

# IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA UPS MONOFÁSICO COM CONDICIONAMENTO ATIVO DE POTÊNCIA SÉRIE E PARALELO

Rodrigo Barriviera<sup>2</sup> Sérgio A. Oliveira da Silva<sup>1</sup> Maurício dos Santos Kaster<sup>1</sup> Rodrigo A. Modesto<sup>1</sup>

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR<sup>1</sup>

Instituto Federal do Paraná – IFPR<sup>2</sup>

Av. Alberto Carazzai, 1640, CEP. 86.000-300<sup>1</sup>

Cornélio Procópio – PR, Brasil.

rodrigo.barriviera@ifpr.edu.br<sup>2</sup> augus@utfpr.edu.br<sup>1</sup> mkaster@utfpr.edu.br<sup>1</sup> rodrigomodesto@utfpr.edu.br<sup>1</sup>

**Resumo** - Este artigo apresenta a implementação de um sistema de energia ininterrupta (UPS – *Uninterruptible Power Supply*) monofásico, usando um algoritmo de compensação baseado no sistema de eixos de referência síncrona, resultando na supressão de harmônicos e compensação de afundamentos e elevações da tensão da rede elétrica, bem como na compensação de potência reativa e a supressão dos harmônicos da corrente de carga, resultando em uma efetiva correção do fator de potência. A UPS é composta por dois conversores PWM, os quais realizam as funções de filtros ativos série e paralelo. Na estratégia de controle adotada, o conversor série irá operar como uma fonte de corrente senoidal enquanto o conversor paralelo irá operar como uma fonte de tensão senoidal. Ensaios experimentais são realizados a fim de confirmar o desenvolvimento teórico e avaliar o desempenho do sistema UPS *line-interactive*.

**Palavras-Chave** – Algoritmo SRF, Condicionamento ativo de potência, Supressão de harmônicos, Sistema UPS

## SINGLE-PHASE UPS SYSTEM IMPLEMENTATION WITH SERIES- PARALLEL ACTIVE POWER-LINE CONDITINING

**Abstract** – This paper presents an uninterruptible power supply (UPS) implementation using a compensation algorithm based on synchronous reference frame (SRF), allowing harmonic suppression and voltage sag/swell compensation of the utility voltage, as well as reactive power compensation and harmonic suppression of the load current, resulting in an effective power factor correction. The UPS is composed of two PWM converters to perform the active power-line filter functions. The UPS is implemented by adopting the strategy in which the series converter acts as a sinusoidal current source, while the parallel converter acts as a sinusoidal voltage source. Experimental results are presented to confirm the theoretical development and evaluate the performance of the line-interactive UPS system.

**Keywords** – Active power–line conditioning, Harmonic suppression, SRF-based algorithm, UPS system.

---

Artigo submetido em 29/07/2012. Revisado em 14/11/2012. Aceito para publicação em 03/12/2012 por recomendação do editor Henrique A. C. Braga..

## I. INTRODUÇÃO

Distúrbios na rede elétrica, tais como afundamentos e elevações de tensão e transientes causados por condições anormais de funcionamento do sistema elétrico têm ajudado a piorar a qualidade da energia disponibilizada às cargas críticas, tais como, computadores, controle de processos industriais, sistemas de controle de tráfego aéreo, equipamentos hospitalares, dentre outros. Além disso, harmônicos de corrente gerados por cargas não lineares, ao interagirem com a impedância da linha, acarretam o aparecimento de harmônicos e quedas de tensão, afetando a qualidade da energia a outros usuários conectados ao mesmo ponto de acoplamento comum (PAC). Efeitos adicionais podem ser notados pelo aquecimento excessivo de transformadores e motores, aumento de ruídos na frequência audível, dentre outros.

Condicionadores de qualidade de energia, tais como filtros ativos de potência (FAP), condicionadores unificados de qualidade de energia (UPQC - *Unified Power Quality Conditioner*), e sistemas UPS (*Uninterruptible Power Supply*) têm sido empregados no intuito de melhorar a qualidade de energia nos sistemas elétricos [1-15].

Normalmente, FAP série são usados para compensar distúrbios de tensão da rede elétrica, enquanto os FAP paralelos são empregados na compensação de correntes harmônicas e potência reativa [1-5]. No entanto, as filtragens ativas série e paralela podem ser realizadas simultaneamente por meio de UPQC [6-10], ou por alguns sistemas UPS, que além da filtragem oferecem proteção contra distúrbios da rede e energia ininterrupta às cargas críticas [10-15].

Em aplicações convencionais de UPQC, o conversor série funciona como uma fonte de tensão não senoidal, eliminando perturbações de tensão da rede, enquanto o conversor paralelo funciona como uma fonte de corrente não senoidal, eliminando quaisquer correntes harmônicas geradas por cargas não lineares [6-8]. No entanto, um UPQC dual pode ser implementado [9, 10], o qual é chamado de iUPQC e apresenta várias vantagens em sua operação [9]. Na estratégia de controle do iUPQC, o conversor PWM série opera como fonte de corrente senoidal, enquanto o conversor PWM paralelo opera como fonte de tensão senoidal.

Neste trabalho, no modo *standby* (rede presente), a UPS monofásica funciona de forma similar, tanto ao iUPQC apresentado em [8] como aos sistemas UPS apresentados em [10] e [12], onde em [10], se tratando de uma UPS monofásica, apenas resultados da simulação foram apresentados. Desse modo, o sistema UPS atua como filtro

ativo série e paralelo quando estiver operando com a rede presente. Em outras palavras, o sistema UPS é capaz de drenar da rede elétrica uma corrente senoidal e com baixa taxa de distorção harmônica (TDH). Além disso, deve fornecer à carga tensão senoidal, regulada e com baixa TDH.

Com o objetivo de extrair a referência de corrente monofásica, necessária para compensar a corrente de entrada, um controlador baseado no sistema de eixos de referência síncrona (SRF-*Synchronous Reference Frame*) é empregado. Como o SRF é baseado em sistemas equilibrados trifásicos, este é adaptado para ser utilizado em sistemas monofásicos. As coordenadas do vetor unitário  $sen\theta$  e  $cos\theta$ , usado no algoritmo SRF, são obtidas a partir de um sistema p-PLL (*Phase-Locked Loop*), o qual é baseado na teoria de potência ativa instantânea [18,19]. Além disso, o p-PLL também é usado para gerar a tensão de referência de saída da UPS.

Para confirmar o desenvolvimento teórico e avaliar o desempenho da UPS monofásica, testes experimentais são realizados considerando as perturbações na tensão da rede elétrica, tais como harmônicos, afundamentos e elevações de tensão, bem como faltas.

Este artigo é organizado como segue: A Seção 2 descreve a estrutura do sistema UPS monofásico, bem como os modos de operação dos conversores série e paralelo na execução do condicionamento de energia. O controlador de corrente e o algoritmo SRF usado para gerar a corrente de referência do conversor série são apresentados na Seção 3. Na Seção 4 o controlador de tensão e o sistema PLL utilizados para gerar a referência de tensão do conversor paralelo são apresentados. Curvas normalizadas que descrevem o fluxo de energia através dos conversores série e paralelo da UPS são discutidas na Seção 5. Na Seção 6 são apresentados os resultados experimentais da UPS controlada digitalmente por DSP, enquanto as conclusões são apresentadas na Seção 7.

## II. DESCRIÇÃO DA TOPOLOGIA DA UPS

A topologia da UPS é composta por dois inversores monofásicos em ponte completa, como mostrado na Figura 1. Os conversores são acoplados a um mesmo barramento c.c. de tensão, e executam as funções de filtros ativos série e paralelo. O barramento c.c. é composto por um banco de baterias e capacitores. Além disso, a chave estática 'sw' tem a função de proteger a carga proporcionando uma desconexão rápida entre a UPS e a rede mediante uma condição anormal de funcionamento. Em situações críticas, 'sw' pode ser aberta e o conversor série inibido. Enquanto isso, o conversor paralelo permanece em funcionamento normal, sem que haja qualquer tempo de transferência que poderia influenciar a carga, ou seja, a UPS *line-interactive* se comporta como uma verdadeira UPS *on-line* [11, 16, 17].

Um algoritmo SRF é usado para gerar a referência de corrente do conversor PWM série fazendo com que a corrente da rede seja senoidal. Sua impedância deve ser alta o suficiente para isolar a rede das correntes harmônicas da carga. Já o conversor PWM paralelo é controlado para operar como uma fonte de tensão senoidal. Neste caso, sua impedância deve ser suficientemente baixa para absorver as correntes harmônicas da carga. Tanto a tensão de saída senoidal ( $v_L$ ) como a corrente senoidal de entrada ( $i_s$ ) são

controladas individualmente para estarem em fase com a tensão da rede ( $v_s$ ), permitindo uma eliminação eficaz dos harmônicos de corrente e tensão. Além disso, a compensação de potência reativa e a regulação da tensão de saída também são realizadas.

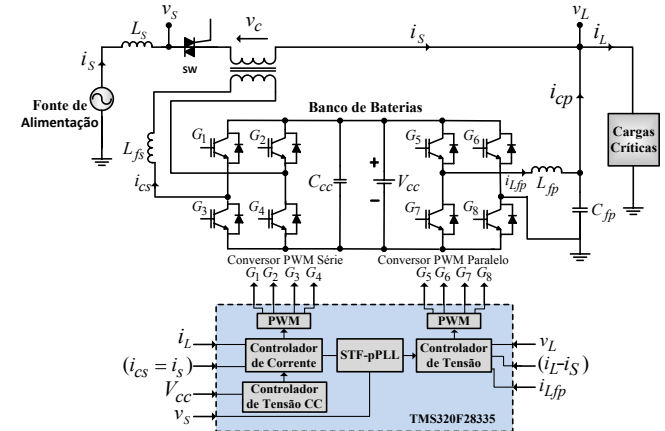


Fig. 1. Topologia da UPS line-interactive monofásica.

## III. CONTROLE DE CORRENTE DA UPS

Nesta seção é apresentado o algoritmo SRF destinado a gerar a referência de corrente do conversor série, assim como o controlador proporcional-integral (PI) de corrente.

### A. Algoritmo SRF

O algoritmo SRF se baseia na transformação das grandezas de tensão/corrente do sistema de eixos estacionário  $abc$  em grandezas contínuas no sistema de eixos síncrono  $dq$ , no qual estes giram à velocidade síncrona em relação aos vetores espaciais de tensão/corrente. Os termos correspondentes às parcelas harmônicas de tensão ou corrente nos eixos  $dq$  que possuem frequências diferentes da síncrona, são representados por formas de onda alternadas superpostas ao termo contínuo fundamental. Desse modo, as parcelas fundamentais são facilmente extraídas através da utilização de filtros passa-baixa (FPB). A ortogonalidade necessária para o funcionamento ideal do algoritmo SRF é obtida por meio da geração das coordenadas do vetor unitário síncrono  $sen\theta$  e  $cos\theta$ , utilizando, por exemplo, um circuito PLL (*Phase-Locked Loop*), sincronizado com a frequência do sistema elétrico.

No caso da UPS, por se tratar de um sistema monofásico, algumas modificações devem ser feitas para se utilizar o algoritmo SRF. A principal delas é gerar um sistema trifásico fictício, representado por um sistema bifásico no eixo de coordenadas estacionárias  $\alpha\beta$ .

O algoritmo de SRF utilizado neste trabalho está mostrado na Figura 2. Medindo apenas a corrente de carga  $i_L$ , duas correntes em quadratura no sistema de eixos estacionário  $\alpha\beta$  são obtidas, ou seja,  $i_\alpha$  e  $i_\beta$ , onde  $i_\alpha$  é a própria corrente da carga medida ( $i_L$ ) e  $i_\beta$  é obtida realizando um atraso de fase de  $\pi/2$  radianos em relação  $i_L$ , obtendo-se, desta forma, correntes bifásicas fictícias representadas por (1).

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_L(\omega t) \\ i_L(\omega t - \pi/2) \end{bmatrix} \quad (1)$$

No eixo síncrono, a corrente direta  $i_d$  é obtida por (2) e, usando um FPB, sua componente c.c. ( $i_{d_{cc}}$ ) pode ser encontrada, onde esta representa a parcela ativa da corrente da carga. Portanto, a referência senoidal de corrente do conversor série  $i_{cs}^*$  é obtida diretamente utilizando (3), onde o ângulo de fase estimado, obtido a partir do p-PLL, deverá ser idêntico ao ângulo de fase da rede. O sinal  $i_{b_{cc}}$  representa o sinal de saída do controlador PI do barramento c.c., cujos ganhos proporcional e integral são definidos por  $K_{P_{cc}}$  e  $K_{I_{cc}}$ , respectivamente. O controle do barramento c.c. é realizado controlando a amplitude da corrente de referência  $i_{cs}^*$ , cuja finalidade é equilibrar o fluxo de potência da UPS, seja para compensar a diferença de tensão entre a entrada e a saída, seja para compensar as perdas nas chaves de potência e dos elementos passivos de filtragem. Além disso,  $i_{b_{cc}}$  é também utilizado para realizar a carga do banco de baterias da UPS drenando uma parcela de potência ativa da rede. Especificamente, neste trabalho, foi adotado o método de carga por tensão constante [20].

Resumidamente, com o algoritmo da Figura 2 consegue-se gerar a referência adequada para eliminar os harmônicos da corrente da carga, bem como compensar a potência reativa da carga.

$$i_d = i_\alpha \cos \theta + i_\beta \sin \theta \quad (2)$$

$$i_{cs}^* = (i_{d_{cc}} + i_{b_{cc}}) \cos \theta \quad (3)$$

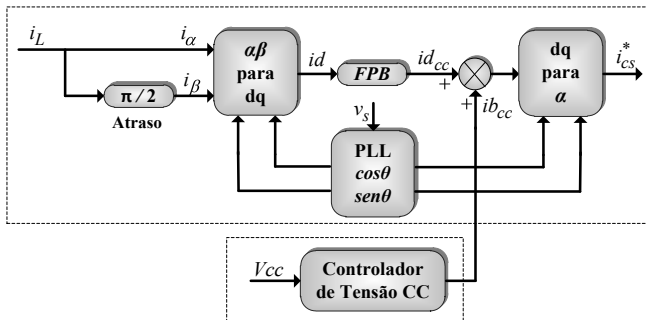


Fig. 2. Algoritmo SRF para geração da referência de corrente.

### B. Controlador de Corrente da UPS

O modelo do sistema de controle de corrente da UPS é obtido através do circuito equivalente mostrado na Figura 3.a, onde a tensão do barramento  $V_{cc}$  é assumida ser constante para um determinado período de chaveamento. As impedâncias do lado do secundário do transformador série são todas refletidas para o lado primário, sendo  $L_{dt}$  a indutância de dispersão do transformador série,  $L_{sf}$  a indutância de filtragem,  $L_s$  a indutância da rede,  $R_t$ ,  $R_{Lsf}$  e  $R_s$  as suas respectivas resistências,  $n$  a relação de transformação e  $i_s/n$  a corrente da rede refletida para o primário do transformador série. Para a obtenção do respectivo modelo, assume-se o conversor paralelo como uma fonte de tensão senoidal ideal [21]. O diagrama em blocos da malha de controle de corrente é mostrado na Figura 3.b, e sua respectiva função de transferência de malha fechada é representada por (4). Já a função de transferência que representa rigidez dinâmica do conversor série é dada por (5), na qual a diferença entre as tensões de entrada e saída da UPS é tratada como uma perturbação no sistema.

$$\frac{i_s(s)}{i_s^*(s)} = \frac{K_{PWM}V_{cc}(K_{P_s}s + K_{I_s})}{L_{eq}s^2 + K_{P_s}K_{PWM}V_{cc} + R_{eq}s + K_{I_s}K_{PWM}V_{cc}} \quad (4)$$

$$\frac{v_L s - v_s(s)}{i_s(s)} = -\frac{L_{eq}s^2 + K_{P_s}K_{PWM}V_{cc} + R_{eq}s + K_{I_s}K_{PWM}V_{cc}}{s} \quad (5)$$

Onde:  $K_{P_s}$  e  $K_{I_s}$  são os ganhos proporcional e integral do controlador de corrente;  $K_{PWM}$  é o ganho do modulador PWM;  $L_{eq} = n^2(L_{dt} + L_s) + L_{sf}$  e  $R_{eq} = n^2(R_t + R_s) + R_{Lsf}$  são, respectivamente, a indutância e a resistência equivalente do sistema.

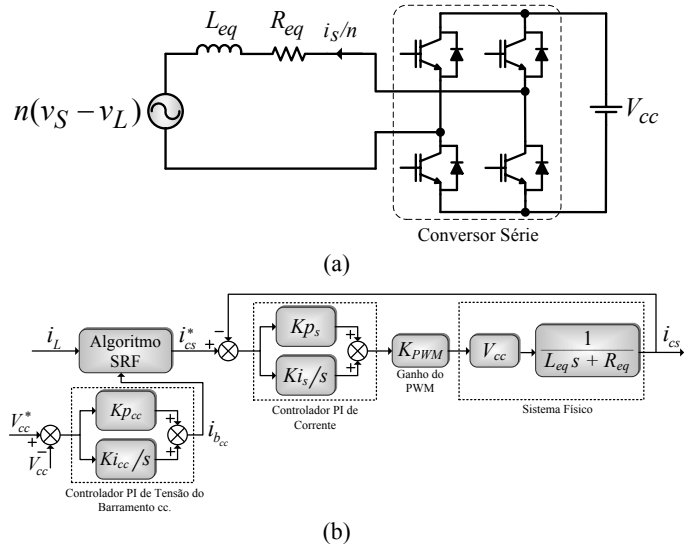


Fig. 3. (a) Circuito equivalente do conversor série da UPS; (b) Diagrama em blocos da malha de corrente.

## IV. CONTROLE DE TENSÃO DA UPS

Nesta seção é apresentado o algoritmo PLL destinado à geração da referência de tensão do conversor paralelo, assim como os controladores da tensão de saída da UPS.

### A. Sistema PLL Monofásico

As coordenadas do vetor unitário síncrono usadas no algoritmo SRF de corrente ( $\sin \theta$  e  $\cos \theta$ ), bem como a referência de tensão de saída da UPS são obtidas por meio do p-PLL monofásico mostrado na Figura 4.a e descrito em detalhes em [18].

Uma vez que o respectivo PLL é baseado na teoria de potência ativa instantânea trifásica e o mesmo é utilizado em sistemas monofásicos, novamente um sistema trifásico fictício deve ser criado, o qual será representado pelo sistema de eixos estacionário bifásico  $\alpha\beta$ . Assim, a tensão da rede  $v_s$  é assumida ser a tensão direta do eixo bifásico estacionário, ou seja,  $v_s = v_\alpha$ . Já a tensão em quadratura fictícia  $v_\beta$  é obtida pela introdução de um atraso de fase de  $\pi/2$  radianos na tensão medida da rede ( $v_s$ ).

O princípio de operação do p-PLL é cancelar a componente c.c. ( $p'$ ) da potência fictícia trifásica  $p'$  (Figura 4.a). A dinâmica do PLL irá determinar na saída do controlador PI a frequência angular de referência ( $\omega^* = 2\pi f$ ), onde  $f$  é a frequência da rede elétrica. O ângulo de fase  $\theta^*$  é obtido pela integração da frequência angular  $\omega^*$  que será

idêntica à frequência angular da rede  $\omega$ . Assim,  $\theta^*$  é usado para calcular as correntes de realimentação bifásicas fictícias  $i'_\alpha$  e  $i'_\beta$ . Para cancelar a componente c.c. de  $p'$  ( $p'$ ),  $i'_\alpha$  e  $i'_\beta$  devem ser ortogonais às respectivas tensões  $v_\alpha$  e  $v_\beta$ . A frequência  $\omega_{ff}$  é usada para melhorar a dinâmica inicial do p-PLL.

### B. Sistema STF-pPLL

O sistema p-PLL mostrado na Figura 4.a pode ser diretamente afetado por perturbações da tensão da rede, tais como harmônicas, afundamentos e elevações de tensão, dentre outros, os quais podem interferir no desempenho do PLL. Conseqüentemente, a qualidade das referências de corrente e tensão da UPS podem ser influenciadas.

Para contornar este problema, optou-se por utilizar um filtro auto-sintonizado (STF – *self-tuning filter*) [2] de forma a filtrar as tensões fictícias de entrada do p-PLL conforme mostrado na Figura 4.b. O STF funciona em conjunto com o p-PLL resultando em um algoritmo aqui chamado de STF-pPLL. Basicamente, o STF é empregado para extrair as componentes fundamentais das tensões de entrada do p-PLL. Já o p-PLL é responsável pela adaptação da frequência de corte do STF considerando que possa haver uma variação da frequência da rede. O STF mostrado na Figura 4.b foi empregado em sistemas trifásicos, o qual é descrito em detalhes em [2], onde os sinais de entrada do mesmo compreendem dois sinais de quadratura não filtrados.

Observa-se que para que o STF tenha um desempenho adequado, sua frequência de corte  $\omega_c$  deve ser idêntica à frequência da rede ( $\omega = \omega^*$ ). Neste caso, esta tarefa é feita pela realimentação da frequência obtida no p-PLL.

As funções de transferência dos respectivos sinais filtrados do STF,  $v_{\alpha f}$  e  $v_{\beta f}$ , são dadas por (6) e (7), respectivamente, onde o parâmetro  $K$  está diretamente relacionado com a seletividade do filtro, ou seja, quanto menor o valor de  $K$ , mais seletivo será o filtro.

$$v_{\alpha f}(s) = \frac{K}{s} [v_\alpha(s) - v_{\alpha f}(s)] - \frac{\omega_c}{s} v_{\beta f}(s) \quad (6)$$

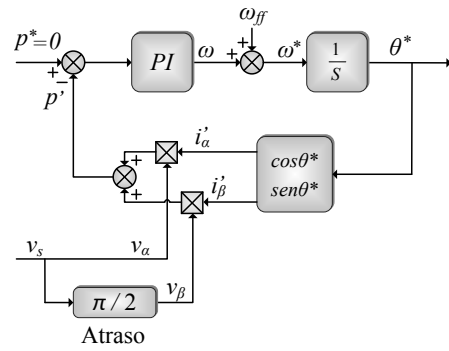
$$v_{\beta f}(s) = \frac{K}{s} [v_\beta(s) - v_{\beta f}(s)] + \frac{\omega_c}{s} v_{\alpha f}(s) \quad (7)$$

### C. Geração da Referência de Tensão da UPS

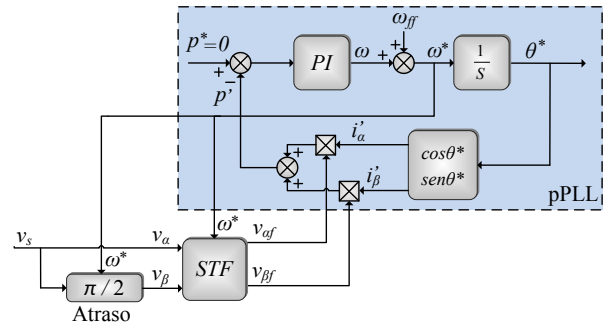
A referência da tensão de saída ( $v_L^*$ ) é obtida diretamente do algoritmo STF-pPLL. Esta é definida por (8), onde  $V_{Lp}$  é a amplitude da requerida tensão de saída e  $\theta^*$  é o ângulo de fase do STF-pPLL.

$$v_L^* = V_{Lp} \cos(\theta^*) \quad (8)$$

Uma vez que a tensão de saída da UPS é sempre senoidal e regulada, as perturbações de rede, tais como harmônicos, afundamentos e elevações de tensão, são naturalmente absorvidas pelo transformador do conversor série. Desse modo, não há necessidade de cálculo de qualquer outra referência de tensão de compensação, haja visto que os distúrbios de tensão da rede elétrica são indiretamente compensados.



(a)



(b)

Fig. 4. Sistemas p-PLL e STF-pPLL.

### D. Controlador de Tensão da UPS

O modelo do sistema de controle de tensão da UPS, para a UPS operando no modo *standby*, está representado pelo circuito equivalente da Figura 5.a, onde a tensão do barramento  $V_{cc}$  é assumida ser constante para o intervalo de tempo de chaveamento do conversor. Para a obtenção do respectivo circuito equivalente assume-se o conversor série como uma fonte de corrente senoidal ideal [21]. Para o modo *backup* a fonte de corrente da Figura 5.a deve ser suprimida.

O diagrama em blocos do controlador de tensão e do sistema físico do conversor paralelo está mostrado na Figura 5.b. No controle da tensão de saída utiliza-se um laço de tensão externo, composto por um controlador proporcional integral, e um laço de corrente interno composto apenas por um controlador proporcional. Desse modo, a função de transferência de laço fechado  $v_L(s)/v_L^*(s)$  é obtida por (9). A função de transferência que representa a rigidez dinâmica do conversor paralelo é dada por (10), na qual a diferença entre a corrente da carga e a corrente da rede é tratada como uma perturbação no sistema.

$$\frac{v_L(s)}{v_L^*(s)} = \frac{K_{PWM} V_{cc} (X_1 s^2 + X_2 s + X_3)}{(Y_1 s^3 + Y_2 s^2 + Y_3 s + Y_4)} \quad (9)$$

$$\frac{i_L s - i_s(s)}{v_L(s)} = - \frac{(Y_1 s^3 + Y_2 s^2 + Y_3 s + Y_4)}{Z_1 s^2 + Z_2 s} \quad (10)$$

Onde:

$$X_1 = \hat{C}_{fp} \cdot K_{pi}; \quad X_2 = K_{pv} \cdot K_{pi}; \quad X_3 = K_{iv} \cdot K_{pi};$$

$$Y_1 = L_{fp} \cdot C_{fp}; \quad Y_2 = C_{fp} \cdot (K_{pi} K_{PWM} V_{cc} + R_{Lfp});$$

$$Y_3 = K_{pv} \cdot K_{pi} K_{PWM} V_{cc} + I; \quad Y_4 = K_{iv} \cdot K_{pi} K_{PWM} V_{cc};$$

$$Z_1 = L_{fp} \quad \text{e} \quad Z_2 = R_{Lfp}.$$

Os ganhos proporcional e integral do laço externo de tensão são definidos, respectivamente, por  $Kp_v$  e  $Ki_v/s$ ;  $Kp_i$  é o ganho proporcional do laço interno de corrente;  $L_{fjp}$  e  $C_{fjp}$  representam o filtro LC de saída do conversor, enquanto  $R_{L_{fjp}}$  representa a resistência de  $L_{fjp}$ .

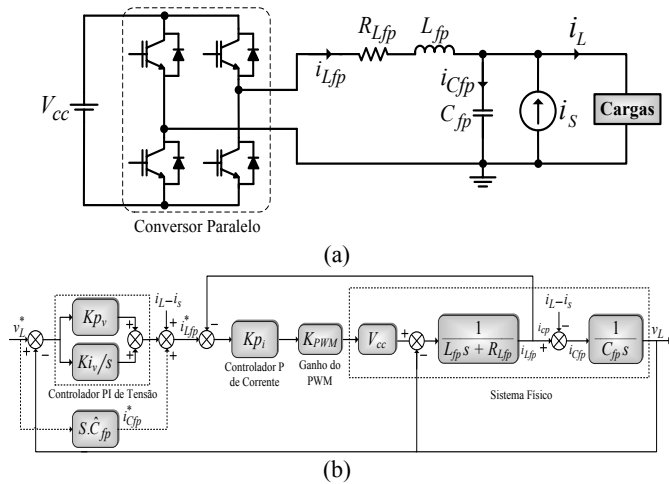


Fig. 5. (a) Circuito equivalente do conversor paralelo da UPS; (b) Diagrama em blocos da malha de tensão.

## V. FLUXO DE POTÊNCIA NA UPS

As potências aparentes dos conversores série e paralelo,  $S_s$  e  $S_p$ , respectivamente, dependem diretamente da relação entre os valores eficazes das tensões da UPS ( $V_L/V_s$ ), do fator de deslocamento ( $\cos\phi_1$ ), da TDH da corrente de carga  $i_L$  ( $TDH_{i_L}$ ) e do fator de carga das baterias ( $K_b = P_b/P_L$ ), onde  $P_b$  é a potência ativa para carregar as baterias e  $P_L$  é a potência ativa consumida pela carga.

Assumindo que as tensões de entrada e saída, assim como a corrente de entrada da UPS são grandezas senoidais, em regime permanente, as potências aparentes dos conversores série e paralelo, normalizadas em função da potência aparente da carga são dadas por (12) e (13), respectivamente.

$$\left| \frac{S_s}{S_L} \right| = \frac{\cos\phi_1 \sqrt{[(1+k_b)(1-V_L/V_s)]^2}}{\sqrt{1+TDH_{i_L}^2}} \quad (12)$$

$$\left| \frac{S_p}{S_L} \right| = \sqrt{\frac{\cos^2\phi_1 \frac{V_L}{V_s} (1+k_b) \left( \frac{V_L}{V_s} (1+k_b) - 2 \right)}{1+TDH_{i_L}^2}} + 1 \quad (13)$$

Considerando que  $\cos\phi_1$  é igual a um, as potências normalizadas dos conversores série e paralelo, para dois valores distintos de  $K_b$  são mostrados nas Figuras 6.a e 6.b, as quais são traçadas em função de  $V_s/V_L$  e da  $TDH_{i_L}$ . Analisando a Figura 6 percebe-se que o sentido do fluxo de potência da UPS depende da diferença de tensão entre a entrada e a saída da UPS, bem como do fator de carga  $k_b$ .

A Figura 7 mostra o sentido do fluxo das potências ativas instantâneas na UPS, onde para realizar o equilíbrio de potência no barramento c.c., a amplitude da corrente de referência do conversor série é variada por meio de um controlador PI de tensão no barramento c.c. (Figura 2), sabendo-se que a potência da rede, do conversor série, do conversor paralelo e da carga são representadas, por  $p_s$ ,  $p_{cs}$ ,  $p_{cp}$  e  $p_L$ , respectivamente.

Considerando  $K_b$  igual a zero, quando  $V_s$  é maior que  $V_L$ , uma parte da potência ativa consumida pela carga flui da rede para o barramento c.c., via conversor série, e do barramento c.c. para a carga via conversor paralelo, ou seja,  $p_s = p_{cs} + p_o = p_{cp} + p_o = p_L$  (Figura 7.a). Quando  $V_s$  é menor que  $V_L$ , considerando que a amplitude da corrente de entrada se eleva para equilibrar o fluxo de potência e a tensão na saída do transformador se inverte para garantir a regulação da tensão de saída, tem-se que  $p_o > p_s = p_L$ . Isto resulta na circulação de uma parcela ativa de potência processada pela UPS fluindo da saída do conversor paralelo para o barramento c.c., e deste para o transformador de acoplamento via conversor série, ou seja,  $p_s + p_{cs} = p_o = p_{cp} + p_L$ , onde  $p_{cs} = p_{cp}$  (Figura 7.b). Num caso particular, quando  $V_s$  é igual a  $V_L$  e a UPS está alimentando uma carga puramente resistiva, não existe potência ativa fluindo pelos conversores série e paralelo, ou seja,  $p_s = p_o = p_L$  (Figura 7.c). Por outro lado, a potência ativa relacionada com a carga do banco de baterias, bem como com as perdas de chaveamento de ambos os conversores e dos elementos passivos de filtragem, será absorvida pelo conversor paralelo. Por exemplo, observando a Figura 6.a e 6.b, quando  $V_s/V_L = 1$ ,  $\cos\phi_1 = 1$ ,  $TDH_{i_L} = 0$ , e  $K_b = 0,1$  as potências normalizadas  $|S_p/S_L| = 0,1$  e  $|S_s/S_L| = 0$ . Assim, para esta condição, o comportamento do fluxo de potência da UPS é mostrado na Figura 7.d.

O conversor paralelo deve ser dimensionado para a potência nominal da carga. Já o dimensionamento do conversor série considera-se, principalmente, a compensação dos distúrbios como afundamentos e elevações de tensão. Durante tais distúrbios, existe uma componente fundamental de tensão no transformador série, a qual corresponde a diferença entre as tensões de entrada e saída da UPS. Pelo fato da fundamental da corrente da rede também fluir através do respectivo transformador, resultará em uma potência média que será absorvida ou fornecida pelo conversor série.

## VI. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O sistema UPS foi experimentalmente testado de acordo com a topologia mostrada na Figura 1, o qual consiste em dois conversores PWM monofásicos em ponte completa acoplados a um barramento c.c. comum, composto por um banco de baterias. O DSP TMS320F28335 foi usado para implementar o algoritmo SRF de corrente (Figura 2), o algoritmo STF-pPLL (Figura 4) e os controladores de tensão e corrente (Figuras 3 e 5). As frequências de comutação dos conversores PWM foram fixadas em 20 kHz. Uma carga não linear de 1 kVA foi utilizada nos testes, a qual é composta por um retificador a diodos alimentando uma carga RL.

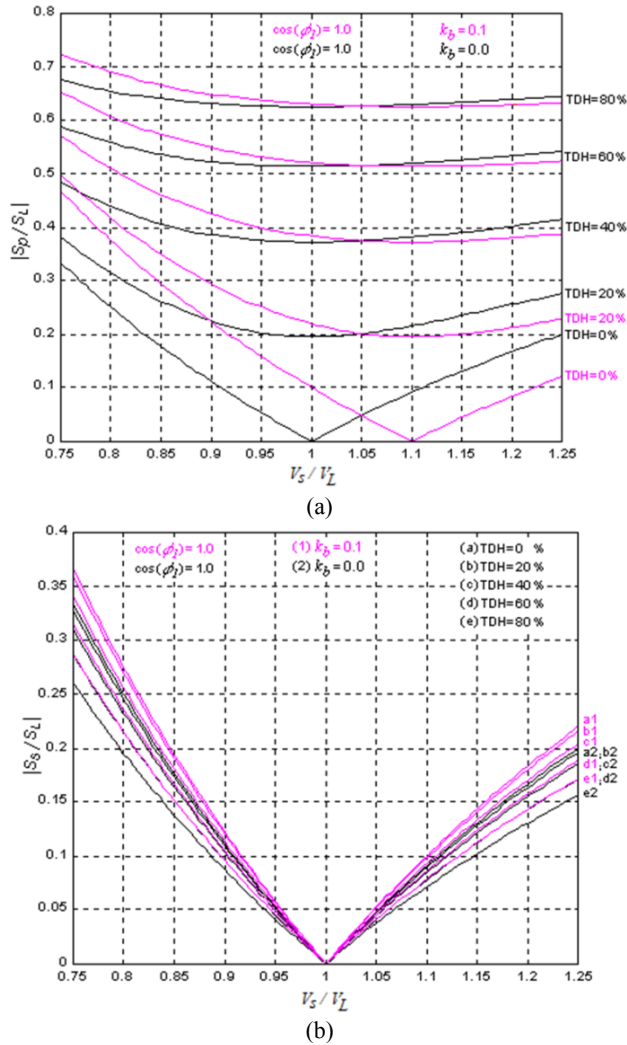


Fig. 6. Potências e  $k_b = 0,1$  ( $\cos\phi_1=1$ ): (a) Conversor paralelo  $|S_p / S_L|$ ; (b) normalizadas:  $k_b = 0$  Conversor série  $|S_s / S_L|$ .

Os parâmetros usados nos experimentos estão mostrados na Tabela I. Já os ganhos dos controladores assim como as especificações utilizadas para o projeto dos mesmos estão mostrados na Tabela II. Os resultados experimentais, que mostra a UPS operando de forma similar ao iUPQC no modo de operação *standby* estão mostrados nas Figuras 8 e 9. Já as transições da UPS estão mostradas na Figura 10. Na Figura 8.a são mostradas a corrente da rede compensada  $i_s$ , a corrente de compensação do conversor paralelo  $i_{cp}$  e a corrente de carga  $i_L$ . As Figuras 8.b e 8.c mostra as tensões da rede ( $v_s$ ) e de saída ( $v_L$ ), assim como a corrente da rede ( $i_s$ ) para  $V_s > V_L$  e  $V_s < V_L$ , respectivamente. Em ambos os casos observa-se que a corrente da rede e a tensão de saída são controladas para estarem em fase com a tensão da rede. Como pode ser notado nas Figuras 8.b e 8.c, a amplitude da tensão de saída é sempre constante, porém a amplitude da corrente da rede varia com o objetivo de controlar o fluxo de potência na UPS. As Figuras 8.d e 8.e mostram a tensão de compensação sobre o transformador série ( $v_c$ ) para  $V_s$  (127 V)  $>$   $V_L$  (114 V) e para  $V_s$  (127 V)  $<$   $V_L$  (140 V), respectivamente, a qual representa a diferença entre as tensões de entrada e saída da UPS.

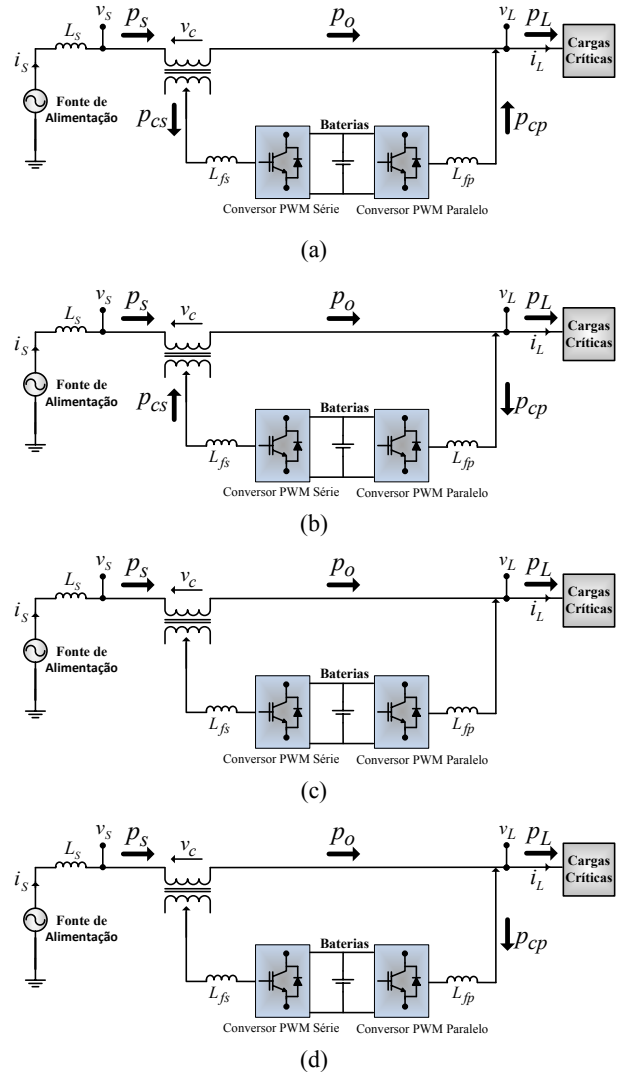


Fig. 7. Fluxo de potência: (a)  $V_s > V_s$  e  $k_b = 0$ ; (b)  $V_s < V_s$  e  $k_b = 0$ ; (c)  $V_s = V_s$  e  $k_b = 0$ ; (d)  $V_s = V_s$  e  $k_b = 0,1$ .

A Figura 9 apresenta o comportamento da UPS considerando a existência de 11,22% de TDH na tensão de entrada. Após a compensação, uma TDH de 2% foi medida na tensão de saída. A Figura 10 apresenta os resultados referentes ao comportamento dinâmico da UPS, quando ocorrem os distúrbios de afundamento e elevação de tensão de 12%. As Figuras 10.a e 10.b mostram a tensão no barramento c.c. ( $v_{cc}$ ), as tensões da rede ( $v_s$ ) e de saída ( $v_L$ ) e a corrente de entrada ( $i_s$ ) para os distúrbios de afundamento e elevação de tensão, respectivamente. Como pode ser notado, a amplitude da corrente da rede aumenta no instante do afundamento de tensão e diminui no instante da elevação de tensão. Isto acontece pela ação do controle do fluxo de potência da UPS, o qual é realizado pelo controlador do barramento c.c. mostrado na Figura 2. A Figura 10.c mostra, respectivamente, a tensão do barramento c.c., a corrente da rede, a corrente de compensação do conversor paralelo e a corrente da carga, quando um transitório de carga ocorre.

As correntes e tensões da UPS, operando nos modos de operação *standby* e *backup*, são mostrados na Figura 11. A corrente da rede, a corrente de compensação paralela e a

corrente de carga são mostradas na Figura 11.a, quando a transição *backup-standby* ocorre, enquanto que a transição *standby-backup* é mostrada na Figura 11.b. As correntes e tensões da UPS para ambas as transições são mostrados na Figura 11.c. A Figura 11.d mostra a tensão do barramento c.c., as tensões da rede e de saída para as transições *standby-backup-standby*. Como pode ser observado que não existe tempo de transferência durante as respectivas transições. As TDHs da corrente da carga e da rede estão mostradas nas Figuras 12.a e 12.b, enquanto a TDH das tensões de entrada e saída são mostradas nas Figuras 12.c e 12.d. O fator de potência (PF) e o fator de deslocamento (DPF) medido na rede, bem como as potências ativa (W), reativa (VAR) e aparente (VA) envolvidas estão mostrados na Figura 13.

**TABELA I**

**Parâmetros Utilizados nos Experimentos**

Tensão eficaz nominal da rede	$V_L = 127V$
Tensão eficaz na carga	$V_s = 127V$
Frequência da rede	$f_s = 60Hz$
Tensão do barramento c.c.	$V_{cc} = 300V$
Ganho do modulador PWM	$K_{PWM} = 5,33 \cdot 10^{-4}$
Frequência de amostragem do DSP	$f_a = 60kHz$
Relação de transformação do transformador de acoplamento série	$n = 1$
Indutância de dispersão do transformador de acoplamento série	$L_{dt} = 381,8\mu H$
Resistência do transformador de acoplamento série	$R_t = 0,144\Omega$
Indutância do alimentador	$L_s = 10\mu H$
Resistência do alimentador	$R_s = 3,76m\Omega$
Indutância do filtro série	$L_{fs} = 3,14mH$
Resistência do indutor série	$R_{Lfs} = 0,38\Omega$
Indutância do filtro paralelo	$L_{fp} = 350\mu H$
Resistência do indutor paralelo	$R_{Lfp} = 0,12\Omega$
Capacitância do filtro paralelo	$C_{fp} = 200\mu F$
Resistência da carga	$R = 16\Omega$
Indutância da carga	$L = 200mH$

**TABELA II**

**Ganhos dos Controladores e Especificações de Projeto**

Tensão de saída		Corrente		Barramento c.c.	
Laço Externo	Laço Interno	$Kp_s$	$Ki_s$	$Kp_{cc}$	$Ki_{cc}$
$Kp_v$	$Ki_v$	$Kp_i$			
0,3454	924,64	34,76	219,59	424230	0,0657
Ganho proporcional do p-PLL				$K_{ppll} = 180$	
Ganho integral do p-PLL				$K_{ipll} = 2000$	
Parâmetro $K$ do STF				$K = 20$	
Frequência de cruzamento da malha de corrente (conversor paralelo)		$\omega_{ci_p} = 2\pi f_s / 8 \text{ rad/s}$			
Margem de Fase		$MF_{ip} = 75^\circ$			
Frequência de cruzamento da malha de tensão (conversor paralelo)		$\omega_{cv_p} = 0,16\omega_{ci_p} \text{ rad/s}$			
Margem de Fase		$MF_{vp} = 45^\circ$			
Frequência de cruzamento da malha de corrente (conversor série)		$\omega_{ci_s} = 2\pi f_s / 13 \text{ rad/s}$			
Margem de Fase		$MF_{is} = 80,6^\circ$			
Frequência de cruzamento da malha de tensão (barramento cc.)		$\omega_{cv_{cc}} = 42 \text{ rad/s}$			
Margem de Fase		$MF_{v_{cc}} = 87,5^\circ$			

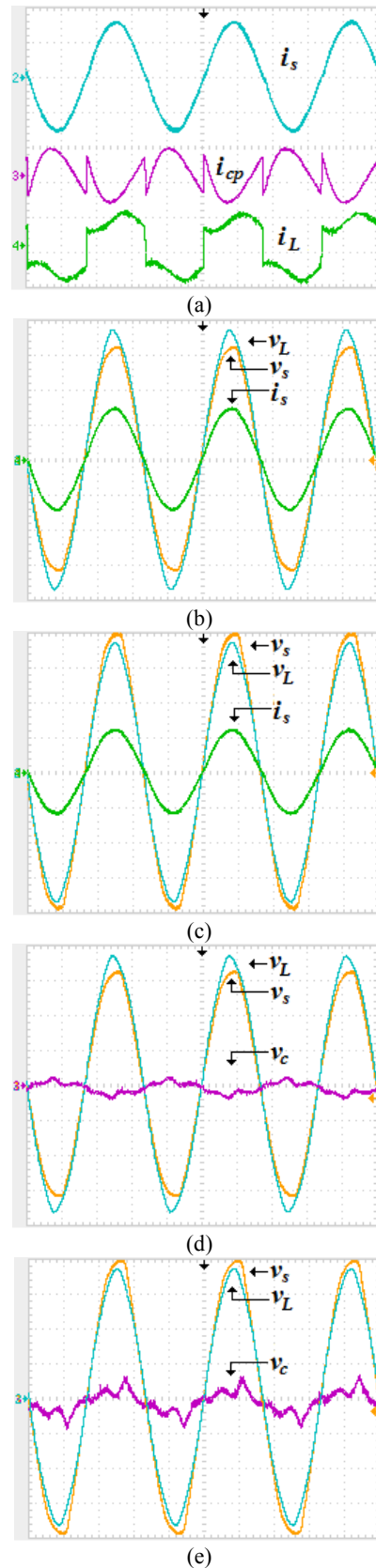


Fig. 8. Tensões e correntes (5ms/div): (a) corrente da carga  $i_L$ , corrente de compensação paralela  $i_{cp}$ , corrente da rede  $i_s$  (10A/div); (b) e (c) tensões de entrada ( $v_s$ ) e saída ( $v_L$ ) (50V/div),  $i_s$  (10A/div); (d) ( $v_s$ ) e ( $v_L$ ) (50V/div), tensão de compensação série ( $v_c$ ) (100V/div); (e) ( $v_s$ ) e ( $v_L$ ) (50V/div), ( $v_c$ ) (50V/div).

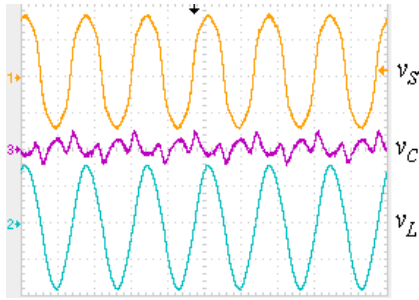


Fig. 9. Tensões da UPS (10ms/div, 100V/div): tensão de entrada ( $v_s$ ), tensão de compensação série ( $v_c$ ) e tensão de saída ( $v_L$ ).

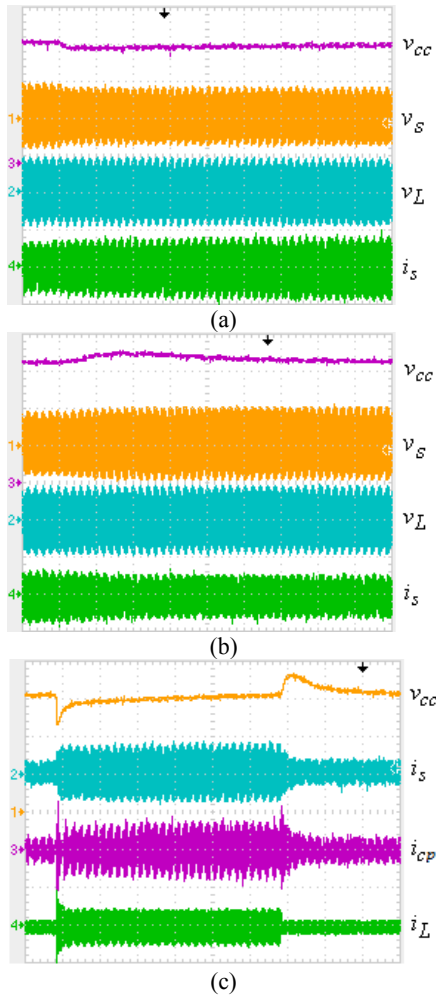


Fig. 10. (a) Afundamento de tensão (12%) – ( $v_{cc}$ ) (100V/div), tensão de entrada ( $v_s$ ) e saída ( $v_L$ ) (200V/div), corrente da rede ( $i_s$ ) (20A/div); (b) Elevação de tensão (12%) – ( $v_{cc}$ ) (100V/div), ( $v_s$ ) e ( $v_L$ ) (200V/div), ( $i_s$ ) (20A/div); (c) Transiente de carga (50%-100%-50%) – ( $v_{cc}$ ) (100V/div), ( $i_s$ ), ( $i_{cp}$ ) e  $i_L$  (20A/div).

## VII. CONCLUSÕES

Uma UPS *line-interactive* monofásica com compensação ativa série e paralela foi experimentalmente testada. O condicionamento ativo de potência foi realizado por meio da supressão de harmônicos e compensação de afundamentos e elevações de tensão da rede. Além disso, a supressão de harmônicos de corrente da carga e a compensação de potência reativa permitiu uma efetiva correção de fator de

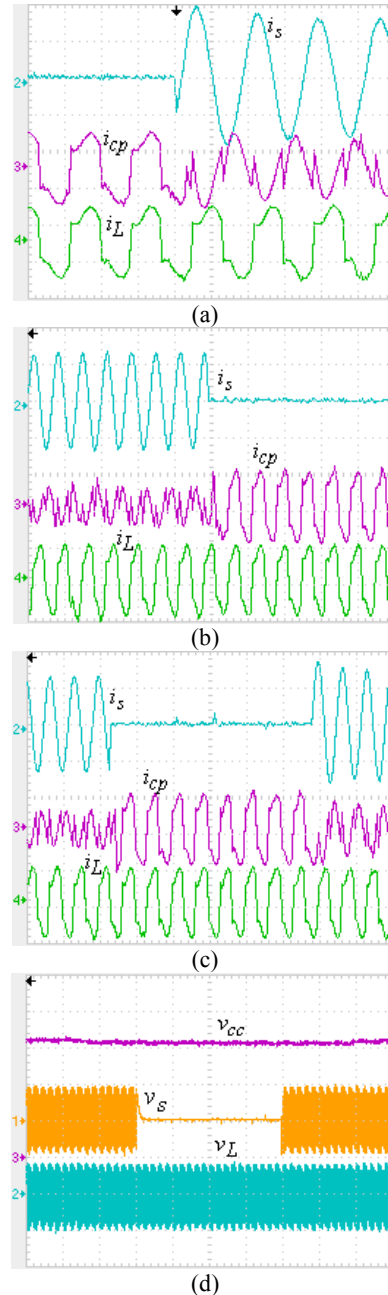


Fig. 11. Correntes e tensões da UPS: (a) corrente  $i_s$ , corrente  $i_{cp}$  e corrente  $i_L$  (20A/div), (10ms/div) - transição backup-standby; (b)  $i_s$ ;  $i_{cp}$  e  $i_L$  (20A/div) (20ms/div) - transição standby-backup; (c)  $i_s$ ;  $i_{cp}$  e  $i_L$  (20A/div) (20ms/div) - transição standby-backup-standby; (d) ( $v_{cc}$ ) (100V/div), ( $v_s$ ) e ( $v_L$ ) (200V/div) - transição standby-backup-standby (1s/div).

potência. Para a geração das referências da UPS, um algoritmo SRF e um sistema STF-pPLL foram empregados. Juntamente com o p-PLL foi utilizado um filtro auto-sintonizado (STF), a fim de tornar o desempenho do PLL mais robusto frente aos distúrbios de tensão da rede.

A pequena taxa de potência usada por ambos os conversores série e paralelo durante o modo *standby*, contribui para o aumento da eficiência da UPS. Isto representa uma vantagem quando comparado com a UPS *on-line*, a qual utiliza dois conversores PWM em cascata, ambos dimensionados para atender a potência total da carga. Desse



modo, a UPS apresentada pode ser uma solução atraente dependendo da potência da carga. Além disso, pelo fato do conversor paralelo operar continuamente, nenhum tempo de transferência é detectado pela carga.

Uma vez que as referências de tensão e corrente sintetizadas pelos conversores são senoidais, permite um controle mais preciso quando comparado com as referências não senoidais comumente usadas em algoritmos de compensação ativa.

Foi demonstrado por meio dos resultados experimentais o satisfatório desempenho do sistema UPS, o que valida o desenvolvimento teórico apresentado.

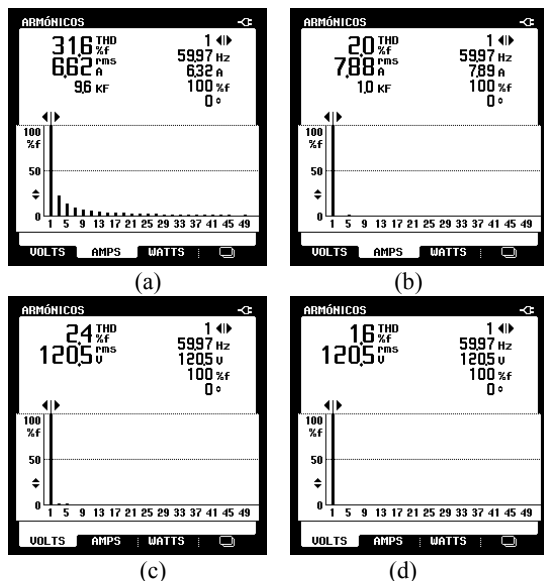


Fig. 12. TDH das correntes e tensões da UPS: (a)  $i_L$ ; (31,6%); (b)  $i_S$  (2%); (c)  $v_S$  (1,4%); (d)  $v_L$  (1,6%).

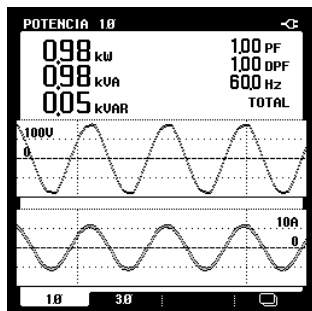


Fig. 13. Tensão e corrente na rede: Fator de potência (PF), fator de deslocamento (DPF) e potências em W, VAR e VA.

#### AGRADECIMENTOS

Este projeto foi financiado pelo CNPq (processo 471825/2009-3).

#### REFERÊNCIAS

[1] M. I. M. Monteiro, E. R. Cadaval, e F.B. González, "Comparison of control strategies for shunt active power filters in three-phase four-wire system," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22, no. 1, pp. 229-236, 2007.

[2] M. Abdusalam, P. Poure, S. Karimi, e S. Saadate, "New digital reference current generation for shunt active power filter under distorted voltage conditions," *Electrical Power System Research Journal*, vol. 79, pp. 759-765, 2009.

[3] M. Aredes, E. H. Watanabe, "New control algorithms for series and shunt three-phase four wire active power filters," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 10, no. 3, pp. 1649-1656, 1995.

[4] R. Griño, R. Cardoner, R. Costa, E. Fossas, "Digital repetitive control of a three-phase four-wire shunt active filter," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 3 pp. 1495-1503, 2007.

[5] J. W. Dixon, G. Venegas, L. A. Morán, "A series active filter based on sinusoidal current-controlled voltage-source inverter," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 44, no. 5, pp. 612-619, 1997.

[6] H. Fujita e H. Akagi, "The unified power quality conditioner: The integration of series and shunt active filters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 13 no. 2, pp. 315-322, 1998.

[7] M. Aredes, K. Heumann e E. H. Watanabe, "A universal active power line conditioner," *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 13, no. 2, pp. 545-551, 1998.

[8] J. Dias, T. D. C. Busarello, L. Michels, C. Reach, and M. Mezaroba, "Controle Digital Simplificado para um Condicionador Unificado de Qualidade de Energia", *Revista Eletrônica de Potência*, vol. 16, no. 3, pp. 212-221, 2011.

[9] M. Aredes e R. M. Fernandes, "A dual topology of unified power quality conditioner: the iUPQC," in *Proc. of 13th International European Power Electronics Conference*, 2009.

[10] S. A. O. Silva, R. Barriviera, R. A. Modesto, M. Kaster, e A. Goedel, "Single-phase power quality conditioners with series-parallel filtering capabilities," in *proc. of IEEE 20th International Symposium on Industrial Electronics*, 2011, pp. 1124-1130.

[11] F. Kamran e T. Habetler, "A novel on-line UPS with universal filtering capabilities," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 13, no. 2, pp. 366-371, 1998.

[12] S. A. O. Silva, P. F. Donoso-Garcia, P. C. Cortizo, and P. F. Seixas, "A three-phase line-interactive UPS system implementation with series-parallel active power-line conditioning capabilities," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 38, no. 6, pp. 1581-1590, Nov/Dec. 2002.

[13] A. Nasiri, A. E. Amac e A. Emadi, "Series-parallel active filter/Uninterruptible power supply system," *Electric Power Components and Systems*, vol. 32, no 11, pp. 1151-1163, 2004.

[14] S. J. Jeon, e G. H. Cho, "A series-parallel compensated uninterruptible power supply with sinusoidal input current and sinusoidal output voltage," in *proc. of IEEE 28th Power Electronics Specialist Conference*, 1997, pp. 297-303.

[15] B. H. Kwon, J. H. Choi e T. W. Kim, "Improved Single-Phase Line Interactive UPS," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 48, no. 4, pp. 804-811, 2001.

- [16] M. R. Reinert, J. D. Sperb, M. Mezaroba, C. Reach, e L. Michels, "UPS de Dupla Conversão não Isolada Usando Snubber Regenerativo", *Revista Eletrônica de Potência*, vol. 16, no. 2, pp. 158-167, 2011.
- [17] F. M. A. Linard, C. M. T. Cruz, D. S. Oliveira Júnior, R. P. T. Bascopé, and G. A. L. Henn, "Double Conversion Uninterrupted Energy System with Rectifier and the Inverter Integration", *Revista Eletrônica de Potência*, vol. 15, no. 2, pp. 59-66, 2010.
- [18] S. A. O. Silva, R. Novochadlo, e R. A. Modesto, "Single-Phase PLL structure using modified p-q theory for utility connected systems," in *proc. of IEEE 39th Annual Power Electronics Specialist Conference*, 2008, pp. 4706-4711.
- [19] R. M. Santos Filho, P. F. Seixas, P. C. Cortizo, L. A. B. Torres, e A. F. Souza, "Comparison of three single-phase PLL algorithms for UPS applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 8, pp. 2923-2932, 2008.
- [20] P-H. Cheng, C-L. Chen, "A High-Efficiency Fast Charger for Lead-Acid Batteries," in *proc. of IEEE 28th Annual Industrial Electronics Conference*, 2002, pp. 1410-1415.
- [21] R. Barriviera, *Sistema UPS Line-Interactive Monofásico com Compensação Ativa de Potência Série e Paralela*, Dissertação de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2012.

#### DADOS BIOGRÁFICOS

**Rodrigo Barriviera**, nascido em Londrina (PR), é engenheiro eletricitista (2008) pela Universidade Norte do Paraná (UNOPAR) e mestre em engenharia elétrica (2012) pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Campus* Cornélio Procópio (UTFPR-CP). É professor do Instituto Federal do Paraná, *Campus* Ivaiporã (IFPR) desde 2010. Suas áreas de interesse são: sistemas de energia ininterrupta (UPS), processamento digital de sinais e suas aplicações e automação industrial. É membro da SOBRAEP.

**Sérgio Augusto Oliveira da Silva**, nascido em Joaquim Távora (PR), é engenheiro eletricitista (1987) e mestre em engenharia elétrica (1989) pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC); e doutor em engenharia elétrica (2001) pela Universidade Federal de Minas Gerais. É professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Campus* Cornélio Procópio (UTFPR-CP) desde 1993. Suas áreas de interesse são: filtros ativos de potência, sistemas de energia ininterrupta (UPS), sistemas de controle empregando DSP's, qualidade da energia elétrica e ensino de Engenharia Elétrica. É membro da SOBRAEP.

**Maurício dos Santos Kaster**, nascido em Maringá (PR), é engenheiro eletricitista pela UFPR (1992), mestre em engenharia elétrica e informática industrial pelo CEFET-PR (1996); e doutor em automação e sistemas (2006) pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). É professor do Departamento de Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Campus* Ponta Grossa (UTFPR-PG) desde 1995. Suas áreas de interesse são: sistemas de controle não linear, controle por modos deslizantes, conversores estáticos de potência, controle digital microprocessado, acionamento e controle por dispositivos de lógica reconfigurável.

**Rodrigo Augusto Modesto**, nascido em Londrina (PR), é tecnólogo em eletrotécnica (2004) pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Campus* Cornélio Procópio (UTFPR-CP), e mestre em engenharia elétrica (2007) pela Universidade Estadual de Londrina (UEL); engenheiro eletricitista (2009) pela Universidade Norte do Paraná (UNOPAR); atualmente é doutorando em engenharia elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos (USP). É professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Campus* Cornélio Procópio (UTFPR-CP) desde 2009. Suas áreas de interesse são: sistemas de energia ininterrupta (UPS), filtros ativos de potência, processamento digital de sinais e suas aplicações e qualidade da energia elétrica. É membro da SOBRAEP.