

# FONTE DE ALIMENTAÇÃO CA MONOFÁSICA COM ADIÇÃO DE HARMÔNICOS

Marcello Mezaroba<sup>1,2</sup>, Joselito A. Heerdt<sup>1,2</sup>, Alessandro L. Batschauer<sup>1,2</sup>,  
Neomar Giacomini<sup>1</sup> e Jonathan D. Sperb<sup>1</sup>

E-mails: {mezaroba, jaheerdt, batschauer, neomar, jonathan}@joinville.udesc.br

<sup>1</sup>Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC  
Campus Universitário Prof. Avelino Marcante s/n  
Bairro Bom Retiro, CEP: 89223-100  
Joinville, SC, Brasil.

<sup>2</sup>Supplier Ind. e Com. de Eletroeletrônicos Ltda  
Rua Arno Waldemar Döhler, nº 957 - Sala B-20  
Bairro: Santo Antônio, CEP 89.218-155  
Joinville, SC, Brasil.

## I. INTRODUÇÃO

**Resumo** - Esse trabalho apresenta a implementação de uma Fonte de Alimentação CA que permite a adição de conteúdo harmônico. A fonte proporciona a geração de sinais genéricos, além da possibilidade de programação de distúrbios comuns em redes, como flutuações e transitórios. Para os circuitos de potência são propostos conversores com comutação suave, que aumentam a eficiência e possibilitam maior compactação. A geração dos sinais é feita por um circuito baseado em DSP, que também é responsável pela supervisão, sinalização, interface com o usuário e comunicação serial com PC. São apresentados resultados experimentais para diferentes tipos de formas de onda, comprovando a eficácia da solução proposta.

**Palavras-chave** – Fontes de Alimentação CA, Inversores, Conversores CC-CC, Comutação Suave, DSP.

## SINGLE PHASE AC POWER SOURCE WITH HARMONICS

**Abstract** – This paper presents the implementation of an AC Power Source that allow the addition of harmonics in the output signal. The proposed source provides generic voltage power generation and also can be used to program voltage dips, short interruptions and voltage variations in power supply systems. The power stage uses soft switched converters that increase the efficiency and make possible a high condensation. The signal generation is implemented in a DSP based circuit, which also is responsible for the graphic interface, serial communication, protections and alarms. Experimental results are presented using different waveforms and show the good performance of proposed source.

**Keywords** – AC Power Sources, Inverters, DC-DC Converters, Soft Commutation, DSP.

Com o avanço dos semicondutores, cada vez mais o processamento eletrônico de energia se faz presente em todos os segmentos da sociedade. No meio industrial, a utilização de conversores proporcionou a automação de processos, incrementando a produtividade e melhorando a qualidade dos produtos manufaturados.

Juntamente com os benefícios dessas aplicações, surgiram diversos problemas devido às técnicas de processamento de energia utilizadas nos conversores estáticos. 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 interferência e danos a outros sistemas conectados a ela. Outro problema comum é o baixo fator de potência inerente a topologias retificadoras comumente utilizadas em equipamentos eletrônicos

De forma a garantir uma limitação dos distúrbios gerados por equipamentos eletrônicos comerciais e industriais, foram criadas diversas normas internacionais pelas quais os produtos devem ser submetidos para garantir que se seu funcionamento não interfira significativamente na qualidade da rede elétrica. Algumas das principais normas internacionais são publicadas pela IEC (International Electrotechnical Commission), com destaque para as normas IEC 61000 que versam sobre EMC (Electromagnetic compatibility). Tais normas também padronizam testes que visam verificar a imunidade do equipamento frente a distúrbios comumente observados na rede.

Para possibilitar os testes em laboratórios e verificar sua conformidade com as normas, é necessária a utilização de sofisticados equipamentos de geração e medição, como Geradores de Transientes Rápidos, Fontes de Alimentação CA, Geradores de Pulsos de Alta Tensão, Analisadores de Espectro, Osciloscópios, etc. Apesar da demanda crescente, muitas vezes estes equipamentos não estão acessíveis aos fabricantes de eletro-eletrônicos devido ao alto custo e ao fato de serem em sua maioria importados.

Visando atender as necessidades do setor produtivo, iniciaram-se estudos para o domínio tecnológico de equipamentos usados nas certificações, com ênfase no desenvolvimento de fontes de alimentação CA com possibilidade de adição de conteúdo harmônico. Esse tipo de fonte pode ser utilizado para efetuar a variação de amplitude e frequência da tensão de saída, bem como introduzir harmônicas ao sinal visando reproduzir as condições reais de uma rede de alimentação.

Artigo submetido em 19/03/2007. Revisão em 14/05/2007.

Aceito por recomendação do editor R. M. Stephan.

Outra aplicação possível é a programação de distúrbios comuns em redes, como flutuações e transitórios.

As fontes de alimentação CA têm sido muito estudadas na literatura [1]-[5], abordando principalmente novas técnicas de controle digital que podem ser aplicadas em DSP (processador digital de sinais) visando a redução do hardware e melhoria na qualidade dos sinais de saída. A adoção de um controle digital baseado em DSP apresenta vantagens como flexibilidade, versatilidade e condensação, além da possibilidade de implementação de proteções, sinalizações e comunicação, sem envolver um hardware adicional.

Além dos estudos feitos com vistas à melhoria das técnicas de controle, muitos outros trabalhos têm sido desenvolvidos buscando melhorias no processamento de energia, objetivando a diminuição no volume dos conversores e conseqüentemente do seu custo. Isso pode ser obtido com o aumento da freqüência de chaveamento associado à introdução de circuitos que proporcionam a comutação suave, permitindo um aumento considerável na freqüência de chaveamento sem causar uma elevação significativa das perdas [6]-[17].

No decorrer do trabalho será apresentada uma descrição detalhada da implementação de uma Fonte de Alimentação CA com amplitude e freqüência variáveis, que possibilita a reprodução de sinais genéricos, através da introdução de componentes harmônicos ao sinal de saída.

## II. APRESENTAÇÃO DOS CIRCUITOS

O diagrama de blocos da fonte proposta pode ser visto na Figura 1. A fonte é alimentada a partir de uma rede monofásica.

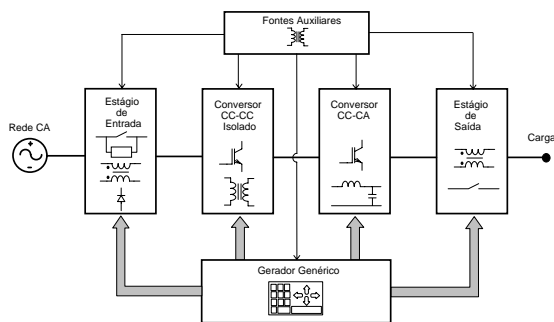


Fig. 1. Diagrama de Blocos da Fonte Proposta.

O estágio de entrada é responsável pela conversão CA-CC que disponibilizará um barramento de tensão contínua ao próximo estágio. Esse estágio também possui um limitador de corrente de partida e um filtro de interferência eletromagnética.

O estágio seguinte é formado por um conversor CC-CC isolado em alta freqüência, que é responsável por fornecer um barramento regulado e ajustável. A variação da tensão no barramento é importante para a operação do estágio seguinte, pois garante que o inversor trabalhe com índice de modulação alto mesmo quando se deseja tensões de saída reduzidas. Isso é feito, variando o barramento CC juntamente com a variação da saída CA, diminuindo muito as ondulações de chaveamento na saída do inversor e conseqüentemente man-

tendo uma uniformidade na qualidade da tensão em toda sua faixa de variação.

O conversor CC-CA é responsável pela geração da tensão alternada de saída, seguindo a referência produzida no gerador de sinais genéricos. O inversor possui um filtro de saída com uma grande banda passante, que permite a reprodução de sinais genéricos com grande conteúdo harmônico. Como já foi dito, o barramento CC variável permite uma excelente qualidade da tensão gerada mesmo para baixas amplitudes.

O estágio de saída possui filtragem de interferência eletromagnética e uma chave responsável pelo acoplamento da carga. Em situações onde ocorre algum tipo de proteção ou falha, a chave automaticamente desconecta a carga.

O estágio responsável pela geração dos sinais que serão reproduzidos pelo inversor acumula também funções de supervisão, sinalização, proteção e inicialização dos conversores, além de controlar a interface com o usuário e a comunicação serial RS232.

As fontes auxiliares são utilizadas na alimentação dos circuitos de comando e controle dos conversores.

Os circuitos que compõem cada estágio serão apresentados individualmente, juntamente com as respectivas técnicas de operação.

### A. Estágio de entrada

O diagrama que ilustra os circuitos que compõem o estágio de entrada pode ser observado na Figura 2.

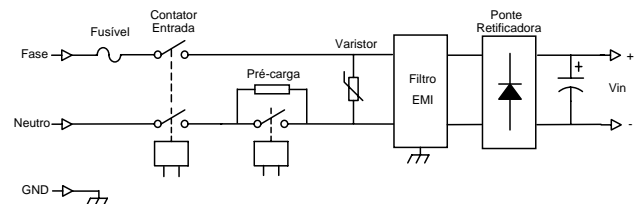


Fig. 2. Estágio de Entrada.

A fonte é alimentada a três fios (fase, neutro e terra) a partir da rede elétrica. Na seqüência podemos observar a presença de um fusível de proteção seguido do contator que é responsável pela energização do circuito de potência e é comandado pelo circuito de supervisão. O circuito de pré-carga é responsável pela limitação da corrente de pico circulante no estágio de entrada durante a energização, protegendo principalmente os diodos da ponte retificadora e evitando a queima de fusíveis. Para a proteção dos conversores contra possíveis sobretensões é utilizado um varistor em paralelo com a rede elétrica. Ainda antes da ponte retificadora é utilizado um filtro de interferência eletromagnética. Tal filtro é utilizado para diminuir a circulação dos ruídos de modo comum e diferencial comuns em conversores chaveados. O último circuito é um retificador em ponte completa com filtro capacitivo, que faz a conversão da tensão alternada em contínua, buscando prover um barramento que será utilizado pelo estágio CC-CC.

### B. Conversor CC-CC Isolado

Um dos estágios mais importantes da fonte proposta é o conversor CC-CC. Ele é responsável pela isolamento entre o estágio de entrada e de saída e pela regulação da tensão CC,

independente de variações na entrada e na carga. Outra característica desejada é que o barramento de saída tenha tensão ajustável, conforme a necessidade do estágio seguinte.

O conversor escolhido para executar essa função foi o conversor CC-CC FB-ZVS-PWM-PS, que pode ser visto na Figura 3.

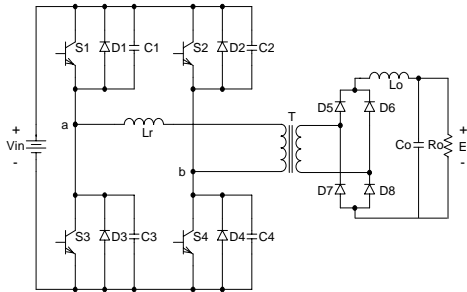


Fig. 3. Conversor CC-CC FB-ZVS-PWM-PS.

As iniciais das palavras que descrevem suas principais características são: FB - Ponte Completa (Full Bridge), ZVS - Comutação sob Tensão Nula (Zero Voltage Switching), PWM - Modulação por Largura de Pulso (Pulse Width Modulation) e PS - Deslocamento de Fase (Phase Shift). Esse conversor é bastante conhecido no meio acadêmico [14]-[17] e muito utilizado no meio industrial, principalmente pelos fabricantes de fontes chaveadas para telefonia. O principal ponto positivo dessa topologia está na alta eficiência, que é obtida através do chaveamento com comutação suave ZVS, reduzindo as perdas por comutação. Essa característica também possibilita uma maior compactação do conversor, pois possibilita a operação em frequências elevadas diminuindo o volume dos materiais magnéticos.

A técnica de modulação utilizada é conhecida como Phase Shift (PS). A tensão  $V_{ab}$  e conseqüentemente a potência transferida para saída são controladas pela defasagem entre os sinais de comando dos braços, conforme representado na Figura 4.

Para o sistema de controle foi utilizado o diagrama ilustrado na Figura 5. A técnica de controle por valores médios é bem dominada pelos projetistas desse tipo de conversor e consiste na utilização de duas malhas de controle, uma responsável pelo controle instantâneo da corrente do filtro de saída e outra que controla o valor médio da tensão de saída do conversor.

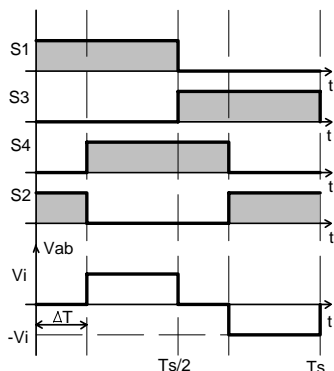


Fig. 4. Sinais de comando e tensão  $V_{ab}$ .

A malha de corrente é rápida e força a corrente seguir uma referência através da variação do defasamento dos braços e conseqüentemente da tensão aplicada ao filtro. Devido a sua rapidez, essa malha garante robustez ao conversor, protegendo-o contra possíveis sobrecargas em sua saída.

Para o controle da tensão de saída é utilizada uma malha lenta que controla o valor médio da tensão de saída, sem se preocupar com transitórios rápidos e ondulações do barramento.

Uma variação no valor médio da tensão de saída é corrigida através da mudança da corrente de referência do conversor. Ao variar a corrente de referência, a malha de controle regula a tensão de saída indiretamente com o aumento ou diminuição da corrente fornecida ao capacitor de saída.

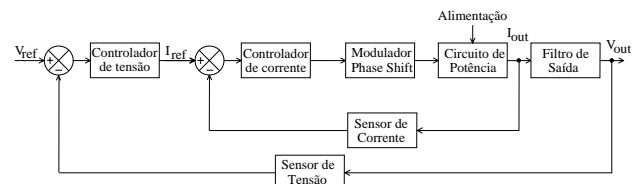


Fig. 5. Diagrama de Blocos do Controle do Conversor CC-CC.

### C. Conversor CC-CA

O estágio responsável pela geração da tensão de saída da fonte pode ser visto na Figura 6. Ele é composto por um inversor monofásico em ponte completa seguido de um filtro LC.

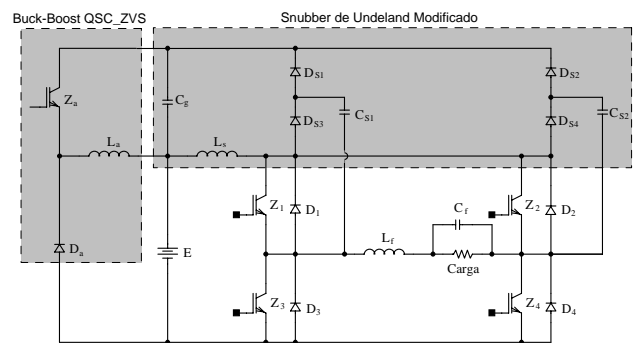


Fig. 6. Estágio CC-CA.

O inversor proposto opera com modulação PWM 3 níveis, fazendo com que a frequência aplicada ao filtro seja o dobro da frequência de comutação dos interruptores. Essa estratégia possibilita a redução do volume do filtro, além de propiciar um aumento da banda passante, possibilitando a reprodução de harmônicas de alta ordem.

Para possibilitar o chaveamento em alta frequência, foi adicionado ao conversor um circuito passivo de ajuda a comutação, baseado no Snubber de Undeland [6]. Esse circuito é responsável pela limitação das derivadas de tensão e corrente nos interruptores, diminuindo significativamente as perdas de comutação.

Apesar de diminuir as perdas por comutação, o circuito do Snubber de Undeland inicialmente proposto não melhora o rendimento da topologia, pois a energia retirada das comutações é transferida ao capacitor de armazenagem  $C_g$  e usualmente dissipada por um resistor em paralelo. Para melhorar a eficiência da topologia foi acrescentado um estágio respon-

sável pela regeneração da energia armazenada no capacitor  $C_g$ , devolvendo ao barramento CC. Para isso foi utilizado o conversor Buck-Boost QSC-ZVS (Quasi-Square-Wave Converter) [11], que opera com comutação suave, frequência e razão cíclica fixas, tornando o seu comando muito simples. A utilização desse circuito regenerador confere ao estágio CC-CA alta eficiência e conseqüentemente redução de peso e volume. A estratégia de controle utilizada é baseada no controle instantâneo da tensão de saída, fazendo com que o conversor siga uma tensão de referência obtida do gerador de sinais genéricos. O diagrama de blocos do controle pode ser observado na Figura 7.

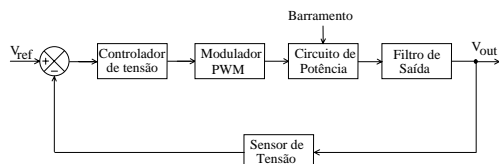


Fig. 7. Diagrama de controle do inversor.

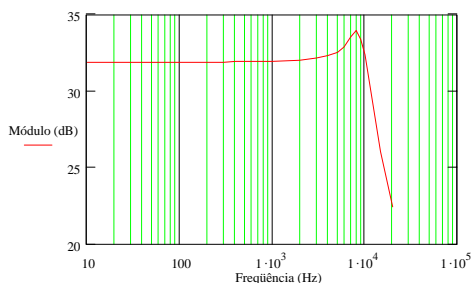


Fig. 8. Ganho do inversor em função da frequência.

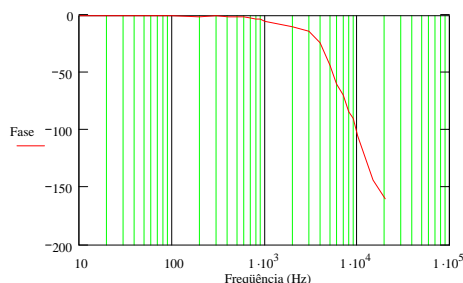


Fig. 9. Diagrama de fase em função da frequência

O controle é projetado de maneira que o inversor tenha uma banda passante elevada, permitindo a geração de tensões com elevado conteúdo harmônico. Os diagramas que mostram a resposta em frequência do inversor em malha fechada podem ser vistos nas Figura 8 e Figura 9. Observa-se que o conversor possui boa banda passante, até aproximadamente 10kHz, sendo que em torno de 8kHz existe um sobre-sinal de aproximadamente 10%. Isto se deve a frequência de corte do filtro de saída estar situada nesta frequência. Pode-se salientar que para frequências até 1kHz praticamente não há defasagem entre entrada e saída.

#### D. Estágio de Saída

O diagrama que ilustra os circuitos que compõem o estágio de saída pode ser observado na Figura 10.

A tensão de saída do inversor é levada a um filtro que é responsável pela atenuação do ruído conduzido, evitando

assim que a carga sofra interferências geradas pelo chaveamento dos conversores. Após o filtro existe um contator bipolar de saída que desconecta a carga sempre que a fonte estiver desligada, ou seja, desativada pelos circuitos de supervisão e controle. Esse contator possui uma lógica de contatos normalmente aberto, ou seja, abre a carga em casos de falta de energia e somente é reabilitado com a interferência do usuário. Em caso de ocorrer alguma falha em um dos estágios da fonte, esse contator também é desabilitado.

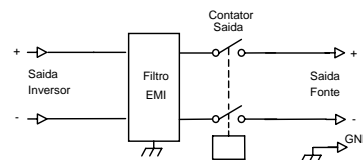


Fig. 10. Estágio de saída.

#### E. Gerador Genérico

O gerador genérico é o circuito responsável pela geração dos sinais de referência para os conversores de potência, comando dos estágios de entrada e saída e interface com o usuário. Além disso, o processador utilizado também acumula as funções de supervisão, sinalização e comunicação com o PC. O diagrama que representa as funções implementadas no gerador pode ser observado na Figura 11.

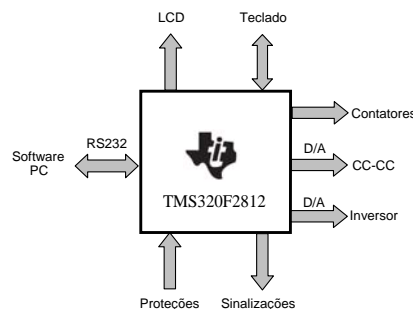


Fig. 11. Diagrama funcional do Gerador Genérico.

O hardware do gerador é composto por um processador digital de sinais (DSP) TMS320F2812 da *Texas Instruments*, por conversores digital analógico, comunicação serial isolada, teclado com 20 teclas, display LCD de 20x4 e memória EEPROM serial SPI.

O Processador 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.

Os conversores D/A são de 8 bits e possuem controle da amplitude através da variação da tensão de referência, permitindo sempre utilizar a máxima resolução na conversão. A variação da tensão de referência é feita através de saídas PWM do DSC seguidas de um filtro de segunda ordem. Os conversores D/A são utilizados para o envio dos sinais de referência aos conversores de potência. No conversor CC-

CC esse recurso é utilizado para permitir a variação do barramento de saída. No inversor, o sinal proveniente do conversor D/A é amplificado e disponibilizado na saída.

A comunicação serial bidirecional é isolada por dois circuitos com acopladores óticos. É utilizado o padrão de comunicação RS232 juntamente com um protocolo próprio que permite a comunicação do gerador com um software de gerenciamento remoto instalado em um micro-computador. O protocolo desenvolvido permite a operação e monitoração remota da fonte e possui controle de erro para evitar perda de pacotes de informação. O teclado opera no modo matricial 4x5 e juntamente com o display permite o acesso a todas as funções e parametrizações da fonte. Através do teclado é possível fazer a alteração da amplitude e frequência dos sinais gerados, criar ou alterar sinais genéricos, carregar sinais recebidos via comunicação serial, utilizar um dos sinais padrão presente na biblioteca do equipamento, acionar o contato de saída e alterar o contraste do display.

A memória EEPROM externa é utilizada para a gravação das configurações do usuário, possibilitando inclusive a criação de uma biblioteca de sinais. O acionamento dos contatos dos estágios de entrada e saída é feito através de saídas digitais, seguidas de circuitos auxiliares. Algumas saídas digitais também são utilizadas para sinalização de erros e status, através de leds indicadores.

A fonte possui algumas importantes proteções contra falhas, tais como curto-circuito, sobrecarga, térmica e de Sobretensão no Barramento CC. A atuação das proteções é lida através de entradas digitais do processador e informadas ao usuário através do display e leds indicadores. Detalhes sobre a implementação da geração podem ser obtidos em [18]

#### F. Software de Gerenciamento Remoto

Para a operação remota da fonte a partir de um PC foi desenvolvido um software executável em ambiente LabView, que utiliza a RS232 para se comunicar com a placa de geração. O programa de interface remota pode programar sinais e ligar ou desligar o sinal de saída. Além disso, podem ser criados sinais, visualizá-los na tela do computador, salvá-los em arquivo, importar arquivos de sinais e utilizá-los para programar a fonte.

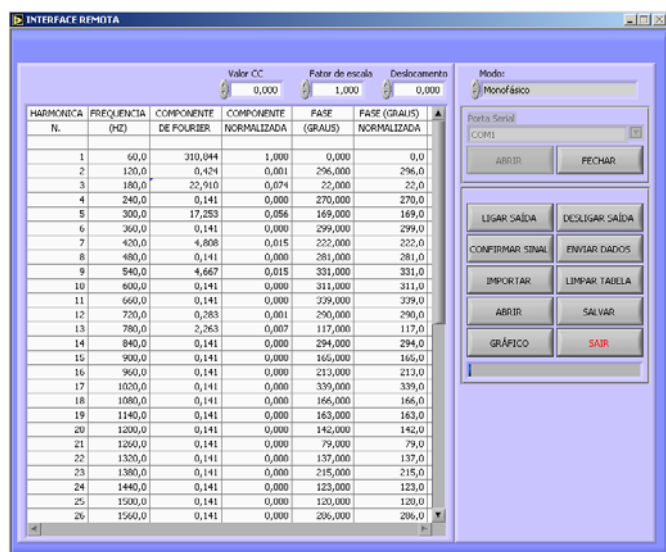


Fig. 12. Tela principal da interface de acesso remoto.

A Figura 12 mostra a tela principal da interface de acesso remoto. A entrada de dados relativa à forma de onda desejada pode ser feita manualmente através do preenchimento da tabela vista na Figura 12. Outra possibilidade disponível é a importação de tabelas de análise harmônica oriundas de programas matemáticos, softwares de simulação e analisadores de energia.

Após a visualização do sinal, ele pode ser enviado para o gerador genérico através da interface RS232. O programa permite também o acesso remoto das principais funções disponíveis via teclado.

Após a entrada de dados do sinal desejado, é possível fazer a visualização da sua forma de onda e do seu conteúdo harmônico, como pode ser visto na Figura 13.

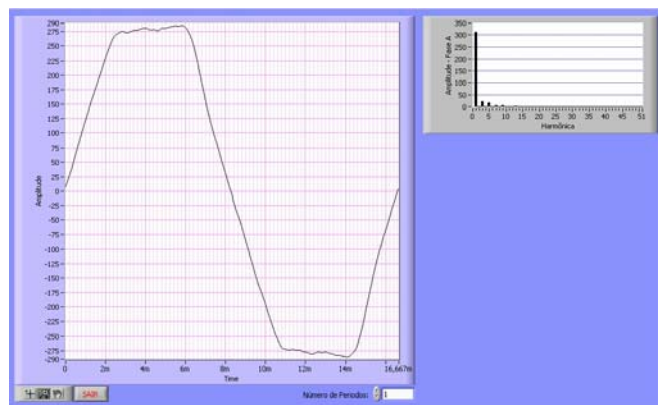


Fig. 13. Tela da forma de onda e conteúdo harmônico.

### III. RESULTADOS EXPERIMENTAIS.

As especificações completas da fonte projetada (Figura 14) podem ser observadas na Tabela 1.



Fig. 14. Fonte de alimentação CA projetada.

Tabela 1 – Especificações da Fonte.

Tensão de alimentação: 220V ± 10%
Frequência de entrada: 50Hz/60Hz
Tensão de saída: 0-270V
Corrente máxima de saída: 20A
Potência máxima de saída: 3,5kVA
Frequência fundamental de saída: DC-500Hz
Largura de Banda: 3kHz
Número de harmônicos permitidos: 51

Todos os estágios de processamento de energia foram projetados e testados individualmente. Após os testes individuais, ocorreu a integração de todos os estágios em um gabinete industrial padrão, de 19 polegadas.

Após o término do processo de integração, foram realizados testes experimentais visando observar o desempenho da fonte na geração de diversos tipos de sinais. 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 triangular, e o terceiro cujos dados são provenientes de uma análise de rede de energia.

### G. Testes com Saída Senoidal

Na Figura 15 são apresentados os sinais de referência interna e de saída da fonte para uma tensão senoidal de 220V / 60Hz. Esse sinal foi gerado utilizando a própria interface da fonte.

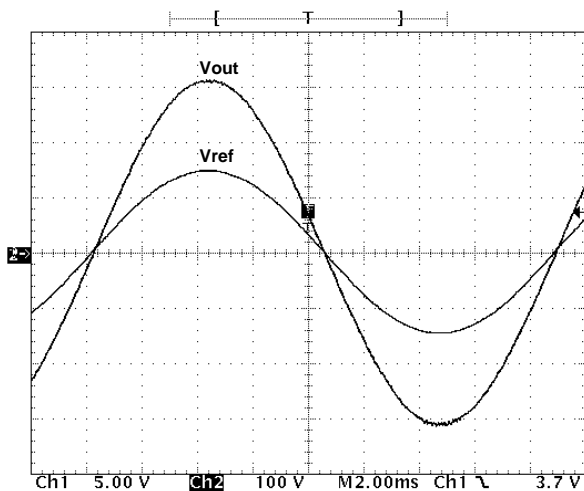


Fig. 15. Saída com tensão senoidal (220V / 60Hz).

### H. Testes com Saída Triangular

Para validar o sistema de importação de sinais oriundos de simulações numéricas através do sistema de gerenciamento remoto, foi realizada a simulação de uma forma de onda triangular utilizando o simulador SPICE. A forma de onda simulada pode ser observada na Figura 16.

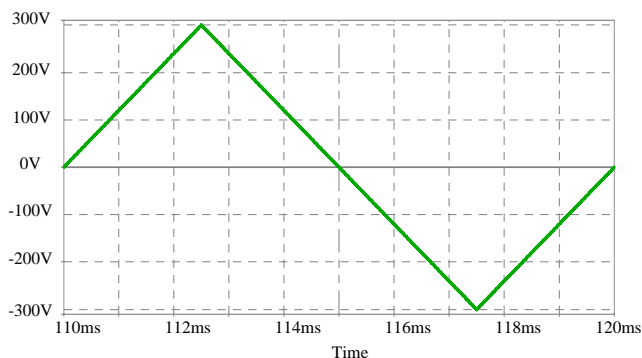


Fig. 16. Forma de onda triangular obtida via simulação

Após a simulação, foi realizada a análise harmônica do sinal e os dados obtidos 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 17.

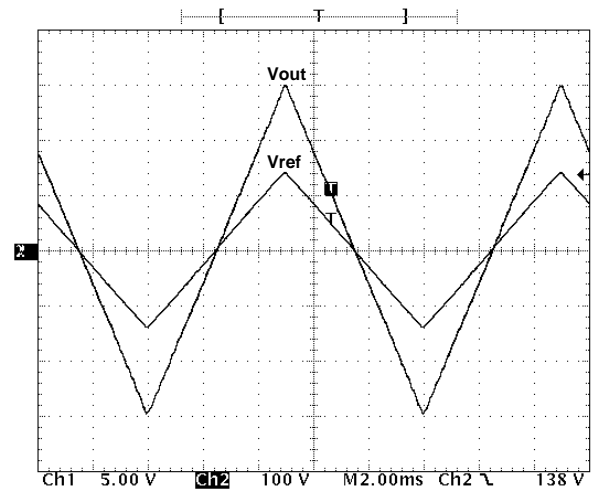


Fig. 17. Sinais triangulares de referência e de saída da fonte.

Para confirmar a correta reprodução do sinal, foi realizada também a análise harmônica da tensão na saída de potência da fonte. Os gráficos que mostram o conteúdo harmônico da tensão simulada e da tensão gerada pela fonte podem ser observados na Figura 18.

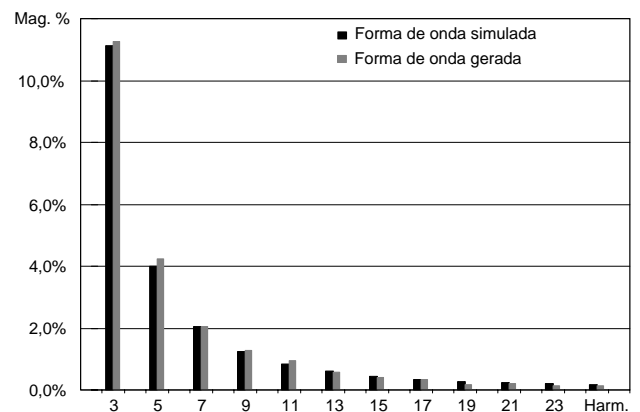


Fig. 18. Análise harmônica das tensões triangulares.

O sinal é reproduzido com qualidade conforme pode se verificar pela comparação das formas de onda simulada (Figura 16) e experimental (Figura 17) e também pela semelhança do conteúdo harmônico apresentado na Figura 18.

### I. Reprodução de uma rede real

Para comprovar a eficácia da fonte na reprodução de alimentações com conteúdo harmônico, presente nas redes reais, foi realizada a análise harmônica de uma rede de alimentação com a ajuda de um analisador de energia. A rede analisada foi obtida na saída de um transformador de tensão, quando este foi submetido a uma carga fortemente não linear (retificador em ponte completa com filtro capacitivo). A Figura 19 apresenta a tensão na saída do transformador.

Os parâmetros de amplitude e fase dos harmônicos obtidos com analisador de energia foram importados pelo soft-



ware de gerenciamento remoto e transferidos via serial para a fonte. Após a geração foram obtidas as formas de onda apresentadas na Figura 20, onde são apresentados o sinal de referência e a tensão de saída da fonte.

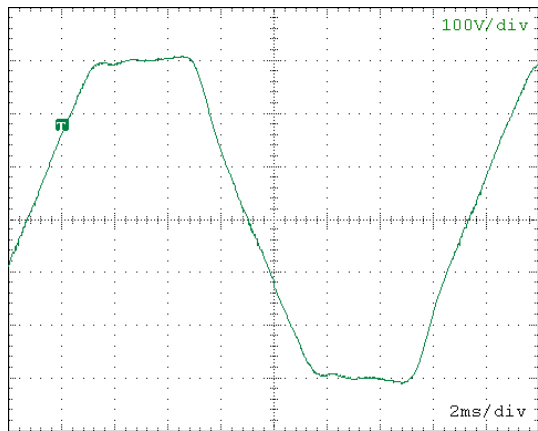


Fig. 19. Rede analisada (THD de 9,69%).

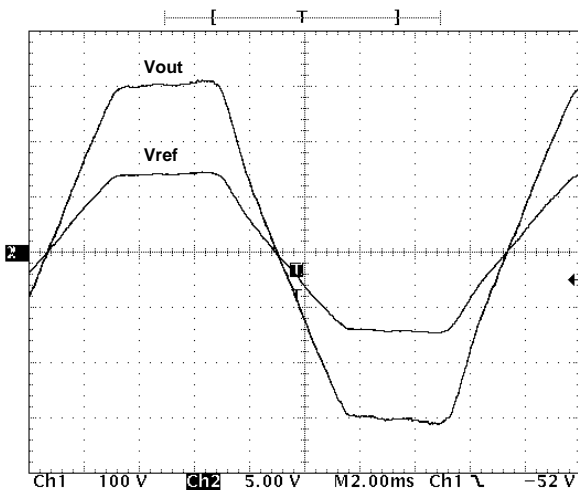


Fig. 20. Rede gerada (THD de 9,43%).

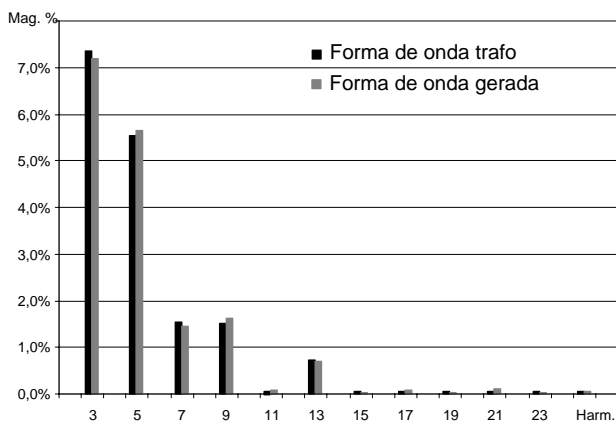


Fig. 21. Análise harmônica da tensão reproduzida.

A Figura 21 apresenta a análise harmônica da tensão original e da tensão reproduzida pela fonte.

Novamente pode-se, através das formas de onda e análises harmônicas apresentadas, afirmar que a fonte reproduziu com qualidade a tensão desejada.

#### IV. CONCLUSÕES

Cada vez mais aumentam as exigências de qualidade e confiabilidade sobre os produtos eletroeletrônicos produzidos no país. Todo ano surgem novas normas e critérios restritivos para a comercialização de equipamentos, principalmente os destinados para o mercado externo.

Para adaptar-se a essa realidade, a indústria nacional necessita cada vez mais equipar os seus laboratórios de pesquisa e desenvolvimento com equipamentos que permitam realizar a avaliação do comportamento de seus produtos frente às mais diversas variações da tensão de alimentação. Muitas vezes, é possível emular em laboratório, com ajuda de uma fonte programável, problemas de campo presentes em lugares distantes, sem a necessidade de deslocamento de uma equipe para avaliação *in loco*.

Apesar dos benefícios proporcionados por tais equipamentos, a sua aquisição muitas vezes esbarra no alto custo de compra e manutenção, devido ao fato de serem em sua maioria, importados. Foi o desejo de ter uma alternativa nacional e de menor custo para essas fontes que motivou o desenvolvimento desse projeto.

Nesse trabalho, foi apresentada uma Fonte de Alimentação CA, programável e com possibilidade de geração de sinais genéricos. A solução proposta conta com três estágios de processamento de energia, CA-CC, CC-CC e CC-CA. O estágio CA-CC utiliza uma topologia clássica de retificador em ponte completa com filtro capacitivo.

O estágio CC-CC utiliza um conversor isolado e com comutação suave do tipo ZVS, o que confere um bom rendimento e ajuda a compactação. O inversor proposto possui circuito passivo de ajuda a comutação que permite a operação em altas frequências. A energia retirada das comutações é regenerada e devolvida ao barramento por um circuito auxiliar, que também opera com comutação suave.

Para a geração dos sinais desejados foi utilizado um gerador de sinais genéricos desenvolvido em um Processador Digital de Sinais. Esse mesmo processador realiza funções de interface, comando, supervisão e sinalização.

Para a operação remota da fonte foi desenvolvido um software em ambiente LabView que comunica-se com a interface através de comunicação serial RS232.

Foram apresentados testes experimentais com a geração de diferentes tensões de saída e os resultados foram muito satisfatórios, comprovando o excelente desempenho da fonte proposta.

Acredita-se que esse projeto possa oferecer uma alternativa viável para a aquisição desse tipo de equipamento pelos centros de pesquisa e desenvolvimento. Atualmente encontra-se em fase final de desenvolvimento uma fonte trifásica com características muito semelhantes, que será abordado em um outro trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Van der Broeck, H.; Lurkens, P.; “Programmable AC power source”; *Fifth European Conference on Power Electronics and Applications*, 1993., pp. 255 - 260 vol.3
- [2] Low, K. S.; “A DSP-based single-phase AC power source”; *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 46 , Issue: 5 , Oct. 1999, pp. 936 – 941.
- [3] Richter, C.M.; Carati, E.G.; Pinheiro, H.; Hey, H.L.; Pinheiro, J.R.; Grundling, H.A.; “A three-phase AC power source using multivariable repetitive robust model reference adaptive control”. *Proceedings of the 2003 American Control Conference*, 2003, Vol. 3 pp.2300 – 2305.
- [4] Ying-Yu Tzou; Rong-Shyang Ou; Shih-Liang Jung; Meng-Yueh Chang; “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, July 1997. Pages: 715 – 725.
- [5] Della Flora, L.; Grundling, H.A. “Vibration Acceleration Control of an AC Power Source-Fed Electrodynamic Shaker”; *IEEE 36<sup>th</sup> Power Electronics Specialists Conference*, 2005. PESC '05. pp.1175 – 1181.
- [6] T. M. Undeland, “Switching Stress Reduction in Power Transistor Converters”. *IEEE Industry Applications Society* 1976, pp. 383-391.
- [7] J. Holtz, S. F. Salama, K.Werner, “A Nondissipative Snubber Circuit for High-Power GTO-Inverters”. *IEEE Industry Applications* 1987, pp. 613-618.
- [8] Foch, M. Cheron, M. Metz, T. Meynard, “Commutation Mechanisms and Soft Commutation in Static Converters”. *COBEP 91*, pp. 338-346.
- [9] W. McMurray, "Resonant Snubbers with Auxiliary Switches". *Conference Records of IEEE IAS Annual Meeting*, 1990, pp. 829-834.
- [10] R. W. De Doncker, J. P. Lyons, "The Auxiliary Resonant Commuted Pole Converter". *Conference Records of IEEE IAS Annual Meeting*, 1990, pp. 1228-1235.
- [11] Vorpérian, V. “Quasi-Square-Wave Converters: Topologies and Analysis”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol 3, No. 2, pp 183-191.
- [12] Hey, H. L., Stein, C. M. O., Pinheiro, J. R., Pinheiro, H., Gründling, H. A. “Zero-Current and Zero-Voltage Soft-Transition Commutation Cell for PWM Inverters.” *IEEE Transactions on Power Electronics*. , v.19, n.2, 2004.
- [13] Mezaroba, M.; Martins, D.C.; Barbi, I.; “A ZVS PWM inverter with active voltage clamping using the reverse recovery energy of the diodes”. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, Volume 52, Issue 10, Oct. 2005; pp 2219 – 2226.
- [14] Barbi I., Souza, F. P. “*Conversores CC-CC Isolados de Alta Freqüência com Comutação Suave*”, Edição dos Autores, Florianópolis, 1999.
- [15] Heldwein, M. L. “*Unidade Retificadora Trifásica de Alto Desempenho para Aplicação em Telecomunicação*”, Dissertação de Mestrado, Florianópolis, 1998.
- [16] Oliveira, S. V. G. “*Otimização de Projeto de Fontes de Alimentação para Centrais de Telecomunicações*”, Dissertação de Mestrado, Florianópolis, 2001.
- [17] Baggio, J.E.; Hey, H.L.; Grundling, H.A.; H.; Pinheiro, J.R.; “Isolated interleaved-phase-shift-PWM DC-DC ZVS converter. ; *IEEE Transactions on Industry Applications*, Volume 39, Issue 6, Nov.-Dec. 2003 Page(s):1795 – 1802
- [18] Mezaroba, M., Heerdt, J. A., Batschauer, A.L., Giacomini, N. “Gerador de Sinais Periódicos Genéricos para Utilização em Fontes de Alimentação CA”; *Congresso Brasileiro de Automática*, 2006, Salvador.

## DADOS BIOGRÁFICOS

**Marcello Mezaroba**, nascido em Videira, SC em 1972. Recebeu os graus de Engenheiro Eletricista, Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica em 1996, 1998 e 2001 respectivamente, pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Atualmente é Professor no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Santa Catarina (UDESC). Suas áreas de interesse incluem comutação suave, correção do fator de potência, acionamento elétrico, e controle de conversores.

**Joselito A. Heerdt**, nascido em Forquilha, SC em 1965. Formou-se Engenheiro Eletricista em 1991 pela UFSC e Mestre em Engenharia Elétrica em 2000, pela UDESC. Atualmente é Professor Titular no Departamento de Engenharia Elétrica da UDESC. Suas áreas de interesse são: processamento digital de sinais, fontes de alimentação chaveadas e controle de conversores estáticos.

**Alessandro Luiz Batschauer**, nascido em Balneário Camboriú, SC em 1977. Formou-se Engenheiro Eletricista em 1999 pela UFSC e Mestre em 2002, pela mesma instituição. Atualmente é Professor Titular no Departamento de Engenharia Elétrica da UDESC. Suas áreas de interesse são: comutação suave, reatores eletrônicos e controle de conversores estáticos.

**Neomar Giacomini**, nascido em 1980 na cidade de Joinville, recebeu o título de Engenheiro Eletricista pela Universidade do Estado de Santa Catarina em 2005. Atualmente é mestrando em Engenharia Elétrica na mesma instituição. Suas áreas de interesse são: Geração de Sinais Genéricos, Conversores Chaveados e Equipamentos para teste de Compatibilidade Eletromagnética.

**Jonathan Domini Sperb**, nascido em 1981 na cidade de Apucarana-PR, recebeu o título de Engenheiro Eletricista pela UDESC em 2005. Atualmente é mestrando em Engenharia Elétrica na mesma instituição e seus esforços se concentram no estudo de conversores trifásicos para amplificação de sinais genéricos. Suas áreas de interesse são: eletrônica de potência e controle de conversores chaveados.