

Mutual influence between harmonics and nonlinear loads

M. A. B. Galhardo, *Member, IEEE* e J. T. Pinho, *Member, IEEE*

Abstract— This work presents and analyzes cases where mutual influence between voltage and/or current harmonic content and nonlinear loads occurs. These influences are exemplified by means of undertaken measurements and simulations, such as: the supply of nonlinear loads with different voltage waveforms, especially loads composed of a rectifier with capacitive filter; the influence of current harmonic content in the supply voltage; the combination of three-phase and single phase loads; and the mutual influence of harmonic content of shunt-connected loads, emphasizing, in these last two cases, the possibility of harmonic compensation.

Keywords— Harmonics; nonlinear loads; inverters; power system; harmonic compensation.

I. INTRODUÇÃO

ATUALMENTE, uma das grandes preocupações do setor elétrico é o uso da energia elétrica de uma forma cada vez mais racional e eficiente; diante dessa necessidade, consumidores tendem a buscar por equipamentos mais modernos, que propiciem esses fatores, associados à redução das perdas. Porém, geralmente, esses equipamentos são mais sensíveis às falhas e distúrbios do sistema elétrico de potência e, por outro lado, devido à suas características não-lineares, constituem as próprias fontes de problemas, podendo deteriorar a qualidade do suprimento elétrico.

Com isso, tem-se criado uma situação complexa no setor elétrico, pois muitas das medidas de conservação, apesar de serem atrativas, se não forem estudadas e implementadas de forma conveniente, podem resultar em vários problemas relacionados à qualidade de energia elétrica. Dentre esses problemas, a poluição harmônica produzida por cargas não-lineares aparece em grande destaque. A presença de harmônicos na tensão e/ou na corrente pode ocasionar danos aos componentes da rede elétrica e aos próprios equipamentos de uma instalação.

A ocorrência desses problemas determina a necessidade, por parte da concessionária, fabricantes de equipamentos e consumidores de buscar soluções para a realização de medidas práticas e econômicas, e apresenta-se como uma forte justificativa para estudos que levem à criação de metodologias que auxiliem na eliminação ou atenuação dos problemas

relacionados. Entre as técnicas mais adotadas para a mitigação do conteúdo harmônico da corrente em um sistema elétrico, destacam-se: a modificação da resposta em frequência do sistema, a redução da injeção de correntes harmônicas das cargas e a instalação de filtros (passivos, ativos ou híbridos). Outra forma para a mitigação de harmônicos em uma instalação se dá pela avaliação do potencial de redução da magnitude das componentes harmônicas, verificando-se a possibilidade de combinação de cargas não-lineares em paralelo, como o efeito de diversidade [1], [2]. Para isso é também imprescindível avaliar a influência da impedância do sistema na tensão de alimentação que por sua vez influencia na forma de onda da corrente das cargas em questão e vice-versa.

O objetivo do presente trabalho é exemplificar e analisar casos onde há a influência mútua ou interação entre o conteúdo harmônico da tensão e da corrente em sistemas suprindo cargas não-lineares, atentando-se para a compensação de harmônicos. Uma das ferramentas utilizadas nos exemplos são medições em sistemas renováveis isolados de pequeno porte, cujo armazenamento da energia gerada por uma ou mais fontes renováveis (sol, vento, biomassa, etc.) é feito em um banco de baterias, com o suprimento de tensão CA para as cargas realizado por meio de um inversor estático (conversor CC-CA). A orientação quando um sistema renovável é instalado é para economizar energia utilizando equipamentos mais econômicos (geralmente cargas não-lineares), que executam a mesma função quando comparados com outros de maior consumo, tendo em vista as limitações do sistema de geração, em função da intermitência da fonte primária (sol e vento, por exemplo) [3]. Isso se torna necessário para o aumento da confiabilidade do sistema e diminuição dos seus custos de implantação. Como é visto neste trabalho, a economia de energia também é realizada dependendo do tipo de inversor utilizado.

II. INFLUÊNCIA DA TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO

Os espectros harmônicos de amplitude e fase da tensão de saída dos inversores utilizados nas medições são apresentados nas Fig.1, Fig.2 e Fig.3, os quais correspondem a, respectivamente: onda senoidal, quadrada modificada, e quadrada.

Os inversores com forma de onda quadrada são de mais fácil construção e mais baratos. Seus principais inconvenientes são: alta distorção harmônica total de tensão (TDHv), superior a 36%, e baixa eficiência, em torno de 60 a 80 %. Os inversores de onda quadrada modificada apresentam

O presente trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq - Brasil.

M. A. B. Galhardo e J. T. Pinho são membros do Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (GEDAE) da Universidade Federal do Pará (UFPA) - Brasil. E-mail: galhardo@ufpa.br e jtpinho@ufpa.br.

TDHv de 15 a 35 % e eficiência de 80 a 95 %. Os inversores de onda senoidal têm a vantagem de oferecer um melhor controle da frequência e da amplitude da tensão, e sua alta eficiência (85 a 95 %) e baixa TDHv (1 a 5 %) tornam o inversor senoidal tecnicamente mais vantajoso. No entanto, o seu alto preço torna-o inviável em muitas aplicações [4].

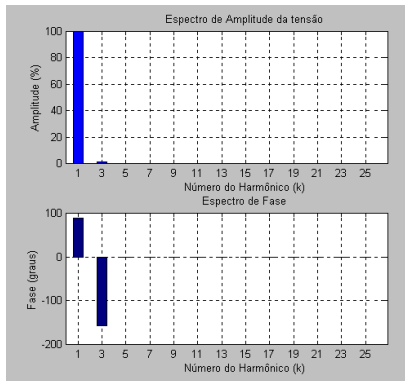


Fig. 1. Espectro de amplitude (gráfico superior) e fase (gráfico inferior) da tensão do inversor de onda senoidal.

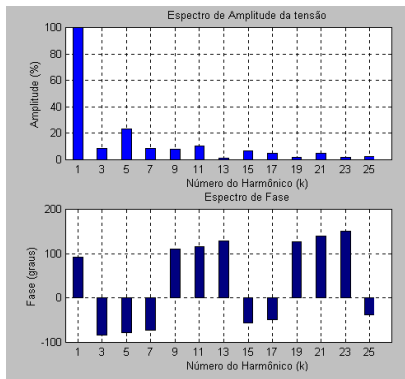


Fig. 2. Espectro de amplitude (gráfico superior) e fase (gráfico inferior) da tensão do inversor de onda quadrada modificada.

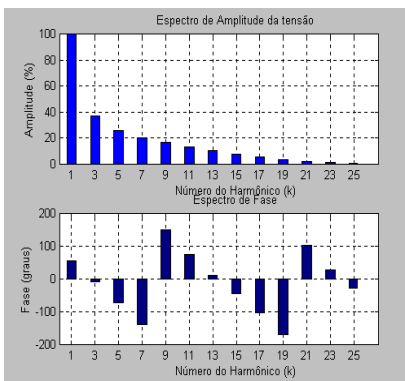


Fig. 3. Espectro de amplitude (gráfico superior) e fase (gráfico inferior) da tensão do inversor de onda quadrada.

Ressalta-se que os inversores de onda quadrada e quadrada modificada não são indicados para alimentar motores elétricos, pois a alimentação com tensões harmônicas afeta a eficiência e o torque disponível do motor.

Atualmente, quase que universalmente, equipamentos eletrônicos possuem fontes chaveadas, as quais possuem um estágio de entrada constituído por um retificador com filtro

capacitivo.

Na Fig.4 mostra-se o espectro de amplitude de corrente de 3 equipamentos eletrônicos (lâmpadas fluorescentes compactas - PL, microcomputador e aparelho de TV), alimentados por um inversor de onda quadrada, verificando-se a semelhança entre seus espectros, assim como entre eles e o da tensão quadrada de alimentação.

Observou-se que quando a alimentação foi realizada com o inversor de onda quadrada, os equipamentos apresentaram fator de potência próximo da unidade e, quando comparados com a alimentação dos demais inversores, com a alimentação quadrada obteve-se menor corrente rms e de pico, menor distorção harmônica total de corrente (TDHi), menor consumo de energia (maior tempo para descarga do banco de baterias).

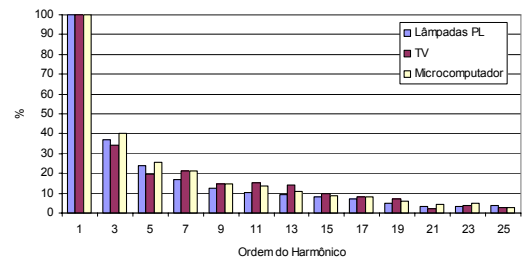


Fig. 4. Espectro harmônico de amplitude da corrente das cargas alimentadas pelo inversor de onda quadrada.

A Fig. 5 apresenta o espectro harmônico de amplitude da corrente de 4 lâmpadas PL quando alimentadas com os inversores de onda quadrada, quadrada modificada e senoidal.

Quando as lâmpadas utilizadas são alimentadas pelo inversor de onda quadrada, nota-se uma semelhança entre as formas de onda de tensão e corrente, como também entre seus espectros de amplitude e fase, o que torna, para essas lâmpadas, quando alimentadas por esse inversor, o fator de potência próximo de 1. Observa-se que quando alimentadas pelo inversor de onda quadrada modificada ocorre uma elevação das amplitudes do espectro harmônico da corrente, mesmo em frequências mais altas. Para essas 4 lâmpadas, quando a alimentação é senoidal, o 3º e o 5º harmônico apresentam amplitudes significativas (nesse caso, 91,43 % e 76,65 %, respectivamente) em relação à fundamental.

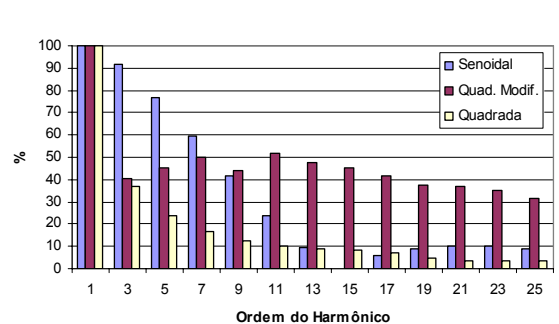


Fig. 5. Espectro harmônico de amplitude da corrente das lâmpadas alimentadas com diferentes formas de onda.

Um parâmetro importante na escolha de um inversor é a

potência que o mesmo pode suprir na partida de um equipamento. O inversor de onda quadrada utilizado, de potência nominal 300 W, consegue dar partida simultânea em 10 lâmpadas PL (8x25 W e 2x10 W). Já o de onda quadrada modificada (potência nominal 1.500 W) não consegue dar partida nessas 10 lâmpadas PL simultaneamente (potência ativa de suprimento 5 vezes maior, comparada com a potência do de onda quadrada e quase 7 vezes maior que a potência nominal da carga). Isso se deve à alta corrente de pico das lâmpadas quando a alimentação é do tipo quadrada modificada e um maior valor de energia reativa solicitado na partida.

O máximo de lâmpadas PL que o inversor de onda quadrada modificada utilizado consegue dar partida simultaneamente são 6, com potência menor ou igual a 150 W (6x25 W). Porém, esse inversor alimenta as 10 lâmpadas, dando-se primeiro a partida nas 6 lâmpadas e depois ligando as outras 4.

Então, deve-se atentar para esse fato quando, por exemplo, um sistema fotovoltaico de pequeno porte, utilizando um inversor de onda quadrada modificada, for destinado a alimentar lâmpadas fluorescentes compactas. No momento de ligá-las, elas podem não acender, o que pode levar à conclusão errônea de que a instalação do sistema de geração foi feita de maneira incorreta.

Se a partida nas 6 lâmpadas for dada ao desligar e ligar em poucos segundos o interruptor de alimentação das mesmas, o inversor não as partem, devido a estarem aquecidas. Portanto, essas lâmpadas, quando aquecidas, requerem uma corrente de pico maior do que na condição desligadas por muitos segundos. Isto se deve à alteração na impedância de carga das lâmpadas, inclusive nas frequências dos harmônicos, entre os estados “aquecido” e “frio” das mesmas [5].

III. INFLUÊNCIA DA CORRENTE HARMÔNICA NA TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO

Em sistemas com baixa capacidade de curto-circuito, como os de pequeno porte, a entrada de um bloco de carga provoca a queda da tensão de geração, devido ao aumento da corrente solicitada.

Com a finalidade de simular um sistema desse tipo, utilizou-se um transformador variável tipo “varivolt” (220 V/110 V), alimentado por tensão senoidal e com capacidade de suprimento de 2,64 kW, onde se observou uma queda de tensão a cada vez que eram conectadas cargas na saída do mesmo.

A Fig. 6 apresenta o circuito equivalente do secundário de um “varivolt” fornecendo uma tensão V_L a uma carga não-linear Z_L . Haverá a circulação de corrente harmônica através da impedância Z_s da fonte, produzindo em V_L uma tensão com conteúdo harmônico.

Antes de ser conectada uma carga no secundário do “varivolt”, mediu-se a tensão a vazio, obtendo-se 127,68 Vrms. Logo em seguida, ligaram-se 4 lâmpadas PL e verificou-se a queda do valor rms de tensão para 126,96 V (tensão V_L).

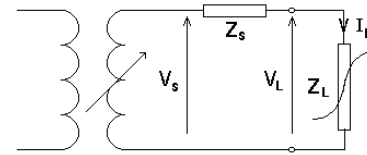


Fig. 6. Carga conectada ao circuito do secundário do “varivolt”.

As Fig. 7 e 8 mostram, respectivamente, o espectro da tensão na saída do “varivolt” a vazio e alimentando a carga não-linear. Apesar da queda do valor rms da tensão, houve um aumento da tensão de pico de 189 V para 195 V com a conexão da carga, devido à mesma produzir componentes harmônicas na tensão V_L . Observa-se nessas figuras que a tensão a vazio já apresentava uma componente no 5º harmônico. Com a entrada da carga, a amplitude da componente fundamental diminuiu, a amplitude da componente no 5º harmônico aumentou (houve uma redução de cerca de 17º em sua fase) e surgiram novas componentes harmônicas na tensão (3ª, 7ª, 9ª, 11ª). A TDHv a vazio é de 3,30 % e com as 4 lâmpadas é de 5,02 %.

A Fig. 9 apresenta o espectro de amplitude e fase da corrente. Observa-se na Tabela I que a potência ativa foi negativa nas frequências em que surgiram os harmônicos de tensão, representando um fluxo na direção oposta (retorno para a fonte).

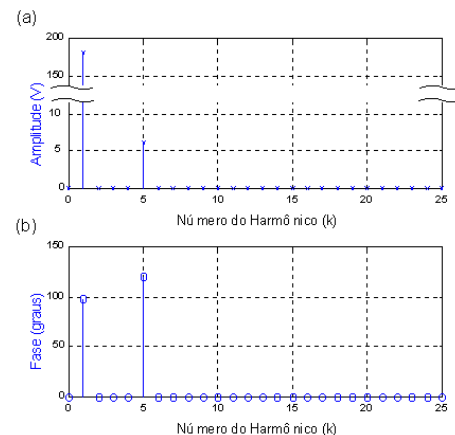


Fig. 7. Espectro da tensão a vazio: (a) amplitude; (b) fase.

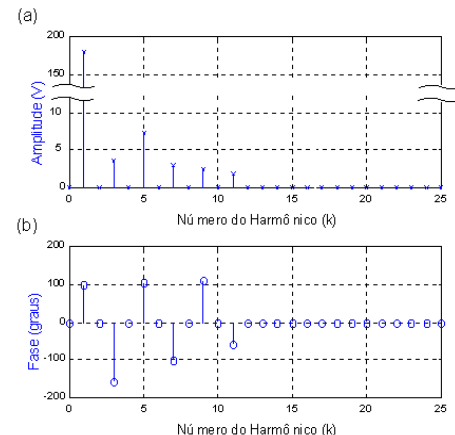


Fig. 8. Espectro da tensão nas 4 lâmpadas: (a) amplitude; (b) fase.

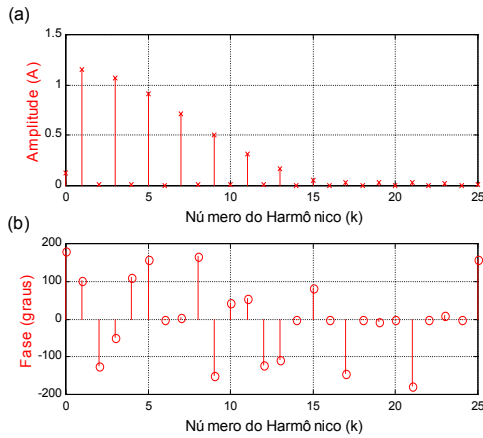


Fig. 9. Espectro da corrente nas 4 lâmpadas: (a) amplitude; (b) fase.

TABELA I - POTÊNCIA ATIVA EM CADA COMPONENTE HARMÔNICA.

Componente	P (W)
0	0
1	102,971
2	0
3	-0,616
4	0
5	1,916
6	0
7	-0,299
8	0
9	-0,094
10	0
11	-0,120

IV. INFLUÊNCIA ENTRE CARGAS

A. Carga Trifásica com Cargas Monofásicas

Um prédio comercial possui, geralmente, poucas cargas não-lineares trifásicas, como por exemplo, acionadores de velocidade ajustável (*ASD - Adjustable-Speed Drives*) para ventilação. Uma grande quantidade das cargas não-lineares de um prédio é monofásica, como microcomputadores e lâmpadas fluorescentes com reatores magnéticos e/ou eletrônicos.

Uma alternativa para reduzir o conteúdo harmônico de corrente na rede elétrica é avaliar o ângulo de fase de cada componente harmônica das correntes produzidas pelas cargas não-lineares e, se possível, combiná-las de modo que suas fases em uma determinada frequência provoquem a diminuição da amplitude da corrente resultante nessa frequência.

A Fig. 10 apresenta o diagrama esquemático de um sistema suprido três cargas monofásicas e uma trifásica, todas do tipo retificador com filtro capacitivo.

A Fig. 11 apresenta as formas de onda de corrente provenientes da fase A, solicitada pela carga monofásica (gráfico superior), e trifásica (gráfico inferior), que juntas compõem a forma de onda da Fig. 12. Todas as formas de onda foram obtidas por meio de simulação. A corrente da carga monofásica conectada na fase A possui um valor rms de 11,33 A e uma distorção harmônica total de corrente de 79,75 %, a carga trifásica possui uma corrente rms na fase A de 12,68 A e uma distorção harmônica total de corrente de 42,78 %. A corrente total da fase A apresenta uma distorção

harmônica total menor que a das duas correntes (33,57 %) e um valor rms de 21,62 A. A redução do conteúdo harmônico da corrente de linha também se verifica para as demais fases.

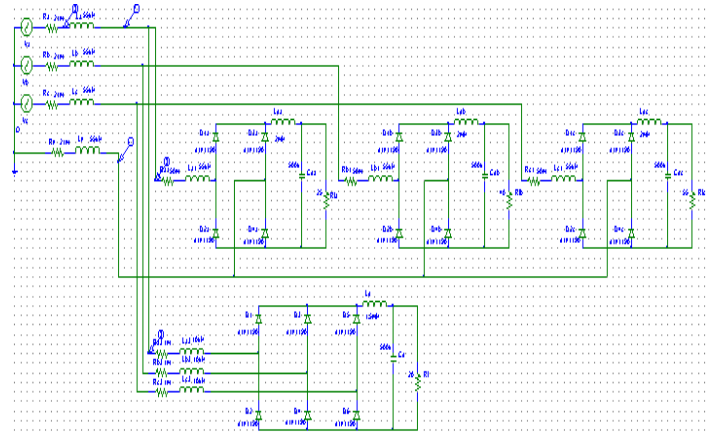


Fig. 10. Sistema simulado.

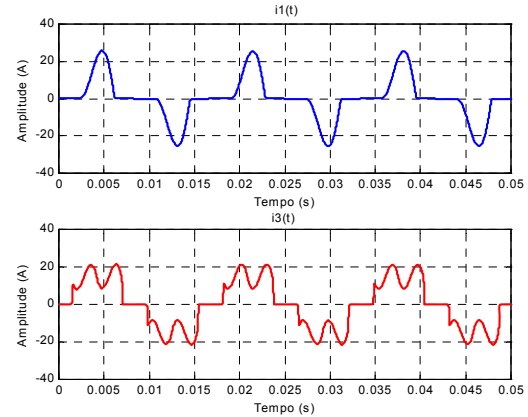


Fig. 11. Formas de onda da corrente da fase A do retificador monofásico (gráfico superior) e trifásico (gráfico inferior).

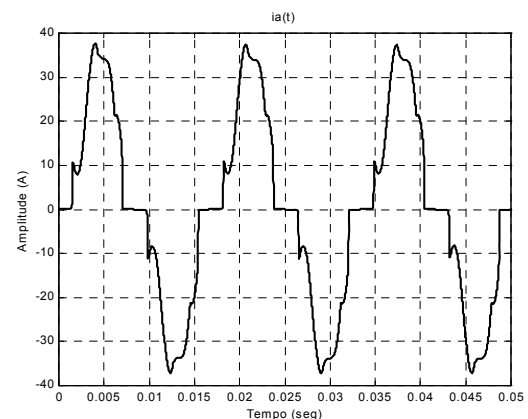


Fig. 12. Corrente total da fase A.

Analisando o espectro harmônico de amplitude e fase da corrente da carga monofásica e da carga trifásica na fase A (Fig. 13 e Fig. 14, respectivamente), observa-se que a composição vetorial de algumas correntes de mesma frequência resultaram na diminuição da corrente resultante nessa frequência (Fig. 15), como é o caso das correntes do 5° e

7° harmônico, sendo que a amplitude da componente resultante no 5° harmônico é reduzida de forma significativa.

O retificador trifásico não possui componente harmônica significativa de ordem ímpar múltipla de três (3°, 9°, 15°, 21°,...) e observa-se que o 5° harmônico do retificador trifásico está quase sempre com uma defasagem próxima de 180° em relação à fase do 5° harmônico do retificador monofásico [6], ocorrendo a compensação na corrente total de fase quando essas cargas são agrupadas.

Para efeito de comparação, é mostrado na Fig. 16 o espectro de amplitude da corrente da carga monofásica na fase A, da corrente da carga trifásica (fase A) e da soma vetorial de ambas as correntes.

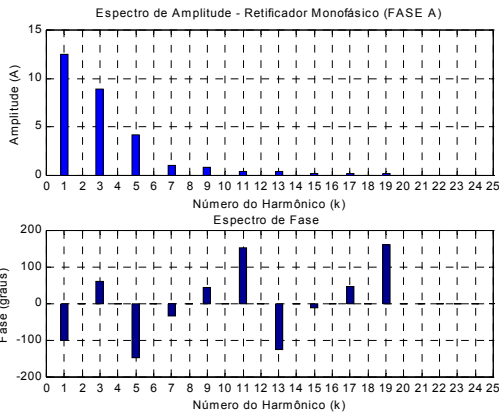


Fig. 13. Espectro de amplitude e fase da corrente: retificador monofásico.

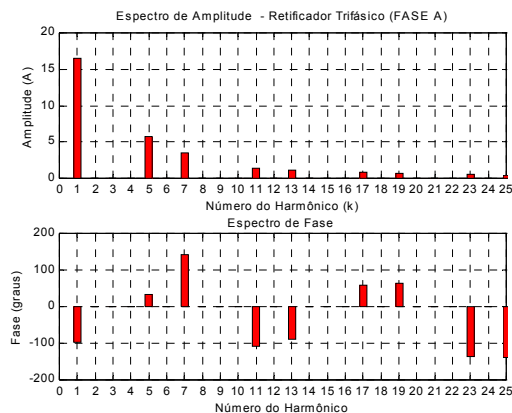


Fig. 14. Espectro de amplitude e fase da corrente: retificador trifásico.

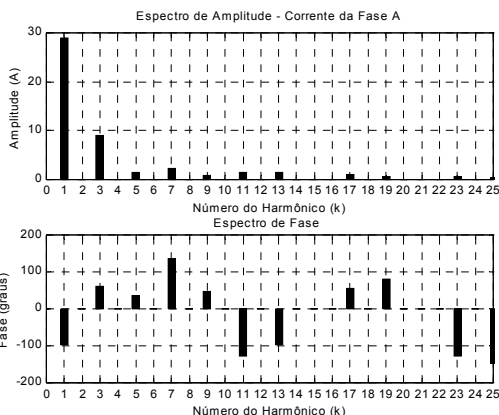


Fig. 15. Espectro de amplitude e fase da corrente total da fase A.

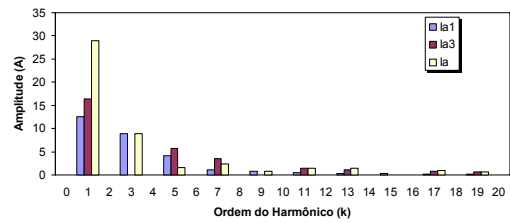


Fig. 16. Espectro de amplitude da corrente das cargas e corrente total (fase A).

B. Alteração de Parâmetros Internos da Carga

Quando cargas não-lineares são colocadas em paralelo, podem ocorrer mudanças significativas na forma de onda de corrente de uma ou mais cargas. É o que se observou quando 2 lâmpadas PL (de um determinado fabricante) de 25 W cada foram colocadas em paralelo com um aparelho de TV 20'' (de um determinado fabricante) de 50 W de potência nominal. Para realizar essa medição, utilizou-se um circuito isolado (Fig. 17), a fim de evitar problemas que por ventura seriam encontrados caso as cargas fossem alimentadas pela rede elétrica da concessionária, como a interferência de outras cargas na medição e a oscilação do valor rms de tensão. Nas medições realizadas, o aparelho de TV foi mantido com brilho, cor, nitidez, e contraste, na posição máxima e na condição *mute* (sem volume).

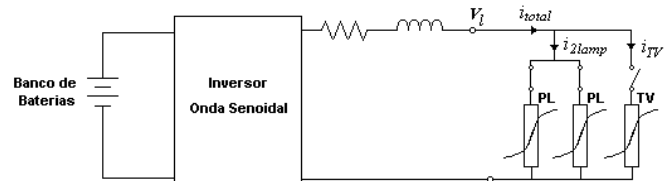


Fig. 17. Circuito utilizado para medição.

A corrente medida das duas lâmpadas sem e com a TV em paralelo são mostradas na Fig. 18.

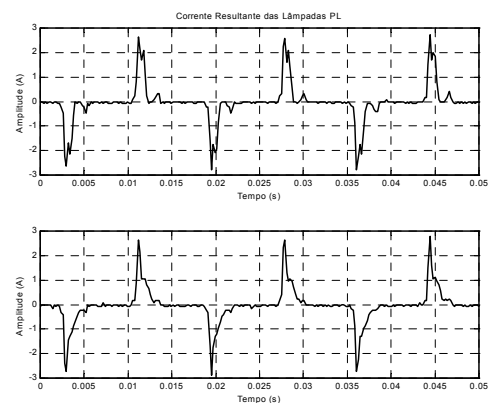


Fig. 18. Forma da corrente de 2 lâmpadas PL: isoladas (gráfico superior) e em paralelo com uma TV (gráfico inferior).

A Tabela II apresenta os parâmetros calculados, a partir dos valores instantâneos medidos de tensão e corrente, para as cargas alimentadas isoladamente e com a presença da outra

carga em paralelo. Sendo, V_{rms} - tensão rms; I_{rms} - corrente rms de cada carga; P - potência ativa; S - potência aparente; FP - fator de potência; Q_B - potência reativa de Budeanu; D_B - potência de distorção de Budeanu; N - potência não-ativa ou de Fryze. As potências foram calculadas segundo as definições apresentadas em [7].

Para as lâmpadas PL, a potência ativa permanece praticamente a mesma, porém há a diminuição da potência não-ativa quando a TV é colocada em paralelo e, conseqüentemente, o fator de potência aumenta. Já as grandezas elétricas calculadas para a TV permaneceram praticamente inalteradas.

TABELA II – CARGAS ALIMENTADAS ISOLADAMENTE E EM PARALELO COM OUTRA CARGA.

Carga	I_{rms} (A)	V_{rms} (V)	$THDi$ (%)	$THDv$ (%)	P (W)
2 lâmpadas (isoladas)	0,72	117,84	143,43	1,02	44,79
2 lâmpadas (TV em paralelo)	0,67	117,13	123,73	1,10	44,92
TV (isolada)	0,87	118,77	133,07	1,27	60,22
TV (2 lâmpadas em paralelo)	0,88	117,13	132,28	1,10	60,54
TV + 2 lâmpadas	1,35	117,13	103,08	1,10	105,46
Carga	S (VA)	FP	Q_B (VAr)	D_B (VAr)	N (VAr)
2 lâmpadas (isoladas)	85,39	0,52	16,94	70,69	72,70
2 lâmpadas (TV em paralelo)	77,96	0,58	16,01	61,67	63,72
TV (isolada)	103,40	0,58	9,46	83,52	84,05
TV (2 lâmpadas em paralelo)	102,74	0,59	9,68	82,45	83,01
TV + 2 lâmpadas	157,88	0,67	25,69	114,64	117,49

Em sistemas não-lineares a potência aparente total é diferente da soma da potência aparente calculada para cada carga, pois o valor rms da soma de duas correntes é sempre menor ou igual à soma dos valores rms das correntes separadamente ($I_{tot}rms \leq I_1rms + I_2rms$) o que pode ser provado a partir das equações abaixo.

$$i_{tot}(t) = i_1(t) + i_2(t) \quad (1)$$

$$i_1(t) = \sum_{k=0}^{\infty} I_{1k} \cdot \cos(k\omega_0 t + \alpha_k) \quad (2)$$

$$i_2(t) = \sum_{k=0}^{\infty} I_{2k} \cdot \cos(k\omega_0 t + \beta_k) \quad (3)$$

$$i_{tot}(t) = \sum_{k=0}^{\infty} I_k \cdot \cos(k\omega_0 t + \phi_k) \quad (4)$$

onde,

$$I_k = \left[I_{1k}^2 + 2I_{1k}I_{2k} \cos(\alpha_k - \beta_k) + I_{2k}^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

$$\phi_k = \text{tg}^{-1} \left(\frac{I_{1k} \text{sen } \alpha_k + I_{2k} \text{sen } \beta_k}{I_{1k} \text{cos } \alpha_k + I_{2k} \text{cos } \beta_k} \right) \quad (6)$$

As equações (4), (5) e (6) fornecem a expressão para o cálculo no domínio do tempo da corrente resultante do agrupamento de duas cargas em paralelo.

A Fig. 19 apresenta o espectro de amplitude da corrente em cada carga e total, estando as cargas em paralelo. Nessa figura são exibidos somente os harmônicos ímpares, pois os harmônicos pares são inexistentes ou não são significativos.

A amplitude do 9º harmônico é menor do que a amplitude do 9º de cada carga individual. O mesmo se observa para o 11º harmônico.

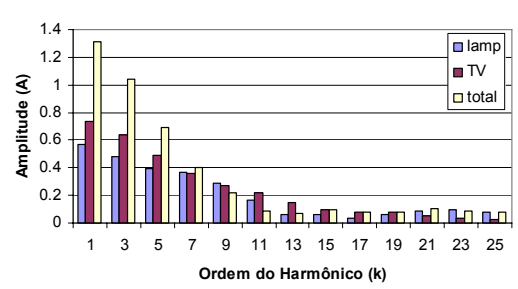


Fig. 19. Espectro de amplitude das correntes das lâmpadas, da TV e da corrente total.

A Fig. 20 e a Fig. 21 mostram o espectro de amplitude de corrente de cada carga isolada e com a outra carga em paralelo. Verifica-se a atenuação das amplitudes do 3º ao 11º harmônico da corrente das lâmpadas quando a TV é colocada em paralelo, reduzindo o valor rms da corrente das lâmpadas.

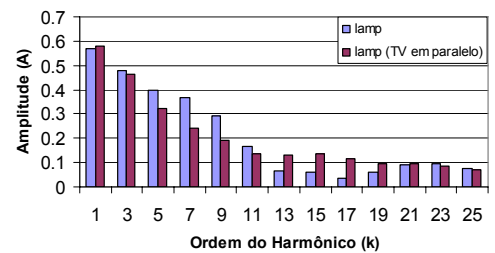


Fig. 20. Espectro de amplitude das 2 lâmpadas sem e com a TV em paralelo.

Quando as lâmpadas são colocadas em paralelo com a TV praticamente não há mudança no espectro de amplitude desta.

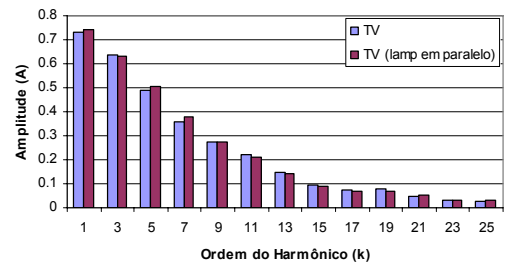


Fig. 21. Espectro de amplitude da TV sem e com as lâmpadas em paralelo.

A Fig. 22 e a Fig. 23 mostram o espectro de fase de cada

carga isolada e com a outra carga em paralelo. Não houve mudanças significativas no espectro de fase da TV. Para as lâmpadas, verifica-se uma inversão de fase no 11º harmônico e variações significativas nas fases do 9º, 13º, 15º, 19º e 23º harmônicos.

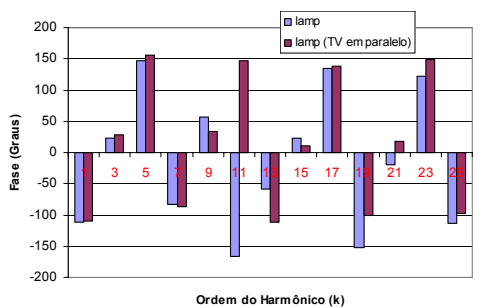


Fig. 22. Comparação do espectro de fase das lâmpadas (isoladas e com a TV em paralelo).

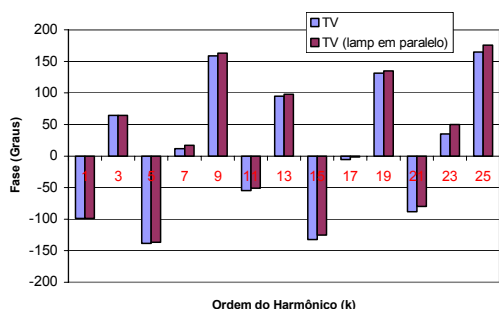


Fig. 23. Comparação do espectro de fase da TV (isolada e com as lâmpadas em paralelo).

Por meio da alteração de um ou vários parâmetros de uma carga, a influência entre as cargas pode ser mais significativa. É o que se observa na corrente medida das lâmpadas quando se alteram as condições da imagem da TV. Com essa alteração, observou-se uma pequena variação nas amplitudes de alguns harmônicos da corrente nas lâmpadas. Para ilustrar isso, a Fig. 24 mostra a superposição dos espectros de amplitude dos harmônicos de ordem ímpar da corrente medida nas 2 lâmpadas em 2 situações com a TV em paralelo: contraste 50 % e outros parâmetros da imagem na posição máxima (raias espectrais pretas); todos os parâmetros de imagem em 50 % (raias espectrais cinzas).

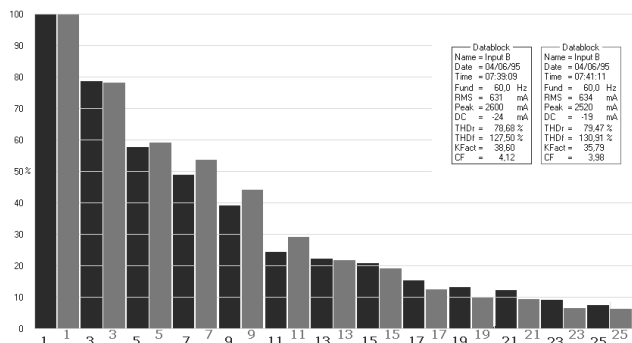


Fig. 24. Comparação dos espectros da corrente nas 2 lâmpadas, para diferentes ajustes da imagem da TV em paralelo.

C. Influência entre Cargas em Paralelo sem a Variação do Valor RMS da Tensão de Alimentação

Nesta seção são apresentados casos em que ocorrem influências entre cargas ligadas em paralelo sem variar o valor rms da tensão. Essa influência que ocorre entre cargas pode ser positiva (redução, proporcional ou não, das amplitudes das componentes harmônicas), ou negativa (aumento, proporcional ou não, das amplitudes das componentes harmônicas).

1) Cargas Alimentadas por Tensão Senoidal

Usando a alimentação com o “varivolt” e monitorando a medição de corrente em 4 lâmpadas PL de 25 W, foram inseridas outras cargas em paralelo com as lâmpadas. Sabendo-se da queda de tensão que ocorreria com a inserção das cargas, manteve-se o valor rms de tensão constante pelo ajuste do “tap” regulável do aparelho a cada nova inserção de carga, com a finalidade de avaliar a influência das cargas na forma de onda de alimentação e na forma de onda da corrente das 4 lâmpadas.

A Fig. 25 mostra as formas de onda de tensão e corrente das 4 lâmpadas alimentadas isoladas com tensão de 127 Vrms, e nas Fig. 26 e Fig. 27 são mostrados os espectros de amplitude da tensão e corrente, respectivamente.

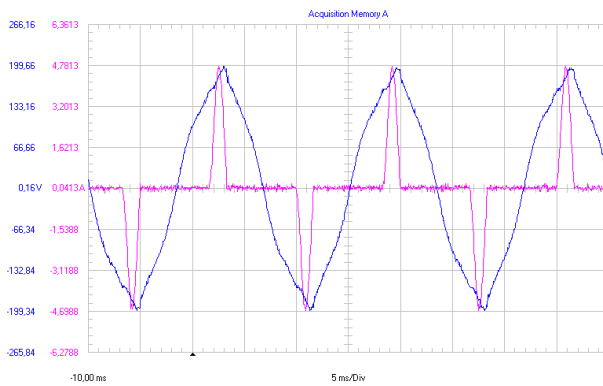


Fig. 25. Formas de onda de tensão e corrente das 4 lâmpadas (isoladas).

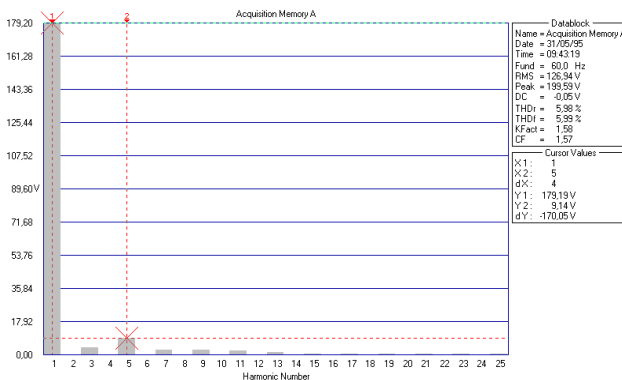


Fig. 26. Espectro harmônico de amplitude da tensão da Fig. 25.

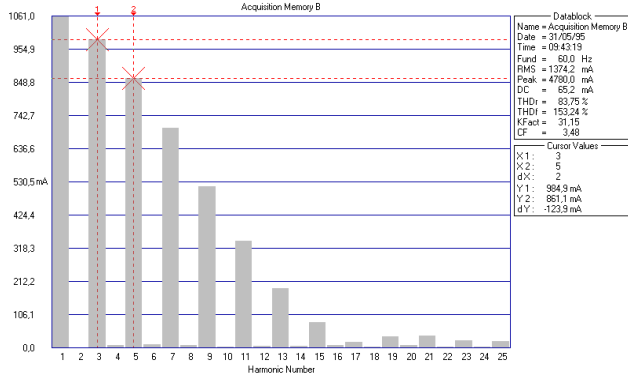


Fig. 27. Espectro harmônico de amplitude da corrente da Fig. 25.

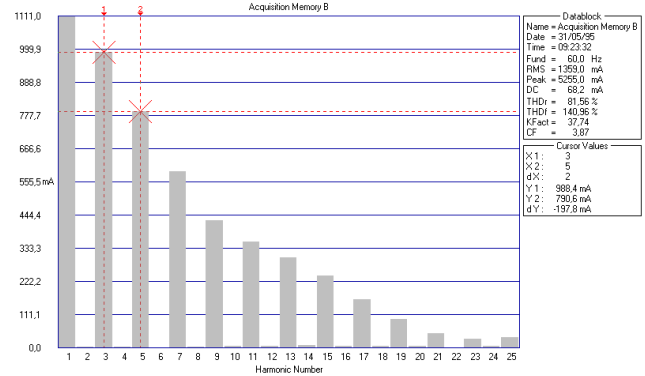


Fig. 30. Espectro harmônico de amplitude da corrente da Fig. 28.

Na Fig. 28 é vista a alteração da forma de onda da corrente nas 4 lâmpadas com a inserção de uma carga não-linear em paralelo (microcomputador – 100 W). Na Fig. 29 e na Fig. 30 são apresentados os espectros de amplitude da tensão e corrente das formas de onda da Fig. 28. Foi observado um aumento de 44,28 % na amplitude do 3º harmônico e a redução de 40,01 % na amplitude do 9º harmônico de tensão. Comparando-se os espectros da Fig. 27 e Fig. 30, verifica-se a redução das amplitudes do 5º ao 9º harmônico da corrente, o aumento da amplitude do 3º harmônico, e um aumento significativo das amplitudes do 13º harmônico em diante. O valor rms da corrente continuou praticamente o mesmo, porém a TDHi foi reduzida de 153,24 % para 140,96 %.

Com a inserção de uma carga linear (ventilador – 120 W) em paralelo, e retirando o microcomputador, verifica-se pela Fig. 31 que não houve mudança significativa na forma de onda da corrente, quando comparada com a da Fig. 25 e, conseqüentemente, não houve alteração no formato do espectro da corrente.

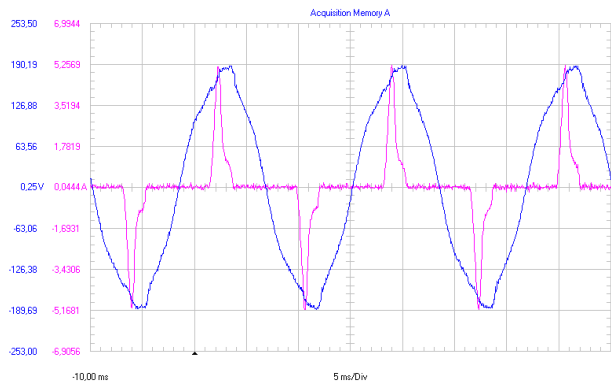


Fig. 28. Formas de onda de tensão e corrente das 4 lâmpadas (computador em paralelo).

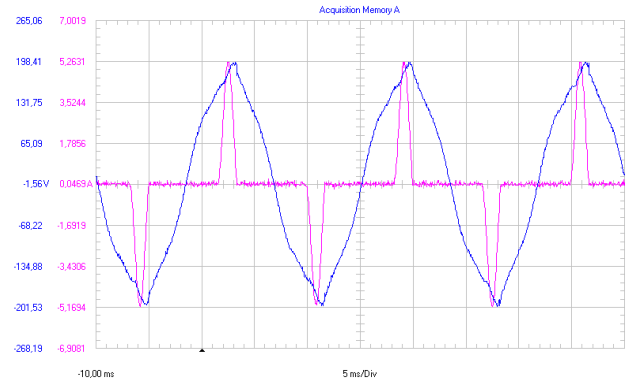


Fig. 31. Formas de onda de tensão e corrente das 4 lâmpadas (ventilador em paralelo).

Essas medições foram feitas várias vezes sucessivas e não se verificou a alteração das grandezas medidas.

2) Cargas Alimentadas por Tensão Não-Senoidal

Neste exemplo, tem-se um microcomputador (100 W) em paralelo com um ventilador, alimentados por uma tensão com forma de onda quadrada modificada. Neste caso, faz-se a monitoração da corrente do computador com e sem o ventilador em paralelo. O espectro da tensão não apresentou variação nessas duas situações medidas, apresentando a forma de onda da tensão, 117 Vrms e 152 Vpico, com uma TDHv em torno de 30,48 %.

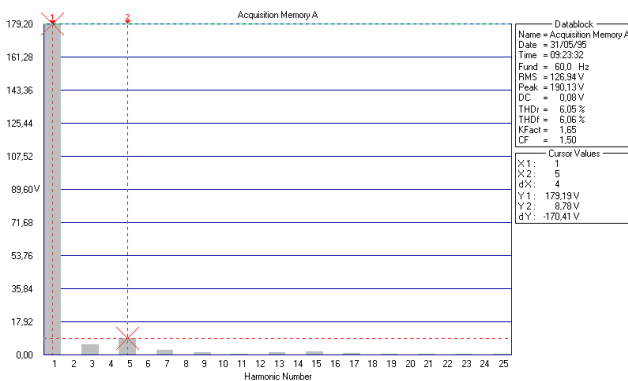


Fig. 29. Espectro harmônico de amplitude da tensão da Fig. 28.

Comparando-se os espectros da amplitude da corrente no microcomputador isolado (Fig. 32) e no microcomputador com um ventilador em paralelo (Fig. 33), verifica-se um aumento não proporcional das amplitudes dos harmônicos ímpares e, conseqüentemente, o valor rms da corrente aumentou de 1,10 A para 1,31 A, resultando em um aumento de 103,47 % para 125,71 % na TDHi, com a inserção do ventilador em paralelo.

Nessa situação, o ventilador exerce uma influência negativa na corrente do computador (aumento das amplitudes dos

harmônicos) quando os dois são colocados em paralelo e alimentados por uma forma de onda quadrada modificada de tensão.

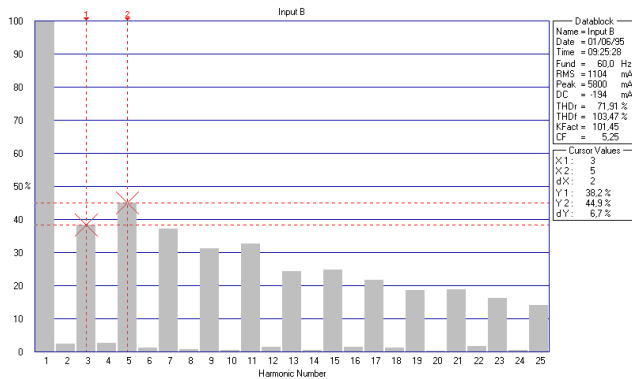


Fig. 32. Espectro de amplitude da corrente do microcomputador (isolado).

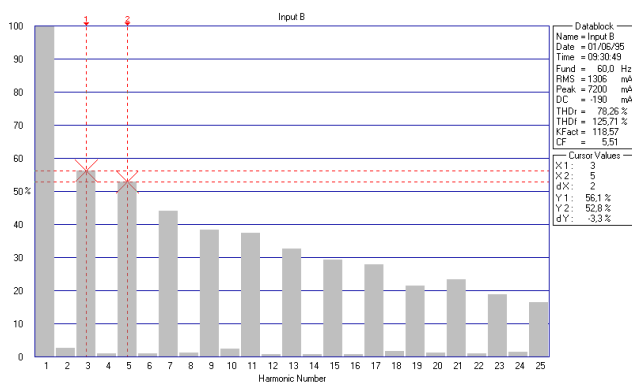


Fig. 33. Espectro de amplitude da corrente do microcomputador (ventilador em paralelo).

Essas medições foram repetidas várias vezes, e observou-se que sempre permaneciam as mesmas características das Fig. 32 e 33 para o espectro da corrente sem e com o ventilador em paralelo, respectivamente.

V. CONCLUSÕES

A forma de onda da tensão de alimentação sobre uma carga não-linear tem influência significativa no fator de potência e na distorção harmônica total de corrente da mesma. Para o caso observado das cargas com estágio de entrada de um retificador com filtro capacitivo, elas apresentaram um fator de potência alto quando alimentadas por uma forma de onda quadrada de tensão e também uma baixa distorção harmônica total de corrente, em comparação com a alimentação por uma tensão senoidal, além do fato de menor consumo de energia, comparado com os demais inversores.

O baixo fator de potência apresentado pelas lâmpadas PL, quando a forma de onda de tensão é quadrada modificada ou senoidal, leva a uma elevação da circulação de reativos. Perdas adicionais nos cabos de distribuição são inseridas, devido ao alto valor eficaz da corrente de entrada, se o ponto de consumo estiver distante do inversor.

No entanto, outro ponto a ressaltar é que o tipo de aplicação ou o tipo de carga a ser suprida, associado ao custo,

são fatores fundamentais que devem ser considerados na escolha de um inversor.

Efeitos parecidos com os das medições apresentadas neste trabalho foram observados quando se realizaram testes com equipamentos de mesma classe e porte, porém de outros fabricantes. Não foram feitas medições com cargas de potência mais elevada em um circuito totalmente isolado (livre das influências de outras cargas que por ventura poderiam interferir na medição e da oscilação do valor rms da tensão), devido à queda de tensão no inversor e ao descarregamento do banco de baterias utilizado na entrada dos inversores, que nesse caso seria mais rápido.

A corrente com conteúdo harmônico produzida por cargas não-lineares influencia na tensão de alimentação, introduzindo componentes harmônicas na tensão, mesmo que o gerador não produza essas componentes. Essa influência é maior, por exemplo, em sistemas de geração de pequeno porte, pois esses geradores possuem uma impedância série mais alta (baixa potência de curto-circuito), quando comparada com a rede da concessionária.

A conexão de diferentes cargas não-lineares em sistemas de baixa tensão, mesmo com o aumento da THD_v, pode levar à redução da THD da corrente resultante das cargas em paralelo, devido às mudanças no formato da forma de onda de tensão de alimentação e/ou pelo efeito de cancelamento ou atenuação por ângulo de fase.

Outro ponto a se destacar é que a influência entre cargas pode eventualmente ser usada como uma maneira de atenuar harmônicos indesejáveis.

A alteração dos parâmetros da TV a fim de reduzir a TDH_i do sistema, no item B da seção IV, foi realizada de maneira a verificar se havia alguma influência apreciável nas formas de onda de corrente das lâmpadas. Contudo, pode-se utilizar técnicas de otimização para um modelo matemático de uma "carga fictícia" em paralelo com uma carga não-linear, que busque o cálculo dos coeficientes ótimos da carga fictícia, de modo que haja compensação harmônica, podendo haver situações em que ocorrem a atenuação de alguns harmônicos e amplificação da amplitude da fundamental.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Mansoor, W. M. Grady, A. H. Chowdhury e M. J. Samotyj, "An Investigation of Harmonic Attenuation and Diversity Among Distributed Single-Phase Power Electronic Loads". *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 10, No.1, pp. 467-473, Jan. 1995.
- [2] C. Agüero, D. Anaut, G. di Mauro, J. A. Suarez, "Análisis de la Distorsión Armónica y los Efectos de Atenuación y Diversidad en Areas Residenciales", *Revista IEEE América Latina*, Vol. 3, No. 5, pp. 429-435, Dez. 2005.
- [3] M. A. B. Galhardo e J. T. Pinho, "Avaliação da Qualidade da Energia Fornecida por Sistemas Renováveis Isolados de Pequeno Porte," *5º Encontro de Energia no Meio Rural e Geração Distribuída- AGRENER-GD 2004*, Campinas-SP, Out. 2004.
- [4] F. M. Silva, N. J. Camelo, O. R. Saavedra e W. M. Santos, "Iluminação Baseada em Sistemas Fotovoltaicos: Análise de Desempenho sob Condição de Tensão Não-Senoidal," *5th Latin-American Congress: Electricity Generation and Transmission*, São Pedro-SP, Nov. 2003.
- [5] M. A. B. Galhardo, "Estudo da Influência Mútua de Harmônicos e Cargas Não-Lineares em Sistemas de Energia Elétrica," Dissertação de Mestrado; orientada por J. T. Pinho, PPGEE/ITEC/UFPA; Fev. 2002.

- [6] S. Hansen, P. Nielsen e F. Blaabjerg, "Harmonic Cancellation by Mixing Nonlinear Single-Phase and Three-Phase Loads," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 36, No. 1, pp. 152-159, Jan./Fev. 2000.
- [7] *IEEE Trial-Use Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions*, IEEE Standard 1459-2000, 2000.



M. A. B. Galhardo nasceu em Belém, Pará, Brasil, em 7 de setembro de 1976, é engenheiro eletricista com doutorado em Sistemas de Energia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (UFPA). Atualmente é membro do Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (GEDAE / UFPA), atuando principalmente nos seguintes temas de pesquisa: qualidade da energia, energias renováveis, eficiência energética, compensação de harmônicos, modelagem de sistemas não-lineares, telemetria e geração de

eletricidade.



J. T. Pinho nasceu em Belém, Pará, Brasil em 22 de agosto de 1955. Recebeu os títulos de Bacharel em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (UFPA), em 1977, de Mestre em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, em 1984, e de Doutor em Engenharia Elétrica pela Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (Alemanha) em 1990. Trabalha no Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Federal do Pará desde

1978, trabalhou como assistente na RWTH Aachen, de 1986 a 1990, foi coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA de 1992 a 1994, e é atualmente Professor Titular e coordenador do Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (GEDAE) da UFPA.

Seus interesses em pesquisa estão centrados em eletromagnetismo, especialmente em aplicações industriais de microondas, e na aplicação de sistemas híbridos de geração de eletricidade, especialmente os que utilizam as energias solar fotovoltaica e eólica. Nessas áreas tem orientado diversos trabalhos de graduação e pós-graduação e publicado vários artigos a nível nacional e internacional.

O Prof. Pinho é consultor ad hoc de diversos conselhos e instituições de fomento no Brasil, membro de várias sociedades científicas nacionais e internacionais, atual presidente da ISES (International Solar Energy Society) - Seção Brasil.