

# COMPENSAÇÃO DE TENSÃO TRIFÁSICA EM CARGAS SENSÍVEIS BASEADA EM UM SISTEMA DE CONTROLE REPETITIVO E MÍNIMOS QUADRADOS

João R. S. Martins<sup>1,3</sup>, Darlan A. Fernandes<sup>1</sup>, Fabiano F. Costa<sup>2</sup>, Maurício B. R. Corrêa<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba – UFPB, João Pessoa – PB, Brasil

<sup>2</sup>Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Bahia – UFBA, Salvador – BA, Brasil

<sup>3</sup>Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande – PB, Brasil  
e-mail: joao.martins@ee.ufcg.edu.br, darlan@cear.ufpb.br, fabiano.costa@ufba.br, mbrcorrea@dee.ufcg.edu.br

**Resumo** – Este trabalho propõe a utilização de um controle repetitivo para restaurar de forma dinâmica a tensão em cargas sensíveis conectadas à rede elétrica. O controle intrinsecamente é capaz de mitigar a distorção harmônica e é estruturado apenas por uma função de transferência. Desta forma, não há necessidade da aplicação de filtros harmônicos seletivos. Além disso, o sistema de controle é capaz de trabalhar em referências senoidais e, assim, evita a necessidade de utilizar a transformação de Park. O algoritmo de mínimos quadrados recursivo também é incluído ao sistema de controle, a fim de assegurar a sincronização das tensões a serem restauradas. O projeto dos parâmetros de controle, juntamente com a estabilidade do sistema são discutidos. Os resultados experimentais são obtidos com uma montagem de um compensador série trifásico. Os cenários das tensões com distúrbios são os mesmos para os resultados experimentais e simulados. Os resultados corroboram o uso do método proposto e encorajam novas investigações.

**Palavras-chave** – Afundamento de Tensão, Compensador Série, Controle Repetitivo, Estabilidade de Nyquist, Harmônicos, Restaurador Dinâmico de Tensão.

## SENSITIVE THREE-PHASE LOAD VOLTAGE COMPENSATION BASED ON A REPETITIVE AND LEAST-SQUARES CONTROL SYSTEM

**Abstract** – In this work, it is suggested a repetitive-based control technique to dynamically restore voltages across critical loads connected to the power grid. The technique is intrinsically able for dealing with harmonics distortions and it is realized with only one transfer function. Therefore, there is no need of using harmonic selective filters. Moreover, the technique is capable of tracking sinusoid references which turns unnecessary the Park transformation, usually applied in control schemes of three-phase converters. A recursive least-square algorithm is also aggregated to assure proper synchronization of the voltages to be restored. The control system design along with its stability are discussed. The experimental results

are produced through a setup of a series three-phase compensator. These scenarios for disturbed voltages are the same for the experiments and simulations. The results endorse the proposal and encourage further investigations.

**Keywords** – Dynamic Voltage Restorer, Harmonics, Nyquist Stability, Repetitive Control, Series Compensator, Voltage Sag.

### I. INTRODUÇÃO

A função essencial de um compensador série é proteger cargas críticas contra distúrbios de tensão da rede elétrica. Os distúrbios mais comuns são as elevações e afundamentos de tensão [1]–[5]. Distorções harmônicas também são bastante frequentes e são geralmente provocadas por cargas não lineares ligadas à rede elétrica. A maioria das soluções para proteger cargas sensíveis são projetadas exclusivamente para lidar com as elevações e afundamentos e operar para restaurar somente as tensões fundamentais [6]–[8]. O desempenho destas soluções geralmente se deteriora com a presença de harmônicos [9]–[11]. Assim, há uma crescente demanda por soluções que lidem adequadamente com diferentes tipos de perturbações ou múltiplas funcionalidades. Por isso, o desenvolvimento de dispositivos para proteger as cargas são de crescente relevância.

Na literatura, encontra-se propostas de dispositivos baseados em inversores de tensão (VSI), para proteção de cargas, com diferentes abordagens. Em [9], os autores usaram um controlador repetitivo para mitigar correntes harmônicas com um inversor modular multi-nível. Numa segunda etapa, um controlador PI atua sobre a saída do controlador repetitivo para obter erro nulo para a referência de corrente. Não há necessidade de outros filtros e a dinâmica do sistema é rápida. Em [11], um outro esquema de controle repetitivo foi usado para controlar um VSI. Para o controle, é incorporado um filtro de resposta finita ao impulso para melhorar as referências de rastreamento. Em [12], um controlador repetitivo é usado para proteger cargas através de um restaurador dinâmico de tensão. O trabalho aborda o projeto de um controlador e sua análise de estabilidade. Mostram-se resultados simulados satisfatórias, mas sem validação experimental.

Neste trabalho, apresenta-se um esquema de controlador repetitivo para o compensador série trifásico. Especificamente, para o compensador de tensão apresentado, o controlador opera sobre a tensão de referência aplicada

Artigo submetido em 14/10/2016. Primeira revisão em 06/12/2016. Aceito para publicação em 24/02/2017 por recomendação do Editor Marcelo Cabral Cavalcanti.

à carga, que mitiga afundamentos, e também atenua as distorções harmônicas de tensão que infligem as cargas. Não há necessidade de utilizar filtros harmônicos seletivos que aumentam a complexidade computacional do sistema e promovem atrasos de fase. O controlador é bastante rápido e seu atraso é no máximo um ciclo de período PWM. O método proposto é validado por um protótipo do compensador série e os resultados demonstram a sua robustez para reproduzir na carga referências senoidais mesmo sob presença de harmônicos advindos da rede elétrica.

## II. MODELO E PROJETO DO SISTEMA COMPENSADOR SÉRIE

A visão geral do compensador série analisado neste artigo é mostrada na Figura 1(a). O circuito monofásico equivalente é descrito na Figura 1(b). Nesta figura, a tensão  $v_{pcc}$  é aplicada sobre o ponto de acoplamento comum (PCC). A corrente  $i_s$  é fornecida pela rede elétrica e é dividida na corrente  $i$ , fornecida para a carga crítica, e  $i_r$ , fornecida para todas as outras cargas conectadas ao mesmo barramento. A tensão  $u$  é a de compensação e  $v$  é a tensão aplicada à carga. Os parâmetros  $R$  e  $L$  são a resistência e a indutância associadas com o transformador série de acoplamento do compensador.

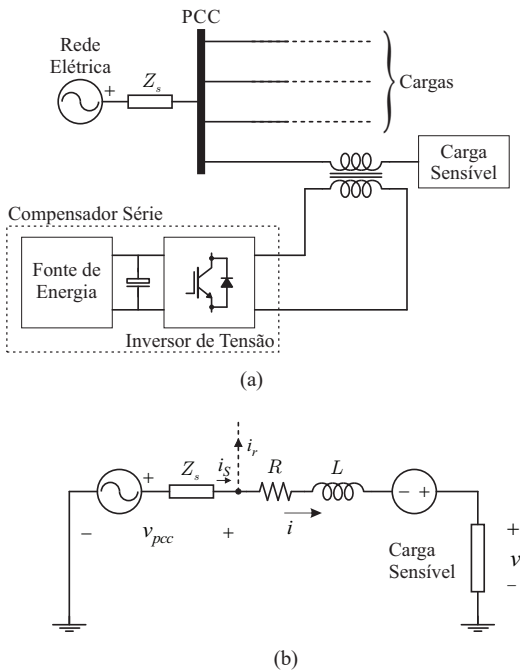


Fig. 1. Compensador de tensão série trifásico. (a) Rede elétrica com compensação da carga sensível. (b) Circuito monofásico equivalente para a alimentação da carga sensível.

Dadas as devidas nomenclaturas, a tensão de carga pode ser expressa por:

$$v(t) = v_{pcc}(t) - Ri(t) - L \frac{d}{dt}i(t) + u(t). \quad (1)$$

Com base nesta formulação, o controle proposto neste artigo é mostrado pelo diagrama de blocos da Figura 2.

O processo a ser controlado é representado por duas funções de transferência,  $G_1$  e  $G_2$ . A primeira corresponde

ao compensador série trifásico (TSC) e se a frequência de comutação é suficientemente elevada, ela pode ser modelada por um simples atraso  $G_1 = e^{-t_0s}$ . Este atraso é a soma dos períodos de amostragem e comutação. A função  $G_2$  representa a impedância  $RL$  originada a partir da dispersão do transformador de acoplamento. Matematicamente,  $G_2 = Ls + R$ . O sistema de controle, representado na mesma figura, contém três entradas, das quais a corrente  $I$  e a tensão de acoplamento comum  $V_{pcc}$  são variáveis da rede elétrica, enquanto  $V^*$  representa a tensão de referência a ser aplicada à carga crítica. A tensão  $U^*$  é fornecida pelo sistema de controle do TSC. Ao observar os diagramas de blocos, pode-se escrever:

$$V(s) = F_r(s)V^*(s) + F_g(s)V_{pcc}(s) + F_i(s)I(s) \quad (2)$$

em que

$$F_r(s) = \frac{[1 + G_c(s)]G_1(s)}{1 + G_c(s)G_1(s)} \quad (3)$$

$$F_g(s) = \frac{1 - G_1(s)}{1 + G_c(s)G_1(s)} \quad (4)$$

$$F_i(s) = -\frac{G_2(s)}{1 + G_c(s)G_1(s)}. \quad (5)$$

Na teoria do controle repetitivo [13], o controlador, como regra geral, pode ser escrito como:

$$G_c(s) = \frac{Q(s)}{1 - e^{-\frac{2\pi}{\omega_1}s}} \quad (6)$$

sendo  $Q(s)$  uma função de transferência que assegura a estabilidade do sistema de retroalimentação e  $\omega_1$  é a frequência fundamental, no caso, a frequência da rede elétrica. Ao substituir (6) em (3)-(5) tem-se:

$$F_r(s) = \frac{[1 - e^{-\frac{2\pi}{\omega_1}s} + Q(s)]G_1(s)}{1 - e^{-\frac{2\pi}{\omega_1}s} + Q(s)G_1(s)} \quad (7)$$

$$F_g(s) = \frac{[1 - G_1(s)][1 - e^{-\frac{2\pi}{\omega_1}s}]}{1 - e^{-\frac{2\pi}{\omega_1}s} + Q(s)G_1(s)} \quad (8)$$

$$F_i(s) = -\frac{[1 - e^{-\frac{2\pi}{\omega_1}s}]G_2(s)}{1 - e^{-\frac{2\pi}{\omega_1}s} + Q(s)G_1(s)}. \quad (9)$$

Ao observar a resposta em frequência de (7)-(9), constata-se que os termos  $(1 - e^{-\frac{2\pi}{\omega_1}j\omega})$  são nulos quando  $\omega$  é um múltiplo de  $\omega_1$ , com  $s = j\omega$ . Assim,  $F_r(j\omega_h) = 1$ ,  $F_g(j\omega_h) = 0$  e  $F_i(j\omega_h) = 0$ , para  $\omega_h = h\omega_1$ , sendo  $h = 0, 1, 2, \dots, \infty$ . Com estes valores, as tensões de referência são produzidas para a carga, como indicado por (2).

Se  $Q(s) = e^{-\frac{2\pi}{\omega_1} - t_0}s$ , o sistema pode não ser estável [12]. Para superar esta dificuldade,  $G_c(s)$  pode ser modificado para:

$$G_c(s) = \frac{F(s)e^{-(T-t_0)s}}{1 - F(s)e^{-Ts}} \quad (10)$$

sendo  $F(s)$  um filtro passa-baixas,  $T$  o período fundamental

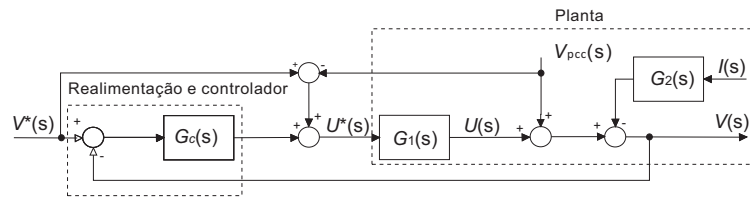


Fig. 2. Sistema de controle para gerar tensões de referência para o conversor CC-CA.

menos  $\beta$ , que é um parâmetro concebido com a restrição de ser menor do que um período fundamental da rede elétrica, isto é,  $\beta < (2\pi/\omega_1)$ , e  $\hat{t}_0$  é o tempo de atraso estimado para o TSC. Essa modificação para o controlador assegura a mitigação harmônica e uma reprodução limpa das referências.

### III. ASPECTOS DE CONTROLE DO COMPENSADOR SÉRIE

Inicialmente alguns aspectos do controle de estabilidade devem ser verificados antes dos resultados da simulação. Em seguida, os resultados experimentais serão apresentados para corroborar o método proposto.

#### A. Diagrama de Bode do Controlador

O controle repetitivo tem uma característica especial, eliminar frequências múltiplas da fundamental. Estas eliminações podem ser verificadas pela magnitude das respostas em frequência. Assim, os diagramas de Bode para o controle proposto são mostrados na Figura 3.

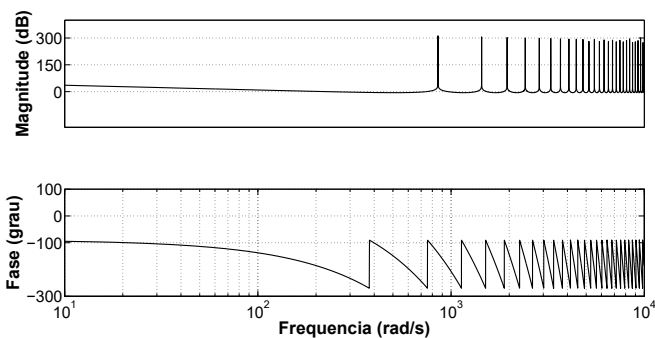


Fig. 3. Diagrama de Bode do controlador projetado.

Observando-se a figura, surgem picos de ressonância em frequências múltiplas da fundamental. Para o controlador, os picos são positivos, uma vez que são necessários para amplificar o sinal de erro para acelerar a convergência, e, portanto, eliminar os componentes. Para verificar o processo de atenuação realizado para o controle da tensão de saída, é necessário verificar os diagramas de Bode do sistema de malha fechada. Como é um sistema com múltiplas entradas, (2) tem três termos. Cada um representa um sistema que liga a sua entrada para a tensão de saída. A primeira função de transferência,  $F_r$ , refere-se a tensão de saída com a tensão de referência a ser imposta sobre a carga. A Figura 4 mostra os diagramas de Bode desta função. Ao observar o diagrama de magnitude, a curva começa a oscilar a partir de 300rad/s. Os picos negativos representam a atenuação do sinal de entrada. Pode ver-se que o primeiro pico negativo realiza uma atenuação insignificante, e a partir do segundo, a atenuação

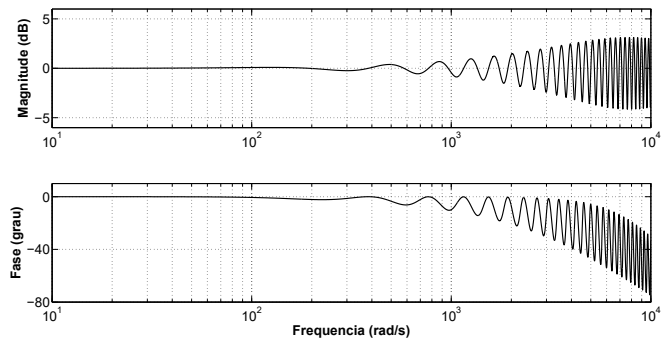


Fig. 4. Diagrama de Bode da função de transferência  $F_r(j\omega)$ .

tem mais intensidade. O aumento da intensidade dos picos na seqüência nas frequências das harmônicas de tensão, justificam o cancelamento das componentes harmônicas que podem compor o sinal de referência. A Figura 5 mostra as magnitudes das outras duas funções de transferência. Nestes gráficos pode-se observar um comportamento semelhante ao da Figura 4 em relação às frequências de atenuação. No entanto, os picos são formados de forma mais acentuada.

O benefício deste recurso já foi mencionado, mas o efeito indesejado é que este tipo de resposta pode causar instabilidade. Portanto, é necessário verificar se o sistema é estável em todas as frequências. Para isso, é utilizado um parâmetro, que é a margem de ganho. Além disso, a magnitude da margem de ganho também é uma informação importante para verificar quão longe o sistema está da instabilidade, e assim quantificar a robustez.

#### B. Estabilidade Através do Critério de Nyquist

O primeiro resultado a ser mostrado neste subitem são as margens de estabilidade através do critério de Nyquist para o sistema proposto. Isto é necessário devido aos picos de ressonância que surgem em sistemas com controle repetitivo.

Os parâmetros para  $G_c$  encontram-se resumidos na Tabela I.

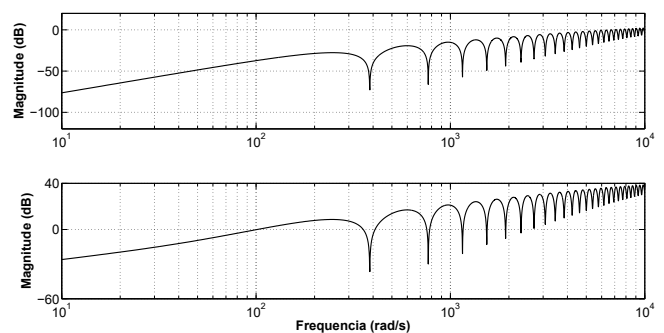


Fig. 5. Diagrama de Bode das funções  $F_g(j\omega)$  e  $F_i(j\omega)$ .

A frequência  $f_s$  é a frequência de comutação do inversor fonte de tensão, e  $f_c$  é a frequência de corte do filtro Bessel passa-baixas,  $F(s)$ . A estabilidade do sistema pode ser verificada por meio do diagrama de Nyquist, mostrado na Figura 6, considerando um intervalo no eixo  $j\omega$  e o polinômio das funções racionais descritos por (7)-(9) menos uma unidade, ou seja, os critérios de Nyquist são aplicados à função de malha aberta  $G_c(s)G_1(s)$ , que é comum as três funções de malha fechada. A partir da figura, é possível determinar que o sistema é estável e com uma margem de ganho igual a 6,02dB. Esta margem é considerada segura e distante da instabilidade. Além disso, o sistema que é utilizado neste trabalho tem pequenas variações paramétricas, o que confere maior robustez ao sistema de controle.

**TABELA I**  
**Parâmetros Projetados para o Sistema de Controle**

Parâmetro	Valor
$f_s$	10kHz
$\beta$	555 $\mu$ s
$\hat{i}_0$	1/(2 $f_s$ )
$T$	16,11ms
$f_c$	50kHz

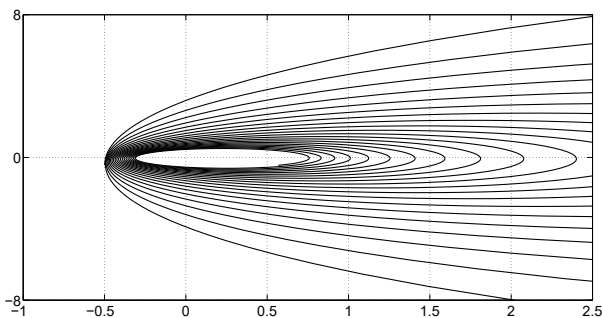


Fig. 6. Diagrama de Nyquist do sistema de controle.

#### IV. ESTIMAÇÃO DA TENSÃO DA REDE ELÉTRICA

A técnica que calcula a fase e a amplitude da tensão CA neste trabalho opera diretamente na tensão medida sem qualquer transformação, e é dada por:

$$v(t) = V_p \cos(\omega t + \phi) \quad (11)$$

e pode ser reescrita como:

$$v(t) = X_1^c \cos(\omega t) + X_1^s \sin(\omega t) \quad (12)$$

em que  $X_1$  são as amplitudes a serem estimadas. Nesta representação, as amplitudes são funções de  $V_p$  e  $\phi$  e descritas como:

$$X_1^c = V_p \cos \phi \quad (13)$$

$$X_1^s = -V_p \sin \phi. \quad (14)$$

As equações (13) e (14) que descrevem os parâmetros  $X_1^c$ ,  $X_1^s$  são lineares em relação ao  $v(t)$ . Assim, pode ser

usado um algoritmo de estimação linear. Neste trabalho, foi utilizado um algoritmo Mínimos Quadrados Recursivo (MQR) ponderado com fator de esquecimento. Além de ter simples implementação, este algoritmo tem a vantagem, que será mostrada na seção seguinte, de lidar com harmônicas de ordens diferentes sem perda de eficiência e interferência na rapidez da resposta dinâmica.

##### A. Mínimos Quadrados Recursivo

Considere um sinal  $y[k]$ , modelado por:

$$\hat{y}[k] = \varphi_1[k]\rho_1 + \varphi_2[k]\rho_2 + \dots + \varphi_L[k]\rho_L. \quad (15)$$

O modelo  $\hat{y}[k]$  depende linearmente dos  $L$  parâmetros  $\rho$ . Compactamente, (15) pode ser escrito como:

$$\hat{y}[k] = \rho^T \varphi_k \quad (16)$$

em que  $\rho$  é o vetor de parâmetros a serem determinados e para cada instante de tempo discreto  $k$  é dado por:

$$\rho^T = [\rho_1 \ \rho_2 \ \dots \ \rho_L] \quad (17)$$

e  $\varphi_k$  é o chamado vetor regressor, escrito como:

$$\varphi_k^T = [\varphi_1[k] \ \varphi_2[k]; \dots \ \varphi_L[k]]. \quad (18)$$

Para cada tempo  $k$ , a estimativa de erro é dada por:

$$e^0[k] = y[k] - \hat{y}^0[k]. \quad (19)$$

O sobrescrito 0 em  $\hat{y}[k]$  indica que a predição é realizada utilizando o vetor de parâmetros calculado no momento anterior, isto é,  $k - 1$ . Consequentemente:

$$\hat{y}^0[k] = \rho_{k-1}^T \varphi_k. \quad (20)$$

O algoritmo MQR atualiza os parâmetros de estimação através de:

$$\hat{\rho}_k = \hat{\rho}_{k-1} + \mathbf{K}_k e^0[k] \quad (21)$$

no qual o ganho  $\mathbf{K}_k$  é fornecido por [14]:

$$\mathbf{K}_k = \frac{\mathbf{P}_k \varphi_k}{\varphi_k^T \mathbf{P}_k \varphi_k + \lambda}. \quad (22)$$

$\mathbf{P}$  é uma matriz de covariância  $L \times L$  e  $\lambda$  é um fator de esquecimento. A atualização para esta matriz é obtida através de:

$$\mathbf{P}_k = \mathbf{P}_{k-1} - \frac{\mathbf{P}_{k-1} \varphi_k \varphi_k^T \mathbf{P}_{k-1}}{1 + \varphi_k^T \mathbf{P}_{k-1} \varphi_k}. \quad (23)$$

O algoritmo MQR é composto pelo seguinte conjunto de equações:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{K}_k = \frac{\mathbf{P}_k \varphi_k}{\varphi_k^T \mathbf{P}_k \varphi_k + \lambda} \\ e^0[k] = y[k] - \hat{y}^0[k] \\ \hat{\rho}_k = \hat{\rho}_{k-1} + \mathbf{K}_k e^0[k] \\ \mathbf{P}_k = \frac{1}{\lambda} \left( \mathbf{P}_{k-1} - \frac{\mathbf{P}_{k-1} \varphi_k \varphi_k^T \mathbf{P}_{k-1}}{1 + \varphi_k^T \mathbf{P}_{k-1} \varphi_k} \right). \end{array} \right. \quad (24)$$



## B. Método Proposto

Devido as distorções harmônicas apresentadas na rede elétrica, um modelo para a tensão  $v(k\Delta t)$  é adotado como:

$$\hat{v}(k\Delta t) = \hat{v}[k] = 1 + V_1 \cos(\omega k\Delta t + \theta_1) + V_2 \cos(2\omega k\Delta t + \theta_2) \cdots + V_h \cos(h\omega k\Delta t + \theta_h) \quad (25)$$

em que  $\Delta t$  é o tempo de amostragem,  $\omega$  é a frequência fundamental da rede elétrica,  $V_1$  e  $\theta_1$  são a magnitude e a fase inicial da senóide. Pode-se notar que o modelo inclui uma harmônica de segunda ordem que pode elevar o desequilíbrio de tensão da rede elétrica. Os parâmetros relacionados a este componente senoidal são  $V_2$  e  $\theta_2$ . O modelo também inclui um componente de ordem  $h^{th}$  da senóide. Se este componente não está incluído no modelo e a tensão medida contém esta harmônica, a estimativa para os outros parâmetros será comprometida. Por isso, todos os componentes harmônicos que espera-se que sejam apresentados nas tensões medidas devem ser incluídos. O regressor unitário faz com que o algoritmo rejeite qualquer componente CC e também é capaz de absorver uma parte da energia de harmônicos que não compõem o modelo para a tensão, e isto melhora o desempenho do algoritmo, de acordo com [15], [16]. O modelo de  $\hat{v}[k]$  deve ser reescrito, a fim de ser utilizado pela estimação MQR. Assim, este modelo pode ser reescrito como:

$$\hat{v}[k] = 1 + X_1^c \cos(\omega n\Delta t) + X_1^s \sin(\omega k\Delta t) + X_2^c \cos(2\omega k\Delta t) + X_2^s \sin(2\omega k\Delta t) + \cdots + X_h^c \cos(h\omega k\Delta t) + X_h^s \sin(h\omega k\Delta t) \quad (26)$$

em que  $X_m^c$  e  $X_m^s$  relaciona-se com os parâmetros  $V_m$  e  $\theta_m$  através de:

$$V_m = \sqrt{(X_m^c)^2 + (X_m^s)^2} \quad (27)$$

$$\theta_m = -\arctan(X_m^s/X_m^c). \quad (28)$$

É importante notar que (27) serve como um modelo para  $v(k\Delta t)$ , tal como é descrita pela primeira vez em (12). As diferenças são o regressor unitário para rejeitar a componente CC, o regressor para rejeitar desequilíbrio e regressor relacionados com a harmônica  $h$ . O vetor de parâmetros,  $\rho$ , associado com o novo modelo é fornecido por:

$$\rho = [1 \ X_1^c \ X_1^s \ X_2^c \ X_2^s \ \cdots \ X_h^c \ X_h^s]^T. \quad (29)$$

Em (29),  $X_2^c$  e  $X_2^s$  representam os parâmetros associados com a harmônica de segunda ordem. Os parâmetros  $X_h^c$  e  $X_h^s$  são associados à distorção harmônica a ser eliminada.  $X_1^c$  e  $X_1^s$  são os parâmetros de interesse e são previamente definidos em (13) e (14). O vetor regressor  $\varphi$  associado a estes parâmetros é dado por:

$$\varphi = \begin{bmatrix} 1 \\ \cos(\omega_k \Delta t) \\ \sin(\omega_k \Delta t) \\ \cos(2\omega k\Delta t) \\ \sin(2\omega k\Delta t) \\ \vdots \\ \cos(h\omega k\Delta t) \\ \sin(h\omega k\Delta t) \end{bmatrix}. \quad (30)$$

Com este conjunto de equações, seguindo o algoritmo descrito em (24), as estimativas para  $X_1^c$  e  $X_1^s$  podem ser atualizadas para cada passo de tempo.

## V. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Para avaliar o controlador proposto, uma plataforma Simulink/Matlab foi utilizada, como mostrado na Figura 7. Primeiramente, pode-se observar que a plataforma executa o

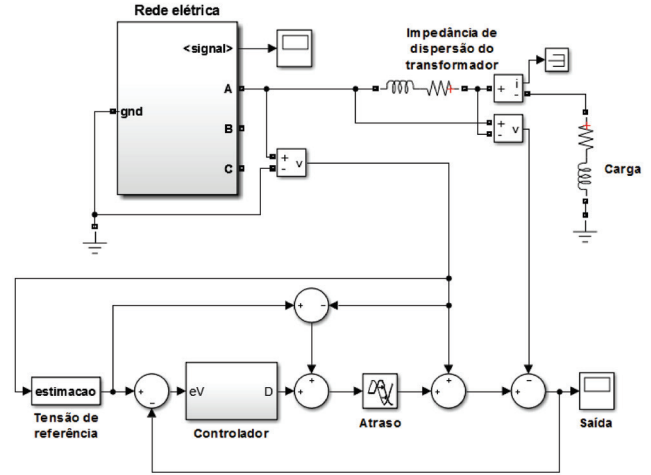


Fig. 7. Plataforma Simulink para testar o desempenho do sistema de controle proposto.

método proposto na Figura 2. Os ensaios são realizados para testar a capacidade do método de restaurar uma referência senoidal e um afundamento de tensão é configurado na fase A. No bloco "Controlador" é implementada a função de transferência (10), com os parâmetros projetados. O "Atraso" é um bloco do Simulink e representa a dinâmica do inversor. Ele é denotado pela função de transferência  $G_1$ . A carga é representada por resistência de  $R=100\Omega$  e uma indutância  $L=6mH$  conectadas em série.

Três cenários diferentes são testados para verificar o desempenho do sistema. No primeiro cenário, o afundamento de tensão inflige uma das fases da alimentação. A Figura 8(a) mostra as tensões corrigidas e afundadas no mesmo gráfico. O afundamento de 50% é iniciado a 20ms e termina em 80ms. Como pode ser observado, a amplitude de correção é bem executada. O algoritmo MQR é propositalmente excluído do sistema de controle e apenas é executado o controle repetitivo. A senóide com atraso zero é imposta na referência. Como a ocorrência do afundamento pode não necessariamente começar na fase zero da senóide, é de se esperar uma defasagem entre as tensões da carga e da rede elétrica.

A Figura 8(b) mostra em detalhe a dinâmica da correção. O tempo entre o início do afundamento e do regime permanente é de cerca de 0,2ms, que é considerado muito rápido.

O segundo cenário combina duas perturbações (distorção e afundamento de tensão), como mostrado na Figura 9. Este é considerado um cenário de distorção severo, uma vez que o sistema de controle proposto deve mitigar estes dois problemas distintos de qualidade de energia. Neste momento, ainda não foi utilizado o algoritmo de MQR. O resultado confirma a característica de dupla função do controle e o resultado é

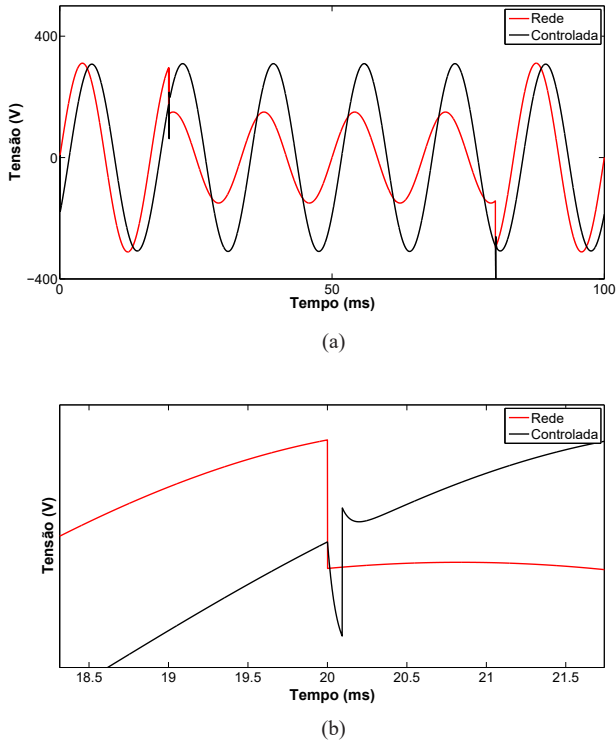


Fig. 8. Cenário com a rede elétrica afundada. (a) Tensão afundada e saída controlada. (b) Detalhe do instante de correção.

bastante satisfatório. Observando a tensão na saída, observa-se que o sistema de controle elimina as componentes harmônicas. Não é necessário qualquer filtro com seleção de harmônicos, como normalmente é proposto [17]. Vale a pena mencionar que, no que diz respeito ao atraso entre as duas tensões, não há erro do sistema de controle. A questão é que nenhum algoritmo de PLL foi utilizado para sincronizar a referência com a componente fundamental da rede elétrica. No entanto, o que realmente importa é que a carga é protegida contra a distorção da rede elétrica e o afundamento de tensão. A sincronização é necessária para controlar o fluxo de energia para dentro ou fora do compensador. Num cenário em que as tensões estão  $180^\circ$  graus defasadas é o mais crítico para o compensador.

Para o terceiro cenário, uma elevação de tensão é contemplada para testar o mesmo controle repetitivo proposto

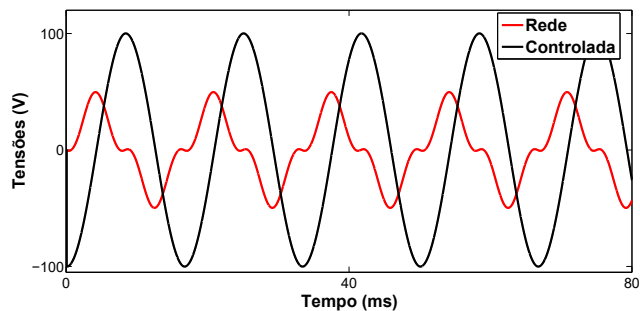


Fig. 9. Tensões da rede elétrica afundada/distorcida e da saída controlada.

num terceiro evento diferente. A Figura 10 mostra as tensões na rede elétrica e a corrigida na carga. A amplitude da

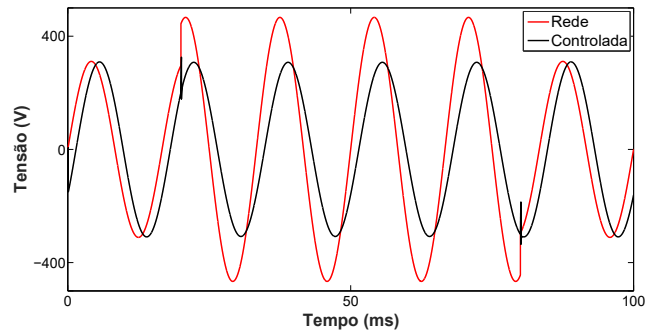


Fig. 10. Cenário com elevação de tensão na rede elétrica.

elevação é ajustada para um nível de 50% maior que o nominal. Assim como ocorrido na Figura 8(a), a tensão é rapidamente restabelecida pelo compensador para o valor nominal de amplitude de 311V (220Vrms).

No quarto cenário, o algoritmo MQR é incorporado ao sistema de controle para estipular uma sincronização entre a tensão da rede elétrica e a injetada pelo compensador. A Figura 11 mostra a tensão corrigida e a afundada no mesma figura. Como pode ser observado, a tensão injetada está em

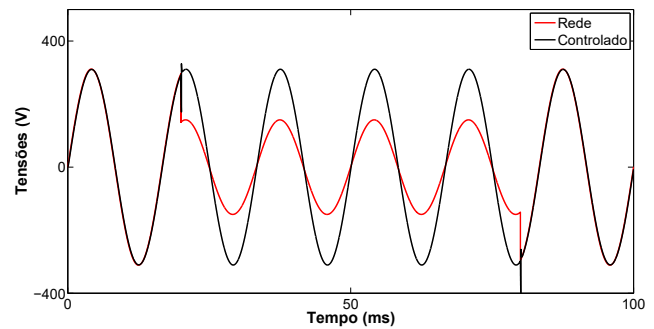


Fig. 11. Tensões da rede elétrica afundada e a de saída corrigida com o algoritmo MQR implementado.

fase com a tensão de rede elétrica. Esta é uma estratégia para injetar a tensão e requerer um mínimo de amplitude de tensão a partir do compensador série. Esta estratégia garante a menor demanda de amplitude de tensão a partir do dispositivo [18],[19].

Vale ressaltar que, para os quatro cenários, o tempo de estabilização é muito pequeno. As normas recomendam que este tempo deve ser cerca de metade de um ciclo da fundamental, que neste caso é aproximadamente 8ms, muito maior do que o obtido aqui.

## VI. VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL

Para verificar a simulação, um sistema compensador trifásico experimental foi montado em laboratório, de acordo com a Figura 12.

A configuração da parte frontal contém um primeiro varivolt que representa a rede elétrica, o inversor fonte de tensão da Semikron, os transformadores série, os filtros LC (2mH e  $16\mu\text{F}$ ) para as tensões PWM, as cargas RL,

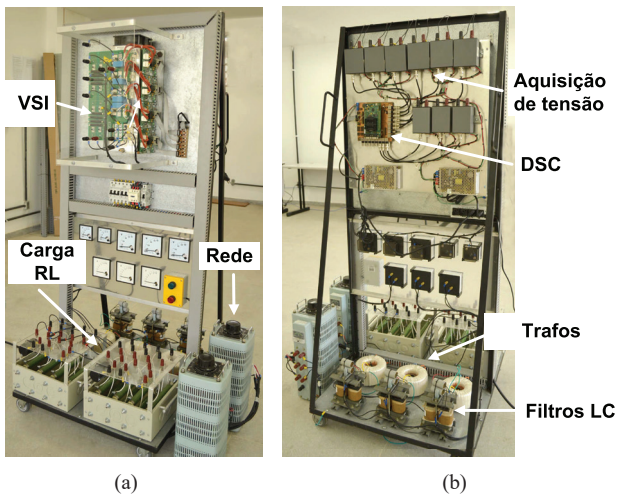


Fig. 12. Protótipo experimental. (a) Parte frontal. (b) Parte traseira.

de mesmos valores utilizados na simulação, e um segundo varivolt seguido de uma ponte de diodos trifásica para carregar o barramento CC. Na parte de trás da instalação estão alocados o sistema de aquisição, os sensores de tensão e corrente e o controlador digital de sinais (DSC) TMS320F28335. São adquiridas as tensões e correntes da rede elétrica e da carga. As funções de transferência do controle são implementadas utilizando a integração trapezoidal, e o período de amostragem, igual ao período de PWM, é  $100\mu\text{s}$ . O PWM é implantado através da modulação escalar proposta em [20].

O primeiro resultado experimental está relacionado com a correção de um afundamento de tensão na fase A. Esta tensão é mantida em 38V de pico durante o afundamento. A Figura 13 mostra este cenário. Para esta situação, a tensão nominal é considerada 50V de amplitude.

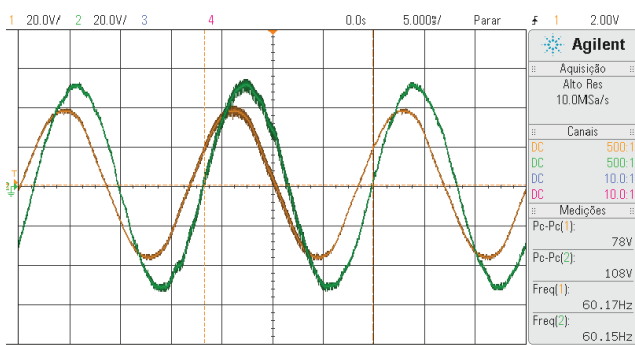


Fig. 13. Valores medidos do afundamento de tensão e da tensão na carga corrigida pelo sistema compensador.

Esta referência é armazenada como uma variável de entrada do algoritmo de controle implementado no DSP. Do mesmo modo do primeiro caso simulado, nenhum método de rastreamento para a tensão de rede elétrica foi aplicado. Mesmo assim, pode-se notar que a tensão da carga é compensada.

A Figura 14 exibe um resultado experimental da tela de um osciloscópio.

Foi produzida uma distorção harmônica de tensão a ser regulada pelo sistema de controle TSC. Como pode ser observado, é mostrado um cenário que inclui simultaneamente

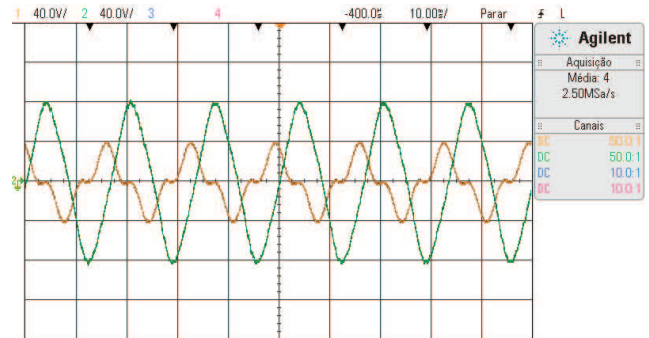


Fig. 14. Resultado experimental com tensão afundada e distorcida.

um afundamento e uma distorção de tensão, igual ao caso de simulação. A tensão nominal considerada é 80V de pico. No sistema de controle proposto, o termo da função de transferência de malha fechada relacionado com  $V_{PCC}$ , elimina todas as interferências harmônicas e preserva a componente fundamental. A curva com maior amplitude mostra que o método proposto é eficaz na correção da tensão distorcida e a tensão de carga é exatamente a mesma da referência.

O resultado a seguir está relacionado com um afundamento de 50% imposto ao compensador. A tensão afundada permanece em 50V durante a falta. A Figura 15 exibe este cenário.

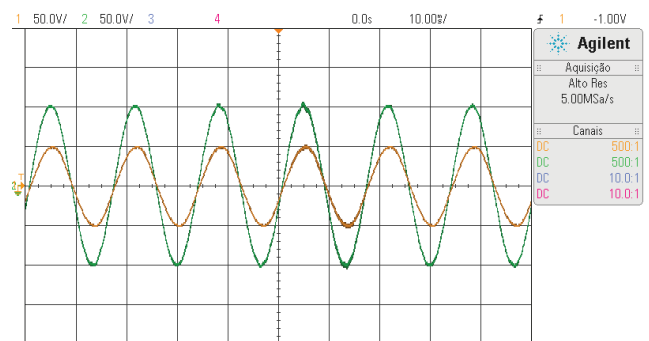


Fig. 15. Afundamento de 50% da tensão da rede e tensão na carga sincronizadas.

Para esta situação, uma tensão com magnitude de 100V é definida como o valor nominal para a carga. Assim, o controlador é configurado para seguir uma tensão com esta magnitude. O MQR calcula em tempo real, a amplitude e a fase da tensão da rede elétrica e esta informação é utilizada para construir a tensão de referência para o sistema. A correção do afundamento é mostrada na mesma. O valor definido para a tensão de carga é alcançado, o que significa que a carga está protegida. As outras duas fases, durante o teste, são mantidas em seu valor nominal.

## VII. CONCLUSÕES

Este trabalho propôs um sistema de controle de um compensador série baseado em um controle repetitivo. O sistema é capaz de mitigar tanto distorções harmônicas e afundamentos. A estabilidade do controle repetitivo é assegurada por um filtro passa-baixas que atenua os picos de ressonância acima de uma frequência crítica. Três cenários foram simulados incluindo estes distúrbios para verificar o sistema de controle proposto. Em todos eles, os parâmetros de

controle são os mesmos. Os resultados mostram a sua eficácia. Além disso, foram apresentados resultados experimentais que corroboram a eficácia do compensador série para mitigar diferentes tipos de problemas de qualidade de energia.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico CNPq pelo apoio financeiro fornecido por meio dos projetos de números 46163520143 e 40496120134.

#### REFERÊNCIAS

- [1] S. Jothibas, M. Mishra, "An Improved Direct AC-AC Converter for Voltage Sag Mitigation", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 1, pp. 21–29, Jan. 2015.
- [2] D. A. Fernandes, S. R. Naidu, "Estratégia de modulação para um inversor de tensão de quatro braços utilizado em um restaurador dinâmico de tensão", *Eletrônica de Potência - Sobraep*, vol. 13, no. 2, pp. 69–76, May 2008.
- [3] M. R. Alam, K. M. Muttaqi, A. Bouzerdoum, "Characterizing Voltage Sags and Swells Using Three-Phase Voltage Ellipse Parameters", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no. 4, pp. 2780–2790, Apr. 2015.
- [4] H. Hao, X. Yonghai, "Control strategy of PV inverter under unbalanced grid voltage sag", in *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE*, 2014.
- [5] D. A. Fernandes, F. F. Costa, M. A. Vitorino, "A Method for Averting Saturation From Series Transformers of Dynamic Voltage Restorers", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 5, pp. 2239–2247, Oct. 2014.
- [6] Y. W. Li, D. M. Vilathgamuwa, F. Blaabjerg, P. Loh, "A Robust Control Scheme for Medium-Voltage-Level DVR Implementation", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 4, pp. 2249–2261, Aug. 2007.
- [7] S. Jothibas, M. Mishra, "A Control Scheme for Storageless DVR Based on Characterization of Voltage Sags", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 5, pp. 2261–2269, Oct. 2014.
- [8] S. R. Naidu, D. A. Fernandes, "Technique for simulating the steady-state response of power electronic converters", *IET Power Electronics*, vol. 4, no. 3, pp. 269–277, Apr. 2011.
- [9] L. He, K. Zhang, J. Xiong, S. Fan, "A Repetitive Control Scheme for Harmonic Suppression of Circulating Current in Modular Multilevel Converters", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 1, pp. 471–481, Jan. 2015.
- [10] J. A. Pomilio, S. M. Deckmann, "Caracterização E Compensação De Harmônicos E Reativos De Cargas Não-lineares Residenciais E Comerciais", *Eletrônica de Potência - Sobraep*, vol. 13, no. 1, pp. 9–16, Mar 2006.
- [11] D. Chen, J. Zhang, Z. Qian, "An Improved Repetitive Control Scheme for Grid-Connected Inverter With Frequency-Adaptive Capability", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 2, pp. 814–823, Feb. 2013.
- [12] P. Sanchez, E. Acha, J. Calderon, V. Feliu, A. Cerrada, "A versatile control scheme for a dynamic voltage restorer for power quality improvement", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 1, pp. 277–284, Jan. 2009.
- [13] S. Hara, Y. Yamamoto, T. Omata, M. Nakano, "Repetitive control system: A new type servo system for periodic exogenous signals", *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 33, no. 7, pp. 659–668, Jul. 1988.
- [14] L. Ljung, *System Identification: Theory for the User*, 2 ed., Prentice Hall PTR, 1999.
- [15] L. A. L. de Almeida, A. C. de C. Lima, "Covariance Management Based RLS Algorithm for Phasor Estimation in Severely Noisy Systems", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, no. 4, pp. 1067–1072, Oct. 1998.
- [16] M. S. Sachdev, M. Nagpal, "A Recursive Least Error Squares Algorithm for Power System Relaying and Measurement Applications", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 6, no. 3, pp. 1008–1015, Jul. 1991.
- [17] Y. W. Li, J. He, "Distribution system harmonic compensation methods: An overview of DG-interfacing inverters", *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 8, no. 4, pp. 18–31, Dec. 2014.
- [18] J. G. Nielsen, F. Blaabjerg, "A detailed comparison of system topologies for dynamic voltage restorers", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41, no. 5, pp. 1272–1280, Sep./Oct. 2005.
- [19] D. M. Vilathgamuwa, A. R. Perera, S. S. Choi, "Voltage Sag Compensation With Energy Optimized Dynamic Voltage Restorer", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, no. 3, pp. 928–936, July 2003.
- [20] D. A. Fernandes, F. F. Costa, E. C. S. Jr, "Digital-Scalar PWM Approaches Applied to Four-Leg Voltage-Source Inverters", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 5, pp. 2022–2030, May 2013.

#### DADOS BIOGRÁFICOS

**João Raphael de Souza Martins** recebeu o título de Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) em 2011 e o título de Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB) em 2016. De 2015 a 2016, foi professor no Instituto Federal da Paraíba (IFPB). Atualmente desenvolve seu projeto de Doutorado em Engenharia Elétrica pela UFCG. Seus interesses de pesquisa estão nas aplicações de controle em dispositivos de eletrônica de potência e eletrônica industrial.

**Darlan Alexandria Fernandes** recebeu o título de Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB) em 2002, e os títulos de Mestre e Doutor em engenharia elétrica pela UFCG, em 2004 e



2008, respectivamente. De 2007 a 2011, foi professor no Departamento da Indústria do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte. Atualmente é Professor do Departamento de Engenharia Elétrica na UFPB. Seus interesses de pesquisa estão nas aplicações de eletrônica de potência em sistemas de distribuição, qualidade de energia e sistemas fotovoltaicos. Professor Darlan é membro da SOBRAEP e IEEE.

**Fabiano Frago Costa** recebeu o título de Engenheiro Eletricista, o grau de Mestre e o de Doutor em Engenharia Elétrica, respectivamente pela Escola Politécnica da USP (1997), pela UFPB (2001) e pela UFCG (2005). Atualmente, é Professor Adjunto da Universidade Federal da Bahia junto ao Departamento de Engenharia Elétrica. Seus interesses de pesquisa se concentram nos tópicos de sincronização, e controle em geração distribuída. Também, possui interesses no desenvolvimento de técnicas de processamento digital de sinais aplicáveis ao processamento e monitoramento de energia da rede elétrica. Além disso, possui atuação em projetos de Pesquisa e Desenvolvimento junto a concessionárias do setor elétrico. É membro da SOBRAEP e do IEEE.

**Maurício Beltrão de Rossiter Corrêa** recebeu os títulos de Engenheiro Eletricista, Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, Brasil, respectivamente, em 1996, 1997 e 2002. De 1997 a 2004, esteve no Centro Federal de Educação Tecnológica de Alagoas, Brasil. De 2001 a 2002, fez estágio no Wisconsin Electric Machines e o Power Electronics Consortium (WEMPEC), da Universidade de Wisconsin, Madison, WI, EUA, como parte do programa de doutorado. Desde julho de 2004, trabalha no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, onde atualmente é professor associado de engenharia elétrica. Foi vice-coordenador geral da "The 2005 IEEE Power Electronics Specialists Conference"(PESC 2005) e Coordenador do Tópico (B) do IEEE International Future Energy Challenge de 2011 (IFEC 2011). Ele é atualmente o Coordenador do Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamento de Máquinas, onde ele e seus colegas desenvolvem suas pesquisas. Seus interesses de pesquisa incluem sistemas de acionamento, eletrônica de potência e energia renovável.