

# COMPENSAÇÃO SÉRIE COM MÍNIMA INJEÇÃO DE POTÊNCIA OU DE TENSÃO BASEADA EM CONTROLE REPETITIVO

Darlan Fernandes<sup>1</sup>, Fabiano Costa<sup>2</sup>, João Martins<sup>1,3</sup>, Maurício Corrêa<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa – PB, Brasil

<sup>2</sup>Universidade Federal da Bahia (UFBA), Salvador – BA, Brasil

<sup>3</sup>Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande – PB, Brasil

e-mail: darlan@cear.ufpb.br, fabiano.costa@ufba.br, joao.rafael.martins@gmail.com, mbrcorrea@dee.ufcg.edu.br

**Resumo** – Este trabalho propõe a utilização de um controle repetitivo para restaurar de forma dinâmica a tensão aplicada a cargas sensíveis e conectadas na rede elétrica. Além de compensar afundamentos e elevações de tensão, o controle proposto pode corrigir distorções harmônicas. Ainda, é capaz de trabalhar em referências senoidais, e assim, evita a necessidade do emprego de transformadas *dq*. Um algoritmo de mínimos quadrados recursivos também é incluído no sistema de controle, a fim de assegurar a sincronização das tensões injetadas. O projeto dos parâmetros de controle, juntamente com a estabilidade do sistema são discutidos ao longo do trabalho. Além dessas funcionalidades, este trabalho tem como principal objetivo analisar dois tipos diferentes de inserção de tensão na rede por meio do compensador série. No primeiro, a injeção de tensão está sincronizada com a tensão da rede durante a falta, enquanto que o segundo insere a tensão com um mínimo de potência ativa. Ambos os tipos de inserção produzem as tensões de referência por meio do controle repetitivo. Os resultados de simulações e experimentais são apresentados e corroboram a eficácia do método.

**Palavras-chave** – Afundamento de Tensão, Compensador de Tensão, Controle Repetitivo, Harmônicos de Tensão, Mínimos Quadrados Recursivo, Potência Ativa Mínima.

## SERIES COMPENSATION WITH MINIMUM POWER OR VOLTAGE INJECTION BASED ON REPETITIVE CONTROL

**Abstract** – This paper proposes a control technique to be applied in a series compensator which dynamically maintain the voltage across critical loads connected to the power grid in nominal value. The technique is capable of dealing with voltage sags, swells and harmonic distortions. Furthermore, it is suitable for tracking sinusoid references, avoiding the employment of axes transformations and allowing control tuning for each phase separately. It is also proposed the integration of a recursive least-squares to synchronize the reference signals to the compensating voltages. These voltages, then, can be controlled for achieving two different objectives. In

the first one, the compensating voltage is in phase with the sagged or swelled voltage and its level is, therefore, minimum. In the second objective, the compensating voltage is injected so as to the injected power from the compensator to the grid is minimum or null. The technique has been verified on a simulated system and on a experimental setup realizing the compensator. The obtained results endorse the propositions and clearly confirms the technique efficacy.

**Keywords** – Minimum Active Power, Recursive Least-Squares, Repetitive Control, Voltage Harmonics, Voltage Sag, Voltage Series Compensator.

## I. INTRODUÇÃO

Em um cenário atual, a rede elétrica tem recebido um número crescente de cargas não-lineares e geradores distribuídos. Esta tendência coloca inúmeros desafios às concessionárias de energia e seus clientes. A proteção das cargas críticas a variações é um desses desafios, pois a rede elétrica está propensa a ter distorções de tensão causadas por estes geradores ou distorções harmônicas provocadas por não-linearidades presentes na rede [1]–[3]. As cargas críticas são aquelas em que a energia deve ser fornecida ininterruptamente em condições senoidais nominais. Exemplos destas cargas são centrais de dados, equipamentos hospitalares, máquinas controladas por computadores e acionamentos a velocidade variável.

Existem duas possibilidades que podem ser aplicadas para proteger cargas sensíveis ou críticas na rede elétrica. Na primeira, o objetivo é melhorar a flexibilidade da rede de energia em ações como a redundância de fornecimento, aperfeiçoamento dos procedimentos de manutenção ou substituição de equipamentos obsoletos ou antigos [4], [5]. Essas ações são baseadas na configuração da rede e, geralmente, são tomadas pelas concessionárias de energia, que são agentes centrais para o sistema. A outra possibilidade é complementar à primeira e procura soluções locais. Entre as diversas soluções descritas na literatura, a utilização de compensadores séries ou restauradores dinâmicos de tensão para manter a tensão nominal na carga crítica, é bastante conhecida [6]–[8].

A função básica de um compensador série é proteger cargas críticas contra distúrbios de tensão da rede. Os distúrbios mais comuns são os afundamentos e elevações de tensão [9]. Distorções harmônicas também são bastante comuns e são geralmente provocadas por cargas não-lineares

Artigo submetido em 28/10/2016. Primeira revisão em 16/01/2017. Aceito para publicação em 21/03/2017 por recomendação do Editor Marcelo Cabral Cavalcanti.

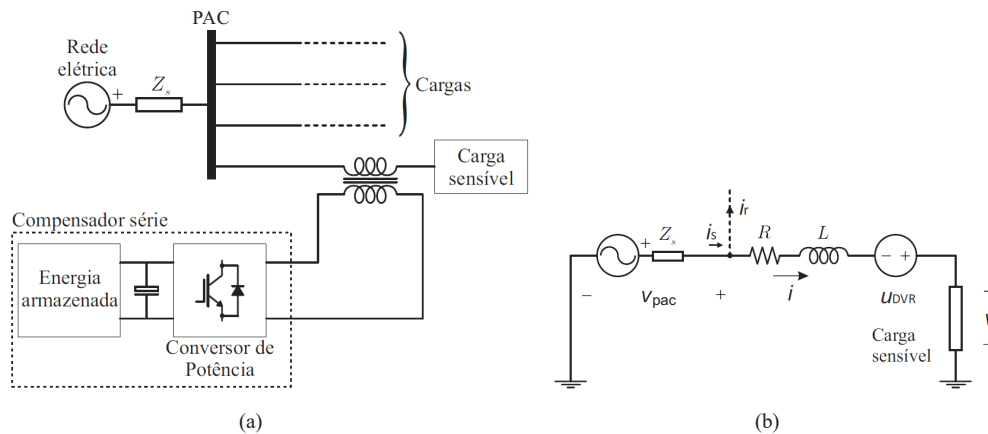


Fig. 1. Estrutura de compensação de tensão. (a) Rede elétrica com compensação da carga sensível. (b) Circuito monofásico equivalente para a alimentação da carga sensível.

ligadas à rede elétrica. Na literatura, observa-se que a maioria das soluções de consumidores para proteger cargas sensíveis são projetadas exclusivamente para lidar com as elevações e afundamentos para restaurar as tensões fundamentais [10], [11]. O desempenho de tais soluções geralmente se deteriora na presença de harmônicos [12], [13]. Assim, existe uma procura crescente de soluções que lidem de forma adequada, e simultaneamente, com diferentes tipos de perturbações, incluindo as distorções harmônicas. Este artigo propõe uma destas soluções.

Em relação à técnica de controle aplicada para regular a tensão da carga, existem algumas alternativas propostas ao longo dos últimos anos. O que se observa nas referências à respeito do controle é que pode ser tratado diretamente na sua forma senoidal original ou no domínio  $dq$ , onde as variáveis senoidais são transformadas em constantes. Neste trabalho, as referências são senoidais e não há necessidade de aplicar a transformação  $dq$ . Além disso, esta abordagem permite controlar cada fase individualmente e pode ser prontamente adaptada para sistemas monofásicos sem a necessidade de aplicar algoritmos para estimar as componentes de sequência positiva, normalmente utilizadas para sistemas de controle de três fases.

O controlador ressonante proporcional é a técnica mais comum para lidar com referências senoidais [14], [15]. Este controlador é baseado no princípio do modelo interno, onde afirma-se que uma referência é rastreada corretamente no regime permanente se o modelo da função de transferência estiver incluído no controle de malha fechada [16]. Isto significa que o controlador deve incluir, na sua função de transferência, um par de polos associados com a mesma frequência do sinal de referência. O controle repetitivo conta com o mesmo princípio. No entanto, ao contrário do controlador proporcional ressonante, a sua função de transferência inclui não apenas os polos relacionados com a frequência fundamental do sinal de referência, mas também polos associados com os harmônicos de sua fundamental. Além disso, o controlador pode ser expresso por uma função transcendental simples. Este controlador é equivalente a uma infinidade de controladores ressonantes em paralelo. Portanto,

evita-se a aplicação de filtros seletivos de harmônicos que aumentam a complexidade computacional do sistema. O controlador repetitivo tem sido cada vez mais aceito em diversos campos de pesquisa [17], [18].

Este artigo sugere o uso da técnica de controle repetitivo para regular a tensão da rede elétrica sobre uma carga sensível. Adicionalmente, é proposta a inclusão de um algoritmo de mínimos quadrados recursivo para operar em conjunto com o controle repetitivo [19]. O algoritmo de mínimos quadrados possibilita diferentes abordagens para a injeção de tensão através do compensador série. Neste artigo são destacadas duas destas abordagens, na primeira, a magnitude de tensão demandada para corrigir o afundamento de tensão é mínima, na segunda abordagem, a potência exigida do compensador série é mínima, que é adequada para sistemas com baterias que fornecem a tensão CC do inversor de frequência.

## II. MODELO E PROJETO DO SISTEMA COMPENSADOR SÉRIE

Uma visão geral do compensador série proposto neste trabalho está mostrada na Figura 1(a). O circuito monofásico equivalente está desenhado na Figura 1(b). Nesta figura, a tensão  $v_{pac}$  está aplicada sobre o ponto de acoplamento comum (PAC). A corrente  $i_s$  é produzida pela rede e é dividida em  $i$ , que supre a carga crítica, e  $i_r$ , que é entregue a todas as outras cargas conectadas ao mesmo barramento. A tensão  $u_{DVR}$  é a de compensação e  $v$  é a tensão aplicada à carga. Os parâmetros  $R$  e  $L$  são a resistência e a indutância de dispersão do transformador série do compensador.

Dada a nomenclatura anterior, a tensão de carga pode ser expressa por:

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

Com base nesta formulação, o controle proposto neste artigo está 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 de tensão (DVR) e se a frequência de

comutação é suficientemente elevada, esta pode ser modelada por um simples atraso  $G_1 = e^{-t_0 s}$ . 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 Figura 2, contém três entradas, das quais a corrente  $I$  e a tensão de acoplamento comum  $V_{pac}$  são variáveis da rede elétrica, enquanto  $V^*$  representa a tensão de referência a ser aplicada à carga crítica. A tensão  $U_{DVR}^*$  é fornecida pelo sistema de controle ao DVR.

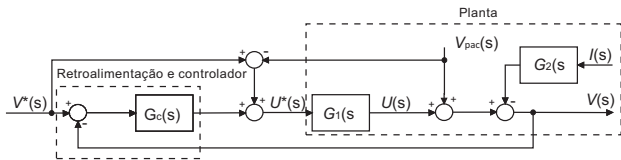


Fig. 2. Sistema de controle para produzir tensões de referência para o conversor de potência CC-CA.

Observando-se o diagrama de blocos, pode-se escrever:

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

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 [20], 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  $Q(s)$  a função de transferência que assegura a estabilidade do sistema com realimentação e  $\omega_1$  é a frequência fundamental da tensão da rede elétrica. Ao substituir (6) em (3)-(5) tem-se:

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

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

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

Observando 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 [21]. Para superar esta dificuldade,  $G_c(s)$  pode ser modificado para:

$$G_c(s) = \frac{F(s)e^{-(T - \hat{t}_0)s}}{1 - F(s)e^{-Ts}} \quad (10)$$

sendo  $F(s)$  um filtro passa-baixas,  $T$  o período da fundamental menos  $\beta$ , que é um parâmetro projetado com a restrição de ser menor do que um período da fundamental da rede, isto é,  $\beta < (2\pi/\omega_1)$ , e  $\hat{t}_0$  é o tempo de atraso estimado para o compensador. Essa modificação para o controlador assegura a mitigação harmônica e uma reprodução limpa das referências.

### III. FLUXO DE POTÊNCIA COM INSERÇÃO DO COMPENSADOR

A Figura 3 mostra o esquemático do fluxo de potência complexa no sistema que envolve a rede elétrica, o compensador série e a carga.

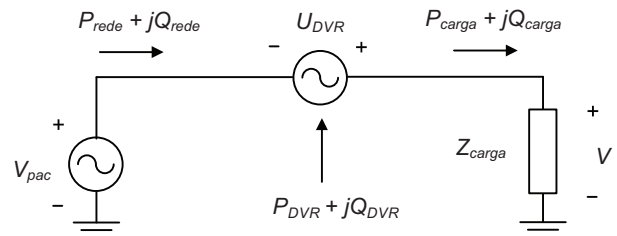


Fig. 3. Fluxo de potência ativa e reativa com a inserção de um compensador série.

A tensão injetada  $U_{DVR}$  pode ser realizada de três modos diferentes. Estes modos dependem da potência do compensador e do tipo de carga a ser protegida.

Os modos de injeção de tensão estão ilustrados na Figura 4.

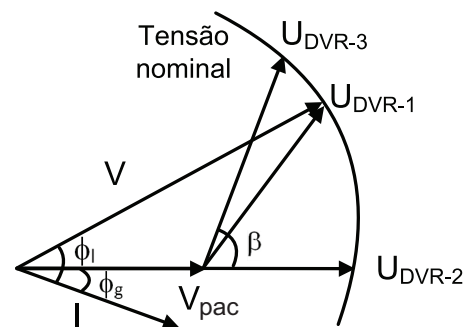


Fig. 4. Diferentes tipos de correções de afundamentos de tensão com saltos de fase.

No primeiro modo, a correção é feita para que a tensão na carga seja a mesma da tensão pré-afundamento. A vantagem deste modo é de evitar saltos de fase que podem ser danosos para as cargas sensíveis. No segundo modo de operação, a correção de tensão é feita com a tensão injetada em fase e em sincronismo com a tensão afundada. Esta estratégia demanda menor nível de tensão injetada. Portanto, esta é adequada para situações onde a tensão do barramento CC é limitada por níveis menores de tensão. No terceiro modo de operação, a tensão de injeção é configurada para extrair do compensador um mínimo de potência ativa. Esta é adequada no sistema

onde o barramento CC do inversor recebe fornecimento de baterias, pois permite um ciclo de vida maior. Além disso, o compensador é um equipamento instalado por consumidores. O gasto de potência ativa implica numa tarifa de energia mais onerosa. Todos estes modos de operação dependem do nível de tensão a ser compensada nas fases. Neste trabalho, estes parâmetros são calculados por um algoritmo de mínimos quadrados recursivo (MQR).

Em relação ao terceiro modo, algumas considerações precisam ser observadas para desenvolver a expressão da potência ativa injetada pelo compensador. Inicialmente, a expressão para a potência ativa fornecida pela rede e consumida pela carga são dadas respectivamente por:

$$P_{rede} = |V_{pac}| |I| \cos \phi_g \quad (11)$$

$$P_{carga} = |V| |I| \cos \phi_l. \quad (12)$$

A potência ativa injetada pelo compensador é a diferença entre (12) e (11). Portanto:

$$P_{dvr} = |V| |I| \left( \cos \phi_l - \frac{|V_{pac}|}{|V|} \cos \phi_g \right). \quad (13)$$

Estas equações podem ser expressas em valores por unidade com a potência base  $|V||I|$ . O compensador deve manter a tensão da carga no valor nominal, que é  $|V| = 1 pu$ . Portanto, (13) pode ser reescrita como:

$$P_{dvr} = f p_l - |V_{pac}| \cos \phi_g \quad (14)$$

com  $f p_l = \cos \phi_l$ . Analisando (14), existem duas possibilidades para a injeção de potência ativa mínima a partir do compensador. No primeiro caso, deve-se anular a potência ativa. Para o segundo caso, a potência nula não é realizável e a ideia é configurar um valor mínimo advindo do compensador. Portanto, no primeiro caso, considerando  $P_{dvr} = 0$ , a seguinte afirmação é válida:

$$0 = f p_l - |V_{pac}| \cos \phi_g \quad (15)$$

e portanto,

$$\cos \phi_g = \left( \frac{f p_l}{|V_{pac}|} \right) \quad (16)$$

$$\phi_g = \arccos \left( \frac{f p_l}{|V_{pac}|} \right). \quad (17)$$

Considerando que,  $0 < \cos \phi_g \leq 1$ , a condição para injeção nula de potência é dado por:

$$|V_{pac}| \geq f p_l \quad (18)$$

ou seja, a tensão afundada por unidade não pode ser menor do que o fator de potência da carga.

O segundo caso de injeção de potência aplica-se quando (18) não é verificado. Isto significa que a rede deve fornecer um máximo de potência, isto é, a tensão e a corrente da rede estão em fase e  $\cos \phi_g = 1$ , ou  $\phi_g = 0^\circ$ . A potência

advinda do compensador pode ser escrita como:

$$P_{dvr}^{min} = f p_l - |V_{pac}|. \quad (19)$$

Se  $P_{dvr}$  fosse negativo, o compensador absorveria potência da rede e esta condição deve ser evitada. O sistema de controle repetitivo proposto opera de forma que se evite a absorção, e para produzir a tensão injetada  $U_{DVR}$  no intuito de manter a tensão nominal na carga. Em busca deste propósito, a partir do circuito mostrado na Figura 3, pode-se escrever:

$$U_{DVR} = V - V_{pac}. \quad (20)$$

Em termos fasoriais, (20) pode ser expressa como:

$$|U_{DVR}| \angle \beta = 1 \angle (\phi_l - \phi_g) - (1 - |V_{pac}| \angle 0^\circ). \quad (21)$$

Considerando o caso onde a injeção de potência ativa é nula, as equações seguintes da amplitude e fase de  $U_{DVR}$  é:

$$|U_{DVR}^0| = \sqrt{|V_{pac}|^2 + 2(1 - |V_{pac}|)[1 - \cos(\phi_l - \phi_g)]} \quad (22)$$

$$\beta^0 = \arctan \left[ \frac{\sin(\phi_l - \phi_g)}{\cos(\phi_l - \phi_g) - |V_{pac}|} \right]. \quad (23)$$

De forma similar, a situação que a injeção de potência ativa não pode ser nula, mas minimizada é caracterizada pelas seguintes expressões relacionadas com  $U_{DVR}$ :

$$|U_{DVR}^{min}| = \sqrt{|V_{pac}|^2 + 2(1 - |V_{pac}|)[1 - \cos \phi_l]} \quad (24)$$

$$\beta^{min} = \arctan \left[ \frac{\sin \phi_l}{\cos \phi_l - |V_{pac}|} \right]. \quad (25)$$

Na intenção de operar corretamente, neste trabalho, o sistema de controle proposto é combinado com o algoritmo de MQR adequado para estimações rápidas de parâmetros de sinais senoidais [22]. O algoritmo é aplicado para estimar a tensão de referência  $V^*$  indicada na Figura 2. Isto é esclarecido na próxima seção.

#### IV. ESTIMAÇÃO DA REFERÊNCIA DE TENSÃO PARA O CONTROLE REPETITIVO

No intuito de estimar a tensão de referência  $V^*$  para o sistema de controle, é necessário considerar o esquema desenhado na Figura 5. Nota-se que a estimação pelo método MQR é aplicado para obter a amplitude da tensão de rede. Esta magnitude é subtraída de um determinado valor nominal, de modo que obtém-se a magnitude da tensão de compensação. Posteriormente, é multiplicada por uma função cosseno com a fase inicial  $\beta$ , que é calculada em (23) ou (25), dependendo se a potência injetada é nula ou mínima. Finalmente, a tensão injetada  $U_{DVR}$  subtraída da tensão da rede medida produz  $V^*$ .

O estimador MQR utilizado neste trabalho determina a amplitude da tensão  $|V_{pac}|$ . Adicionalmente, é utilizado para a extração da fase da corrente,  $\phi_g$ , necessária na determinação de  $|U_{DVR}^0|$  e  $\beta^0$  em (22) e (23), respectivamente, e a fase  $\phi_l$ . O MQR é baseado em um modelo de sinal composto pela soma de  $p$  senoides, com uma sendo a fundamental e as outras as harmônicas. Isto assegura a robustez do estimador levando em conta os harmônicos. Nomeando os sinais de tensão por  $v_g$ , o

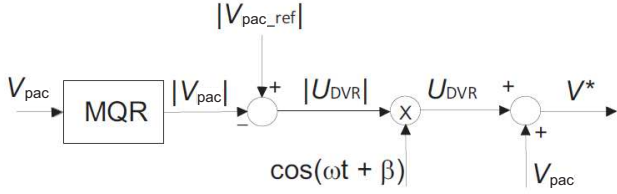


Fig. 5. Estimação da tensão de referência.

modelo  $\hat{v}_g$  é expresso por:

$$\hat{v}_g(n\Delta t) = \hat{v}_g[n] = \sum_m^p (V_{Gm} \cos(m\omega_0 n\Delta t + \alpha)) \quad (26)$$

onde  $V_{Gm}$  e  $\alpha_m$  são a amplitude e a fase da senóide de frequência  $m\omega_0$ , respectivamente.  $\Delta t$  é o período de amostragem.

No intuito de adaptar (26) para o algoritmo de MQR, pode ser utilizado uma bem conhecida identidade trigonométrica para escrever:

$$\hat{v}_g[n] = \sum_{m=1}^p [V_{Gm}^c \cos(m\omega_0 n\Delta t) - V_{Gm}^s \sin(m\omega_0 n\Delta t)] \quad (27)$$

sendo que  $V_{GM}^c$  e  $V_{GM}^s$  estão relacionados ao modelo (26) por meio das equações:

$$V_{GM} = \sqrt{(V_{GM}^c)^2 + (V_{GM}^s)^2} \quad (28)$$

$$\alpha_m = -\arctan \frac{V_{GM}^s}{V_{GM}^c}. \quad (29)$$

A equação (27) pode ser reescrita como:

$$\hat{v}_g[n] = \phi_n^T \varphi_n \quad (30)$$

na qual  $\phi_n$  é um vetor de regressores dado por:

$$\phi_n = \begin{bmatrix} \cos(\omega_0 n\Delta t) \\ \sin(\omega_0 n\Delta t) \\ \dots \\ \cos(p\omega_0 n\Delta t) \\ \sin(p\omega_0 n\Delta t) \end{bmatrix} \quad (31)$$

e  $\varphi_n$  é um vetor de parâmetros a ser determinado e cujos elementos são dados por:

$$\varphi_n = [V_{1c} \ V_{1s} \ \dots \ V_{pc} \ V_{ps}]^T. \quad (32)$$

A discordância entre  $v_g$  e  $\hat{v}_g$  no instante  $t_n$  é o erro  $e[n]$ , definido por:

$$e[n] = v_g[n] - \hat{v}_g[n]. \quad (33)$$

O algoritmo de MQR atualiza a estimativa dos parâmetros de acordo com a equação [23]:

$$\hat{\varphi}_{n+1} = \hat{\varphi}_n + \mathbf{K}_{n+1} e[n+1] \quad (34)$$

sendo  $\mathbf{K}_{n+1}$  é um ganho definido por:

$$\mathbf{K}_n = \mathbf{P}_n \phi_n \quad (35)$$

e  $\mathbf{P}_n$  a matriz covariância a ser atualizada pela seguinte

equação recursiva:

$$\mathbf{P}_{n+1} = \mathbf{P}_n - \frac{\mathbf{P}_n \phi_n \phi_n^T \mathbf{P}_n}{1 + \phi_n^T \mathbf{P}_n \phi_n}. \quad (36)$$

A matriz covariância é inicialmente ajustada para ser diagonal com os elementos de valores elevados em comparação com os valores dos parâmetros a serem estimados. Durante a aplicação do MQR, como a estimativa converge para os valores dos parâmetros, a norma de  $\mathbf{P}_n$  é reduzida. Isto significa que o algoritmo é menos adaptável. Existem várias maneiras de prover a adaptabilidade para o algoritmo. A selecionada aqui é denominada *Modified Random Walking* (MRW) [24]. Nesta técnica, a matriz covariância é atualizada de acordo com a seguinte regra:

$$\mathbf{P}_{n+1} = \begin{cases} \mathbf{P}_n - \frac{\mathbf{P}_n \phi_n \phi_n^T \mathbf{P}_n}{1 + \phi_n^T \mathbf{P}_n \phi_n} & \text{if } |e[n]| \leq \varepsilon \\ \mathbf{P}_n + \mathbf{R} & \text{if } |e[n]| > \varepsilon \end{cases} \quad (37)$$

onde  $\varepsilon$  é ajustado arbitrariamente. É importante mencionar que para cada período de amostragem, a amplitude da tensão da rede é fornecida por (28).

## V. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Os parâmetros do controle repetitivo proposto foram projetados adequadamente. As simulações discutidas neste trabalho foram realizadas na plataforma *Simulink*. Os dois primeiros cenários são testados para checar o desempenho do sistema. Nos dois últimos, as injeções de tensão acontecem de acordo com os modos 2 e 3 da Figura 4.

No primeiro cenário, o afundamento ocorre em uma das fases da rede. A Figura 6 mostra a tensão afundada e corrigida no mesmo gráfico. Os 50% de afundamento é iniciado em 20ms e finalizado em 80ms. Como pode ser observado, a correção é praticamente sem falhas. O tempo entre o início do afundamento e o alcance do regime permanente é de cerca de 0,2ms e o pico de tensão no transitório é 5% da tensão nominal. Na extinção do afundamento, o pico do transitório é mais intenso, mas também rapidamente é eliminado.

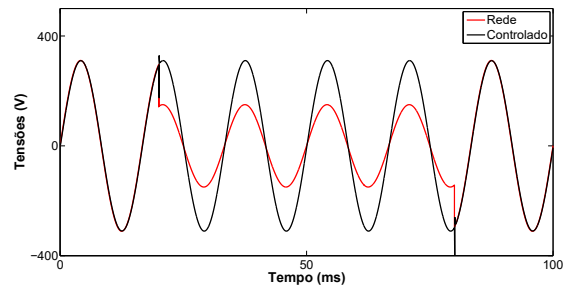


Fig. 6. Tensões de saída afundada e controlada.

O segundo cenário é uma combinação das duas perturbações prévias, como mostrado na Figura 7. O sistema de controle atua para mitigar os harmônicos juntamente com o afundamento e os resultados são completamente satisfatórios. A tensão da rede apresentou um total de distorção harmônica (THD) de 24,63%, já a tensão controlada aplicada à carga tem THD igual à 0,97%. O transitório entre o início do

afundamento e do regime permanente é de 0,2ms e o pico de tensão é 4,8% da tensão nominal. Estes parâmetros corroboram a eficácia do método de controle proposto.

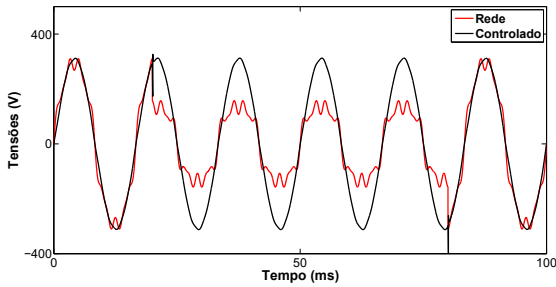


Fig. 7. Tensões de saída distorcida/afundada e controlada.

O segundo conjunto de resultados utilizam o mesmo controle projetado anteriormente. Além disso, as tensões de referência a serem calculadas pelo controle seguem os métodos de inserção para a compensação. As Figuras 8 e 9 ilustram os resultados.

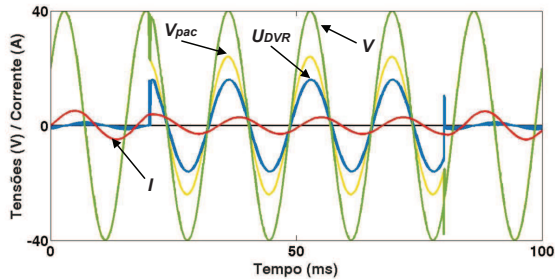


Fig. 8. Correção da tensão de carga utilizando o método de otimização da tensão.

Como pode ser observado, a Figura 8 ilustra o caso em que a tensão está em fase com a tensão da rede. A tensão afundada é cerca de 60% da nominal. A técnica de MQR estima corretamente a amplitude e fase da tensão de compensação e a fase da tensão de carga é igual a fase da tensão afundada na rede. A Figura 9 mostra o cenário em que o compensador atua no modo de mínima injeção de potência.

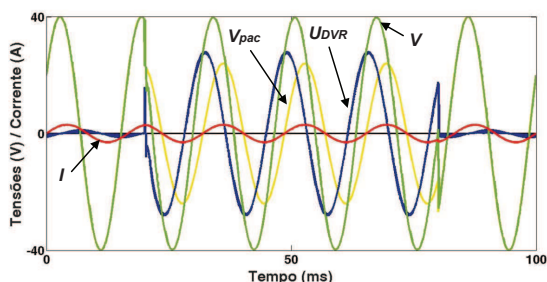


Fig. 9. Correção da tensão de carga utilizando o método de otimização da potência.

Como apontado na última seção, existem duas possíveis formas de corrigir a tensão na carga, dependendo da amplitude do afundamento e o fator de potência da carga. No cenário criado neste trabalho, o valor do fator de potência da carga é 0.9. O afundamento é o mesmo como mostrado na Figura 8, isto é  $V_{pac} < f_{pi}$ . Desta forma, a compensação de tensão

$U_{DVR}$  é construída de (24) e (25). Observando ainda a Figura 9, é notório que a tensão injetada não está sincronizada nem com a tensão da rede nem com a tensão da carga. No entanto, esta abordagem assegura que a potência ativa demandada do compensador é mínima. Isto é executado ao custo de um nível de amplitude mais elevado da tensão injetada, quando comparado ao caso da Figura 8. O tempo de resposta do início do afundamento até o do regime permanente é de 0,05ms nas Figuras 8 e 9.

A Figura 10 mostra a evolução das potências ativas para os dois métodos durante o tempo de simulação.

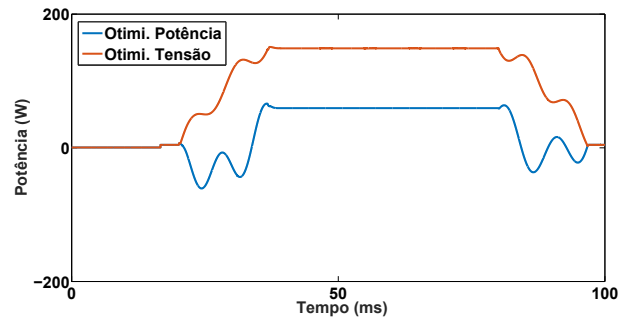


Fig. 10. Evolução das potências ativas na faixa de tempo simulada.

Estes cenários são obtidos com injeção de tensão obtida pelos modos de mínima tensão e também de mínima potência. As curvas mostram que durante o tempo da falta, o modo de mínima potência demanda cerca de metade da potência requerida comparado ao modo da mínima tensão.

É importante observar que no caso da Otimização pela Potência, durante grande parte do período transitório, o nível de potência tem valor negativo. Isto significa que o compensador absorve potência, o que faz a energia ativa fluir da rede para o dispositivo nestes intervalos. A potência absorvida pelo equipamento pode trazer danos e ter como uma das consequências diminuição de sua vida útil, apesar do tempo de ocorrência ser bastante curto. Esta potência negativa pode ser evitada, fazendo uso de dispositivos de proteção como um diodo. Isto evitaria o fluxo de corrente no sentido da rede para o compensador. Vale observar também que no caso da Otimização pela Tensão não houve valores negativos, o que não impede de que em algum outro cenário não ocorra. O valor negativo surge dependendo do instante de ocorrência do evento na forma de onda. Como no cenário apresentado, as tensões estão defasadas uma em relação à outra e cada transitório tem um comportamento diferente.

## VI. VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL

Uma plataforma experimental foi desenvolvida no intuito de verificar os resultados simulados e o sistema de controle proposto. Uma visão geral dos estágios frontal e traseiro está mostrada na Figura 11.

O estágio frontal contém os dispositivos de potência, incluindo o inversor de tensão (VSI) de fabricação Semikron, os transformadores que são conectados à rede, os filtros LC e as cargas RL. O estágio traseiro é composto pelo sistema de aquisição de dados, sensores de corrente e de tensão e o controlador digital de sinais (DSC) TMS320F28335 da Texas Instruments. Para produzir os resultados mostrados nesta

seção são medidas as tensões da carga e da rede. É medida também a corrente que passa pelos enrolamentos primários do transformador. Este enrolamento é conectado a fase da rede onde ocorrem os afundamentos. O controlador repetitivo é digitalmente realizado pelo método de integração trapezoidal. O valor do período de amostragem é de  $100\mu s$ . Os sinais PWM são gerados no DSC por meio de uma modulação escalar digital descrito em [25] para comutar os IGBTs do inversor de tensão.

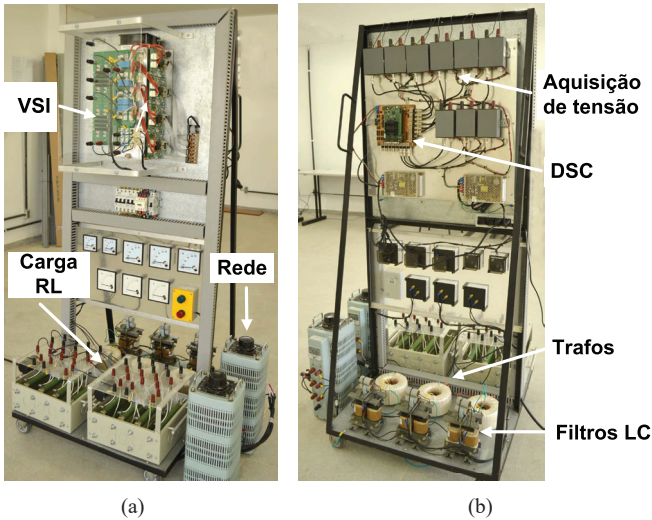


Fig. 11. Plataforma experimental em escala laboratorial. (a) Estágio frontal. (b) Estágio traseiro.

Para uma melhor visualização e entendimento de como o sistema de medição é configurado juntamente com o sistema de controle, na Figura 12 é mostrado um diagrama esquemático.

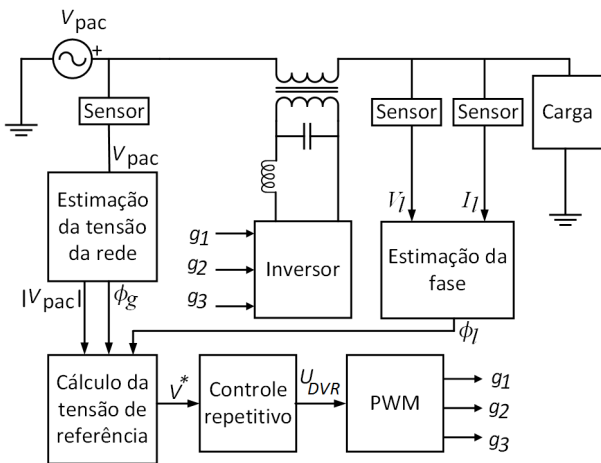


Fig. 12. Diagrama esquemático do sistema de medição e controle para a compensação de tensão.

Para mostrar a efetividade do método de controle proposto em mitigar outras interferências além de afundamentos, na Figura 13 é exibido o resultado da tela do osciloscópio onde o compensador série regula as distorções harmônicas advindas da rede.

A curva em verde representa a tensão sobre a carga. É

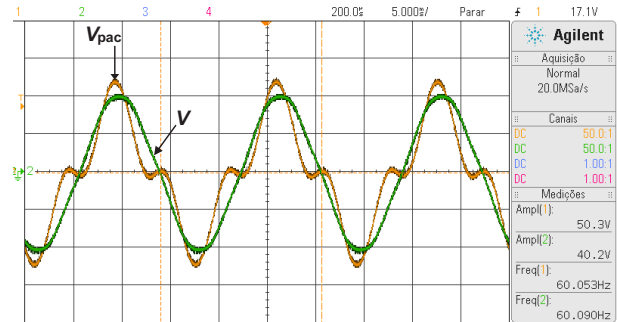


Fig. 13. Tensões da rede e carga.

perceptível a redução da distorção nesta tensão,  $V$ , utilizando-se o controle proposto.

A Figura 14 ilustra um resultado da estratégia de mínima tensão. Como esperado, a tensão injetada é sincronizada com a tensão da rede, assegurando mínima amplitude. É possível perceber que a corrente é defasada em relação à tensão da carga, a qual é indutiva. Nesta mesma figura, ainda pode ser observado que a corrente  $I$  tem uma pequena distorção. Isso acontece porque o nível de corrente utilizado satura os indutores da carga. No entanto, isso não prejudica em nada os propósitos de controle, uma vez que as tensões é que são corrigidas pelo compensador série.

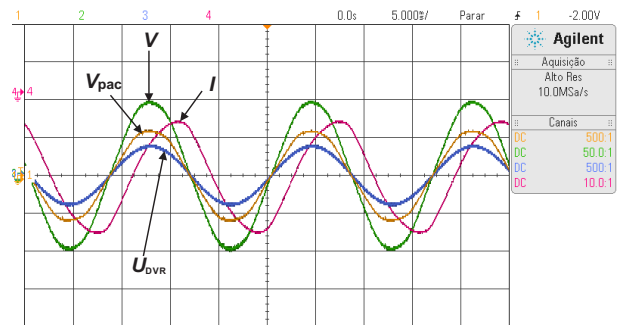


Fig. 14. Mitigação da tensão afundada utilizando o método da otimização de tensão.

A Figura 15 mostra o resultado para a abordagem na qual o compensador série injeta um mínimo de potência ativa na rede.

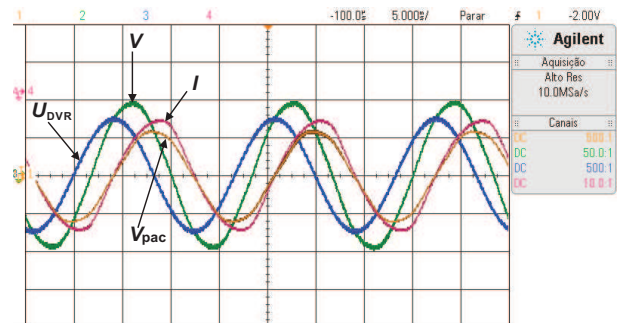


Fig. 15. Mitigação da tensão afundada pelo método da otimização da potência.

Pode ser observado que a corrente defasa próximo de 90 graus da tensão injetada, o qual indica que a potência injetada é bastante baixa.

## VII. CONCLUSÕES

Neste artigo foi proposto um método para proteger cargas sensíveis de interferências provenientes da rede elétrica. O método baseia-se em um compensador conectado em série com a carga a ser protegida. O compensador atua por meio de um controle repetitivo o qual é habilitado para rejeitar distorções harmônicas, afundamentos e elevações de tensão. A tensão injetada pelo compensador é sincronizada por uma técnica de mínimos quadrados recursiva adequada para responder rapidamente as tensões senoidais que sofrem faltas. A estabilidade do controle repetitivo é assegurada por um filtro passa-baixas o qual atenua os picos ressonantes acima da frequência de corte. A técnica dos mínimos quadrados permite o compensador funcionar com três estratégias diferentes de tensão de injeção. Neste trabalho são destacadas duas que demandam valores mínimos de potência ou tensão do compensador. A estratégia da mínima potência tem a limitação de requisitar níveis mais elevados de tensões injetadas, em contraste com as que injetam em fase com as tensões da rede. Além das simulações, uma bancada experimental foi montada e os resultados ratificam as previsões da teoria e demonstram a eficácia do método proposto.

## AGRADECIMENTOS

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

## REFERÊNCIAS

- [1] A. Banerji, S. K. Biswas, B. Singh, “Enhancing Quality of Power to Sensitive Loads With Microgrid”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 1, pp. 360–368, Jan./Feb. 2016.
- [2] C. Kumar, M. K. Mishra, “Operation and Control of an Improved Performance Interactive DSTATCOM”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 10, pp. 6024–6034, Oct. 2015.
- [3] C. Chen, J. Wang, F. Qiu, D. Zhao, “Resilient Distribution System by Microgrids Formation After Natural Disasters”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 2, pp. 958–966, Mar. 2016.
- [4] J. Varela, N. Hatzargyriou, L. J. Puglisi, G. Bissel, A. Abart, M. Rossi, R. Priewasser, “The Best of IGREENGrid Practices: A Distribution Network’s Contribution to Resiliency”, *IEEE Power Energy Magazine*, vol. 13, no. 3, pp. 81–89, May/June. 2016.
- [5] S. D. Manshadi, M. E. Khodayar, “Resilient Operation of Multiple Energy Carrier Microgrids”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 5, pp. 2283–2292, Sept. 2015.
- [6] A. A. Hussein, M. H. Ali, “Comparison among series compensators for transient stability enhancement of doubly fed induction generator based variable speed wind turbines”, *IET Renewable Power Generation*, vol. 10, no. 1, pp. 116–126, Jan. 2016.
- [7] G. A. Carlos, C. B. Jacobina, E. C. dos Santos, “Investigation on Dynamic Voltage Restorers With Two DC Links and Series Converters for Three-Phase Four-Wire Systems”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 2, pp. 1608–1620, Mar./Apr. 2016.
- [8] M. Shahabadi, H. Iman-Eini, “Improving the Performance of a Cascaded H-Bridge-Based Interline Dynamic Voltage Restorer”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 31, no. 3, pp. 1160–1167, Jun. 2016.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] S. R. Naidu, D. A. Fernandes, “Technique for simulating the steady-state response of power electronic converters”, *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 3, no. 5, pp. 437–447, May 2009.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] E. Twining, D. G. Holmes, “Grid Current Regulation of a Three-Phase Voltage Source Inverter With an LCL Input Filter”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 18, no. 3, pp. 888–895, May 2003.
- [15] R. Teodorescu, F. Blaabjerg, M. Liserre, P. C. Loh, “Proportional-resonant controllers and filters for grid-connected voltage-source converters”, *IEE Proceedings – Electric Power Applications*, vol. 153, no. 5, pp. 750–762, Sept. 2006.
- [16] Y. Yang, K. Zhou, F. Blaabjerg, “Current Harmonics From Single-Phase Grid-Connected Inverters Examination and Suppression”, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 4, no. 1, pp. 221–233, Mar. 2016.
- [17] W. Rohouma, P. Zanchetta, P. W. Wheeler, L. Empringham, “A Four-Leg Matrix Converter Ground Power Unit With Repetitive Voltage Control”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 4, pp. 2032–2040, Apr. 2015.
- [18] X. Nie, H. Qiao, B. Zhang, X. Huang, “A Nonlocal TV-Based Variational Method for PolSAR Data Speckle Reduction”, *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 25, no. 6, pp. 2032–2040, Jun. 2016.



- [19] R. Arablouei, K. Doğansay, S. Werner, “Recursive Total Least-Squares Algorithm Based on Inverse Power Method and Dichotomous Coordinate-Descent Iterations”, *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 63, no. 8, pp. 1941 – 1949, Apr. 2015.
- [20] S. Hara, Y. Yammamoto, 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] L. Ljung, *System Identification: Theory for the User*, 2 ed., Prentice Hall PTR, 1999.
- [24] F. F. Costa, D. A. Formiga, R. R. Ferreira, T. Sousa, F. B. Costa, “A Recursive Least-Squares Aided by Pre-filtering for Phasor-Estimation in Distance Protection”, in *Powertech*, pp. 1–6, 2013.
- [25] D. A. Fernandes, F. F. Costa, E. C. Santos, “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

**Darlan Alexandria Fernandes** recebeu o título de engenheiro eletricitista 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 da 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 Fragoso 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.

**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 sua tese de doutorado em engenharia elétrica na UFCG. Seus interesses de pesquisa estão nas aplicações de controle em dispositivos de eletrônica de potência e eletrônica industrial.

**Maurício Beltrão 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.