



# VI SBQEE

21 a 24 de agosto de 2005

Belém – Pará – Brasil



Código: BEL 16 7740

Tópico: Qualidade da Energia em Sistemas com Geração Distribuída

## INFLUÊNCIA DA FORMA DE ONDA DE ALIMENTAÇÃO SOBRE CARGAS NÃO-LINEARES EM SISTEMAS DE GERAÇÃO DE PEQUENO PORTE

MARCOS A. B. GALHARDO\*

GEDAE/UFPA

JOÃO T. PINHO

GEDAE/UFPA

### RESUMO

Neste trabalho mostra-se que a forma de onda da tensão de alimentação sobre cargas não-lineares tem influência significativa no fator de potência e na demanda de energia do sistema, fato importante para a autonomia do banco de baterias, utilizado em sistemas de geração de energia elétrica com fontes intermitentes. Assim também há influência na taxa de distorção harmônica, nos valores efetivos e de pico da corrente da carga. Para enfatizar o estudo, apresentam-se medições em cargas com fontes chaveadas, alimentadas por inversores de diferentes formas de onda e fazem-se análises do ponto de vista da conservação e da qualidade da energia elétrica.

### PALAVRAS-CHAVE

Cargas Não-Lineares, Inversores, Energia Renovável, Harmônicos, Sistemas Elétricos de Pequeno Porte.

### 1.0 INTRODUÇÃO

Os sistemas de pequeno porte com fontes renováveis apresentam-se como alternativas bastantes favoráveis aos planos de universalização do atendimento de energia elétrica no Brasil, especialmente em locais isolados da rede de distribuição de energia elétrica.

Neste trabalho abordam-se os sistemas isolados de pequeno porte que fazem o armazenamento da energia elétrica gerada em um banco de baterias e a conversão da tensão CC em tensão CA, realizada por um inversor estático.

Ao instalar um sistema renovável, recomenda-se aos seus usuários a economia de energia, para que utilizem equipamentos mais eficientes, ou seja, que executam a mesma função comparada à de outros de maior consumo, pois existe a limitação do sistema de geração e também a intermitência da fonte primária (sol e vento, por exemplo). Isso se torna necessário para o aumento da confiabilidade e autonomia do sistema, assim como a diminuição do seu custo de implantação.

Outro parâmetro importante nesses sistemas é assegurar a compatibilidade entre o tipo de carga a ser usada e o inversor, para se evitar problemas no acionamento das mesmas [1].

Logo, se as medidas acima não forem estudadas e implementadas de forma adequada, podem resultar em problemas relacionados à qualidade da energia elétrica.

### 2.0 FORMAS DE ONDA DOS INVERSORES UTILIZADOS

Dentre as formas de onda da tensão de saída dos inversores, destacam-se: a quadrada, a quadrada modificada e a senoidal.

Os inversores com forma de onda quadrada são de mais fácil construção e mais baratos. Seus principais inconvenientes são: peso (utilizam um transformador de baixa frequência bastante pesado), alta distorção harmônica total de tensão (THDv), superior a 40%, e baixa eficiência, em torno de 60 a 80 %. Os inversores de onda quadrada modificada apresentam THDv 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 THDv (1 a 5 %) tornam o inversor senoidal

tecnicamente desejável. No entanto, o seu alto preço torna-o inviável em muitas aplicações [2]. A tabela 1 apresenta os inversores utilizados neste trabalho, suas respectivas potências nominais, e também uma sigla escolhida para referenciá-los no trabalho. A razão da escolha de cada um dos inversores da tabela 1 é explicada mais adiante.

Tabela 1 - Inversores utilizados nos testes.

Forma de Onda	Sigla	Potência Nominal (W)
Senoidal	S1	250
Senoidal	S2	4.000
Quadrada Modificada	M1	250
Quadrada Modificada	M2	800
Quadrada Modificada	M3	1.500
Quadrada Recortada	R1	260
Quadrada	Q1	300
Quadrada	Q2	300

Dentre os inversores testados inclui-se um, de determinado fabricante, que é vendido como de onda quadrada. Porém, verifica-se que sua forma de onda de tensão difere da de uma onda quadrada, preferindo-se nomeá-lo, neste trabalho, como forma de onda quadrada recortada (R1).

### 3.0 APLICAÇÕES

As aplicações mais freqüentes desses sistemas são: eletrificação de residências, prédios comunitários e pequenos comércios; iluminação pública; sistemas de sinalização e de iluminação de emergência; eletrificação de barcos e de estações rádio-base; etc.

Nessas aplicações deve-se levar em conta que o objetivo é a operação dos equipamentos elétricos do usuário dentro de parâmetros que não prejudiquem seu funcionamento.

Na situação em que a carga é puramente resistiva, como por exemplo, lâmpada incandescente, ferro de soldar, ferro elétrico e chuveiro elétrico (embora não indicado o uso dessas cargas no sistema, devido ao alto consumo de energia ativa), a corrente é diretamente proporcional à tensão e, conseqüentemente, apresenta a mesma forma de onda da tensão com distorção harmônica total de corrente (THDi) igual à THD da tensão de alimentação. Nota-se também que neste caso, em que o objetivo é o aquecimento, pouco importa a forma de onda fornecida pelo inversor. Quando os inversores de onda quadrada e quadrada modificada alimentam motores de indução, tem-se o aumento do aquecimento

devido ao aumento das perdas no ferro e no cobre, afetando-se, assim, a eficiência e o torque disponível. Outro fenômeno observado é a presença de harmônicos no fluxo magnético, produzindo alterações no acionamento, com componentes de torque que atuam no sentido oposto ao da fundamental. Verifica-se que com esse tipo de alimentação há a impossibilidade do equipamento atingir sua máxima potência e uma alimentação freqüente desse tipo de tensão poderá causar a redução da vida útil do aparelho. Observa-se notadamente a redução na rotação do aparelho e o aumento de ruído audível [3]. Portanto, esses inversores não são indicados para a alimentação de geladeiras, freezers, bombas d'água, ventiladores, liquidificadores, furadeiras, etc.

### 4.0 ALIMENTAÇÃO DE CARGAS NÃO-LINEARES

Neste tópico mostra-se a influência do conteúdo harmônico da tensão de alimentação em cargas não-lineares do tipo com retificador de filtro capacitivo, sendo essa influência observada por meio de medições realizadas utilizando inversores com diferentes formas de onda de tensão e estando a carga não-linear isolada da influência de outras cargas.

#### 4.1 Cargas com retificador com filtro capacitivo

Atualmente, quase que universalmente, equipamentos eletrônicos possuem fontes chaveadas, as quais possuem um estágio de entrada constituído por um retificador com filtro capacitivo (figura 1).

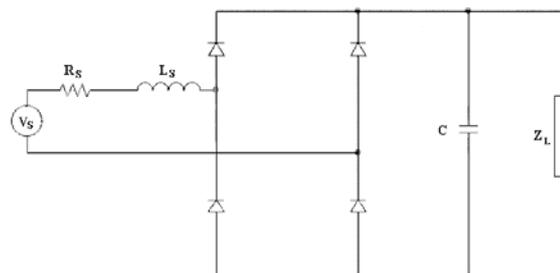


Figura 1 - Retificador com filtro capacitivo.

Para a alimentação quadrada, verifica-se que no circuito do retificador de onda completa, o capacitor, já estando carregado, se comporta como um circuito aberto em regime permanente, pois há uma tensão CC sobre o mesmo. Para alimentação quadrada modificada, existe um elevado valor de pico da corrente no momento de carga do capacitor. Em regime, quando a tensão

de alimentação é nula, o capacitor começa a se descarregar até atingir uma determinada tensão, isto é, até o momento em que há tensão novamente sobre a carga. Nesse instante, ocorre uma variação brusca de tensão no capacitor, elevando a corrente de carga do capacitor e, conseqüentemente, a corrente de entrada do circuito.

Para a alimentação senoidal, a forma de onda da corrente de entrada é muito diferente de uma senóide, apresentando uma corrente de forma impulsiva nos momentos em que o capacitor é carregado (a cada meio ciclo), pois não há uma indutância alta no lado AC. O capacitor carrega-se com, aproximadamente, a tensão de pico da entrada. Quando a tensão de entrada torna-se menor do que a tensão no capacitor os diodos ficam bloqueados e a corrente para o restante da carga é fornecida exclusivamente pelo capacitor, o qual vai se descarregando, até que, novamente, a tensão de entrada fique maior, recarregando o capacitor.

#### 4.1.1 Medições

Para exemplificar, utilizou-se os inversores R1, M1, Q1 e S1, cujas potências nominais são próximas, para alimentar: 1 Microcomputador com potência nominal de 110 W, 1 aparelho de TV de 20" com potência nominal de 85 W e 4 lâmpadas fluorescentes compactas (PL) com potência nominal de 30 W cada.

As figuras 2, 4, 6 e 8 apresentam as formas de onda de tensão de saída dos inversores R1, M1, Q1 e S1, respectivamente, alimentando as 3 cargas separadamente.

Nas figuras 3, 5, 7 e 9 observa-se o formato da onda de corrente das cargas para o tipo de alimentação utilizada.

Nota-se um significativo aumento da THD da tensão de saída do inversor S1 (de 4 % a vazio para aproximadamente 25 % nos três casos), descaracterizando a onda senoidal. Isso se deve à baixa potência de curto-circuito do inversor e à falta de controle e filtros no sentido de minimizar a THDv de saída.

A utilização de Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes – SIGFI é uma opção para a universalização dos serviços de energia elétrica, conforme a Resolução Normativa Nº 83 de 2004 da ANEEL [4], a qual estabelece o fornecimento de energia através de um inversor de onda senoidal com potência mínima disponibilizada a partir de 250 W, conforme a disponibilidade de energia mensal garantida pelo sistema. Ressalta-se que essa resolução é para sistemas de geração de energia

elétrica implantados por concessionárias ou permissionárias de distribuição de energia elétrica, utilizando exclusivamente fonte de energia intermitente, para o fornecimento a unidade consumidora única.

Devido à baixa potência de curto-circuito dos inversores de pequeno porte, ocorrem variações no valor rms da tensão de saída do inversor com a entrada de cargas não-lineares, que podem ser prejudiciais às mesmas ou provocar anomalias nas suas características elétricas ou luminosas.

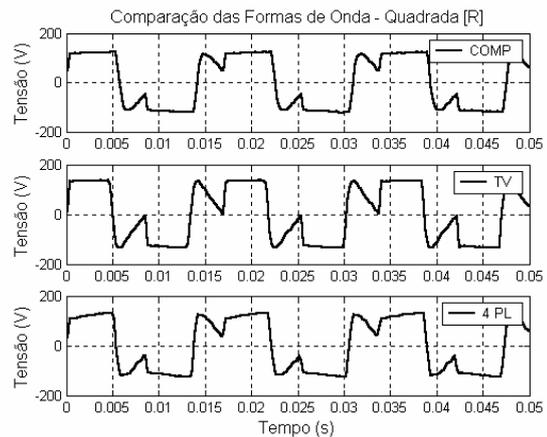


Figura 2 - Tensão na saída do inversor R1.

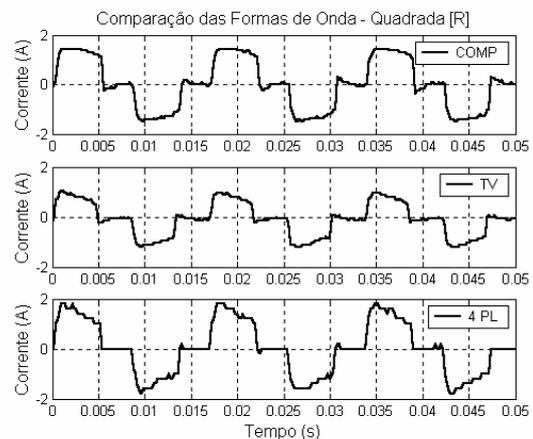


Figura 3 - Forma de onda da corrente das cargas sob a alimentação do inversor R1.

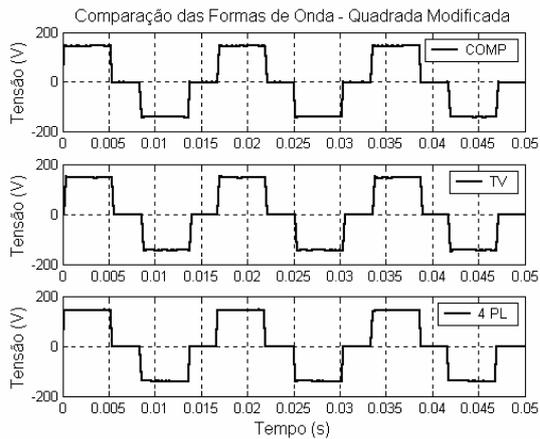


Figura 4 - Tensão na saída do inversor M1.

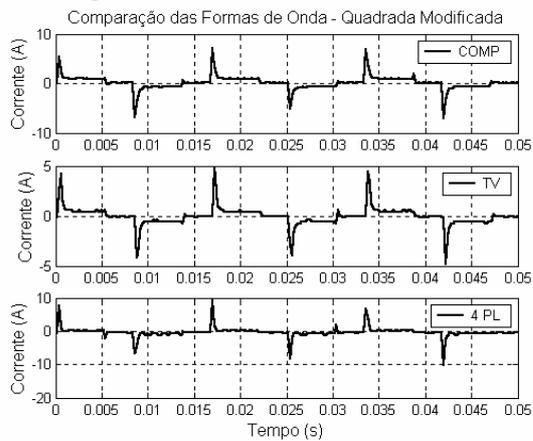


Figura 5 - Forma de onda da corrente das cargas sob a alimentação do inversor M1.

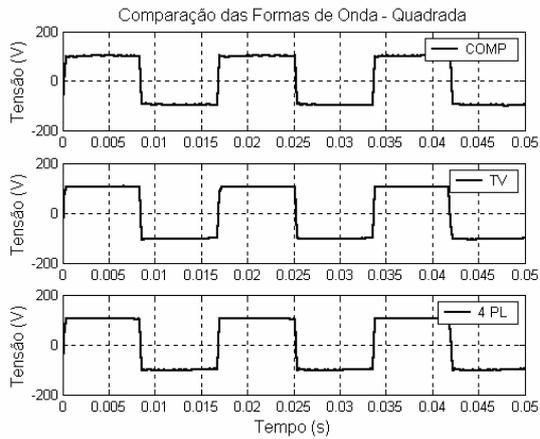


Figura 6 - Tensão na saída do inversor Q1.

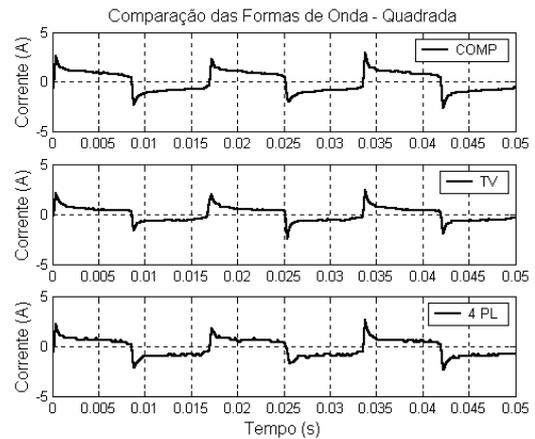


Figura 7 - Forma de onda da corrente das cargas sob a alimentação do inversor Q1.

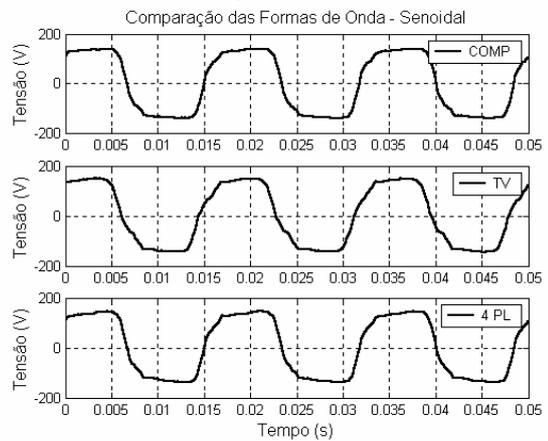


Figura 8 - Tensão na saída do inversor S1.

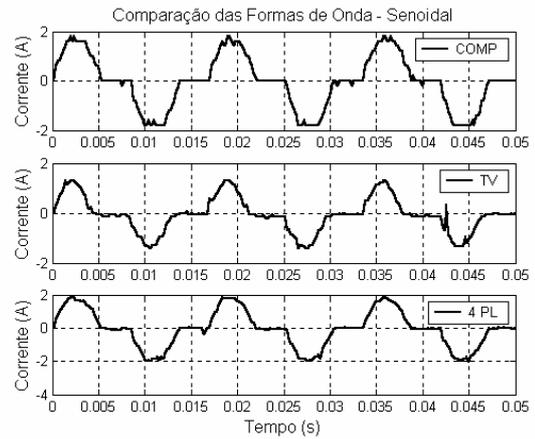


Figura 9 - Forma de onda da corrente das cargas sob a alimentação do inversor S1.

Das figuras 3, 5, 7 e 9, percebe-se o maior valor de corrente de pico na alimentação quadrada modificada.

Na figura 10 observa-se uma similaridade entre os espectros harmônicos de amplitude da corrente das cargas, nas frequências ímpares, sob a alimentação do inversor Q1. Existe também

uma similaridade quando as cargas são alimentadas pelo inversor S1 (figura 11).

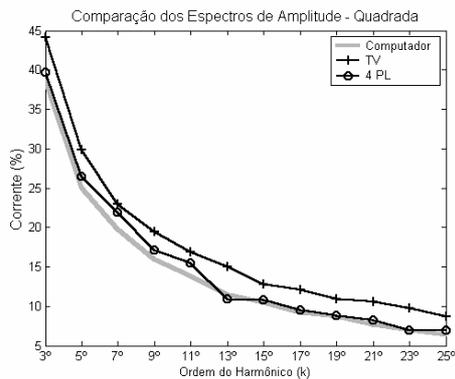


Figura 10 - Espectro harmônico de amplitude de determinadas cargas sob a alimentação do inversor Q1.

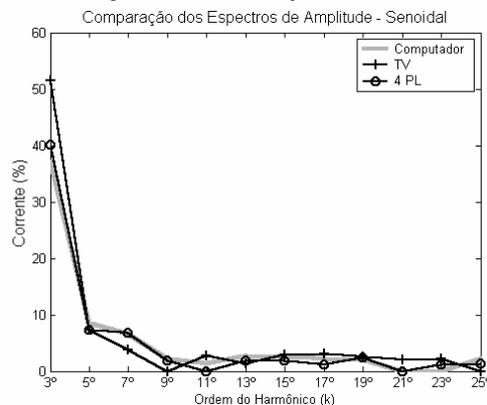


Figura 11 - Espectro harmônico de amplitude de determinadas cargas sob a alimentação do inversor S1.

No gráfico da figura 12 verifica-se a mesma tendência da figura 10, para o outro inversor de onda quadrada (Q2) alimentando os mesmos tipos de equipamentos, porém de diferentes potências nominais e fabricantes.

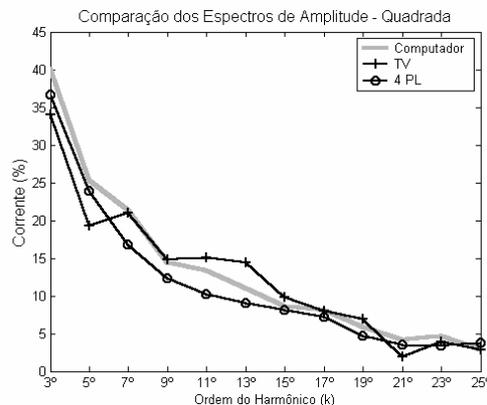


Figura 12 - Espectro harmônico de amplitude de determinadas cargas sob a alimentação do inversor Q2.

A tabela 2 mostra os parâmetros elétricos de desempenho dos inversores R1, M1, Q1 e S1,

alimentando as 4 lâmpadas PL. Sendo,  $V_{rms}$ : tensão rms;  $I_{rms}$ : corrente rms; P: potência ativa; QB: potência reativa de Budeanu; S: potência aparente; DB: potência de distorção de Budeanu; N: potência não-ativa ou de Fryze; FP: fator de potência e  $I_{pico}$ : corrente de pico.

As potências foram calculadas segundo as definições apresentadas na referência [5].

Observa-se piores parâmetros de desempenho na alimentação do inversor M1, comparado aos demais inversores.

Ressalta-se que não se está descontando o autoconsumo dos inversores, e também que a existência de N no lado CC, deve-se à forma da corrente solicitada na entrada do inversor (com frequência igual a 120 Hz, dobro da frequência no lado CA).

Desses inversores, o inversor Q1 é o que mais demanda potência ativa operando a vazio (cerca de 30 W), já o inversor M1 consome cerca de 11 vezes menos (2,6 W) operando a vazio.

Tabela 2 – Medição nos lados CA e CC dos inversores R1, M1, Q1 e S1, alimentando 4 lâmpadas PL.

Parâmetros	Lado CA (regime permanente)			
	R1	M1	Q1	S1
$V_{rms}$ (V)	107,19	111,97	102,11	118,64
$I_{rms}$ (A)	1,07	1,50	0,88	1,09
P (W)	95,24	82,00	83,56	104,79
QB (Var)	29,14	-38,56	-19,19	-8,94
S (VA)	114,91	167,63	90,30	129,76
DB (VA)	57,32	141,02	28,36	76,00
N (Var)	64,30	146,20	34,24	76,52
FP	0,83	0,49	0,93	0,81
THDv (%)	53,33	31,68	45,37	24,88
THDi (%)	35,57	154,10	62,26	41,61
$I_{pico}$ (A)	1,80	9,20	2,75	1,92
Parâmetros	Lado CC (regime permanente)			
	R1	M1	Q1	S1
$V_{rms}$ (V)	10,93	10,96	10,33	10,29
$I_{rms}$ (A)	15,02	11,34	10,66	17,11
P (W)	119,90	122,37	109,22	112,74
S (VA)	164,25	124,21	110,15	175,98
N (Var)	112,26	21,25	14,26	135,13
FP	0,73	0,99	0,99	0,64

A figura 13 apresenta o espectro harmônico de amplitude da corrente de 4 lâmpadas PL de outro fabricante e alimentadas pelos inversores Q2, M2 e S2 (senoidal, THDv igual a 1 % alimentando as lâmpadas).

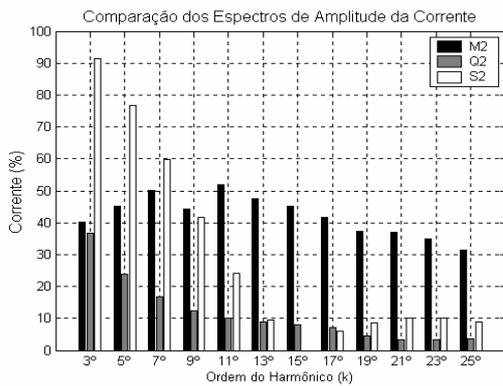


Figura 13 - Espectro harmônico de amplitude da corrente das lâmpadas alimentadas com diferentes formas de onda.

Nesse caso, quando as lâmpadas PL são alimentadas pelo inversor de onda quadrada, tem-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, na alimentação do tipo quadrada, o fator de potência próximo de 1.

Observa-se que quando as lâmpadas são alimentadas pelo inversor de onda quadrada modificada ocorre uma elevação das amplitudes do espectro harmônico da corrente, mesmo em frequências mais altas. Para as 4 lâmpadas, quando a alimentação é senoidal, a 3ª e a 5ª componentes harmônicas da corrente apresentam amplitudes bastante elevadas. Verificou-se também nessa medição um maior consumo de energia do banco de baterias para as alimentações do tipo quadrada modificada e senoidal.

O baixo fator de potência apresentado por essas cargas quando a forma de onda de tensão é quadrada modificada ou puramente senoidal leva a uma elevação da circulação de reativos, que contribui para o aumento da capacidade e do custo do sistema de fornecimento de energia elétrica. 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.

Testes de desempenho para lâmpadas PL sob diferentes formas de onda de alimentação foram realizados em [6] e [2]. O menor nível de luminosidade apresentado pelas lâmpadas foi para a alimentação do inversor de onda quadrada (menor nível de tensão de alimentação). Porém, para essa alimentação, as lâmpadas apresentam, em geral, eficiência luminosa (lux/Watt) maior do que para a alimentação puramente senoidal, devido à potência ativa consumida pelas mesmas em cada alimentação.

Outro parâmetro importante na seleção de um inversor é a potência que o mesmo pode suprir na partida de um equipamento. Como exemplo,

fez-se teste em um conjunto de lâmpadas PL de determinado fabricante, cuja soma das potências nominais era próxima à capacidade de suprimento do inversor Q2 e notou-se que o mesmo consegue dar partida simultânea nas lâmpadas PL. Já os inversores de onda quadrada modificada M2 e M3 não conseguem dar partida no conjunto de lâmpadas simultaneamente (potência ativa de suprimento do inversor M3 cerca de 6 vezes maior que a potência nominal da carga). Isso se deve à alta corrente de pico das lâmpadas PL e um maior valor de energia reativa solicitado na partida na alimentação quadrada modificada. Não foram feitos testes com o inversor S1 devido à sua potência de suprimento e S2, de maior porte, supre toda a energia solicitada pelas lâmpadas na partida.

A avaliação da partida de lâmpadas fluorescentes com reator eletromagnético e eletrônico, alimentadas com diferentes formas de onda, será incluída em um trabalho futuro.

## 5.0 CONCLUSÕES

Observa-se 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.

Para o caso apresentado das cargas com retificador de filtro capacitivo, observou-se que quando alimentadas por uma forma de onda quadrada, elas apresentam um fator de potência mais alto, menor consumo de energia do banco de baterias e também uma menor THDi, em comparação com a alimentação por uma tensão senoidal e por tensão quadrada modificada.

No caso das lâmpadas PL, apesar de parâmetros favoráveis à alimentação quadrada, pelo lado da conservação da energia, como menor demanda das energias ativa e reativa, verifica-se um nível de iluminância mais baixo, quando comparado com a alimentação senoidal e quadrada modificada. Entretanto, isso pode ser atribuído ao menor nível de tensão de saída do inversor de onda quadrada.

Como trabalho futuro, pretende-se também avaliar o desempenho dos inversores alimentando a agregação de diferentes eletrodomésticos.

## 6.0 REFERÊNCIAS

- [1] I. R. Salazar. "Procedimentos de Qualificação e Aceitação de Componentes de Sistemas Fotovoltaicos Domiciliares". Dissertação de Mestrado, PIPGE/IEE-EP-FA-IF/USP, 2004.

[2] F. M. Silva, N. J. Camelo, O. R. Saavedra, 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; novembro; 2003.

[3] M. A. B. Galhardo e J. T. Pinho. "Avaliação da Qualidade da Energia Fornecida por Sistemas Renováveis Isolados de Pequeno Porte", AGRENER GD 2004 – V Encontro de Energia no Meio Rural e Geração Distribuída, outubro, 2004.

[4] Resolução Normativa N° 83, de 20 de setembro de 2004. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL.

[5] IEEE Standard 1459-2000. "IEEE Trial-Use Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions", 2000.

[6] M. A. B. Galhardo e J. T. Pinho. "Análise do Desempenho de Inversores de Pequeno Porte com Diferentes Formas de Onda", IV AGRENER, 2002.

## 7.0 AGRADECIMENTOS

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

Agradecemos também ao Prof. Roberto Zilles, Coordenador do Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos da Universidade de São Paulo (LSF/IEE/USP), pela permissão para realização de medições utilizando os equipamentos desse Laboratório.

