



VI SBQEE

21 a 24 de agosto de 2005
Belém – Pará – Brasil



Código: BEL 01 7595
Tópico: Análise, Diagnóstico e Soluções

COMPENSAÇÃO CAPACITIVA EM REDES DE BAIXA TENSÃO COM CONSUMIDORES DOMÉSTICOS: IMPACTOS NO NÍVEL DE TENSÃO E NA DISTORÇÃO HARMÔNICA

S.M.DECKMANN
DSCE/FEEC
UNICAMP

J.A.POMILIO
DSCE/FEEC
UNICAMP

E.A.MERTENS
Elektro
Eletricidade e
Serviços S.A.

L.F.S.DIAS
Elektro
Eletricidade
e Serviços
S.A.

A.R.AOKI
LACTEC

M.D.TEIXEIRA
LACTEC

F.R.GARCIA
IESA

RESUMO

O objetivo deste artigo é demonstrar que o uso de compensação em derivação com capacitores, tendo como objetivo melhorar o perfil de tensão de uma rede secundária, pode levar a uma deterioração nos níveis de distorção da tensão e da corrente caso aplicado a uma rede com cargas não-lineares do tipo fonte de tensão, que é típica em redes com consumidores domésticos e comerciais e de natureza distinta das cargas industriais, do ponto de vista de imposição de distorção harmônica de corrente e de tensão.

PALAVRAS-CHAVE

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

1.0 INTRODUÇÃO

Diversas empresas de distribuição de energia elétrica têm pesquisado o uso de capacitores distribuídos na rede secundária de distribuição com o objetivo de melhorar o perfil de tensão ao longo do alimentador e reduzir o carregamento dos transformadores [1, 2], de modo a postergar obras de melhoria que representariam um maior custo de implantação.

Embora o uso de capacitores para correção de fator de potência ou regulação de tensão seja uma prática comum em redes e consumidores industriais [3,4], a situação de consumidores

domésticos deve ser analisada com atenção por causa da diferente natureza das cargas não-lineares típicas.

A principal diferença é que tais cargas não-lineares têm um comportamento de “fonte de tensão”, ao invés do comportamento típico de “fonte de corrente” que apresentam, normalmente, as cargas industriais [5-7].

Esta diferença é fundamental pois a colocação de dispositivos em derivação junto a uma “fonte de tensão” não é capaz de alterar a corrente que a mesma produz no restante no circuito. Como, na prática, estas “fontes de tensão” não são ideais, mas apresentam uma certa impedância série, ocorre algum tipo de atuação do componente em derivação, mas com efeito muito menor do que o que ocorre com uma carga não-linear do tipo “fonte de corrente”.

1.1 Peculiaridades de redes domésticas

A potência reativa, medida junto ao transformador, em redes secundárias com cargas residenciais de baixa renda apresenta uma variação ao longo do dia muito menor do que a potência ativa. Seu valor mínimo é essencialmente definido pelos refrigeradores, como ilustra a Figura 1.

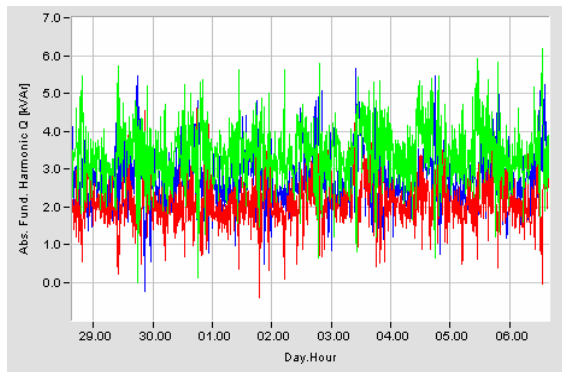


Figura 1 – Potência reativa ao longo de uma semana em rede com consumidores de baixa renda.

Em áreas de maior poder aquisitivo verifica-se também o efeito de outros aparelhos que utilizam motores, especialmente máquinas de lavar no período matutino [6].

A Figura 2 mostra o comportamento medido da potência ativa. Verifica-se um forte crescimento no final da tarde e início da noite, intervalo de tempo em que ocorre sobrecarga do transformador e possível violação dos limites de tensão [8]. As cargas adicionadas neste intervalo são majoritariamente do tipo resistiva (chuveiros e lâmpadas incandescentes). A participação de cargas não-lineares, como TVs e lâmpadas fluorescentes compactas (LFC) também ocorre e seu efeito pode ser visualizado analisando os valores absolutos dos componentes harmônicos da corrente junto ao transformador. Pode-se concluir que as variações de fator de potência e de DHT observadas nas medições são essencialmente decorrentes da forte alteração na potência ativa.

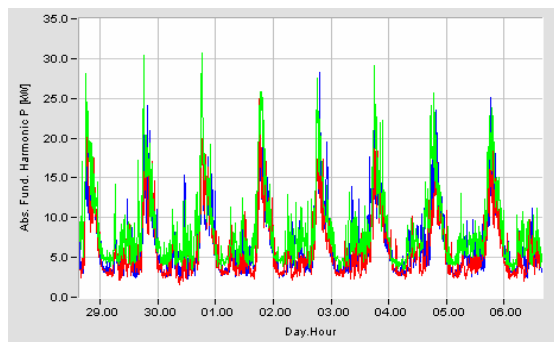


Figura 2 – Comportamento da potência ativa.

2.0 METODOLOGIA DE ESTUDO

Com base em medições em redes secundárias e em planilhas que fornecem a distribuição dos consumidores e suas respectivas demandas máximas em cada nó da rede, foram desenvolvidos modelos utilizando o programa Matlab. Tais modelos trifásicos reproduzem o

comportamento das redes, inclusive os níveis de desequilíbrio e de distorção harmônica de tensão e corrente. As cargas não-lineares são inseridas como retificadores com filtro capacitivo (caso típico de cargas eletrônicas de baixa potência de uso doméstico). Com tais modelos são estudados os efeitos da colocação de capacitores em diferentes situações: junto aos consumidores ou junto ao transformador.

Para validação da modelagem e das conclusões obtidas por meio do modelo, os resultados das simulações foram comparados com medições de campo, nas mesmas redes após a instalação dos capacitores.

As Figuras 4 e 5 mostram resultados do espectro da corrente no secundário do transformador quando se faz uma compensação com um banco de capacitores junto ao trafo. Na Figura 6 estão os resultados obtidos por simulação. Observa-se uma boa concordância dos espectros, destacando-se o efeito de amplificação dos harmônicos de ordem 7, 9, 11 e 13.

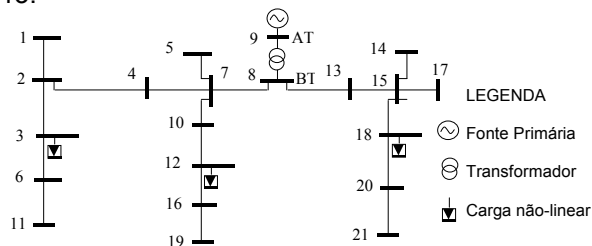


Figura 3 Layout de uma das redes estudadas.

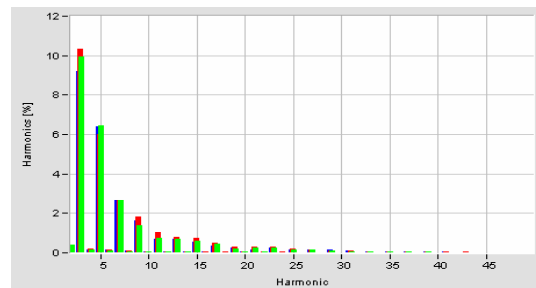


Figura 4 - Espectro das correntes medidas no transformador sem compensação.

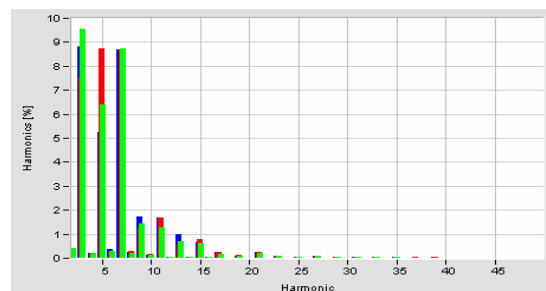


Figura 5 - Espectro das correntes medidas no transformador com compensação junto ao trafo.

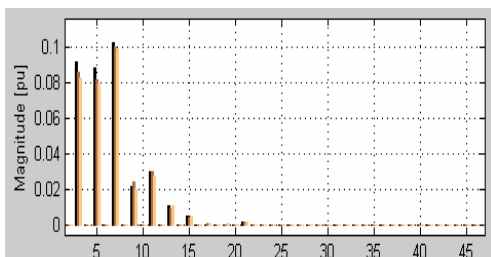


Figura 6 - Espectro das correntes secundárias para capacitores junto ao trafo, obtidas por simulação.

Resultados semelhantes foram obtidos para outras grandezas, como espectro da tensão, níveis de tensão, fator de potência, etc.

3.0 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Com base nos estudos, foram definidas diferentes compensações a serem testadas na rede em análise. Serão apresentados neste artigo dois resultados referentes a: conexão de um banco de capacitores em delta, na saída do transformador e colocação de capacitores junto aos consumidores. A compensação de reativos se dá em nível consistente com o valor de fundo da potência reativa, que está em torno de 2,5 kVAR por fase.

Os resultados apresentados a seguir permitem comparar os efeitos reais de se utilizar compensação capacitiva numa rede com consumidores domésticos, observados através de medições.

As medições foram realizadas entre 30/11/04 e 04/01/05. Inicialmente foi monitorada a situação sem capacitores e no dia 09/12 foi instalado um banco capacitivo em delta, de 8,33kVAR, junto ao secundário do transformador. No dia 21/12 foram instaladas 58 unidades monofásicas de 0,12kVAR, totalizando 6,96kVAR junto aos consumidores. A Figura 7 mostra o efeito sobre a potência reativa, medida junto ao transformador. A Figura 8 mostra a tensão na saída do transformador.

O total da compensação distribuída foi um pouco menor que o da compensação concentrada, dadas algumas dificuldades de se instalar compensadores em todos os clientes.

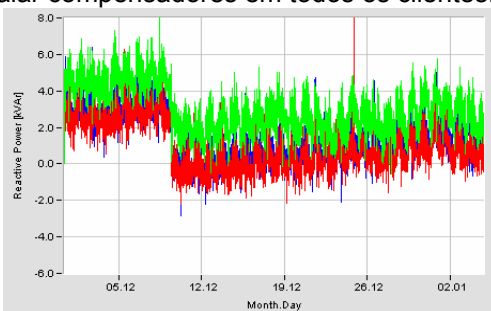


Figura 7 - Potência reativa suprida pelo transformador antes e após a instalação dos capacitores.

Pode-se notar que a compensação reativa média foi melhor no período 9/12 a 20/12 (banco concentrado). Isto significa que a demanda reativa da rede secundária era mesmo em torno de 8kVAR. No entanto, a compensação distribuída de 7kVAR também realizou uma boa compensação global, vista pelo trafo.

Para uma compensação reativa ideal teria sido melhor instalar 8,33kVAR nos dois casos, como mostram os resultados. No entanto, mesmo com redução em 16% na compensação distribuída, pode-se ainda verificar que essa solução apresenta algumas vantagens.

3.1 Efeito sobre as tensões

Pelas medições, o perfil diário médio das tensões secundárias aumentou em torno de 1V (0,8%) devido à compensação reativa nos dois casos.

Embora não tenham sido feitas medições específicas, com base no modelo, pode-se inferir o comportamento da tensão ao longo da rede, como mostra a figura 9. Notar que as tensões permanecem entre 124V e 130V. Na simulação a compensação aumentou as tensões em média 0,8V (0,6%). Uma observação interessante é que o perfil das tensões com capacitor concentrado no secundário é muito semelhante ao resultante da compensação distribuída nos consumidores.

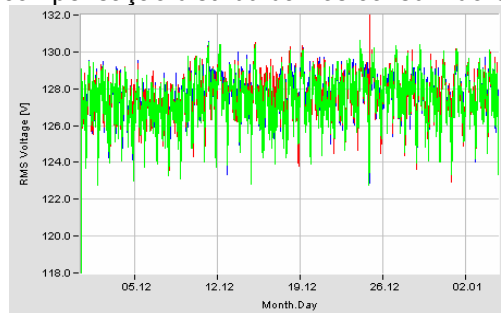


Figura 8 - Tensões secundárias antes e após as compensações reativas.

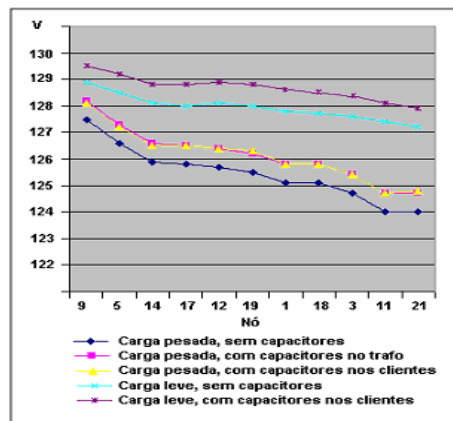


Figura 9 - Perfil das tensões resultantes sob carga pesada e leve.

3.2 Efeito sobre os harmônicos

A presença dos capacitores produz um caminho de baixa impedância para correntes de alta frequência e resulta em um aumento na distorção da corrente e também na distorção da tensão, como indicam as Figuras 10 e 11, e já era esperado tanto pelos resultados das simulações quanto por estudos teóricos [6].

Os níveis de distorção harmônica das tensões e correntes secundárias, medidas em dez/04 acusaram valores nas faixas entre 1,0% e 2,6% (média de 2%) nas tensões e entre 5% e 25% (média de 11%) nas correntes. Predominava a 5ª harmônica com (2,0%) na tensão e a 3ª na corrente (8,5%). Esses níveis podem ser considerados normais em termos de redes secundárias. Com a instalação dos capacitores houve um aumento, aceitável, tanto na distorção média da tensão (de 2% para 3%) como de corrente (de 11% para 17%). As medições finais também confirmaram que os valores reais foram compatíveis com as simulações.

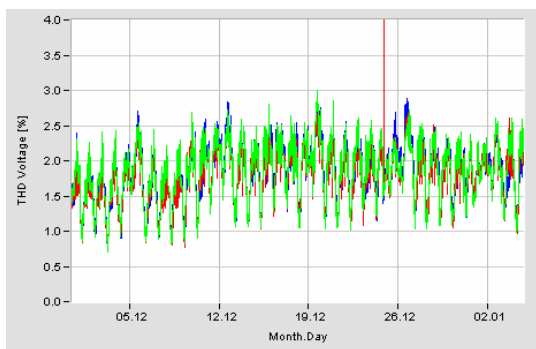


Figura 10 - DHT das tensões secundárias antes e após as compensações.

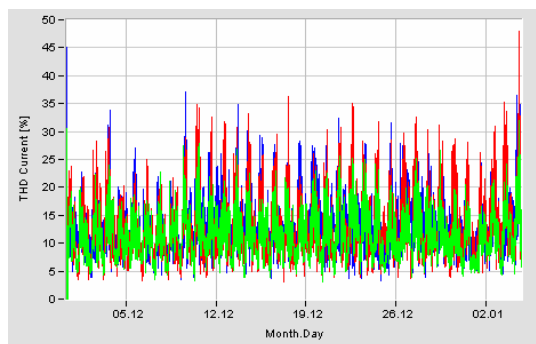


Figura 11 - DHT das correntes antes e após as compensações.

Tanto os capacitores concentrados junto ao trafo como os distribuídos junto aos consumidores são visto pelo primário como um equivalente, que causa ressonância em torno de 780Hz (13ª harmônica), como ilustrado nas

Figuras 12 e 13. Na forma distribuída, no entanto, a redução na impedância é menor do que na forma concentrada, o que implica numa menor amplificação de componentes harmônicas existentes na tensão do lado de alta.

Tal amplificação pode ser verificada no espectro das correntes obtido no período de testes correspondente, mostrados nas Figuras 5, 6 e 14.

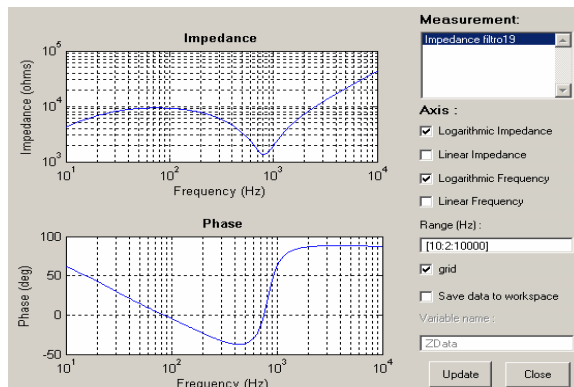


Figura 12 - Resposta em frequência vista pelo primário, carga pesada, com capacitores concentrados.

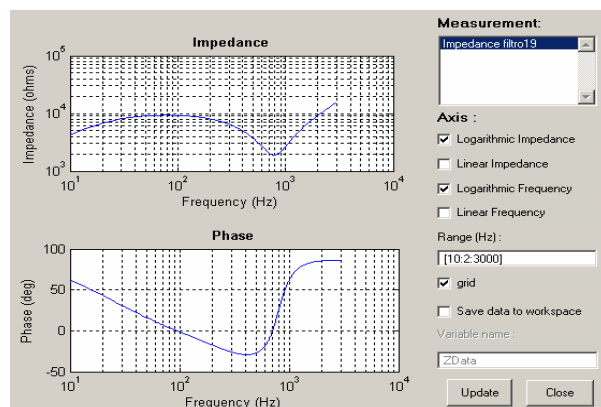


Figura 13 - Resposta em frequência vista pelo primário, carga pesada, com capacitores distribuídos.

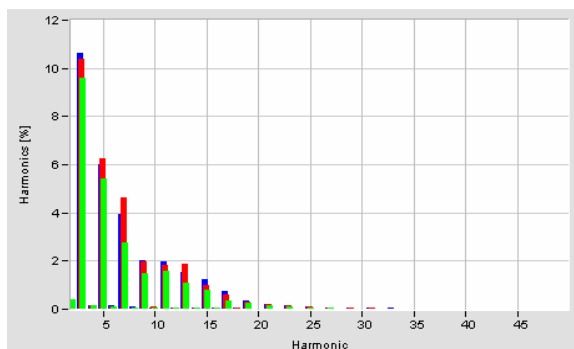


Figura 14 - Espectro das correntes no transformador com capacitores distribuídos.

3.3 Efeito sobre o consumo

A Tabela 1 apresenta os valores das potências consumidas antes e depois da compensação reativa.

Tabela 1 - Potência consumida antes e depois da compensação.

Caso	kW no secundário sem compensação	kW no secundário com compensação	Aumento kW
Carga pesada	45,22	45,65	0,43
Carga leve	15,82	15,97	0,15

Observa-se um aumento de consumo da ordem de 1% tanto sob carga pesada como leve. Na Tabela 2 são apresentados os valores das perdas observadas no trafo.

Tabela 2 - Perdas no trafo antes e depois da compensação.

Caso	Perdas [kW] sem compensação	Perdas [kW] com compensação	Redução kW
Carga pesada	1,09	1,05	0,04
Carga leve	0,41	0,35	0,06

Observa-se uma redução percentual de perdas da ordem de 4% sob carga pesada e 15% sob carga leve. Ou seja, a compensação reativa é conveniente, mesmo sob carga leve.

No entanto, deve ser ressaltado que, em termos absolutos, o aumento do consumo (0,43kW), provocado pelo aumento das tensões, supera em muito a redução das perdas (0,04kW), decorrente da redução dos reativos supridos pela rede.

Assim a principal justificativa econômica para esse tipo de compensação não é a redução das perdas, mas sim o aumento do consumo de energia por parte dos consumidores supridos em tensões mais próximas do valor nominal, mesmo sob carga pesada.

4.0 CONCLUSÕES

A partir dos resultados de medições sem e com capacitores, verificou-se a adequação dos modelos desenvolvidos, uma vez que os resultados previstos foram confirmados experimentalmente.

A colocação de capacitores distribuídos apresenta um efeito de melhoria no perfil de tensão ao longo de todo alimentador, além do que, ao reduzir a circulação de corrente pela rede minimiza as perdas. Observa-se, globalmente, um aumento na potência consumida devido à elevação da tensão. Nota-se também uma redução nas perdas no transformador.

A instalação concentrada, embora também resulte uma elevação da tensão, não permite a redução das perdas na rede. Sua vantagem é a facilidade de instalação.

Em termos de distorções, nota-se das medições, conforme também previsto nas simulações, que a colocação de capacitores aumenta as distorções de tensão e de corrente.

A presença do banco capacitivo leva ao surgimento de ressonâncias devido à característica predominantemente indutiva da rede. A ressonância série, formada essencialmente pela reatância de dispersão do transformador com o capacitor é problemática em caso da presença de distorção na tensão no lado de alta tensão, que pode produzir sobre-correntes tanto no capacitor quanto no transformador, amplificando também a distorção na tensão.

Visto pelo lado das cargas, estes mesmos componentes representam uma ressonância paralela. Esta ressonância pode ser um problema caso a carga seja do tipo fonte de corrente (pois produziria um aumento na distorção da tensão). No entanto, posto que a carga é do tipo "fonte de tensão", não ocorre este tipo de amplificação.

Pode-se concluir que entre as vantagens da compensação distribuída sobre a concentrada verificam-se as seguintes:

- 1- Necessidade de menor capacidade reativa global, pois não se compensa os reativos devidos às reatâncias série dos cabos da rede de alimentação;
- 2- Maior eficiência na redução das perdas na rede secundária, pois reduz-se a corrente pela rede desde as cargas;
- 3- Melhoria do perfil das tensões ao longo do secundário devido à injeção local dos reativos;
- 4- Aumento mais uniforme do consumo devido ao aumento das tensões nas cargas;
- 5- Menor risco de ressonância para harmônicas de baixa ordem devido à "filtragem distribuída" resultante;

- 6- Maior possibilidade de melhorar o balanceamento entre fases.

Como desvantagens pode-se citar:

- 1- Maior custo de instalação e eventual manutenção;
- 2- Necessidade de acesso aos pontos de conexão dos consumidores.

5.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] 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 II CITENEL, Salvador, Nov.2003, pp.845-852.
- [2] Penna, C. e Resende, J. W. (2003). Análise da Instalação de Filtros Harmônicos Passivos em Circuitos Secundários de Distribuição, Anais do II CITENEL, Salvador, Nov. 2003, pp.839-844.
- [3] Pereira, O.O., Kassick E.V., and Summer, M. (1999). Harmonic Distortion in a Low Voltage Electrical System: Passive Filtering, Proc. of the 5th Brazilian Power Electronics Conference–COBEP99, Foz do Iguaçu, PR.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Deckmann, S.M. Pomilio J.A., Mertens E.A., Dias L.F.S. Uso de Filtros passivos em Redes de Distribuição com Cargas Não-lineares. XV CBA, Gramado, Set. 2004.
- [7] Pomilio J. A. and Deckmann S. M., “Characterization and compensation for harmonics and reactive power of residential and commercial loads”, Proc. of 8th Brazilian Power Electronics Conference COBEP 2005, Recife, Brazil, June 2005.
- [8] ANEEL (2001) RESOLUÇÃO NORMATIVA N° 505 de 26/11/2001.