

# ESTRATÉGIA DE MODULAÇÃO PARA UM INVERSOR DE TENSÃO DE QUATRO BRAÇOS UTILIZADO EM UM RESTAURADOR DINÂMICO DE TENSÃO

Darlan A. Fernandes, S. R. Naidu

Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamento de Máquinas - LEIAM

Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica, UFCG

CEP:58109-970, Campina Grande – PB, Brasil

Fone: +55(83)3310-1526; Fax: +55(83)3310-1418

e-mails: darlan@ee.ufcg.edu.br, naidu@dee.ufcg.edu.br

**Resumo** - Uma estratégia de modulação por largura de pulso (PWM) aplicada a um inversor de tensão de quatro braços é proposta neste trabalho. A técnica é utilizada para a geração de tensões trifásicas desequilibradas, incluindo a componente de sequência zero. Ela pode ser facilmente implementada em um processador digital de sinais (DSP) e com custo computacional reduzido em relação a uma estratégia de modulação tridimensional utilizada para este tipo de inversor. A técnica proposta é aplicada com um controle em malha aberta de um restaurador dinâmico de tensão (DVR) laboratorial. Os resultados de simulação e experimental são apresentados para validar a técnica proposta.

**Palavras-Chave** – Componente de sequência zero, inversor de quatro braços, restaurador dinâmico de tensão.

## A PWM SCHEME FOR THE 4-LEG VOLTAGE SOURCE CONVERTER AND ITS USE IN DYNAMIC VOLTAGE RESTORATION

**Abstract** – A PWM scheme for the 4-leg voltage source converter (VSC) has been described. The technique is useful for the generation of unbalanced, 3-phase voltages, including a zero sequence component. It is simple and can be easily implemented in a digital signal processor (DSP). The proposed technique has been applied to the open-loop control of a laboratory-scale dynamic voltage restorer (DVR). Experimental and simulation results are presented to validate the proposed technique.

**Keywords** – Zero-sequence component, four-leg converter, dynamic voltage restorer.

### NOMENCLATURA

$e, v$	tensões de fase instantâneas.
CC	corrente contínua.
$V_{cc}$	tensão do barramento CC.
$\mathbf{v}$	vetor instantâneo das tensões trifásicas.
V1-V7	vetores no plano múltiplos de 60°.

Artigo submetido em 23/12/2007. Revisão em 17/03/2008. Aceito por recomendação do editor F. L. M. Antunes.

S1-S7	funções de comutação.
$t$	tempo
$\tau$	largura de pulso.
$t_s$	período de comutação.
$\theta$	velocidade angular.
$\phi$	ângulo de fase.
$\omega$	frequência angular.
$X, Y$	vetores de parâmetros.
<u>subscritos</u>	
1, 2, 3	fases.
an, bn, cn	fases das cargas conectadas ao inversor.
p	seqüência positiva.
n	seqüência negativa.
0	seqüência zero.
$\alpha$	componente de eixo- $\alpha$ .
$\beta$	componente de eixo- $\beta$ .
i	inversor.
d	correção por meio do DVR.
h	homopolar.
<u>sobrescritos</u>	
'	transposto.
*	referência.

## I. INTRODUÇÃO

As indústrias automatizadas são conhecidas pelos seus sistemas de distribuição de energia serem vulneráveis a variações nos valores nominais de tensão. Um afundamento nas tensões de um sistema trifásico por uma fração de segundo pode resultar em perdas de produção e um custo financeiro significativo. Por um lado, afundamentos de tensão são inevitáveis porque um tempo finito é requerido para se extinguir uma falta no sistema. Por outro lado, cargas industriais estão se tornando mais sensíveis a flutuações de tensão. O desenvolvimento de dispositivos de potência do tipo CP (*Custom Power*) tem sido apresentado como um dos meios para proteger cargas sensíveis dos problemas de qualidade de energia como os afundamentos de tensão [1]. O restaurador dinâmico de tensão (DVR) com fonte de energia tem se tornado uma alternativa bem aceita [2]-[6].

O DVR é um dispositivo conectado em série com o sistema de distribuição (Figura 1.a). O principal componente de um DVR é o conversor fonte de tensão, no caso, o inversor de tensão, o qual gera tensões trifásicas e fornece a tensão necessária a uma carga sensível durante a ocorrência de afundamentos de tensão. Um inversor de 4 braços utilizado no DVR proposto é mostrado na Fig. 1.b. As tensões geradas pelo DVR devem ser injetadas de forma sincronizada com as tensões do sistema de distribuição. Um importante fato a ser notado acerca dos afundamentos de

tensão é que os mesmos podem ser desequilibrados. Portanto, o DVR deve contemplar a possibilidade de gerar e injetar tensões trifásicas desequilibradas. Estas tensões podem ser geradas por inversores de 3 braços [7], inversores *H-bridge* [8] ou por inversores de 4 braços [9].

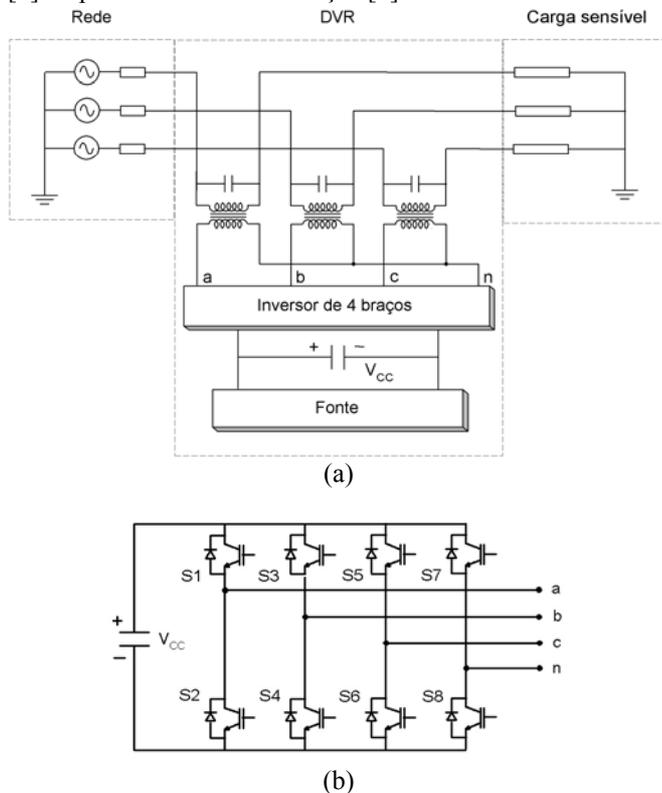


Fig. 1. Restaurador dinâmico de tensão. (a) DVR conectado à rede de distribuição. (b) Inversor de 4 braços.

Os inversores de 3 braços necessitam fazer uma ligação entre o neutro da carga e o ponto comum entre os capacitores do barramento CC. Embora o controle deste inversor seja simples, uma importância especial deve ser dada ao equilíbrio das tensões do barramento CC. A estratégia de modulação PWM vetorial tridimensional para um inversor de quatro braços proposta em [9] faz uso de projeções do vetor de referência no plano  $\alpha\beta$  localizado em um determinado prisma. Após algumas etapas, o ciclo de trabalho é determinado baseado numa tabela de 24 matrizes pré-calculada. Um esquema de modulação PWM vetorial tridimensional com um inversor de quatro braços semelhante à [9] foi proposto em [10]. Claramente, a implementação do PWM vetorial tridimensional em um DSP é de maior complexidade. A técnica apresentada em [11] baseia-se numa portadora triangular, tornando inviável a implementação computacional ou necessário utilizar um *hardware* exclusivo para esta implementação. A estratégia descrita em [12] é um PWM vetorial, porém mais complexo que a técnica proposta neste artigo.

Na estratégia de PWM proposta para o inversor de 4 braços, as tensões trifásicas instantâneas a serem geradas são decompostas em componentes de sequência positiva, negativa e zero. Os primeiros três braços são utilizados para gerar as componentes de sequência positiva e negativa. O

quarto braço é utilizado exclusivamente para gerar a componente de sequência zero e esta modulação não é significativamente mais complexa do que a utilizada em um inversor de três braços. Esta estratégia ainda permite um melhor aproveitamento da tensão do barramento CC. Finalmente, resultados típicos de simulação e experimental para o controle do DVR em malha aberta utilizando um inversor de 4 braços são apresentados.

## II. MÉTODO PROPOSTO

Para a geração de três tensões de fase  $e_1, e_2, e_3$  por meio de um inversor de quatro braços é necessário inicialmente uma representação em componentes  $0\alpha\beta$  como mostrado nas equações (1), (2) e (3) [13]:

$$v_0 = \frac{1}{3}(e_1 + e_2 + e_3), \quad (1)$$

$$v_\alpha = \sqrt{\frac{2}{3}} \left[ e_1 - \frac{(e_2 + e_3)}{2} \right], \quad (2)$$

$$v_\beta = \sqrt{\frac{1}{2}} (e_2 - e_3). \quad (3)$$

A técnica proposta faz uso dos três primeiros braços do inversor para gerar  $v_\alpha$  e  $v_\beta$ . O último braço é utilizado exclusivamente para gerar  $v_0$ .

### A. Determinação das Tensões Utilizando Três Braços do Inversor

O vetor  $\mathbf{v} = v_\alpha + jv_\beta$  é mostrado no plano- $\alpha\beta$  da Figura 2.

A Tabela I fornece as seqüências de comutação que geram os vetores no plano, localizados nos vários setores da Fig. 2. A Figura 3 mostra funções de comutação típicas para a geração dos vetores no plano do primeiro setor que correspondem aos interruptores superiores do inversor, S1, S3 e S5. Nesta figura,  $t_s$  é o período de comutação e  $t_a, t_b$  são intervalos de comutação correspondendo aos estados ativos.

TABELA I

Seqüência de comutação para geração dos vetores no plano

Setor	Seqüência de comutação						
1	V7	V1	V2	V0	V2	V1	V7
2	V7	V3	V2	V0	V2	V3	V7
3	V7	V3	V4	V0	V4	V3	V7
4	V7	V5	V4	V0	V4	V5	V7
5	V7	V5	V6	V0	V6	V5	V7
6	V7	V1	V6	V0	V6	V1	V7

A determinação dos vetores utilizando os três braços do inversor é bem conhecida [14]. Neste estudo, o esquema de comutação descrito em [15] tem sido considerado e consiste nos seguintes passos para cada período de comutação:

(i) Determinar as tensões de referência para a carga alimentada pelo inversor, dado  $v_{i\alpha}$  e  $v_{i\beta}$

$$v_{an}^* = \sqrt{\frac{2}{3}} v_{i\alpha}, \quad (4)$$

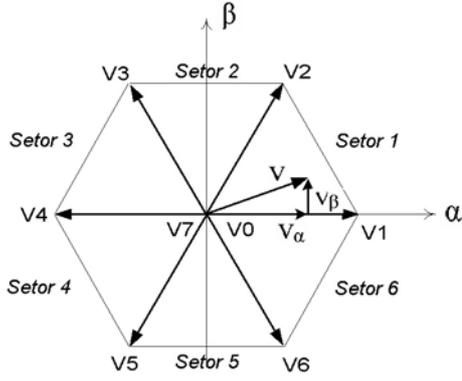


Fig. 2. Plano  $\alpha$ - $\beta$ .

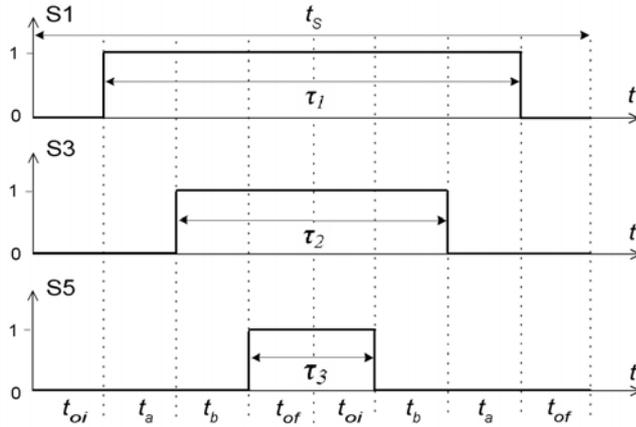


Fig. 3. Funções de comutação para um vetor de referência localizado no primeiro setor.

$$v_{bn}^* = \frac{1}{\sqrt{6}} (-v_{i\alpha} + \sqrt{3} v_{i\beta}), \quad (5)$$

$$v_{cn}^* = -\frac{1}{\sqrt{6}} (v_{i\alpha} + \sqrt{3} v_{i\beta}). \quad (6)$$

(ii) Considerando que  $v_M = \max(v_{an}^*, v_{bn}^*, v_{cn}^*)$  e  $v_m = \min(v_{an}^*, v_{bn}^*, v_{cn}^*)$  calcular

$$v_h = -(v_M + v_m)/2. \quad (7)$$

(iii) Calcular

$$\tau_1 = \left[ \frac{1}{2} + (v_{an}^* + v_h)/V_{cc} \right] t_s, \quad (8)$$

$$\tau_2 = \left[ \frac{1}{2} + (v_{bn}^* + v_h)/V_{cc} \right] t_s, \quad (9)$$

$$\tau_3 = \left[ \frac{1}{2} + (v_{cn}^* + v_h)/V_{cc} \right] t_s. \quad (10)$$

(iv) Classificar  $(\tau_1, \tau_2, \tau_3)$  em  $(\tau_{min}, \tau_i, \tau_{max})$ . Então

$$t_a = (\tau_{max} - \tau_i)/2, \quad (11)$$

$$t_b = (\tau_i - \tau_{min})/2. \quad (12)$$

### B. Geração da Tensão de Sequência Zero

Considere a inclusão do quarto braço e ainda que os interruptores nos três braços sejam operados para gerar o vetor definido pelas tensões da rede. Como um exemplo, estando S1 fechado e S3, S5 permanecendo abertos e com o quarto braço ainda fora de operação (isto é, S7, S8 abertos), as tensões de fase são  $\frac{2}{3}V_{cc}$ ,  $-\frac{1}{3}V_{cc}$  e  $-\frac{1}{3}V_{cc}$ . Realizando o fechamento de S8 sem mudar as posições dos outros interruptores, as tensões de fase são agora:

$$v_{an} = V_{cc} = \frac{2}{3}V_{cc} + \frac{1}{3}V_{cc}, \quad (13)$$

$$v_{bn} = 0 = -\frac{1}{3}V_{cc} + \frac{1}{3}V_{cc}, \quad (14)$$

$$v_{cn} = 0 = -\frac{1}{3}V_{cc} + \frac{1}{3}V_{cc}. \quad (15)$$

Estas tensões são as mesmas em relação àquelas geradas pelos 3 braços mas com a inclusão da tensão de sequência zero em cada uma das tensões de fase. A Tabela II mostra a tensão de sequência zero gerada pelo quarto braço com os interruptores nos primeiros três braços ajustados para gerar os vetores de estado.

TABELA II

Tensão de sequência zero gerada em cada estado

Estado	Tensão de sequência zero	
	S7	S8
V0	0	$V_{cc}$
V1	$-2/3 V_{cc}$	$1/3 V_{cc}$
V2	$-1/3 V_{cc}$	$2/3 V_{cc}$
V3	$-2/3 V_{cc}$	$1/3 V_{cc}$
V4	$-1/3 V_{cc}$	$2/3 V_{cc}$
V5	$-2/3 V_{cc}$	$1/3 V_{cc}$
V6	$-1/3 V_{cc}$	$2/3 V_{cc}$
V7	$-V_{cc}$	0

Considerando a sequência de comutação mostrada na Tabela I para gerar o vetor em qualquer um dos setores, as tensões de fase para o conversor de 4 braços são a soma das correspondentes tensões do conversor de 3 braços e a tensão de sequência zero cuja variação durante período de comutação é mostrada na Figura 4. As duas formas de onda mostradas resultam da condução de S7 ou S8. Os degraus que cada uma apresenta têm uma distância constante, ou seja, as linhas horizontais são equidistantes verticalmente de  $1/3 V_{cc}$ .

Com o interruptor S8 fechado, a máxima tensão de sequência zero que pode ser gerada durante qualquer sequência de comutação mostrado na Tabela I é:

$$v_{0,max} = \frac{1}{3}V_{cc} \left[ \frac{(2t_a + 2t_b + 2t_0) + (2t_b + 2t_0) + 2t_0}{t_s} \right],$$

$$= V_{cc} \left[ \frac{1}{2} - \frac{(t_a + t_b)}{3t_s} \right]. \quad (16)$$

Similarmente, a tensão de sequência zero mínima que pode ser gerada com o interruptor S7 fechado é:

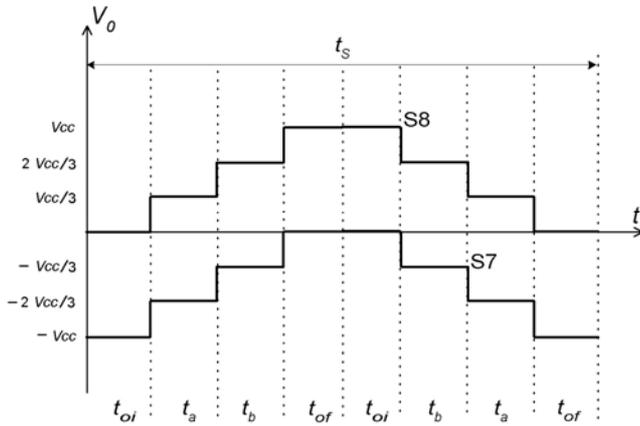


Fig. 4. Variação da tensão de seqüência zero durante qualquer período de comutação.

$$v_{0,\min} = -V_{cc} \left[ \frac{1}{2} + \frac{(t_a - t_b)}{3t_s} \right]. \quad (17)$$

Supõe-se que S8 é fechado durante o período de comutação, exceto durante o intervalo  $2t_c$  quando o interruptor S7 é fechado, então a tensão de seqüência zero gerada durante o período de comutação é:

$$v_0 = V_{cc} \left[ \frac{1}{2} - \frac{(t_a - t_b)}{3t_s} \right] - \frac{2t_c}{t_s} V_{cc}. \quad (18)$$

Portanto, o intervalo de comutação requisitado para S7 na geração de uma dada tensão de seqüência zero  $v_0$  é:

$$2t_c = t_s \left( \frac{1}{2} - \frac{v_0}{V_{cc}} \right) - \frac{t_a - t_b}{3}. \quad (19)$$

Resumindo, o sinal de PWM para um inversor de tensão de 4 braços é obtido como mostrado nos passos de (i) a (iv):

(i) Converter as tensões de fase instantâneas em componentes  $0\alpha\beta$  utilizando as equações (1)-(3).

(ii) Gerar o vetor  $\mathbf{v} = v_\alpha + jv_\beta$  utilizando os três primeiros braços do inversor (equações 8-10).

(iii) Calcular os intervalos  $t_a$ ,  $t_b$  (equações 11 e 12), a partir do esquema de comutação para os três braços.

(iv) Calcular o intervalo de tempo  $2t_c$  para o quarto braço, como dado pela equação (19). A Figura 5 mostra a função de comutação para S7.

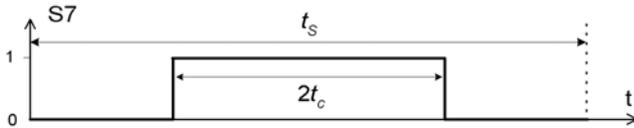


Fig. 5. Função de comutação para S7.

### C. Simulação da Estratégia de Modulação

A Figura 6 mostra um inversor de 4 braços que supre uma carga trifásica por meio de um filtro passa-baixas. Este

circuito é similar ao estudado em [11] e foi simulado utilizando um programa de análise transitória desenvolvido em Matlab<sup>®</sup>. A estratégia de PWM proposta é também analisada com esta mesma configuração.

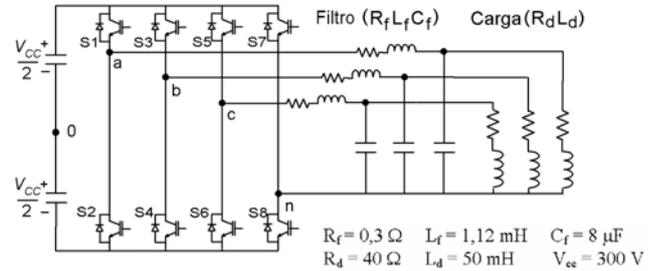


Fig. 6. Carga trifásica alimentada pelo inversor de 4 braços. (Fig. modificada)

As tensões de referência na carga a serem geradas são descritas nas equações (20)-(21),

$$V_{an} = 100\sqrt{3} \cos(120\pi t) + 106,7, \quad (20)$$

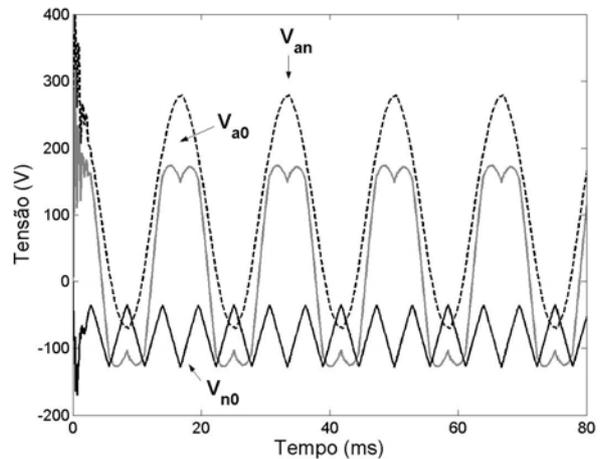
$$V_{bn} = 100\sqrt{3} \cos(120\pi t - 2\pi/3) + 106,7, \quad (21)$$

$$V_{cn} = 100\sqrt{3} \cos(120\pi t + 2\pi/3) + 106,7. \quad (22)$$

O valor de *offset* das tensões de referência é de 106,7 V. A inclusão da resistência do filtro promove uma queda de tensão na carga. Como o valor da resistência do filtro é de 0,3  $\Omega$ , o *offset* de tensão esperado para a carga é de  $\frac{40}{40,3} 106,7 = 105,9$  V. O valor do *offset* extraído da simulação

é de 104,8 V a partir do valor médio entre os picos da tensão de fase. As tensões de pico da referência são  $(100\sqrt{3} + 106,7) \approx 279$  V e o valor extraído da simulação é de 276 V. As tensões  $V_{a0}$  e  $V_{n0}$  correspondem às tensões de pólo e homopolar, respectivamente.

A Figura 7.b mostra as correntes calculadas em cada uma das fases, que são determinadas a partir das respectivas tensões nas fases. Dado que a tensão de *offset* de referência sobre a resistência da carga é de 105,9 V, a corrente a ser obtida é de  $\frac{105,9}{40} = 2,64$  A. O valor de 2,60 A para esta corrente de *offset* é extraído da simulação.



(a)

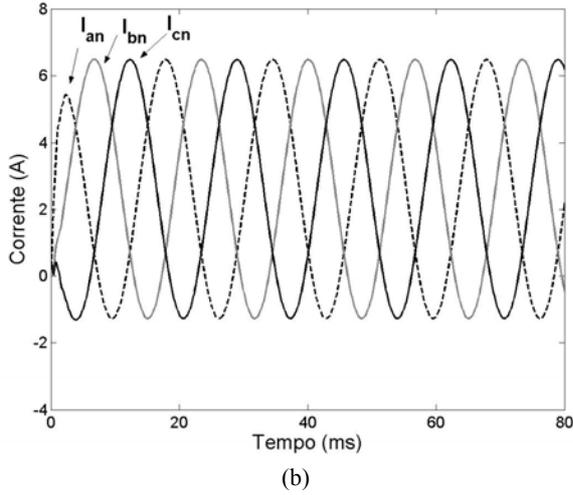


Fig. 7. Resultados de simulação com tensões de referência adicionado deslocamento constante. (a) Tensões de referência. (b) Correntes de carga trifásicas.

De forma semelhante, as equações (24)-(26) representam tensões de referência a serem geradas na carga.

$$V_{an} = 100\sqrt{3} \cos(120\pi t) + 106,7 \cos(120\pi t), \quad (24)$$

$$V_{bn} = 100\sqrt{3} \cos(120\pi t - 2\pi/3) + 106,7 \cos(120\pi t), \quad (25)$$

$$V_{cn} = 100\sqrt{3} \cos(120\pi t + 2\pi/3) + 106,7 \cos(120\pi t). \quad (26)$$

A segunda parcela de cada uma destas equações é uma função senoidal, e a tensão de referência \$V\_{an}\$ é uma soma entre duas senóides em fase. Sendo assim, a tensão de pico de referência é \$(100\sqrt{3} + 106,7) \approx 279\$ V. A Figura 8.a mostra tensões resultantes após o processo de modulação. O valor da tensão de pico de \$V\_{an}\$ extraído a partir da simulação é de 277,9 V. As correntes da Fig. 8.b são calculadas a partir das tensões previamente determinadas.

As formas de onda obtidas na simulação mostradas nas Figuras 7 e 8 são idênticas aquelas mostradas em [11]. Deve ser notado que o circuito da Figura 6 inclui filtros passa-baixas e que a simulação gerou um transitório a partir de condições iniciais nulas.

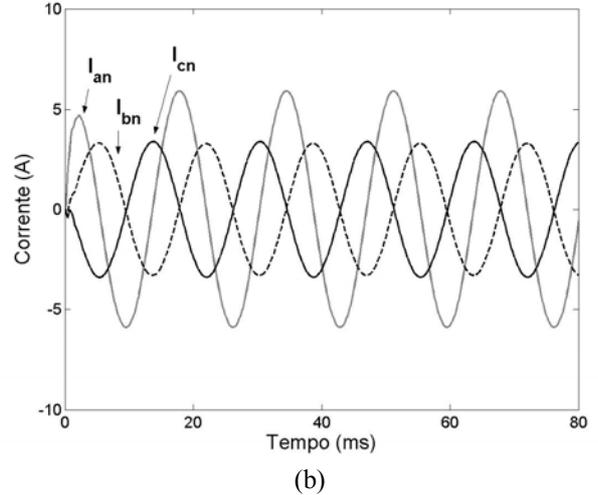
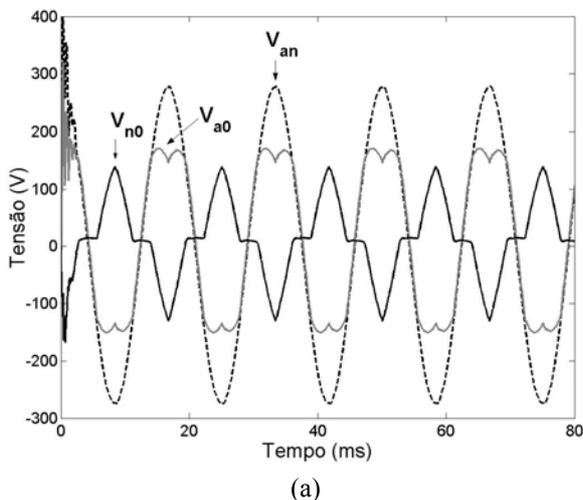


Fig. 8. Resultados de simulação com tensões de referências adicionado deslocamento senoidal. (a) Tensões de referência. (b) Correntes de carga trifásicas.

### III. CONTROLE EM MALHA ABERTA E IMPLEMENTAÇÃO DE UM DVR LABORATORIAL

O primeiro passo para a restauração de tensão é a medição das tensões trifásicas instantâneas do lado das fontes e suas resoluções em componentes de sequência positiva, negativa e zero (a técnica de resolução está descrita no Apêndice). A estratégia de controle de malha aberta consiste em injetar as componentes de sequência negativa e zero que irão cancelar as componentes correspondentes nas tensões do sistema. A tensão de sequência positiva a ser injetada pelo DVR é a diferença entre a tensão de sequência positiva de referência e a tensão de sequência positiva do sistema. Portanto, as componentes \$(0\alpha\beta)\$ a serem injetadas pelo DVR são:

$$v_{d0} = -v_0. \quad (27)$$

$$v_{d\alpha} = (v^* - v_p) \cos(\theta + \phi_p) - v_n \cos(\theta + \phi_n) \\ = v^* \cos(\theta + \phi_p) - v_\alpha. \quad (28)$$

$$v_{d\beta} = (v^* - v_p) \sin(\theta + \phi_p) + v_n \sin(\theta + \phi_n) \\ = v^* \sin(\theta + \phi_p) - v_\beta, \quad (29)$$

sendo \$(\theta + \phi\_p)\$ o ângulo de fase do fasor de sequência positiva (o cálculo de \$\cos(\theta + \phi\_p)\$ e \$\sin(\theta + \phi\_p)\$ é mostrado no Apêndice). As componentes \$0\alpha\beta\$ a serem injetadas pelo DVR são produzidas pelo inversor de 4 braços.

A técnica proposta para a produção de tensões trifásicas desequilibradas com uma componente de sequência zero foi implementada no controle de malha aberta de um DVR. A rede foi representada por uma fonte de tensão trifásica programável (California Instruments model 3000Lx). As tensões da rede foram programadas para afundar em duas fases de 150 V para 50 V e 80 V. O inversor de tensão é um conversor de 4 braços e para a carga são utilizados resistências. As tensões de fase da fonte foram sensoreadas, condicionadas e conectadas às entradas do ADC de um DSP TMS320F2812 da Texas Instruments. Os algoritmos para

determinar as tensões do DVR foram implementados no DSP. As saídas da placa são os sinais de gatilho para o inversor de tensão.

Resultados típicos são mostrados nas Figuras 9 e 10. As curvas da Figura 9 são resultantes da simulação numérica utilizando o Matlab e a Figura 10 mostra os correspondentes resultados experimentais. Em ambas as figuras, o primeiro gráfico mostra a fonte de tensão com afundamentos em duas fases. O segundo gráfico mostra as tensões do DVR a serem injetadas e o terceiro, mostra as tensões de carga corrigidas. Este afundamento é considerado intenso pelo nível de desequilíbrio entra as três fases com diminuição de 67% e 47% em duas fases. Pode ser observado que existe concordância entre os resultados de simulação e experimental.

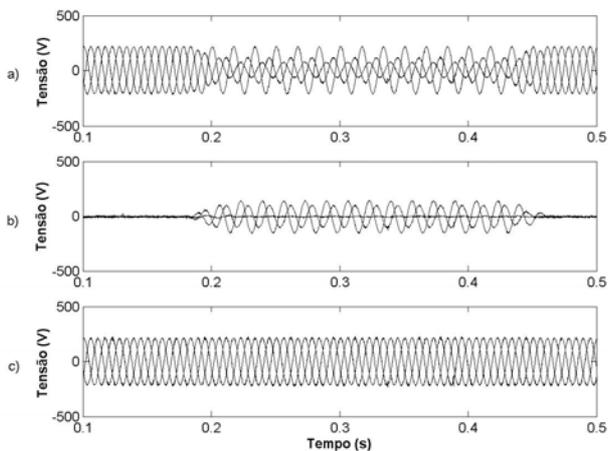


Fig. 9. Desempenho de simulação do DVR. (a) tensões da fonte; (b) tensões injetadas pelo DVR; (c) tensões de carga corrigidas.

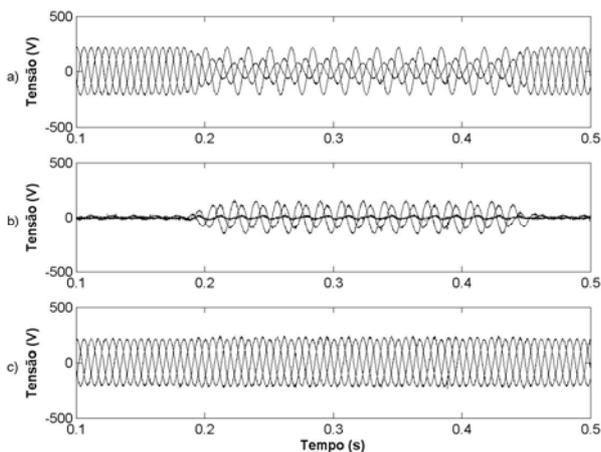


Fig. 10. Desempenho experimental do DVR. (a) tensões da fonte; (b) tensões injetadas pelo DVR; (c) tensões de carga corrigidas.

Deve ser notado que o desempenho do DVR dependerá da corrente de carga devido ao controle ser essencialmente em malha aberta. Um controle em malha fechada pode ser projetado para tratar a corrente de carga como uma perturbação e rejeitar sua influência.

O desempenho do DVR foi avaliado ainda para diferentes tipos de afundamentos de tensão. A fonte de tensão trifásica pode ser programada para gerar tensões com afundamentos em uma, duas ou três fases ao mesmo tempo. Sendo assim, é

possível representar as conseqüências de faltas trifásica, monofásica e fase-fase sobre as cargas que estão sendo protegidas. As Figuras 11, 12 e 13 mostram respectivamente o desempenho experimental do DVR durante a ocorrência destas perturbações.

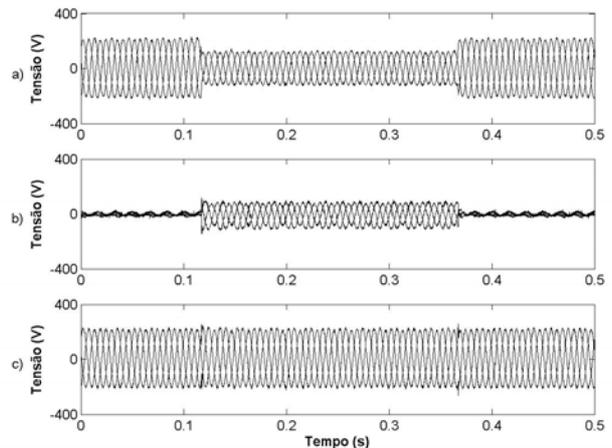


Fig. 11. Desempenho experimental do DVR durante uma falta trifásica. (a) tensões da fonte; (b) tensões injetadas pelo DVR; (c) tensões de carga corrigidas.

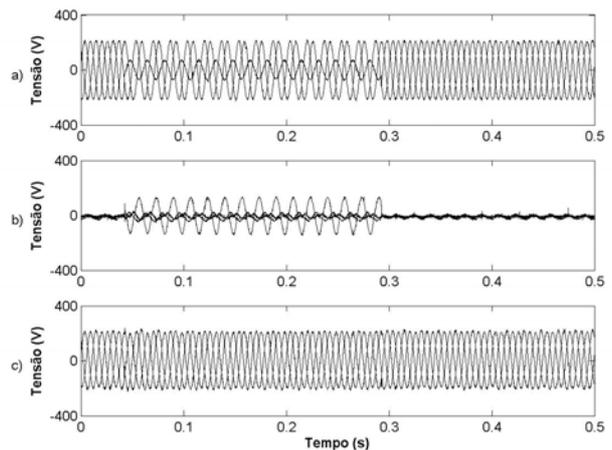


Fig. 12. Desempenho experimental do DVR durante uma falta monofásica. (a) tensões da fonte; (b) tensões injetadas pelo DVR; (c) tensões de carga corrigidas.

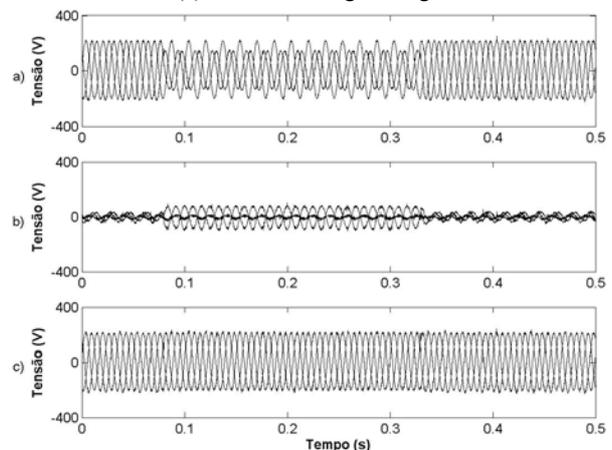


Fig. 13. Desempenho experimental do DVR durante uma falta fase-fase. (a) tensões da fonte; (b) tensões injetadas pelo DVR; (c) tensões de carga corrigidas.

#### IV. CONCLUSÕES

A correção de afundamentos de tensão em uma rede trifásica por meio de um DVR foi apresentada. O inversor de tensão utilizado no dispositivo é de 4 braços sendo que os três primeiros são utilizados para gerar a soma das componentes positiva e negativa enquanto que o quarto é utilizado para gerar exclusivamente a componente de sequência zero. Nos três primeiros, foi utilizada uma estratégia de modulação bem conhecida na literatura enquanto que no último, uma estratégia foi desenvolvida para aquela fim. Com isso, tornou-se possível contemplar a geração de tensões trifásicas desequilibradas sem o uso de uma modulação tridimensional, mais complexa para implementação em um DSP.

Os resultados de simulação tanto da modulação como de todo o sistema em funcionamento mostram que as técnicas empregadas condizem com o objetivo final que são as correções dos afundamentos de tensão. Os resultados experimentais extraídos do protótipo validam o funcionamento do sistema uma vez que as tensões da rede são corrigidas para seus valores nominais sem *spikes* de tensão ou mesmo com transitórios de curta duração nas transições entre as tensões de pré-afundamento para afundamento e de afundamento para pós-afundamento, como observado nos resultados.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro desta pesquisa.

#### APÊNDICE

As tensões de fase da rede são amostradas em uma determinada frequência e servem como dados de entrada para o estimador de componentes de sequência. As amostras de tensão  $e_1, e_2, e_3$  são convertidas para o sistema  $(0\alpha\beta)$  utilizando (1)-(3).

Quando valores sucessivos de  $v_\beta$  são desenhados como função de  $v_\alpha$ , obtém-se o vetor girante no sentido anti-horário. Para tensões da rede equilibradas, o vetor tem uma magnitude constante e gira com uma velocidade angular constante. Quando as tensões da rede são desequilibradas, o vetor girante é a soma da componente de sequência positiva  $\mathbf{v}_p$  girando com velocidade angular  $\omega$  no sentido anti-horário e uma componente de sequência negativa  $\mathbf{v}_n$  girando com a mesma velocidade angular  $\omega$  no sentido horário como mostrado na Fig. 14. Nesta figura, o vetor  $\mathbf{v}$  representa as tensões de fase da rede. Os ângulos de fase dos vetores  $\mathbf{v}_p$  e  $\mathbf{v}_n$  são  $(\theta + \phi_p)$  e  $(\theta + \phi_n)$ , sendo  $\theta = \omega t$  e  $\phi_p, \phi_n$  são as fases iniciais dos vetores  $\mathbf{v}_p$  e  $\mathbf{v}_n$ , respectivamente. O vetor  $\mathbf{v}^*$  é a tensão de referência para o controlador do DVR. Ele tem a amplitude correta para as tensões da rede e está em fase com  $\mathbf{v}_p$ . A partir da Fig. 14, tem-se:

$$v_\alpha = v_{p\alpha} + v_{n\alpha}, \quad (30)$$

$$v_\beta = v_{p\beta} - v_{n\beta}. \quad (31)$$

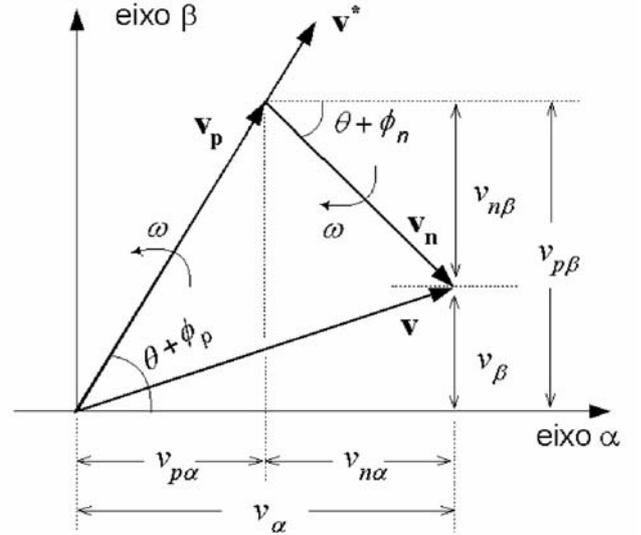


Fig. 14. Componentes de sequência no eixo  $(\alpha\beta)$

Estas equações são reescritas como:

$$v_\alpha = v_p \cos(\omega t + \phi_p) + v_n \cos(\omega t + \phi_n), \quad (32)$$

$$v_\beta = v_p \sin(\omega t + \phi_p) - v_n \sin(\omega t + \phi_n), \quad (33)$$

Expandindo a equação (32), tem-se:

$$v_\alpha = (v_p \cos \phi_p + v_n \cos \phi_n) \cos \omega t + (-v_p \sin \phi_p - v_n \sin \phi_n) \sin \omega t. \quad (34)$$

Contemplando a possibilidade de existir um *offset-CC* de tensão em  $v_\alpha$ , é possível escrever:

$$v_\alpha = X_0 + X_1 \cos \omega t + X_2 \sin \omega t, \quad (35)$$

sendo

$$X_1 = v_p \cos \phi_p + v_n \cos \phi_n, \quad (36)$$

$$X_2 = -v_p \sin \phi_p - v_n \sin \phi_n. \quad (37)$$

Utilizando um período de amostragem  $t_s$  e instantes  $t = 0, t_s, 2t_s, \dots, nt_s$ , um conjunto de equações é gerado a partir de (35) e pode ser escrito na forma matricial como:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha(0) \\ v_\alpha(t_s) \\ \vdots \\ v_\alpha(nt_s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \cos \omega t_s & \sin \omega t_s \\ 1 & \cos 2\omega t_s & \sin 2\omega t_s \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \cos n\omega t_s & \sin n\omega t_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0 \\ X_1 \\ X_2 \end{bmatrix},$$

isto é,

$$\mathbf{v}_\alpha = \mathbf{C} \mathbf{X}. \quad (38)$$

De forma similar, expandindo (33),

$$v_\beta = (v_p \sin \phi_p - v_n \sin \phi_n) \cos \omega t + (-v_p \cos \phi_p - v_n \cos \phi_n) \sin \omega t. \quad (39)$$

A equação (39) é escrita como:

$$v_\beta = Y_0 + Y_1 \cos \omega t + Y_2 \sin \omega t, \quad (40)$$

sendo  $Y_0$  o *offset-CC* das amostras de  $v_\beta$ , e:

$$Y_1 = v_p \sin \phi_p - v_n \sin \phi_n, \quad (41)$$

$$Y_2 = -v_p \cos \phi_p - v_n \cos \phi_n. \quad (42)$$

Escrevendo a equação (40) para cada período de amostragem, outro conjunto de equações é obtido:

$$v_{\beta} = C Y. \quad (43)$$

A estimação dos parâmetros  $X = [X_0 \ X_1 \ X_2]'$  e  $Y = [Y_0 \ Y_1 \ Y_2]'$  é obtida resolvendo (38) e (43) por meio de mínimos quadrados recursivo. É interessante observar que as matrizes de regressores nas equações (38) e (43) são idênticas. Como resultado, a solução destas equações utilizando o procedimento de mínimos quadrados recursivo ponderado [16] requer o cálculo do ganho comum e de matrizes covariância.

A partir de  $X = [X_0 \ X_1 \ X_2]'$  e  $Y = [Y_0 \ Y_1 \ Y_2]'$ , tem-se:

$$v_{p\alpha}(0) = v_p \cos \phi_p = (X_1 + X_2)/2, \quad (44)$$

$$v_{p\beta}(0) = v_p \sin \phi_p = (Y_1 - X_2)/2, \quad (45)$$

Fazendo  $v_p = \sqrt{v_{p\alpha}^2 + v_{p\beta}^2}$ ,

$$\cos(\theta + \phi_p) = \frac{v_{p\alpha}(0) \cos(\theta) - v_{p\beta}(0) \sin(\theta)}{v_p}, \quad (46)$$

$$\sin(\theta + \phi_p) = \frac{v_{p\alpha}(0) \sin(\theta) - v_{p\beta}(0) \cos(\theta)}{v_p}. \quad (47)$$

De maneira similar, o ângulo do vetor de seqüência negativa pode ser obtido.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] N. G. Hingorani, "Introducing custom power", *IEEE Spectrum*, vol. 32, no. 6, pp. 41-48, June 1995.
- [2] N. H. Woodley, L. Morgan, A. Sundaram "Experience with an inverter-based dynamic voltage restorer", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 3, pp. 1181-1186, July 1999.
- [3] M. Vilathgamuwa, A. A. D. R. Perera, S. S. Choi "Performance improvement of the dynamic voltage restorer with closed-loop load voltage and current-mode control", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 17, no. 5, pp. 824-834, September 2002.
- [4] M. Vilathgamuwa, A. A. D. R. Perera, S. S. Choi "Voltage sag compensation with energy optimized dynamic voltage restorer", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 17, no. 3, pp. 857-864, July 2002.
- [5] S. S. Choi, M. Vilathgamuwa, B. H. Li, "Design and analysis of the inverter-side filter used in the dynamic voltage restorer", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, no. 3, pp. 928-936, July 2003.
- [6] B. M. Lopes, S. M. Silva, B. J. C. Filho, J. A. Brito, G. Travassos, "Análise crítica de dispositivos estáticos de compensação série de baixa tensão com transformadores shunt: custos versus funcionalidade". *Revista Brasileira de Eletrônica de Potência (SOBRAEP)*, vol. 11, no. 1, p. 53-60, 2006.
- [7] C. Zhan, A. Arulampalam, N. Jenkins, "Four-wire dynamic voltage restorer based on a three-dimensional voltage space vector PWM algorithm", *IEEE*

*Transactions on Power Electronics*, vol. 18, no. 4, pp. 1093-1102, July 2003.

- [8] J. G. Nielsen, M. Newman, H. Nielsen, F. Blaabjerg, "Control and testing of a dynamic voltage restorer (DVR) at medium voltage level", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 3, pp. 806-813, May 2004.
- [9] R. Zhang, V. H. Prasad, D. Boroyevich "Three-dimensional space vector modulation for four-leg voltage-source converters", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 17, no. 3, pp. 314-326, May 2002.
- [10] W. F. Souza, M. A. Severo-Mendes, P. F. Seixas, "PWM vetorial para inversor trifásico de quatro-braços". *Revista Brasileira de Eletrônica de Potência (SOBRAEP)*, vol. 12, no. 2, p. 89-96, 2007.
- [11] J. H. Kim, S. K. Sul, "A carrier-based PWM method for three-phase four-leg voltage source converter", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 1, pp. 66-75, January 2004.
- [12] O. Ojo, P. Kshirsagar "Concise modulation strategies for four-leg voltage source inverters", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 1, pp. 46-53, January 2004.
- [13] D. A. Fernandes, S. R. Naidu, "A novel PWM scheme for the 4-leg voltage source converter and its use in dynamic voltage restoration", in *Proc. of IEEE PES General Meeting*, vol. 1, no. 1, pp. 1-5, June 2007.
- [14] V. Blasko, "A hybrid PWM strategy combining modified space vector and triangle comparison methods", in *Proc. of PESC*, vol. 2, no. 4, pp. 1872-1878, 1996.
- [15] C. B. Jacobina, A. M. N. Lima, E. R. C. da Silva, R. N. C. Alves, P. F. Seixas, "Digital scalar pulse-width modulation: A simple approach to introduce non-sinusoidal modulating waveforms", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 16, no. 3, pp. 351-359, May 2001.
- [16] J. P. Norton, *An Introduction to Identification*, Academic Press, London, 1986.

#### DADOS BIOGRÁFICOS

**Darlan A. Fernandes**, é professor do Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio Grande do Norte – Uned Mossoró. Recebeu o título de engenheiro eletricitista pela Universidade Federal da Paraíba, em 2002 e o título de Mestre pela Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, em 2004, onde atualmente trabalha sua tese de doutorado. Suas áreas de interesse são aplicações de circuitos eletrônicos de potência em sistemas de potência e qualidade de energia.

**S. R. Naidu**, é professor titular da Universidade Federal de Campina Grande. Recebeu o título de Ph.D em Engenharia Elétrica pela Universidade de Liverpool, U.K., em 1975.

Professor Naidu esteve como visitante na Universidade de British Columbia, Vancouver, e na Universidade de Wisconsin, Madison, de 1986 a 1988 e 2000 a 2001, respectivamente. Suas áreas de interesse incluem circuitos não-lineares, transitórios eletromagnéticos e aplicações de eletrônica de potência em sistemas de potência.