



VI SBQEE

21 a 24 de agosto de 2005

Belém – Pará – Brasil



Código: BEL 01 7588

Tópico: Análise, Diagnóstico e Soluções

CARACTERIZAÇÃO E MODELAGEM DE CARGAS TÍPICAS DE REDES SECUNDÁRIAS COM CONSUMIDORES DOMÉSTICOS E COMERCIAIS

J.A.POMILIO S.M.DECKMANN E.A.MERTENS L.F.S.DIAS A.R.AOKI M.D.TEIXEIRA F.R.GARCIA

DSCE/FEEC
UNICAMP

DSCE/FEEC
UNICAMP

Elektro
Eletricidade e
Serviços S.A.

Elektro
Eletricidade
e Serviços
S.A.

LACTEC

LACTEC

IESA

RESUMO

O objetivo deste artigo é demonstrar que a maior parte das cargas não lineares domésticas e comerciais apresenta características de fontes de tensões harmônicas e não de fontes de correntes harmônicas. Essa constatação é importante para fins de modelagem das cargas não lineares e explica a baixa eficácia dos filtros passivos em derivação e do aumento do nível de distorção harmônica na presença de bancos de capacitores previstos para compensação reativa. Dados de medição em laboratório e em redes secundárias confirmam esse comportamento.

PALAVRAS-CHAVE

Compensação reativa; distribuição secundária; cargas não-lineares; fontes de tensões harmônicas, filtros passivos.

1.0 INTRODUÇÃO

O uso de filtros sintonizados e de capacitores na rede secundária tem como objetivo fazer a compensação da potência reativa, melhorar o perfil de tensão ao longo do alimentador, reduzir o carregamento dos transformadores e reduzir as perdas ôhmicas na rede.

Diferentemente do que ocorre em geral com cargas não lineares industriais, que apresentam um comportamento de “fontes harmônicas de corrente”, as cargas não-lineares de uso doméstico e comercial têm um comportamento de “fontes harmônicas de tensão” [1, 2, 3, 4]. Tais cargas são constituídas, essencialmente, de aparelhos eletro-eletrônicos que possuem em sua entrada um retificador monofásico com filtro capacitivo (computadores, reatores eletrônicos sem correção de fator de potência, lâmpadas fluorescentes compactas, TVs, etc.). Por outro lado, a potência reativa em redes domésticas sofre pequena variação ao longo de uma jornada diária e está, preponderantemente, relacionada com os refrigeradores.

No entanto, na presença de cargas tipo “fontes harmônicas de tensão”, a colocação de compensadores ou filtros em derivação não é capaz de alterar significativamente a corrente que a mesma produz no restante no circuito. Ao contrário, o que ocorre é um aumento das componentes harmônicas da carga, o que confirma o seu funcionamento como fonte de tensão. Na prática, estas “fontes de tensão” não são ideais, apresentando uma certa impedância série, de sorte que pode ocorrer algum efeito de atuação do componente em derivação, mas com eficácia muito

menor do que o que ocorre com uma carga não-linear do tipo “fonte de corrente”.

A compensação da energia reativa pode ser feita por meio da instalação local de capacitores. No entanto, dada a presença de cargas não-lineares, e ainda a existência de distorções na tensão de alimentação, verifica-se uma amplificação da circulação de correntes harmônicas devido à presença desses capacitores. Uma solução para este problema seria a inclusão de um reator em série com o capacitor que possibilitaria a compensação dos reativos (frequência fundamental) sem ampliar a distorção da corrente.

2.0 ANÁLISE DE CARGAS TÍPICAS

Para efeito da análise que se segue, as cargas domésticas podem ser divididas em 3 grupos: cargas resistivas, cargas indutivas e cargas eletrônicas. Do ponto de vista de reativos e de harmônicos são as 2 últimas categorias que devem ser consideradas.

2.1 Refrigeradores: carga tipo fonte de corrente

O comportamento de um refrigerador, que é a carga indutiva mais presente em ambientes residenciais, além de implicar na demanda de potência reativa, também produz harmônicos pela distorção da corrente, como se pode observar na Figura 1. Outros aparelhos, que possuam motores ou transformadores em sua entrada, como máquinas de lavar, aparelhos de ar condicionado, ventiladores, bombas, etc. podem ser incluídos neste grupo.

As curvas mostradas na Figura 1 referem-se a um refrigerador de baixo consumo (26,6 kWh), com potência aparente de 170VA e fator de potência de 0,64 (131VAr e 108,5W). A Figura 2 mostra o espectro da corrente, cujas principais componentes são: 3^a (6,2%), 5^a (5%) e 7^a (1,5%).

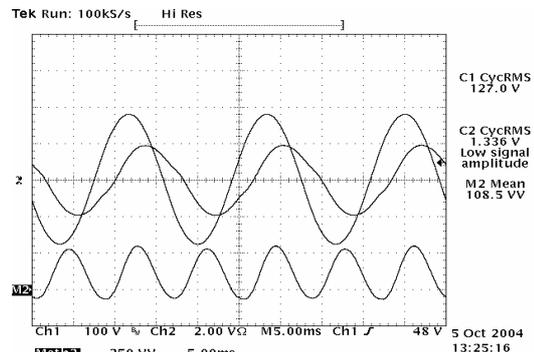


Figura 1 – Tensão, corrente e potência instantânea em refrigerador.

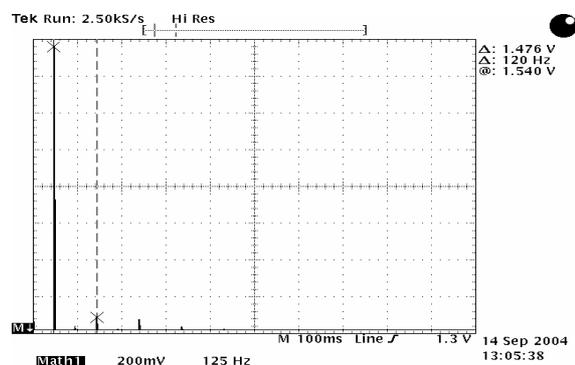


Figura 2 – Espectro da corrente do refrigerador. (0,2A/div., 125Hz/div.).

Esta distorção na corrente pode ser bem modelada por fontes de correntes harmônicas, ou seja, a inclusão de um filtro em derivação no ponto de acoplamento da carga consegue evitar que estes harmônicos se propaguem pelo restante do circuito, como se verá na seqüência deste trabalho.

Um refrigerador de 2 portas tem um consumo médio maior que o dobro do valor anterior. Considerando um ciclo de trabalho de 1/3, tem-se um consumo médio, por domicílio, de 130VA (83W, 100VAr).

Considerem-se agora os resultados de uma medição de campo em uma rede secundária, com 141 consumidores residenciais (70% da demanda), 8 consumidores comerciais (25% da demanda) e 1 consumidor industrial (5% da demanda). Trata-se de um bairro de classe média, o que tem implicação sobre o padrão de consumo de energia elétrica. A Figura 3 mostra o comportamento da potência reativa durante o período de 1 semana de medição. Nota-se um valor base (mínimo) em torno das 6 horas da manhã, com um crescimento ao longo da manhã e decréscimo após o meio dia. O valor mínimo é perfeitamente consistente com as estimativas de consumo dos refrigeradores

domésticos. Ao longo da manhã há um aumento na potência reativa, justificável pelo uso de máquinas de lavar e outros eletrodomésticos com motores. A partir do meio do dia observa-se uma redução sistemática da potência reativa, na direção oposta ao da potência ativa, mostrada na Figura 4. Ou seja, as novas cargas adicionadas, especialmente no final da tarde e início da noite, devem possuir fator de deslocamento próximo da unidade. Poderiam ser cargas resistivas (lâmpadas incandescentes e chuveiros) ou cargas eletrônicas, como se verá na seqüência.

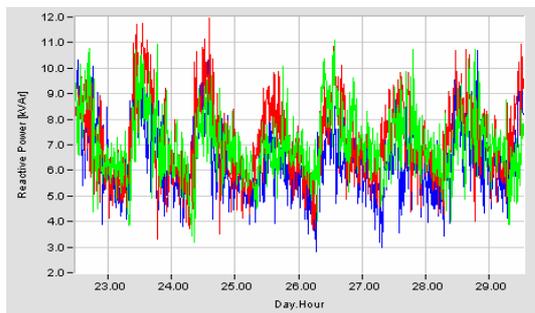


Figura 3: Potência reativa medida na saída do transformador.

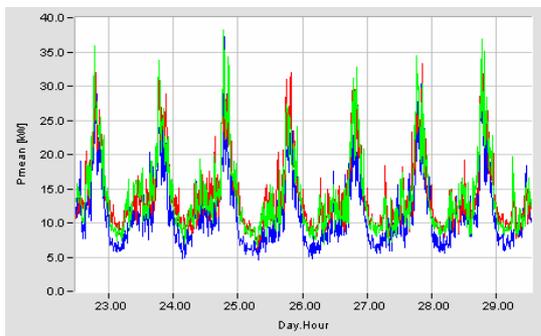


Figura 4 - Potência ativa medida na saída do transformador.

2.2 Equipamentos eletrônicos: cargas tipo fontes de tensões harmônicas

As cargas eletrônicas domésticas, tipicamente possuem um estágio retificador a diodos, com filtro capacitivo na saída. Como resultado tem-se uma corrente de entrada muito distorcida, com baixo fator de potência. O fator de deslocamento da fundamental é levemente capacitivo.

Cargas eletrônicas residenciais e comerciais típicas são televisores, lâmpadas fluorescentes compactas, reatores eletrônicos para lâmpadas

fluorescentes tubulares (sem correção de fator de potência), computadores, carregadores de bateria, etc. Em termos de consumo, a análise pode se limitar a televisores e lâmpadas compactas. Em regiões de maior poder aquisitivo, deve-se considerar também a presença de computadores e reatores eletrônicos.

Outros eletrodomésticos são de potência muito pequena (como rádio-relógio, aparelhos de segurança, carregadores de baterias), ou de uso não contínuo (forno de micro-ondas, aparelhos de som, dimmers, etc.).

A Figura 5 mostra a corrente de entrada de um aparelho de TV de 21', operando normalmente. Nota-se a distorção típica da corrente associada a um retificador com filtro capacitivo. Na mesma figura tem-se as medidas dos valores eficazes da tensão, da corrente e da potência ativa. A potência aparente vale $S=85,54VA$.

Com tais grandezas pode-se determinar o fator de potência, que é de 0,63. A potência consumida, 54W, pode ser considerada típica para televisores deste porte. Este valor se altera, principalmente com a área da tela. Pode-se supor que um aparelho de 29', tendo uma área de tela com o dobro daquela do aparelho de 21', consuma cerca de 100W. Uma TV de 14' deve consumir cerca de 30W.

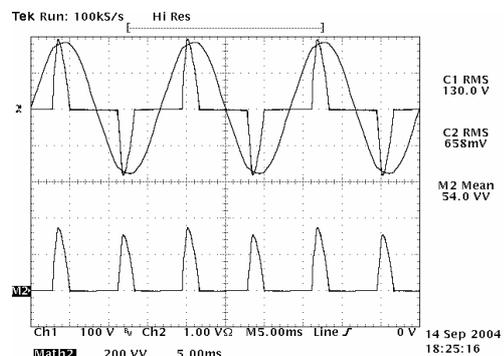


Figura 5: Tensão, corrente e potência de aparelho de TV.

Para uma lâmpada compacta, pode-se considerar uma potência média de 10W. Um computador, incluindo o monitor, apresenta um consumo médio em torno de 100W.

Reatores eletrônicos para lâmpadas tubulares apresentam-se em variada faixa de potência. Acima de 60W, por norma, devem possuir alto fator de potência. Para os de potência inferior, em geral a corrente absorvida da rede é como a mostrada na

Figura 5. Pode-se considerar uma potência média de 30W por reator.

A Figura 6 mostra o espectro da corrente (valor eficaz das componentes harmônicas). Como esperado, tem-se expressiva presença de componentes ímpares. A componente fundamental da corrente está adiantada de 14,4° em relação à tensão.

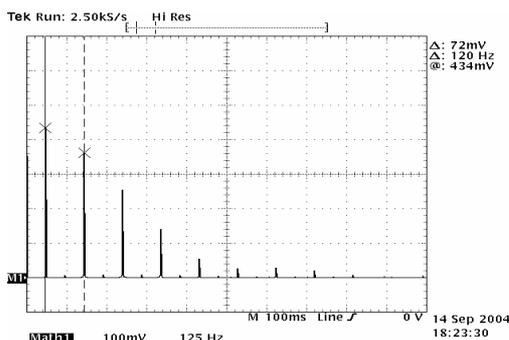


Figura 6: Espectro de corrente da TV valor eficaz das componentes.

Em um retificador com filtro capacitivo, como mostrado na Figura 7, a tensão na entrada do retificador é imposta pelo capacitor do lado CC durante o intervalo de tempo em que os diodos estiverem em condução, conforme mostrado em [1, 5]. Isto implica que a carga não linear não deve ser modelada como uma fonte de corrente, mas sim como uma fonte de tensão, como mostra a Figura 8.

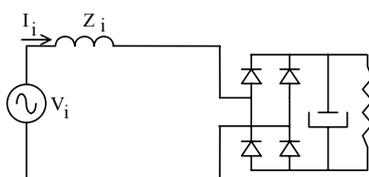


Figura 7 – Circuito retificador típico de aparelhos eletrônicos.

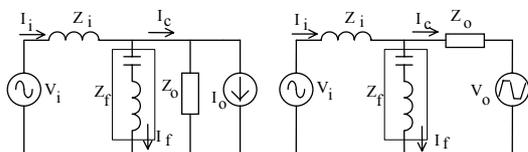


Figura 8 – Modelagem de cargas não-lineares como fonte de corrente (esq) e fonte de tensão (dir).

No caso de uma carga que possa ser modelada como uma fonte de corrente [6], a relação entre a corrente da carga e a corrente da fonte CA é dada por um divisor de corrente. Daí a conclusão de que a eficácia da filtragem depende da impedância da rede.

$$\frac{I_i}{I_c} = \frac{Z_f}{Z_f + Z_i} \tag{1}$$

Já no caso de uma carga com comportamento de fonte de tensão, a eficácia do filtro LC, conectado em paralelo com a carga, pode ser expressa pela admitância equivalente [1]:

$$\frac{I_i}{V_o} = \frac{Z_f}{Z_o Z_i + Z_o Z_f + Z_i Z_f} \tag{2}$$

Esta equação mostra quanto uma componente harmônica de tensão imposta pela carga produz de corrente na rede. A compensação depende tanto da impedância da carga, Z_o , quanto da fonte CA (Z_i). Se Z_o for nula (a carga se comporta como uma fonte de tensão ideal), o filtro em paralelo é inútil. O mesmo ocorre se a impedância da rede for nula.

Analisemos agora o comportamento da terceira harmônica ao longo do período de medição. Foi visto que a corrente medida do refrigerador apresenta cerca de 6% de 3ª harmônica, ou seja, um valor absoluto de aproximadamente 70 mA. Considerando aparelhos com consumo maior do que o ensaiado, este valor se eleva para 175 mA. Com um ciclo de trabalho de 1/3, a participação média por refrigerador é de 60mA. Havendo 141 domicílios, igualmente divididos entre as 3 fases, isto deve representar 2,8 A por fase de terceira harmônica. Durante as madrugadas tais componentes são dominantes, como se vê na Figura 9.

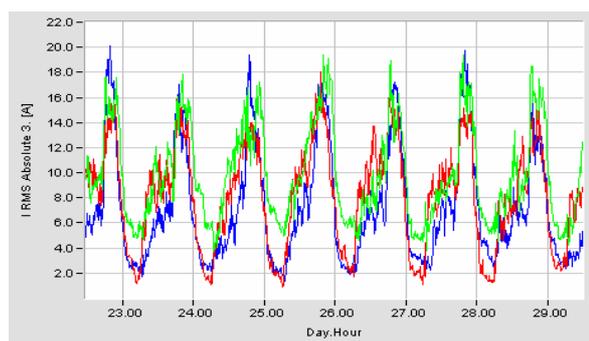


Figura 9 – Terceiro harmônico da corrente.

Supondo a presença de um televisor e de 3 lâmpadas compactas, tem-se uma potência similar à do refrigerador (hipotético) considerado (80 W). Tais cargas produziram uma componente de 3ª harmônica de 700 mA, ou seja, mais de 7 vezes a distorção produzida pelo refrigerador. Muito

provavelmente nem todos os domicílios estarão com estas cargas ligadas no horário noturno. Caso 65% dos aparelhos estejam ligados (valor consistente com medições de índice de audiência de TV em horário noturno, em finais de semana), isto indica que deve haver 15 A (por fase), além do relacionado à geladeira. Tais valores também são coerentes com as medições.

Isto mostra que a distorção da corrente é majoritariamente determinada pelas cargas tipo retificador, e apenas marginalmente (10 a 20%) pelos refrigeradores e outras cargas deste tipo (motores). Também explica a redução da potência reativa total (Figura 3), já que as cargas não-lineares do tipo retificador apresentam leve característica capacitiva em termos da fundamental. O crescimento relativo da 3ª harmônica é menor que o da potência ativa, o que indica o aumento das cargas resistivas no final da tarde e começo da noite.

2.3 Carga em rede com consumidores comerciais

Neste caso, as medições de referem a uma rede secundária radial, relativamente curta, porém com concentração de cargas comerciais (80% da carga) e industriais (11% da carga). Quase 65% das cargas comerciais estão conectadas em uma mesma barra. Trata-se de um alimentador urbano, com alta presença de cargas não-lineares típicas de escritórios de serviços (iluminação com reatores eletromagnéticos e eletrônicos, computadores, impressoras, condicionadores de ar, etc.).

Das medições foram extraídos alguns resultados significativos para a análise do tipo de carga conectada. Por exemplo, a carga total está razoavelmente bem distribuída (Figura 10). No entanto, as cargas não lineares estão concentradas em duas fases, como se pode concluir da análise da Figura 11.

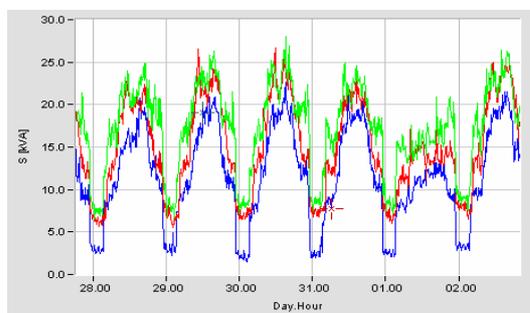


Figura 10. Potência aparente no secundário

do trafo na rede comercial.

A 3ª harmônica aumenta durante o horário comercial apenas em duas fases, sugerindo cargas bifásicas não lineares (reatores sem correção de fator de potência). Comportamento análogo se nota também nas demais componentes harmônicas da corrente. Tal desequilíbrio leva a uma propagação de componentes harmônicas da corrente para o lado de alta tensão do transformador, o que resultará na distorção da tensão no sistema de distribuição para outras cargas.

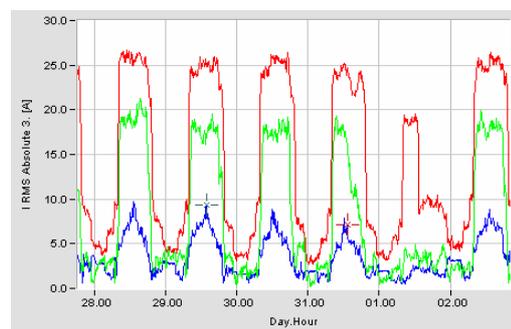


Figura 11. Terceiro harmônico da corrente da carga comercial.

3.0 COMPENSAÇÃO PASSIVA EM REDES RESIDENCIAIS E COMERCIAIS

As empresas de distribuição de energia elétrica estão interessadas na aplicação de filtros passivos ou de compensação capacitiva nas redes com o objetivo de, ao melhorar o perfil de tensão, postergar investimentos nestas redes [7, 8, 9, 10]. Em ambos os tipos de compensação, o montante de reativos capacitivos é dimensionado de modo a compensar a parcela “base” de potência reativa (como indicado na Figura 3). Como benefícios econômicos, têm-se a redução de perdas no transformador e na rede, mas, principalmente, uma elevação da demanda por conta do aumento da tensão para os consumidores. A Figura 12 mostra a alteração na potência reativa medida no transformador com compensação com um banco capacitivo (17,5 kVAr), enquanto a Figura 13 mostra o efeito sobre a tensão na saída do transformador.

No entanto, dada a natureza de fonte de tensão harmônica das cargas não lineares eletrônicas, a inclusão de elementos passivos em derivação não necessariamente leva a uma redução da distorção da corrente e da tensão. Ao contrário, pode-se esperar uma amplificação de componentes em

circulação pelo sistema [4]. Adicionalmente, na presença de componentes harmônicas na tensão no lado de alta tensão (primário), pode ocorrer uma amplificação das correntes harmônicas devido à ressonância formada, essencialmente, pelo banco capacitivo e a reatância de dispersão do transformador. A Figura 14 mostra que, de fato, tem-se um aumento na THD da tensão com a instalação do banco capacitivo. A THD média de tensão se elevou de 2% para 2,5%, enquanto a de corrente aumentou de 8,5% para 10%.

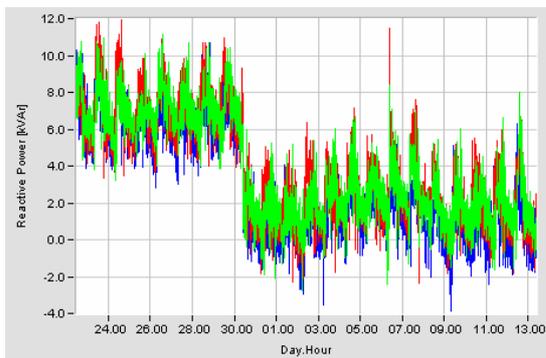


Figura 12 – Efeito da compensação de reativos em rede predominantemente residencial.

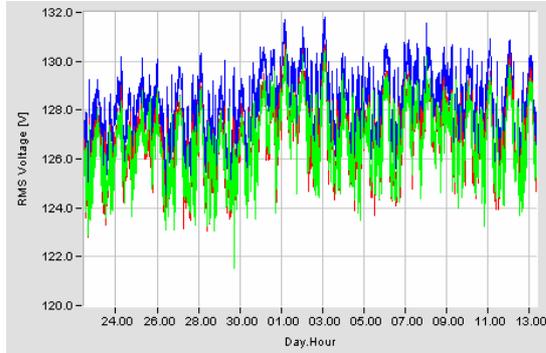


Figura 13 – Efeito da compensação capacitiva na tensão junto ao transformador.

Isto somente é explicado pela presença de cargas não lineares do tipo fonte de tensão, conforme já foi discutido e demonstra que este tipo de solução deve ser usado com cuidado e apenas em situações em que a presença deste tipo de carga represente uma parcela relativamente pequena da demanda, o que é o caso da rede residencial.

No caso da rede comercial, para minimizar o efeito amplificador da simples colocação de um banco capacitivo, foi instalado um filtro LC dessintonizado (162 Hz), em derivação, com a devida

capacidade de compensação de reativos, mas com uma impedância crescente com a frequência, de modo a não ampliar a circulação de correntes harmônicas, embora sem capacidade de reduzi-las, como mostra a Figura 15 para o 3º harmônico.

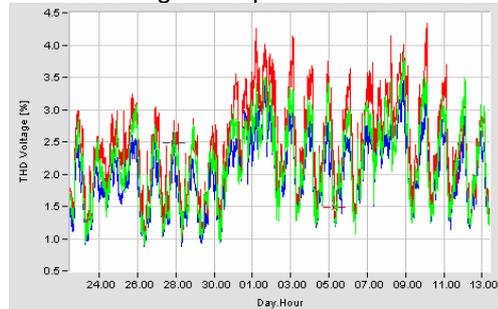


Figura 14 – THD da tensão antes e após a instalação do banco capacitivo.

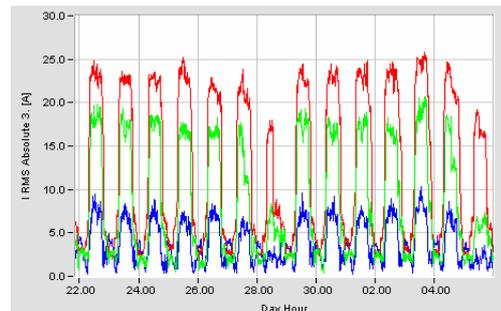


Figura 15 – Valor absoluto do 3º harmônico antes e após a instalação do filtro dessintonizado.

4.0 CONCLUSÕES

Os equipamentos eletro-eletrônicos de uso dominante em áreas residenciais e comerciais possuem, em sua interface com a rede, retificadores a diodos com filtro capacitivo. Tais dispositivos comportam-se como cargas não-lineares do tipo fonte de tensão harmônica, o que implica na ineficiência de dispositivos em derivação para a filtragem dos harmônicos.

Nas condições anteriores, a colocação de bancos capacitivos para a compensação de reativos e, conseqüente melhora no perfil de tensão ao longo da rede de baixa tensão leva a uma ampliação da distorção harmônica da tensão e da corrente, de modo que deve ser usada com muito cuidado.

Em redes secundárias que já possuam uma elevada THD de corrente, como é o caso de consumidores comerciais, a simples inclusão de bancos capacitivos pode levar a níveis inaceitáveis de harmônicos. Nestes casos deve-se utilizar

reatores em série com o banco capacitivo de modo a minimizar a ampliação dos harmônicos de corrente, tomando-se o cuidado para evitar ressonâncias com o lado de alta tensão.

5.0 REFERÊNCIAS

- [1] Peng, F.Z., Su, G-J and Farquharson, G. (1999). *A series LC filter for harmonic compensation of AC Drives*. Proc. of the IEEE Power Electronics Specialists Conference - PESC'99, Charleston, USA, June 1999.
- [2] Deckmann, S.M.; Pomilio J. A.; Mertens, E.A. e Dias, L.F.S. (2004): "Uso De Filtros Passivos Em Redes De Distribuição Com Cargas Não-Lineares" XV Congresso Brasileiro de Automática, Gramado, RS, 21 a 24 de setembro de 2004.
- [3] Deckmann, S.M.; Pomilio J. A. (2005): "Characterization and compensation for harmonics and reactive power of residential and commercial loads", Anais do 8º Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência, COBEP 2005, Recife, 14-17 de junho de 2005.
- [4] Deckmann, S.M.; Pomilio J. A.; Mertens, E.A. e Dias, L.F.S., Aoki, A R., Teixeira, M.D., Garcia, F.D.(2005). *Compensação Capacitiva em Redes de Baixa Tensão com Consumidores Domésticos: impactos no nível de Tensão e na Distorção Harmônica*. VI SBQEE Belém, Pa. Ago. 2005.
- [5] Key, T and Lai, J-S (1995). *Costs and benefits of Harmonic Current Reduction for Switch-Mode Power Supplies in a Commercial Building*, Proc. of IEEE Industry Applications Annual Meeting, USA, pp. 1101-1108.
- [6] Phipps, J. K, Nelson, J. P., Sen, P. K. (1994). *Power Quality and Harmonic Distortion on Distribution Systems*, IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 30, no. 2, March/April 1994, pp. 476-484.
- [7] de Oliveira, A. M., de Medeiros Jr., W. J., Medeiros, A. M. M., do Valle, A. C. M., de Mendonça, F. B. (2003). *Energy Quality x Capacitor Bank*, Proc. of the 7th Brazilian Power Electronics Conference – COBEP 2003, Fortaleza, Ceará.
- [8] Macedo Jr., J.R, Resende, J. W., Samesima, M.I. e Gomes D. B. (2003). *Aplicação de Filtros Harmônicos Passivos em Circuitos Secundários*, Anais do , Anais do.II CITENEL, Salvador, Nov. 2003, pp.845-852.
- [9] Penna, C. e Resende, J. W. (2003). *Análise da Instalação de Filtros Harmônicos Passivos em Circuitos Secundários de Distribuição*, II CITENEL, Salvador, Nov.2003, pp.839-844.
- [10] Tanaka, T., Nishida, Y., Funabiki, S. (2004). *A Method of Compensating Harmonic Currents Generated by Consumer Electronic Equipment Using the Correlation Function*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.: 19, No.1, Jan. 2004, pp. 266- 271.

