

# GERADOR DE SINAIS PERIÓDICOS GENÉRICOS PARA UTILIZAÇÃO EM FONTES DE ALIMENTAÇÃO CA

ALESSANDRO LUIZ BATSCHAUER, JOSELITO ANASTÁCIO HEERDT, MARCELLO MEZAROBA, NEOMAR GIACOMINI

*Laboratório de Eletrônica de Potência, Departamento de Engenharia Elétrica, UDESC  
Campus Universitário Prof. Avelino Marcante s/n, Bom Retiro, Joinville, SC, Brasil, CEP: 89223-100  
E-mails: batschauer@joinville.udesc.br, jaheerdt@joinville.udesc.br,  
mezaroba@joinville.udesc.br, neomar@joinville.udesc.br*

**Abstract**— This paper presents a Generic Signal Generator based on the Fourier mathematical series which uses a Digital Signal Controller (DSC) as its core to manage several capabilities that includes serial communication, liquid crystal display and keyboard user interfaces. The main idea of this generator is to allow the user to create its own periodic signal with the necessary harmonics or the recreate signals from data obtained from power line harmonic analysis or simulation results. The developed system was tested on a 3.5kW class D power amplifier with characteristics that allow the generation or the reproduction of power lines.

**Keywords**— AC Power Source, Fourier Series, Class D Amplifier, Generic Signal Generator, Industrial Interfaces.

**Resumo**— Este artigo apresenta um Gerador de Sinais Genéricos baseado na série matemática de Fourier que utiliza um Controlador Digital de Sinais (DSC) como gerenciador das diversas capacidades do sistema tais como comunicação serial e interface de usuário contendo teclado e display de cristal líquido. A idéia global deste gerador é a de permitir que o usuário crie seu próprio sinal periódico com os harmônicos desejados ou que recrie outros através de dados provenientes de análises harmônicas de linhas de energia ou de resultados de simulação. O sistema desenvolvido foi testado em um amplificador classe D de 3,5kW com características que permitem a geração ou reprodução de redes de energia.

**Palavras-chave**— Amplificadores Potência Classe D, Gerador de Sinais Genéricos, Interfaces Industriais, Série de Fourier, Fontes de Alimentação CA.

## 1 Introdução

Nas últimas décadas com a evolução da eletrônica, principalmente no que diz respeito ao processamento de energia, diversos problemas começaram a surgir devido as novas técnicas de acionamento e circuitos desenvolvidos. Dentre os problemas mais comuns pode-se citar a geração de ruídos eletromagnéticos das mais variadas frequências que ao circularem nas redes de energia podem causar danos a outros sistemas conectados a ela. De forma a garantir o correto funcionamento de equipamentos comerciais, foram criadas normas que exigem a certificação do seu correto funcionamento através de testes onde são aplicadas situações adversas de rede de energia ao equipamento. Com base nesta realidade, verificou-se a necessidade de projetar um gerador que possibilite a simulação de redes de energia, simplesmente fornecendo os coeficientes da Série de Fourier do sinal desejado. Desta forma, na necessidade da realização de testes utilizando redes reais de energia elétrica, a geração de sinais genéricos permite ao usuário a liberdade de alcançar os pontos de operação necessários sem que haja necessidade de deslocamento do equipamento em teste para a localidade da rede em questão, agilizando assim o processo de desenvolvimento e teste de equipamentos.

Este artigo apresenta um sistema completo de geração de sinais genéricos visando a liberdade na criação de sinais periódicos proporcionada pela Série

de Fourier, contemplando a metodologia de geração dos sinais, interfaces homem-máquina, testes com um amplificador e a análise dos resultados obtidos.

## 2 Sistema de Geração

A Figura 1 apresenta o diagrama de blocos geral do sistema desenvolvido.

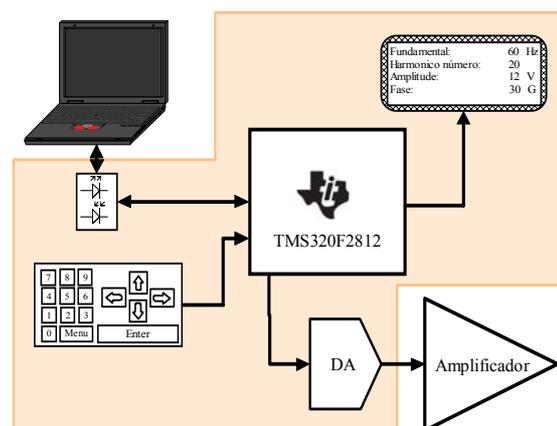


Figura 1 – Diagrama de Blocos do Sistema.

Em termos práticos, o sistema é dividido em 3 partes distintas, sendo elas: Gerador de Referências, Software de Gerenciamento Remoto e Amplificador. O Gerador de Referências tem como função o gerenciamento da interface homem-máquina e a reconstrução do sinal. O Software de Gerenciamento Remoto

é responsável pela transferência dos dados provenientes de simulações ou análises de redes. O amplificador é responsável pela amplificação do sinal de referência de forma a deixá-lo com a amplitude necessária para simular a rede desejada.

### 2.1 Características do sistema

A listagem abaixo apresenta as características do sistema:

- Resolução de 8 bits;
- Amplitude: 0 a 380V;
- Frequência: DC a 500Hz;
- Isolação galvânica;
- Display de 20 linhas por 4 colunas;
- Teclado com 20 Teclas;
- Comunicação serial padrão RS232;
- Programa para comunicação.

A escolha destas características foi baseada na necessidade de praticidade na operação do sistema e nas características desejadas para o sinal de saída.

## 3 Gerador de Referências

Como se sabe a partir da Série de Fourier, qualquer sinal periódico pode ser recomposto através de um somatório de senos e cossenos, ou simplesmente de senóides defasadas. Partindo desta premissa e da possibilidade de se coletar os coeficientes de Fourier através de equipamentos de análise de redes de energia ou de simuladores, especificou-se o gerador descrito a seguir.

### 3.1 Hardware do gerador

A placa de interface homem-máquina contém: Conversão digital-analógica com eliminação de nível CC, realizada pelo conversor TLC7524 da *Texas Instruments*; Comunicação serial isolada; Reguladores de tensão para alimentação e referência para o conversor D/A; Teclado com 20 teclas; Display LCD em modo caractere de tamanho 20x4 com ajuste de contraste. Além desta placa, é utilizado um kit TMDSEZD2812 da *Texas Instruments*, que é conectado a placa de interface através de cabos do tipo flat.

O kit possui as seguintes características:

- 1 Controlador TMS320F2812;
- 128KB x 16 de memória Flash interna;
- 18KB x 16 de memória RAM interna;
- 64KB x 16 de memória RAM externa;
- Interface JTAG e JTAG via porta paralela;
- Conectores de acesso aos pinos do DSC;

Os circuitos utilizados para eliminação de nível CC juntamente com o de conversão analógico-digital são os recomendados pelo fabricante do conversor e podem ser verificados em [11]. O teclado opera no modo matricial 4x5 e o display utiliza somente um

potenciômetro para ajuste do contraste. A estabilização das fontes de alimentação e do sinal de referência para o DA são provenientes de reguladores do tipo 78LXX. A comunicação serial isolada bidirecional é garantida por dois optoacopladores.

### 3.2 Software residente no DSC

O Controlador Digital de Sinais utilizado possui as seguintes características.

- Clock de 150MHz (6,67ns por instrução);
- CPU de 32 bits;
- 36KB RAM + 256KB FLASH;
- 3 Timers de 32 bits;
- Interfaces SCI, SPI e CAN;
- 16 canais AD multiplexados;
- 56 GPIO (Compartilhadas com periféricos);
- 45 fontes de interrupção multiplexadas.

O software desenvolvido para gerenciar a geração do sinal foi codificado de forma a possibilitar a comunicação via serial com controle de erros, garantindo o recebimento de dados e comandos. Os comandos programados para execução via porta serial são: Iniciar Geração, Parar Geração e Recalcular Sinal. O Recálculo do sinal é necessário para indicar ao gerador que este deve atualizar o vetor de saída.

As Figuras 2 e 3 apresentam os fluxogramas das rotinas mais importantes do software.

#### 3.2.1 A série de Fourier

Na tentativa de recompor redes de alimentação analisadas por diversos tipos de equipamentos, tais como: osciloscópios, analisadores de energia e simuladores de circuitos, foram analisadas as equações utilizadas para efetuar a análise harmônica em cada software. A equação escolhida apresentada na equação 1 é a utilizada pelo simulador de circuitos spice e pelo analisador de energia FLUKE 43, ambos utilizados nos testes apresentados no decorrer deste artigo.

$$f(t) = dc + \sum_{n=1}^{51} a_n \cdot \text{sen}(n \cdot \omega \cdot t + \text{fase}_n) \quad (1)$$

Onde:

- dc : Valor médio do sinal analisado;
- n : Número da harmônica;
- a<sub>n</sub> : Amplitude da harmônica n;
- ω : Frequência da fundamental;
- t : Tempo;
- fase<sub>n</sub> : Fase da componente harmônica n.

Para facilitar a operação do gerador, o programa residente permite ao usuário, via teclado, a inserção de todos os parâmetros da Equação 1, o controle das funções iniciar/parar e também a escolha de sinais pré-definidos ou a geração de sinais genéricos.

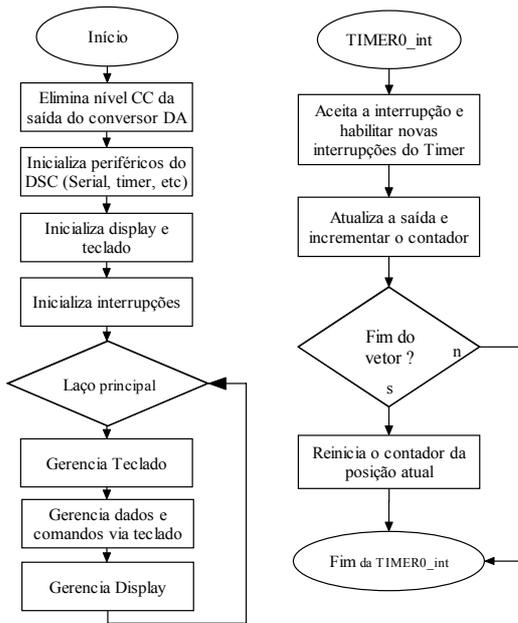


Figura 2 – Fluxogramas da rotina principal e da interrupção que gerencia a atualização do sinal de saída geral do gerador.

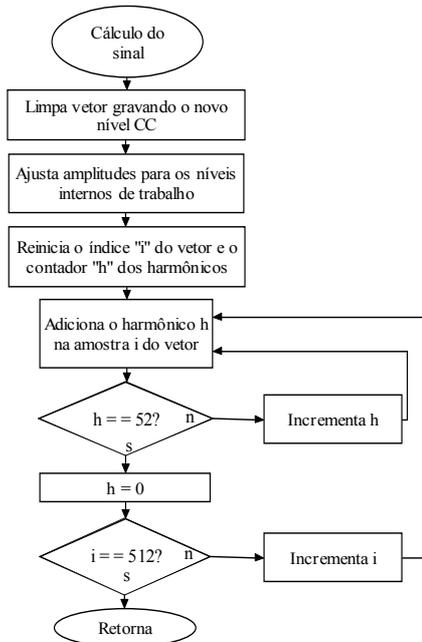


Figura 3 – Rotina para cálculo do sinal de saída do gerador.

#### 4 Software de Gerenciamento Remoto

Visando facilitar a operação por parte do usuário, este software foi desenvolvido de forma a possibilitar a importação e exportação de dados em um formato conhecido, neste caso .xls (Excel) desde que formatado corretamente de acordo com o modelo criado. A Figura 4 apresenta o software de comunicação que foi codificado em linguagem C, nele deve-se dar atenção as áreas sombreadas, pois estas são os coeficientes da série de Fourier que serão enviados para o DSC via comunicação serial. Neste mesmo software a reconstrução do sinal pode ser verificada

a reconstrução do sinal pode ser verificada para conferência do sinal, tal como na Figura 5.

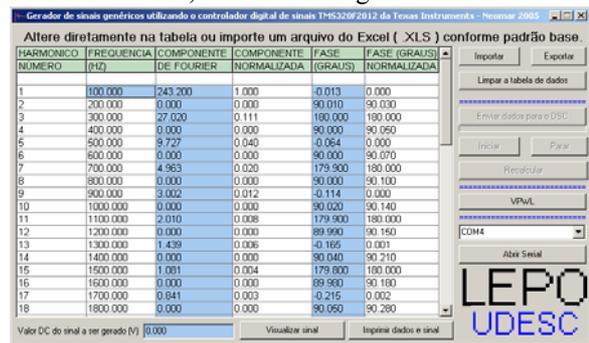


Figura 4 – Software de controle e comunicação.

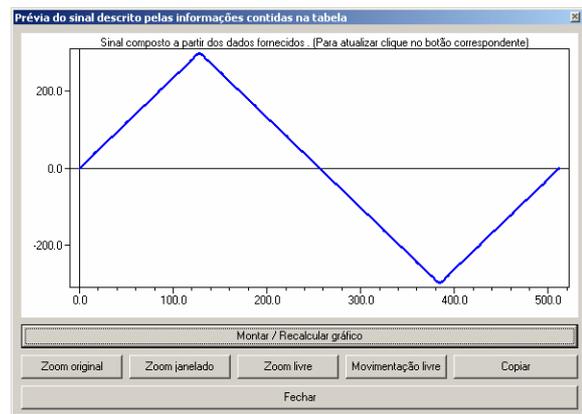


Figura 5 – Reconstrução de um sinal.

Este software também permite a impressão da tabela dos dados e do sinal a ser gerado.

#### 5 Amplificador Classe D

O amplificador utilizado nos testes foi desenvolvido em laboratório e é apresentado em (Batschauer, Herdt e Mezaroba, 2006) e parcialmente reproduzido na Figura 6. Este amplificador é um classe D com modulação PWM em 3 níveis e redução de perdas devido a utilização do snubber de Undeland (Undeland, 1976) modificado (Peres, 2000), mais estágio regenerativo.

O seguimento do sinal de referência mesmo em situações de variação de carga é garantido devido ao controle realimentado implementado.

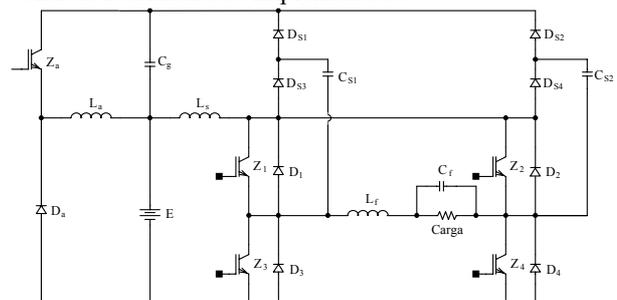


Figura 6 - Conversor CC-CA com o snubber de Undeland modificado e com o conversor buck-boost para regeneração.

Características do Amplificador:

E	: Tensão de entrada (400V)
Fc	: Freq. de comutação (100kHz)
$V_{ormsmax}$	: Tensão máxima de saída (270V)
$I_{ormsmax}$	: Corrente máxima de saída (26A)
$P_{oMAX}$	: Potência de saída (3,5kW)
BW	: Banda Passante (DC a 10kHz)

A topologia deste amplificador foi implementada de forma a reduzir as perdas e assim obter um alto rendimento na faixa desejada. A Figura 7 apresenta o rendimento do amplificador em função da potência de saída.

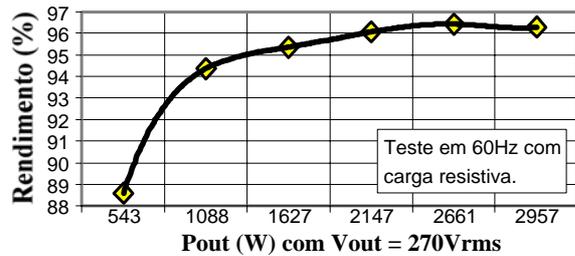


Figura 7 – Rendimento do amplificador utilizado.

As Figuras 8 e 9 apresentam respectivamente as curvas de ganho e fase do amplificador em questão.

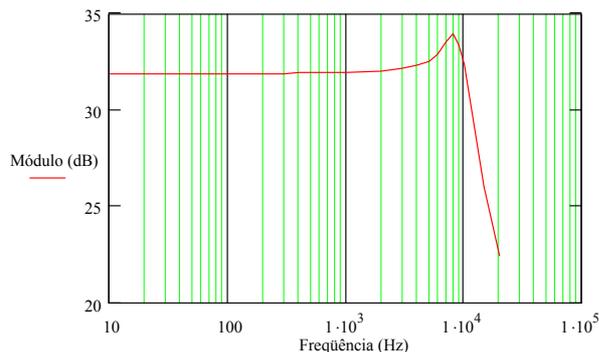


Figura 8 - Ganho do amplificador em função da frequência

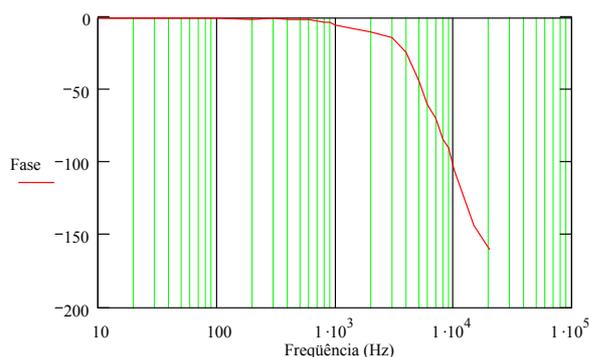


Figura 9 - Fase do amplificador em função da frequência

## 6 Resultados Experimentais

O sistema de geração completo é apresentado na Figura 10. Nesta figura pode-se verificar a presença do kit de desenvolvimento do DSC TMS320F2812 sob a placa de interface.

A montagem do gerador de referências foi realizada prevendo um alto nível de interferência eletro-

magnética proveniente do circuito do amplificador chaveado que é submetido as frequências harmônicas geradas. Para amenizar este problema, a placa de circuito impresso do gerador foi confeccionada em placa dupla face contendo plano de terra em ambos os lados, e também capacitores de desacoplamento em inúmeros pontos do circuito.

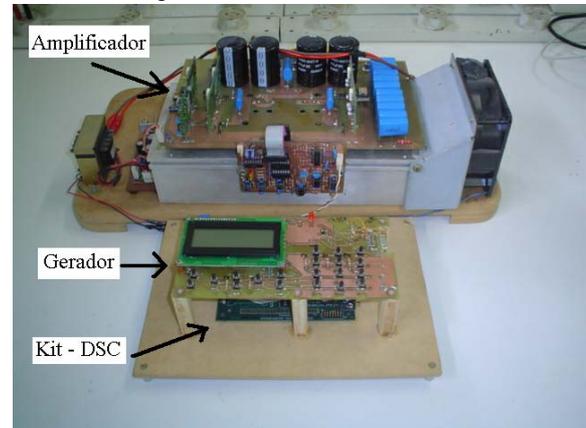


Figura 10 – Gerador de sinais genéricos.

Da mesma forma, a placa de controle do amplificador foi confeccionada e seu posicionamento é tal que esta não sofra influência do circuito magnético.

Para comprovação dos resultados foram escolhidos três tipos de sinais distintos. O primeiro contendo somente um sinal senoidal puro, o segundo composto pelos harmônicos de um sinal conhecido, e o terceiro cujos dados são provenientes de uma análise de rede de energia.

### 4.1 Senóide

Na Figura 11 são apresentados os sinais de referência e de saída do amplificador com este sujeito a uma carga de 120Ω.

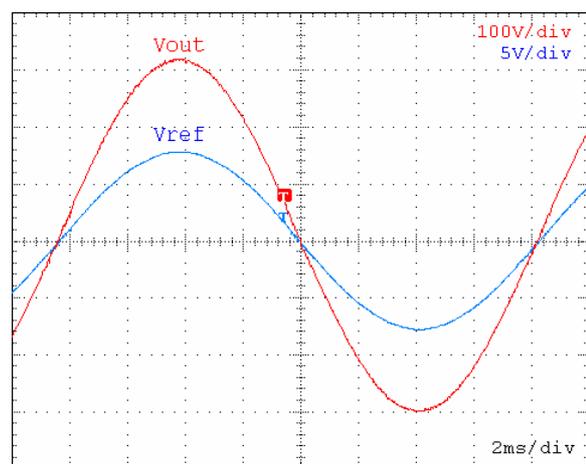


Figura 11 – Sinais senoidais de referência e de saída do amplificador (220V / 60Hz).

## 4.2 Triangular

Utilizando o simulador SPICE, foi realizada a simulação de uma forma de onda triangular, que pode ser observada na Figura 12. Após a simulação foi realizada a análise harmônica da forma de onda apresentada. O resultado da análise harmônica pode ser observado na Figura 13.

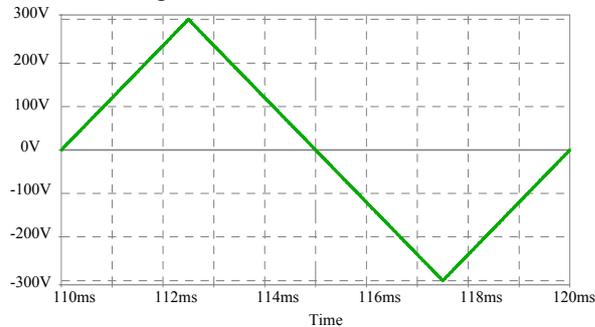


Figura 12 – Triangular obtida via simulação (300V/100Hz).

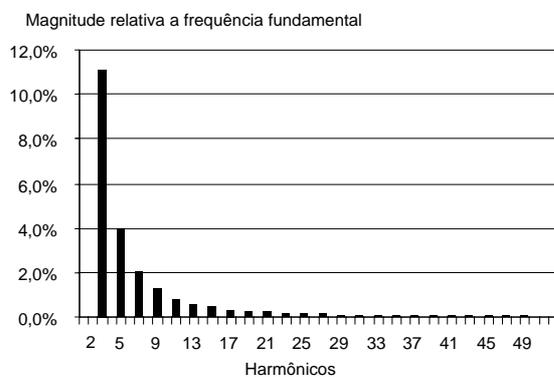


Figura 13 – Análise harmônica da triangular simulada.

Após a correta formatação dos dados obtidos na análise harmônica, estes foram transferidos via comunicação serial para o gerador de referências através do software de gerenciamento remoto residente em um computador. A geração do sinal resultou nas formas de onda apresentadas na Figura 14. Para confirmar a correta reprodução do sinal, não só visualmente, foi realizada a análise harmônica da saída de potência que resultou no gráfico da Figura 15.

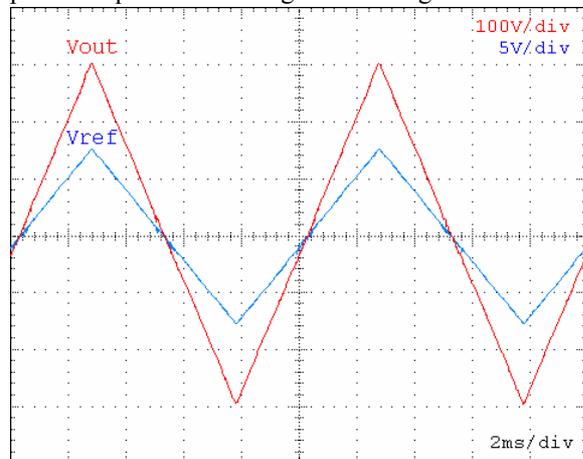


Figura 14 – Sinais triangulares de referência e de saída do amplificador (300V de pico/100Hz).

O sinal é reproduzido com qualidade conforme pode-se verificar pela comparação das formas de onda simulada (Figura 12) e experimental (Figura 14) e também pela semelhança das análises harmônicas apresentadas nas Figuras 13 e 15.

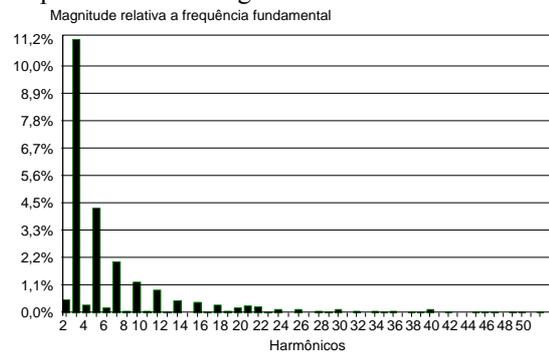


Figura 15 – Análise harmônica do sinal de saída do amplificador.

## 4.3 Análise de uma rede real

Para comprovar a eficácia do sistema de geração de redes reais, foi realizada a análise de uma rede de alimentação do laboratório. A rede analisada foi obtida na saída de um variador de tensão, quando este foi submetido a uma carga fortemente não linear (retificador em ponte completa com filtro capacitivo). A Figura 16 apresenta a rede em questão. Na Figura 17 é apresentada a análise harmônica da mesma rede.

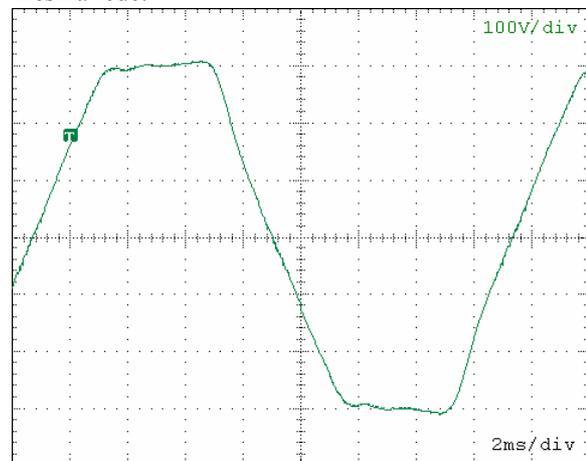


Figura 16 – Rede analisada (220Vrms, 60Hz e THD de 9,69%).

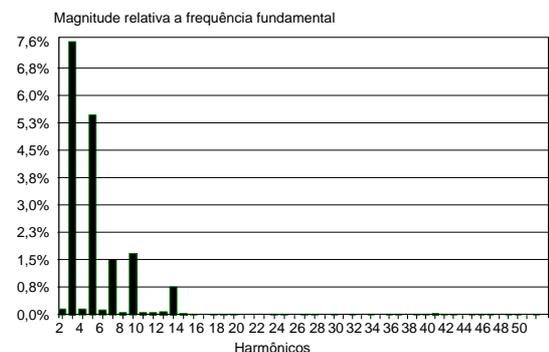


Figura 17 – Análise harmônica da forma de onda da rede.

Dando entrada nos parâmetros de amplitude e fase dos harmônicos no software de comunicação e transferindo-os via serial para o gerador, foram obtidas as formas de onda apresentadas na Figura 18, onde são apresentados o sinal de referência e a saída do amplificador. A Figura 19 apresenta a análise harmônica da rede reproduzida.

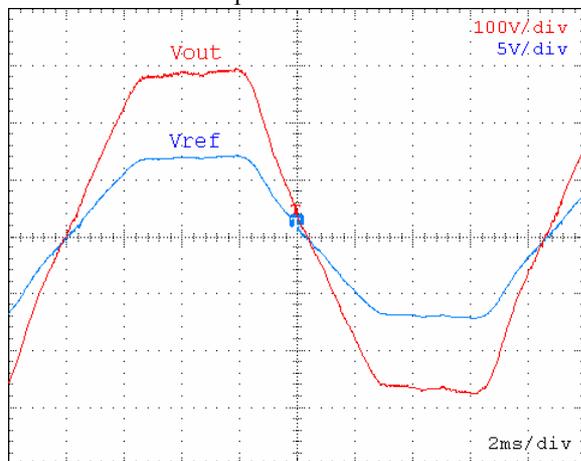


Figura 18 – Rede gerada (220Vrms, 60Hz e THD de 9,43%).

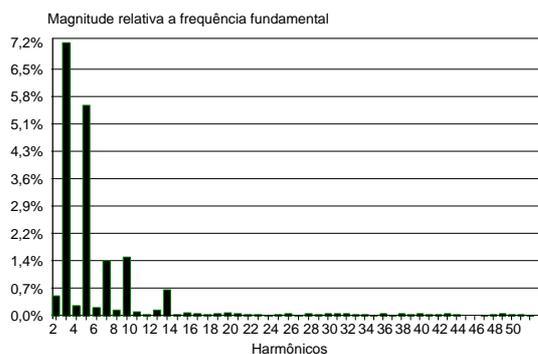


Figura 19 – Análise harmônica da rede reproduzida.

Novamente pode-se, através das formas de onda e análises harmônicas apresentadas, afirmar que o gerador reproduziu com qualidade o sinal desejado.

## 7 Conclusão

A implementação do Gerador de Sinais Genéricos foi bem sucedida e os resultados obtidos foram satisfatórios em todos os testes realizados. A utilização do protótipo, devido a possibilidade de comunicação serial e importação de resultados de simulação, mostrou-se simples e rápida. De acordo com os resultados apresentados verifica-se que o amplificador reproduz com grande fidelidade os sinais solicitados permitindo que este seja utilizado em uma ampla gama de testes e simulações de redes. Para a simulação de redes reais sabe-se que é necessário a adição de uma impedância, característica da linha analisada, em série com a saída deste gerador reproduzindo assim uma linha com grande fidelidade. A utilização do DSC TMS320F2812 na geração de sinais genéricos de 1 a 500Hz em 8 bits de resolução foi possível. No entanto, para a geração de sinais com maior reso-

lução e frequência, recomenda-se a otimização do código através do uso de linguagem assembly ou a escolha por um processador de maior capacidade, como os da família C6000 do mesmo fabricante.

## Agradecimentos

A *Texas Instruments* pela doação do kit de desenvolvimento e do conversor Digital-Analógico utilizados neste projeto e a Universidade do Estado de Santa Catarina pelo financiamento através de bolsa de estudos.

## Referências Bibliográficas

- Batschauer, A. L.; Heerdt, J. A.; Mezaroba, M. (2006). Conversor CC-CA para amplificação de formas de onda genéricas empregando snubber regenerativo, *VII INDUSCON*, Recife – PE.
- Emmert, J. M.; Cheathan, J. A. Jagannathan, B.; Umarani, S. (2003). An FFT approximation Techiwue Suitable for On-Chip Generation and Analisis of Sinusoidal Signals, *18<sup>th</sup> IEEE International Symposium on Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems*.
- Kay-Soon Low (1998), A DSP-based variable AC power source, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Volume: 47 , Issue: 4; Pages: 992 – 996.
- Kay-Soon Low (1999). A DSP-based single-phase AC power source, *IEEE Trans.s on Industrial Electronics*, Volume: 46 , Issue: 5, Pages: 936 – 941.
- Péres, A. (2000). Uma Nova Família de Inversores com Comutação Suave Empregando a Técnica de Grampeamento Ativo, *INEP – UFSC*, Florianópolis – SC.
- Shih-Liang Jung; Hsiang-Sung Huang; Meng-Yueh Chang; Ying-Yu Tzou (1997). DSP-based multiple-loop control strategy for single-phase inverters used in AC power sources, *Power Electronics Specialists Conference, PESC '97 Record., 28th Annual IEEE , Volume: 1 , 22-27; Pages: 706 - 712 vol 1*.
- Undeland, T. M. (1976) Switching Stress Reduction in Power Transistor Converters, *IEEE Industry Applications Society*, pp. 383-391.
- Van Der Broeck, H.; Lurkens, P (1993). Programmable AC power source, *Fifth European Conference on Power Electronics and Applications*, Pages: 255 - 260 vol.3
- Ying-Yu Tzou; Rong-Shyang Ou; Shih-Liang Jung; Meng-Yueh Chang, (1997). High-performance programmable AC power source with low harmonic distortion using DSP-based repetitive control technique, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Volume: 12, Issue: 4. Pages: 715 – 725.