA no projeto e instalação de um filtro harmônico passivo de 5<sup>a</sup> ordem, alocado junto a um alimentador de média tensão com características predominantemente industriais. Com o advento dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST, a serem publicados pela Agência Nacional de Energia Elétrica, e a provável socialização dos custos associados à qualidade da energia elétrica, torna-se imperativa a busca por soluções de baixo custo para a atenuação de problemas relacionados com a qualidade do produto, notadamente na questão relacionada às distorções na forma de onda da tensão, caracterizando investimentos prudentes por parte das distribuidoras de forma a não onerar a modicidade das tarifas, quando das revisões tarifárias periódicas. Nesse sentido, o presente trabalho apresenta aspectos relacionados com a concepção do projeto, com os detalhes construtivos, com as medições de tensão e corrente comparativas para análise de desempenho do equipamento, assim como uma análise termográfica do arranjo. Os resultados obtidos evidenciam as vantagens técnicas associadas à instalação de filtros harmônicos passivos em redes aéreas de média tensão, comparativamente à prática comum de instalação de bancos de capacitores puros em redes de distribuição.

#### 1. Introdução

Com a crescente presença das chamadas cargas “não-lineares” nos sistemas elétricos, cujas formas de ondas das correntes são não-senoidais, crescem as preocupações com relação às distorções nas formas de onda da tensão ao longo das redes elétricas. Estas cargas, no âmbito dos consumidores residenciais, são constituídas, principalmente, por microcomputadores, fornos de microondas, televisores e demais equipamentos portadores de fontes chaveadas (aparelhos de som, tocadores de DVD, carregadores de baterias para telefones celulares, etc.), assim como as cada vez mais presentes lâmpadas fluorescentes compactas.

No sentido de se reduzir os efeitos destas cargas nas redes elétricas, a ESCELSA, de forma pioneira no país, projetou e instalou, no ano de 2002, um filtro harmônico sintonizado de 5ª ordem no lado de baixa tensão de um transformador de distribuição (45 kVA, 11,4 kV/220V) atendendo cargas tipicamente residenciais. Como resultado do referido projeto foi possível reduzir as correntes harmônicas que vinham dos consumidores alimentados por este transformador rumo ao lado de média tensão, reduzindo-se as perdas técnicas no segmento, proporcionando uma elevação dos níveis de tensão, diminuindo-se o carregamento do transformador, assim como melhorando em muito a forma de onda da tensão de fornecimento. Tal equipamento continua operando satisfatoriamente até os dias atuais [1] [2].

Por outro lado, no que se refere aos consumidores industriais, suas cargas não-lineares mais freqüentes são constituídas, essencialmente, por conversores CA-CC (retificadores e inversores, para as mais variadas aplicações), fornos a arco, fornos a indução, cicloconversores, etc. De uma maneira geral, os consumidores industriais encontram-se conectados em redes aéreas de média e alta tensão, as quais, normalmente também possuem bancos de capacitores instalados. A presença de bancos de capacitores puros (sem reatores de desintonia) nestas redes podem, em conjunto com as correntes harmônicas produzidas pelos próprios consumidores industriais, causar ressonâncias em paralelo ou em série, conforme abordado em trabalhos recentemente publicados [3], gerando prejuízos financeiros e, principalmente, comprometendo a segurança das pessoas.

Finalmente, o presente artigo descreve detalhes do projeto e da instalação de um filtro passivo sintonizado de 5ª harmônica, porém, agora instalado em uma rede aérea de média tensão em 11,4 kV. A freqüência de 5ª harmônica, inclusive, é aquela com maior abrangência nas redes de distribuição de energia elétrica [1] [2] [3].

## 2. O projeto desenvolvido

A figura 1 mostra o diagrama trifilar do circuito relativo ao filtro desenvolvido. O seccionamento do filtro se dá através de uma chave tripolar tipo *Omni-Rupter* com operação sob carga. A escolha do local está diretamente associada à presença de um considerável conteúdo de Distorção Harmônica de Tensão de quinta ordem ( $DIT_5\%$ ). As tensões nominais fase-fase e fase-neutra desta barra, são, respectivamente,  $V_n(f-f) = 11,4$  kV e  $V_n(f-n) = 6,58$  kV.

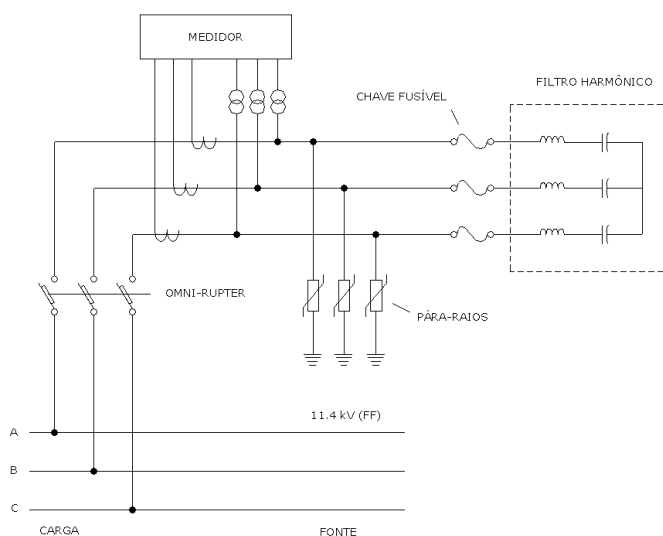


Figura 1 – Diagrama trifilar do circuito do filtro.

Para a elaboração do projeto do filtro foi utilizado um programa computacional, desenvolvido na Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, especificamente para projetos de filtros harmônicos passivos sintonizados e amortecidos [4]. Sabe-se que os bancos de capacitores, quando em operação, podem ter suas capacitâncias alteradas ao longo dos anos. Isso pode conduzir um filtro sintonizado à dessintonia. Ou seja, ele poderá se tornar, na frequência de interesse para sua filtragem, uma impedância capacitiva, a qual, em paralelo com a impedância do sistema elétrico (que em sistemas de distribuição, via de regra, é indutivo para a maioria das frequências) poderá provocar ressonâncias paralelas em frequências presentes na rede.

Diante disso, para se minimizar os riscos com futuros problemas eventuais relacionados com ressonâncias, o filtro objeto deste trabalho foi projetado na sintonia da ordem harmônica 4,9 (294 Hz). Isso faz com que, na frequência de 5ª harmônica (300 Hz), a impedância do filtro seja de característica indutiva, minimizando efetivamente os riscos de ressonâncias. Esse fato pode ser constatado na figura 2(a), a qual mostra as impedâncias harmônicas finais, em módulo e fase, do filtro projetado. Nota-se aí que, na 5ª harmônica, o ângulo da impedância do filtro já está próximo de  $+90^\circ$ .

Desta forma, caso o banco de capacitores venha futuramente a apresentar alterações em sua capacitância, por motivos diversos, existirá uma margem de segurança no sentido de se manter o filtro com características indutivas para a frequência de 300 Hz (5ª harmônica). Ou seja, nestas condições adversas, o filtro não se transforma, de imediato, de uma impedância indutiva ou resistiva para uma impedância capacitiva. Isso de fato aconteceria caso o filtro fosse originalmente projetado para a sintonia exata em 300 Hz.

Por outro lado, a figura 2(b) mostra que o filtro assim projetado (sintonizado na ordem harmônica 4,9) apresenta uma ressonância paralela em torno da ordem harmônica 4,6. Isso, no entanto, não é um problema grave para o presente projeto, pois, nas medições previamente realizadas na barra de conexão do filtro, não se verificaram distorções de tensão relevantes em ordens harmônicas não-inteiras (denominadas inter-harmônicas) compreendidas entre as ordens 4 e 5. No entanto, fica aqui a ressalva de que, em sistemas elétricos onde haja a presença de cargas como fornos a arco, que causam rápidas flutuações de tensão, ou ainda de cicloconvertidores, poderão surgir frequências inter-harmônicas coincidentes com as ordens de anti-ressonância dos filtros, podendo ocorrer então ressonâncias paralelas entre o filtro e o sistema elétrico equivalente.

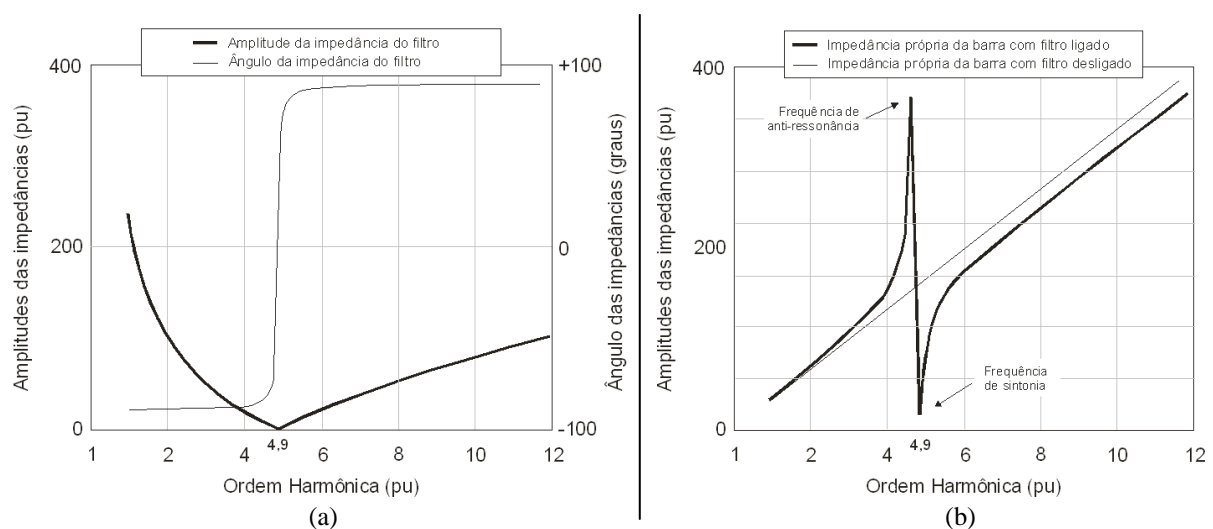


Figura 2- (a) Impedâncias harmônicas, em módulo e fase, do filtro projetado;  
(b) Impedância própria da barra, com e sem o filtro.

As diretrizes do projeto visaram, prioritariamente, a redução da distorção harmônica individual de tensão de 5ª ordem (DIT<sub>5%</sub>) na barra onde o filtro seria instalado. Em consequência disso, certamente haveria a conseqüente redução da distorção harmônica total de tensão (DTT%). Ainda em nível de projeto, deve ser frisado que a determinação dos valores finais para a potência e tensão nominal do banco de capacitores buscou atender aos requisitos de suportabilidade dos capacitores, estabelecidos por normas internacionais [5]. Estas suportabilidades se referem à corrente eficaz, tensão eficaz, tensão de pico e potência reativa produzida, as quais mostradas na Tabela 1.

Tabela 1: Limites de suportabilidade para bancos de capacitores [5]

Limite de corrente eficaz no capacitor	$I_{C(RMS)} \leq 1,8 \times I_{C(1n)}$
Limite de tensão eficaz sobre o capacitor	$V_{C(RMS)} \leq 1,1 \times V_{C(1n)}$
Limite de tensão de pico sobre o capacitor	$V_{C(PICO)} \leq 1,2 \times \sqrt{2} \times V_{C(1n)}$
Limite de potência reativa do capacitor	$Q_{C(RMS)} \leq 1,35 \times Q_{CAP}$

A Tabela 2 apresenta os parâmetros finais do filtro desenvolvido, para as condições de projeto, tais como: correntes harmônicas circulando no ramal antes da presença do filtro, nível de curto-circuito da barra, distorções harmônicas de tensão antes da presença do filtro e distorções harmônicas de tensão objetivadas após a energização do filtro, etc.

Tabela 2 - Parâmetros finais do filtro projetado

GRANDEZA	CAPACITOR	REATOR	RESISTOR
Capacitância	8,35 $\mu$ F	-	-
Indutância	-	35,07 mH	-
Resistência	-	-	1,30 $\Omega$
Reatância capacitiva	-j 317,4 $\Omega$	-	-
Reatância indutiva	-	j 13,22 $\Omega$	-
Tensão fundamental (f-f)	11,89 kV	0,49 kV	0,049 kV
Tensão eficaz (f-f)	12,11 kV	2,44 kV	0,068 kV
Potência fundamental	409 kVAr	18,5 kVAr	1,81 kW
Potência eficaz	462 kVAr	155,9 kVAr	3,53 kW
Corrente fundamental	21,64 A		
Corrente eficaz	30 A		

Para a classe de tensão do ramal em questão (11,4 kV), o limite da tensão eficaz *fase-neutro*, entre os terminais dos capacitores (que são conectados em Y isolada) é de  $12,54 \text{ kV} / \sqrt{3}$ . Por outro lado, conforme a Tabela 2 indica, ao final dos estudos relativos ao projeto, a tensão eficaz *fase-neutro* final, obtida nos terminais do banco de capacitores, foi de  $12,11 \text{ kV} / \sqrt{3}$ , portanto, inferior ao limite informado acima.

No entanto, com o intuito de se elevar a margem de segurança para o projeto piloto, os bancos de capacitores foram construídos na classe de tensão *fase-neutro* de  $13,8 \text{ kV} / \sqrt{3}$  (cujo correspondente limite de tensão eficaz *fase-neutro* é de  $15,18 \text{ kV} / \sqrt{3}$ ). Nesta classe de tensão,

a potência nominal trifásica do banco de capacitores (em 60 Hz) seria de 600 kVAr. Já na tensão de operação de 11,4 kV, a potência trifásica fundamental desenvolvida pelos capacitores seria de 409 kVAr. Estas potências reativas, no entanto, não serão obtidas na prática, pois estes bancos são ligados em série com os reatores, conforme a seguir será mostrado.

Por se tratar de um arranjo em que capacitores e reatores estão conectados em série, em uma barra cuja tensão *fase-neutro* é de  $11,4\text{ kV}/\sqrt{3}$ , tem-se que a tensão entre os terminais do capacitor será maior do que esse valor. Isto é uma consequência física da teoria de Circuitos Elétricos: as tensões em capacitores e reatores são defasadas de  $180^\circ$ . Para a tensão *fase-neutro*, aplicada ao ramo série “Capacitor-Reator”, de  $11,4\text{ kV}/\sqrt{3}$ , o valor para a tensão no capacitor em questão é de  $11,89\text{ kV}/\sqrt{3}$ . A diferença entre estas duas tensões é a tensão entre os terminais dos reatores, cujo valor será de  $0,49\text{ kV}/\sqrt{3}$ .

Com base nessas informações, pode-se agora calcular a verdadeira potência reativa gerada pelo banco de capacitores trifásico, quando o mesmo faz parte do filtro sintonizado. Esta potência será calculada a partir da tensão efetivamente aplicada ao banco de capacitores, cujo valor, conforme a Tabela 2, é de  $11,89\text{ kV}/\sqrt{3}$ , e da reatância capacitiva do capacitor. A potência trifásica assim gerada pelo banco de capacitores será a seguinte:

$$Q_{\text{FILTRO}} = \frac{(11,89\text{ kV})^2}{317,4} = 445,4\text{ kVAr} \quad (1)$$

De forma semelhante, a potencia trifásica reativa líquida disponibilizada pelo filtro para a rede, na tensão de  $11,4\text{ kV}/\sqrt{3}$ , será dada a partir da reatância líquida do ramo, conforme a seguir.

$$Q_{\text{FILTRO LIQ}} = \frac{(11,4\text{ kV})^2}{(317,4 - 13,22)} = 427,24\text{ kVAr} \quad (2)$$

A diferença entre estas duas potências reativas será a parcela absorvida pelos reatores (18, 16 kVAr).

Do exposto acima conclui-se que, no que concerne a potência reativa gerada para a rede, por um determinado banco de capacitores, a contribuição será maior quando o banco de capacitores pertence a um arranjo de filtros sintonizados do que quando o banco está atuando isoladamente.

### 3. Detalhes construtivos do filtro

A figura 3 ilustra o desenho esquemático da estrutura construtiva do filtro já posicionado em no poste.

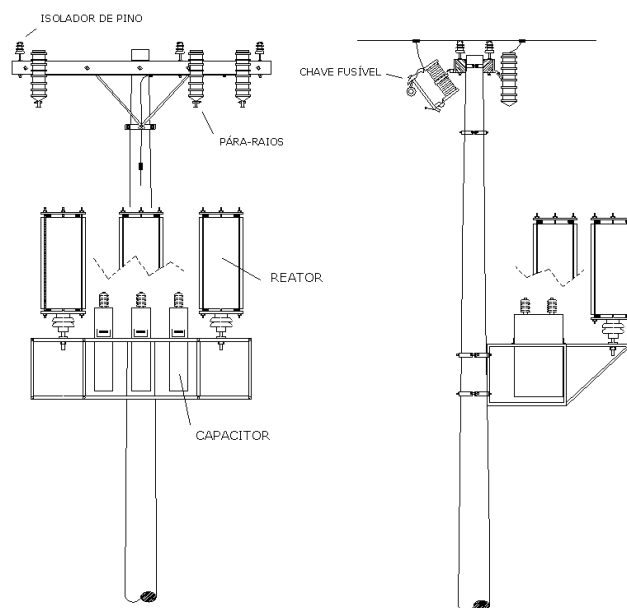


Figura 3 – Desenho esquemático da estrutura construtiva do filtro.

Uma vez executada a instalação do filtro de acordo a figura 3, o resultado final pode ser observado através das fotos ilustradas na figura 4.



Figura 4 – Fotos do filtro instalado.



Figura 5 - (a) Chave de manobra tripolar, (b) Conjunto TP – TC – Medidor, (c) Leitura do medidor.

A figura 5(a) destaca a chave de manobra tripolar *Omni Rupter* (que conecta o filtro à rede). Já a figura 5(b) ilustra o conjunto TP-TC usado para tornar as correntes e tensões possíveis de serem lidas pelo medidor/registrador de parâmetros de qualidade da energia elétrica (ver detalhe deste medidor na figura 5(c)).

#### 4. Resultados das medições efetuadas antes e depois da instalação do filtro

A figura 6 apresenta os resultados das distorções harmônicas individuais de tensão de ordem 5, com o filtro desligado e com o filtro ligado. O período de medição compreende um dia completo antes e após a energização do equipamento. Conforme pode ser observado, a redução obtida foi significativa: com o filtro desligado, estas distorções variam desde 1,75% até valores acima de 4%. Já com o filtro ligado à rede elétrica, as distorções harmônicas de tensão de 5ª ordem não ultrapassam um valor máximo de 1,7%.

Na parte inferior da figura 6 tem-se um gráfico que destaca as variações percentuais das reduções obtidas na distorção harmônica individual de tensão de ordem 5, com a presença do filtro, a cada 10 minutos. A redução média obtida para o indicador  $DIT_5\%$ , foi da ordem de 51,0%.

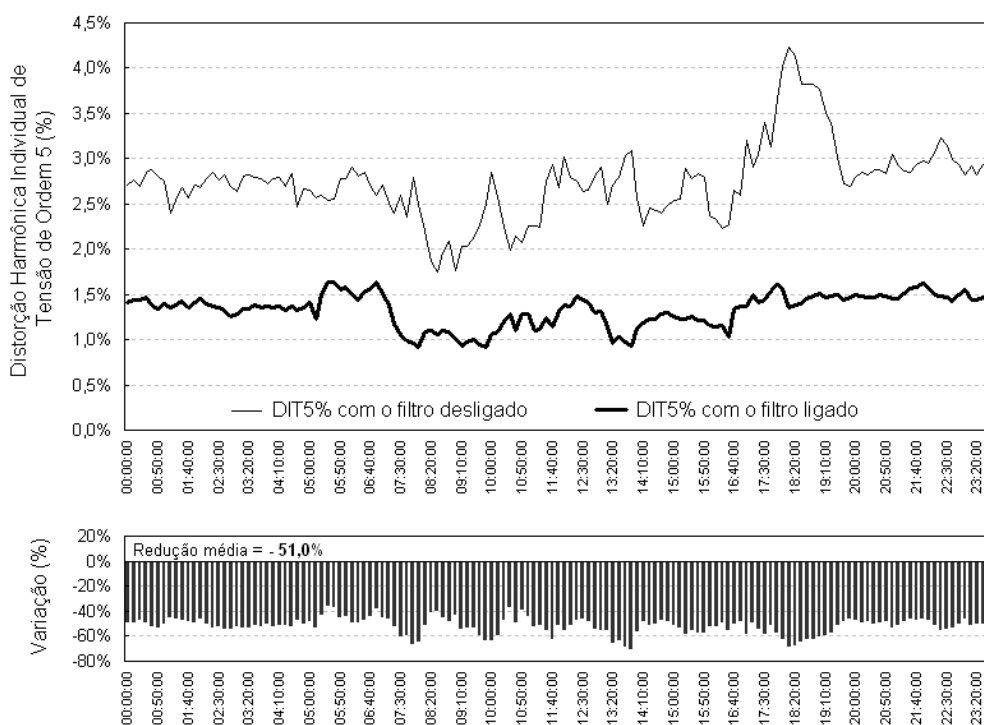


Figura 6 – Distorção harmônica individual de tensão de 5ª ordem ( $DIT_5\%$ ).

A figura 7, a seguir, ilustra o comportamento da distorção harmônica total de tensão, também com o filtro ligado e desligado. Comparando-se a figura 5 com a figura 6, nota-se uma grande semelhança entre ambas. Isso comprova que a 5ª harmônica é a ordem predominante na barra considerada. O impacto positivo da presença do filtro, também para o indicador  $DTT\%$ , fica evidente com a redução média de 42,3%, obtida com a energização do filtro.

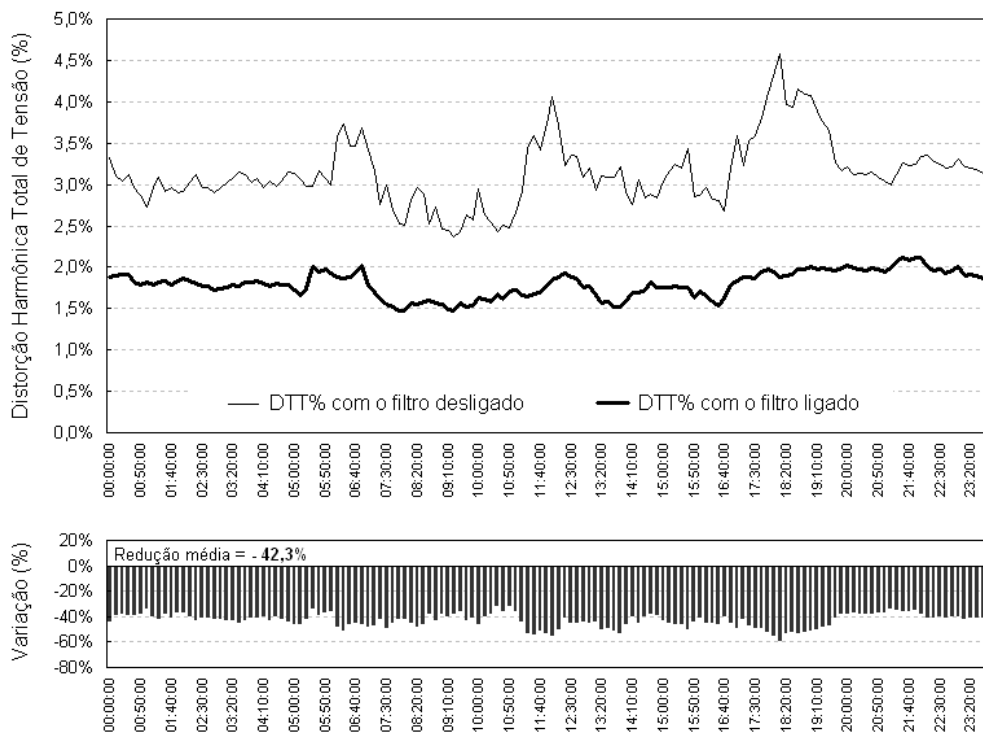


Figura 7 – Distorção harmônica total de tensão (DTT%)

A presença do filtro harmônico de 5<sup>a</sup> ordem também contribuiu para uma redução, ainda que discreta, na distorção harmônica individual de tensão de 7<sup>a</sup> ordem, conforme ilustra a figura 8. A redução média obtida para esta harmônica foi de 15,4%.

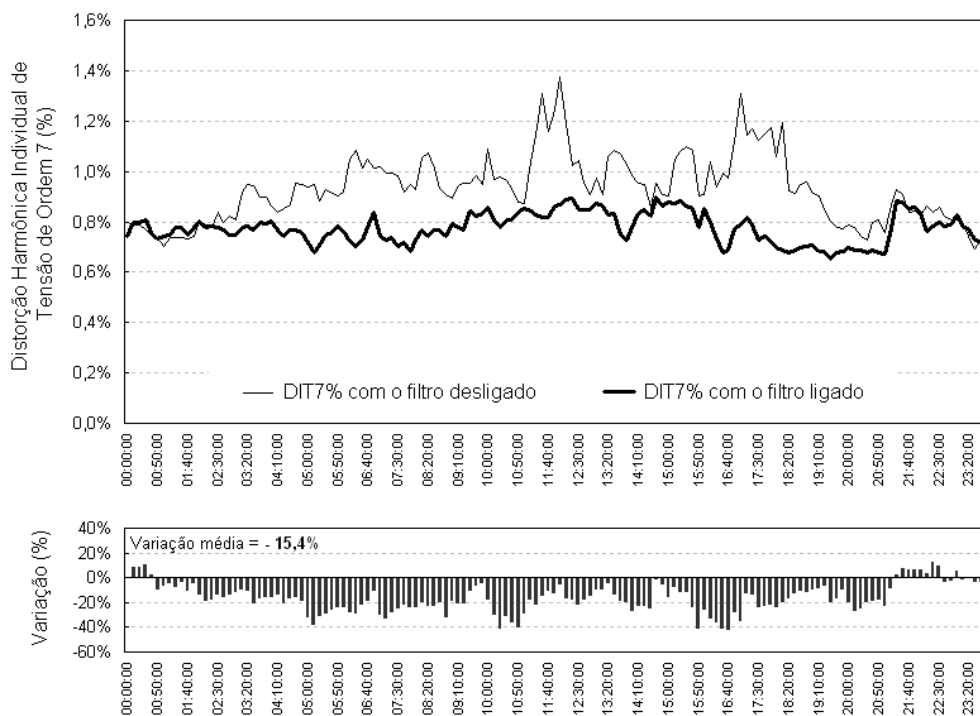


Figura 8 – Distorção harmônica individual de tensão de 7<sup>a</sup> ordem (DIT<sub>7</sub>%)



Para o caso da distorção harmônica individual de tensão de 3ª ordem, de acordo com a figura 9, a presença do filtro de 5ª Ordem, ainda que timidamente, também contribuiu para a redução da mesma.

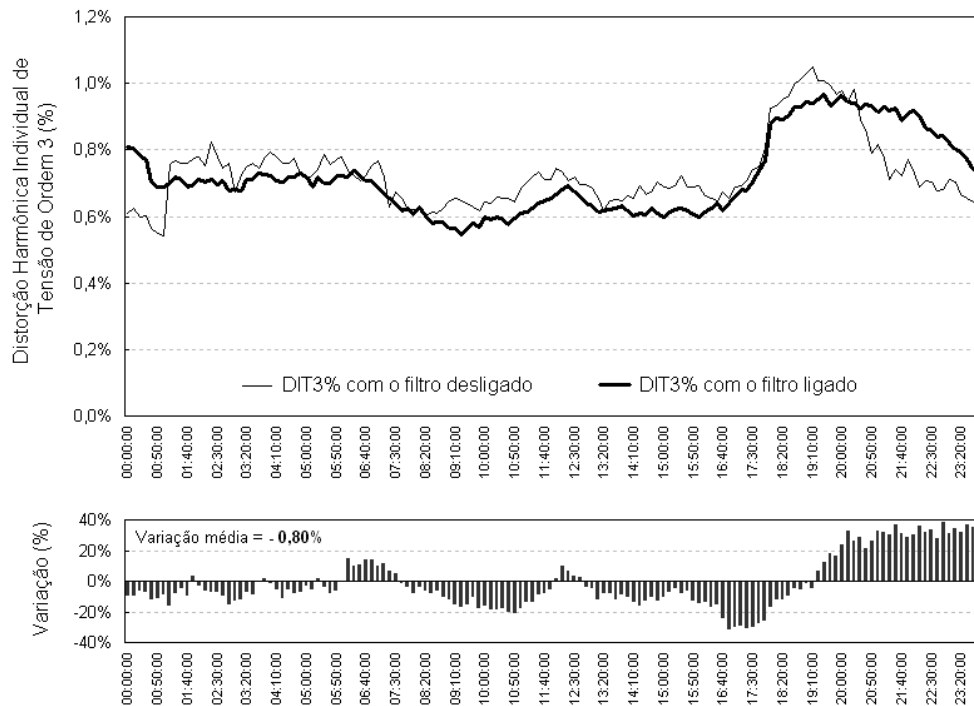


Figura 9 – Distorção harmônica individual de tensão de 3ª ordem (DIT<sub>3%</sub>)

A figura 10, a seguir, mostra a forma de onda da corrente no ramo do filtro durante um período de 63 ms, assim como o espectro em frequência associado, com discretização de 10 Hz. Neste espectro há que se ressaltar dois aspectos importantes: a eficiência da filtragem, já que a maior corrente presente refere-se à frequência de 300 Hz (5ª harmônica), e a presença de diversas correntes inter-harmônicas, com frequências não múltiplas inteiras de 60 Hz.

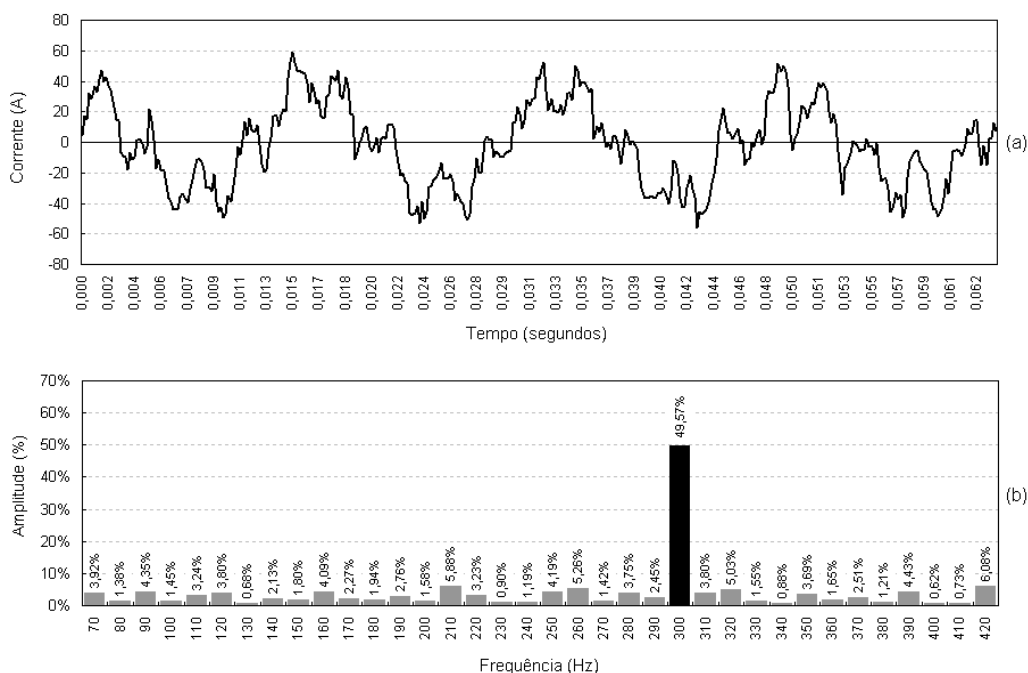


Figura 10 – (a) Forma de onda da corrente do filtro, (b) Espectro de frequências da corrente do filtro.

Uma análise da corrente do filtro, contemplando durações mais longas (24 h), pode ser observada na figura 11 (fase A apenas), a qual apresenta o comportamento das correntes eficaz, fundamental e de 5ª harmônica no ramo do filtro.

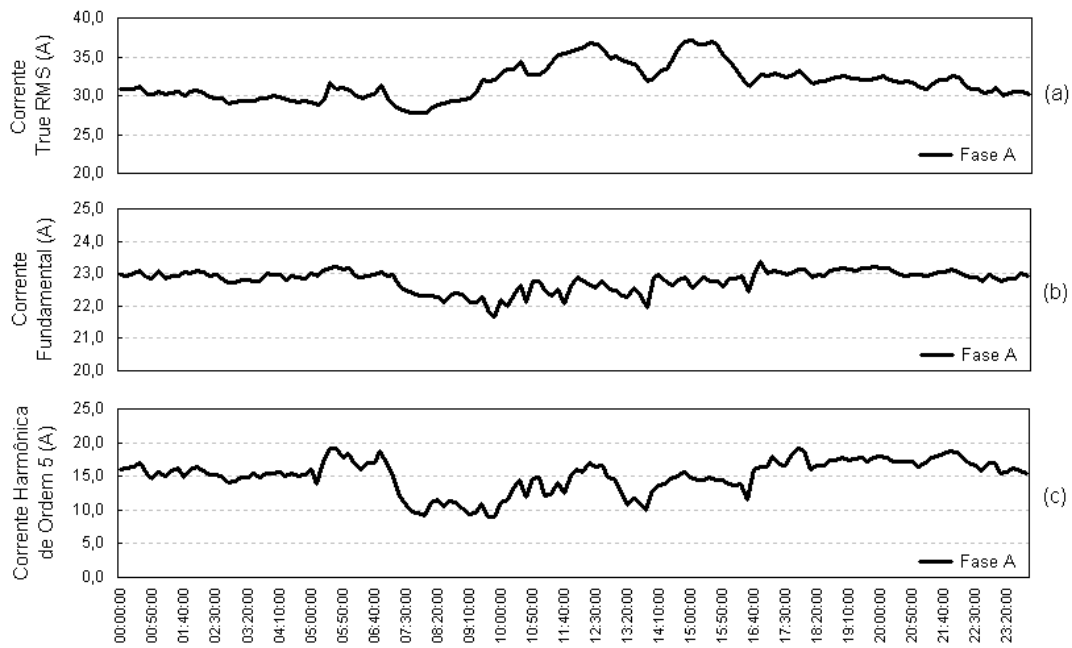


Figura 11 – (a) Corrente *True RMS* no ramo do filtro, (b) Corrente fundamental no ramo do filtro, (c) Corrente harmônica de 5ª ordem no ramo do filtro.

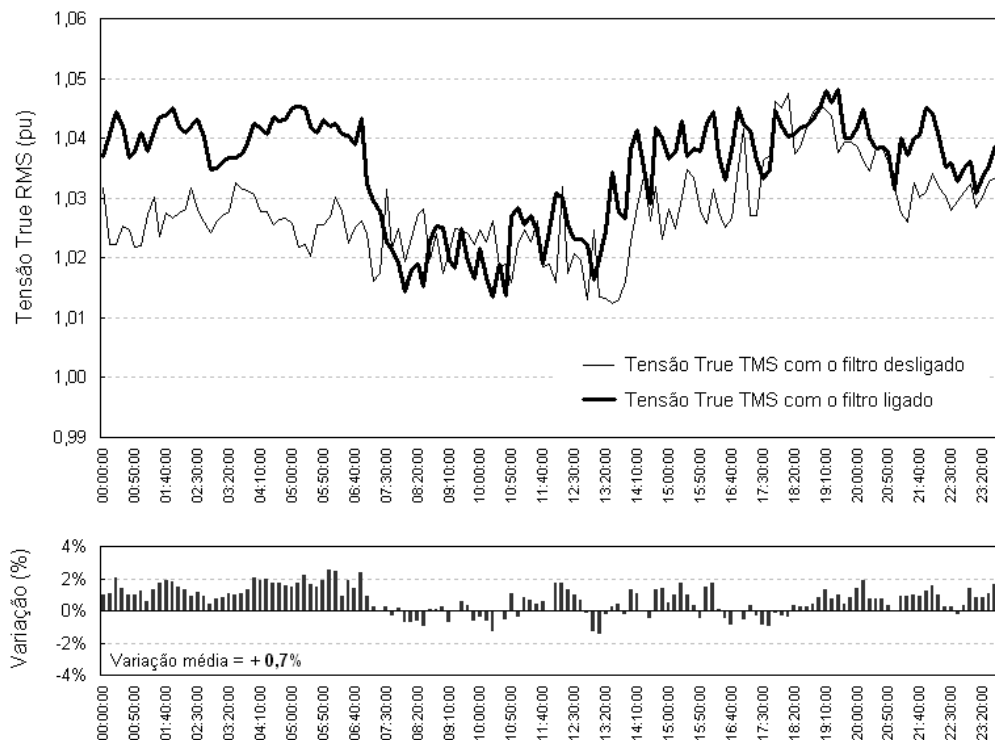


Figura 12 – Tensão *True RMS* na barra de conexão do filtro.

Como se sabe, os filtros harmônicos, além de absorverem correntes harmônicas, também são capazes de gerar potência reativa para a rede. Como consequência disso, a tensão eficaz na barra do filtro tende a apresentar elevação quando o mesmo estiver energizado. Isso pode ser

constatado na figura 12 que ilustra o comportamento do valor eficaz da tensão presente na barra do filtro, ao longo de 24h.

Como informação adicional à questão da variação da tensão eficaz ao longo de 24h, tem-se, na figura 13, o comportamento da potência reativa disponibilizada pelo filtro para a rede, ao longo deste mesmo período. Comparando-se os comportamentos das variações da tensão eficaz (na presença do filtro – figura 12) e da potência reativa (figura 13), observa-se comportamento semelhante entre ambas, ou seja, quando a tensão cai, a potência gerada pelo filtro também decresce (e vice-versa). Cabe aqui ressaltar que, por segurança, o filtro foi projetado e executado para valores nominais de 600 kVAr, na tensão de 13,8 kV.

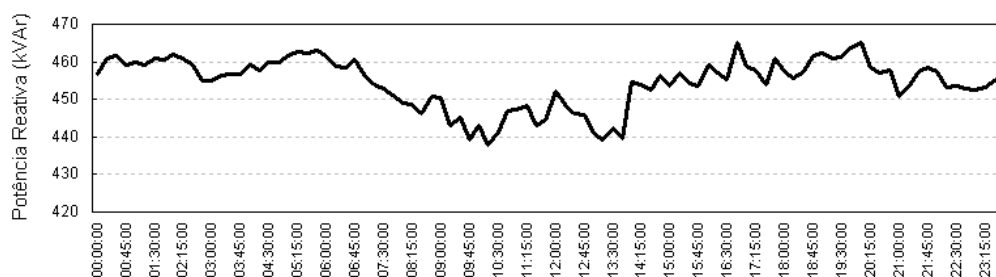


Figura 13 – Potência reativa capacitiva injetada pelo filtro.

Finalmente, a figura 14 apresenta uma imagem termográfica do filtro em operação. A temperatura média registrada nos reatores está em torno de 40 °C. Este valor é apenas +10° C acima da temperatura ambiente média do local, a qual situa-se em torno de 30° C. Considerando que os reatores foram projetados para operar com uma temperatura de +45° C acima da temperatura ambiente, pode-se concluir que os mesmos operam em condição extremamente confortável e segura.

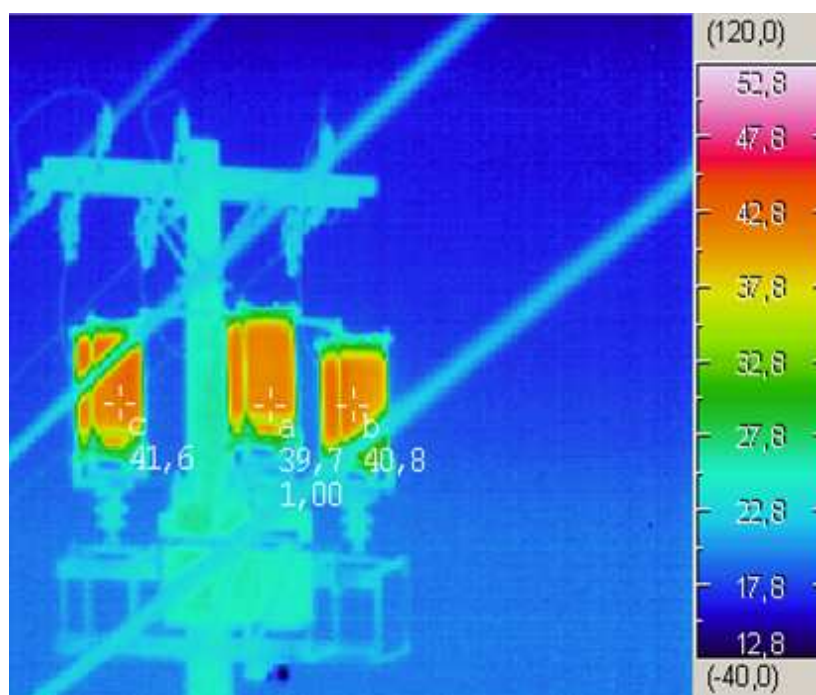


Figura 14 – Imagem termográfica do filtro em operação

## 5. Conclusões

O presente trabalho apresentou uma descrição das etapas de projeto, execução e medições relacionadas à instalação, provavelmente pioneira na América Latina, de um filtro harmônico passivo sintonizado, em redes aéreas de distribuição em média tensão.

Os resultados obtidos são bastante encorajadores no sentido de que, no futuro, quando da necessidade de instalação de bancos de capacitores em redes em média tensão, paralelamente às novas exigências regulamentadas em termos da qualidade da onda da tensão (PRODIST), se possa analisar a viabilidade técnico-econômica em se transformar esses bancos de capacitores em filtros de harmônicas.

## 6. Referências bibliográficas

[1] MACEDO Jr., J. R.; RESENDE, J. W.; SAMESIMA, M. I., “*Shunt tuned filter on the LV side of distribution systems: design and performance*”, 11<sup>th</sup> International Conference on Harmonics and Quality of Power - ICHQP, Lake Placid, NY, USA, 2004, v. 1. p. 74-82;

[2] MACEDO Jr., J. R., RESENDE, J. W.; SAMESIMA, M. I., “*Filtros harmônicos para redes secundárias de distribuição*”, Revista Eletricidade Moderna, Março de 2005;

[3] DE JESUS, N. C.; DE OLIVEIRA, H. R. P. M., “*Amplificação da distorção harmônica em sistema de distribuição*”, págs. 146-159, Revista Eletricidade Moderna, Fevereiro de 2008;

[4] RESENDE, J.W.; NASCIMENTO, R. P., “*Procedimentos para determinação de filtros harmônicos sintonizados incluindo análises de desempenho e de suportabilidade*”, VII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, Santos, SP, agosto, 2007;

[5] IEEE Standard 18-1992, *IEEE Standard for Shunt Power Capacitors*.