

RESTAURAÇÃO DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO EM REDES ELÉTRICAS NÃO-SENOIDAIAS

João R. S. Martins¹, Darlan A. Fernandes², Fabiano F. Costa³, Maurício B. R. Corrêa⁴,
Edison R. C. da Silva^{2,4}

¹Universidade Federal de Alagoas, Maceió – AL

²Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa – PB

³Universidade Federal da Bahia, Salvador – BA

⁴Universidade Federal de Campina Grande – PB

e-mail: joao@ic.ufal.br, [darlan, edison.roberto]@cear.ufpb.br, fabiano.costa@ufba.br, mbrcorrea@dee.ufcg.edu.br

Resumo – Este trabalho apresenta um método de inserção de tensão na rede elétrica com distorções harmônicas para proteção de cargas sensíveis a afundamentos de tensão de curta duração. O objetivo é recuperar o nível de tensão nominal na carga realizando a restauração apenas da componente de frequência fundamental sem que as componentes harmônicas sejam compensadas, por meio de um restaurador dinâmico de tensão (DVR). Correções realizadas desta forma se justificam pois o DVR é um equipamento dedicado a restaurar a amplitude da carga sensível para seu valor nominal, a partir de variações rápidas advindas da rede elétrica. A correção das distorções não é adequada para este equipamento pois os harmônicos são problemas permanentes e originados de não-linearidades das cargas elétricas. Portanto, as baterias que suprem o DVR não sustentam as correções de problemas permanentes, apenas de variações rápidas. Isto permite um prolongamento na vida útil delas, que é um item importante neste tipo de compensador. Para estes propósitos é desenvolvida uma estimação recursiva por mínimos quadrados adequada a tensões com conteúdo harmônico e aqui denominada de HMQR. A construção da tensão de referência a ser produzida pelo conversor CC-CA também leva em conta o sincronismo com a componente fundamental da rede, o que permite uma otimização do nível de tensão utilizado do barramento CC. Cenários de correções apenas com a inserção da fundamental, bem como com conteúdo harmônico são testados em simulação para comparação de desempenho no uso da potência do compensador. Estes mesmos cenários também são testados em uma plataforma experimental desenvolvida em laboratório para confirmação da proposta.

Palavras-chave – Afundamentos, Compensação de Tensão, Controle de Tensão, Harmônicos, Mínimos Quadrados Recursivo.

VOLTAGE SAG COMPENSATION IN NON-SINUSOIDAL ELECTRICAL GRIDS

Abstract – This work presents a voltage insertion method into electrical grid with harmonic distortions to

protect sensitive loads from short-term voltage sags. The objective is to recover the rated voltage level on the load by performing the restoration of the fundamental frequency component without the harmonic components being compensated, through a dynamic voltage restorer (DVR). Corrections by this way are justified as the DVR is a device dedicated to restore the amplitude of the sensitive load to its nominal value, based on rapid variations from the electrical grid. The correction of distortions is not suitable for this equipment as harmonics are permanent problems and originated from non-linearities of electrical loads. Therefore, the batteries that supply the DVR do not support corrections of permanent problems, only of rapid variations. This allows an extension in the batteries life, which is a part of the compensator system. For this purpose, a suitable recursive least squares estimation for voltages with harmonic content is developed, and here named HMQR. The construction of the reference voltage to be produced by the DC-AC converter also takes into account the synchronism with the fundamental component of the grid, which allows an optimization of the voltage level used on the DC-link. Mitigation scenarios with the insertion of the fundamental only, as well as with harmonic content are tested in simulation to perform comparison of the power compensator. These same scenarios are also carried out on an experimental laboratory-scale platform to confirm the proposal.

Keywords – Harmonics, Recursive Least-Square, Voltage Compensation, Voltage Control, Voltage Sag.

I. INTRODUÇÃO

Apesar dos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica terem alcançado um nível elevado de confiabilidade, perturbações elétricas não podem ser inteiramente evitadas. Algumas cargas podem não suportar perturbações advindas do fornecimento de tensão com consequências econômicas e de segurança, e portanto, a qualidade da energia elétrica é de suma importância.

Ainda no âmbito da qualidade da energia elétrica, dentre as perturbações que afetam os sistemas de energia, aquelas associadas à curta duração são as mais frequentes [1], [2]. O impacto das perturbações de tensão nas economias dos países nos últimos anos tem sido evidenciado por vários levantamentos de custos realizados por diferentes entidades,

Manuscript received 05/13/2021; first revision 09/02/2021; accepted for publication 10/21/2021, by recommendation of Editor Demercil de Souza Oliveira Jr.

e os afundamentos de tensão são os que ocorrem com maior frequência [3], [4]. No Brasil, as concessionárias de energia elétrica estão sujeitas a punições quando os níveis de tensão em conjunto com a duração do evento transpassam os limites estabelecidos na resolução normativa da ANEEL [5]. Caso os limites não sejam infringidos, as concessionárias não sofrem sanções, mesmo que o evento exista. Neste caso, os dispositivos configurados para realizarem a mitigação do evento não necessitam atuar.

Outro importante distúrbio na qualidade da energia são os harmônicos no sistema elétrico. As cargas não-lineares são as responsáveis pelo surgimento de formas de onda não-senoidais na rede elétrica. Ao mesmo tempo, e contrariamente a um cenário com menos distorções, os dispositivos eletrônicos de potência vêm crescendo em número para atender as recentes demandas de processamento das gerações de energia descentralizadas nas matrizes energéticas em escala mundial. Também, dispositivos não-lineares e de menor porte têm sido incorporados a cargas domésticas e industriais, e contribuem para a contaminação harmônica das redes elétricas [6]. Os harmônicos podem causar defeitos em cargas controladas, aquecimento de transformadores e falhas em capacitores [7]. A produção de pulsos de torque e sobreaquecimento de máquinas podem também serem atribuídos aos harmônicos [8].

Dentre algumas alternativas para assegurar a qualidade de suprimento de energia para a carga, o restaurador dinâmico de tensão provou ser eficiente e vantajoso [9], [10]. Este equipamento protege cargas críticas contra distúrbios de tensão da rede, impondo, por meio de transformadores em série com a carga, níveis de tensão de compensação de forma que a carga seja protegida e mantenha tensões senoidais com frequência constante.

A principal função de um DVR é proteger cargas críticas de afundamentos e elevações de tensão [11]–[15], que são classificados como variações rápidas na rede. Porém, esses sistemas têm seus desempenhos comprometidos na presença de tensões com distorções harmônicas [16], [17]. Diferentemente das variações rápidas, as distorções harmônicas são um problema de regime permanente. Desta forma, o DVR não deve corrigi-las, pois também estaria atuando permanentemente, reduzindo a vida útil da bateria ou mesmo tornando este sistema de armazenamento incapaz de atender a uma demanda contínua de correção.

Na literatura especializada, algumas técnicas para estimação do afundamento são apresentadas [18]–[20]. No geral, as técnicas necessitam de uma rápida estimação dada a natureza transitória dos afundamentos de tensão. Elas satisfazem esse critério, mas não contemplam a detecção do nível do afundamento quando a tensão possui harmônicos.

Outras técnicas para estimação de afundamentos e harmônicos têm sido apresentadas e com bons desempenhos quando utilizadas individualmente para cada um dos eventos. Em [21] é apresentado um método concebido para a estimação de harmônicos. No trabalho, o método é adaptado para estimar também quedas de tensão e um conjunto de resultados apresentados têm uma precisão elevada na correção e detecção, e também realizado em curto intervalo de tempo. No entanto, não é apresentado nenhum cenário com os dois

eventos ocorrendo simultaneamente para teste de desempenho do método. Um outro trabalho que contempla a detecção dos afundamentos é apresentado em [22]. A detecção é bem sucedida e calculada como uma média das componentes de eixo direto e em quadratura, que necessita de meio ciclo da frequência fundamental. No entanto, os harmônicos considerados nas tensões não são advindos da rede, mas apenas os que eventualmente surgem no início e final do evento de variação rápida. O método apresentado em [23] utiliza uma estimação por mínimos quadrados para a detecção do afundamento. Os resultados mostram que o método atende os requisitos de cálculo da amplitude da tensão afundada combinado com uma resposta rápida, dentro do tempo esperado e determinado pelas normas. Para que o método fosse aplicado a afundamentos com tensões distorcidas seria necessária a inclusão de uma técnica adicional para que a estimação não sofresse deterioração.

Este artigo discute o uso de uma técnica de estimação de harmônicos para separar a fundamental das componentes de frequências mais elevadas em sistemas com ocorrência simultânea de afundamentos de tensão e distorções harmônicas, mas que realiza apenas a restauração da componente fundamental. Para tanto, uma técnica de mínimos quadrados recursivo é elaborada e utilizada como parte do sistema de controle do DVR e é adequada para este propósito, uma vez que realiza as estimações dentro de uma faixa de tempo menor que meio ciclo do período da fundamental. É necessário monitorar continuamente as tensões da rede elétrica e assegurar respostas rápidas e precisas para a amplitude e fase das formas de onda estimadas. A partir dessa estimação, o controle irá atuar para garantir um melhoramento na qualidade de energia do sistema. Sendo assim, a principal contribuição deste trabalho está no método utilizado para a compensação série. A partir de um cenário em que a carga é alimentada com tensões da rede com afundamentos e distorções, o método de correção restaura a amplitude apenas da fundamental, e ainda, com inserção de tensão em fase para que seja utilizado um nível de tensão do barramento CC otimizado. A ferramenta de estimação recursiva é desenvolvida para atender estes propósitos.

Na seção seguinte, o método de estimação da tensão fundamental é apresentado.

II. ESTIMAÇÃO DA TENSÃO DA REDE COM DISTORÇÃO HARMÔNICA

Nesta seção é descrito um algoritmo para calcular a amplitude e fase da tensão CA distorcida. A componente fundamental:

$$v(t) = V_{p1} \cos(\omega_1 t + \phi_1) \quad (1)$$

pode ser estimada por:

$$v(t) = X_1^c \cos(\omega t) + X_1^s \sin(\omega t) \quad (2)$$

ou

$$v(t) = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1^c \\ X_1^s \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$v(t) = \varphi \theta \quad (4)$$

sendo X_1 as amplitudes a serem estimadas, φ o vetor de regressores e θ o vetor de parâmetros. Nesta representação, as amplitudes são funções de V_{p1} e ϕ_1 e descritas como:

$$X_1^c = V_{p1} \cos \phi_1 \quad (5)$$

$$X_1^s = -V_{p1} \sin \phi_1. \quad (6)$$

As equações (5) e (6) são lineares em relação à $v(t)$. Assim, um algoritmo de estimação linear pode ser usado. Neste trabalho é utilizado um algoritmo de mínimos quadrados recursivo (MQR), e a relação:

$$V_{p1} = \sqrt{(X_1^c)^2 + (X_1^s)^2} \quad (7)$$

$$\phi_1 = -\arctan(X_1^s/X_1^c) \quad (8)$$

é extraída. Para harmônicos múltiplos, a tensão $v(t)$ pode ser escrita como segue:

$$v(t) = V_{p1} \cos(\omega_1 t + \phi_1) + V_{p2} \cos(\omega_2 t + \phi_2) + V_{p3} \cos(\omega_3 t + \phi_3) + \dots + V_{pn} \cos(\omega_n t + \phi_n) \quad (9)$$

no qual V_{pn} é a amplitude do n -ésimo harmônico e ϕ_n é o respectivo ângulo de fase.

Os vetores φ_k e θ podem ser expressos por:

$$\varphi_k = [\cos(\omega_1 t_k) \quad \sin(\omega_1 t_k) \quad \dots \quad \cos(\omega_n t_k) \quad \sin(\omega_n t_k)] \quad (10)$$

sendo φ_k o vetor dos regressores no instante t_k , e

$$\theta = [X_1^c \quad X_1^s \quad X_2^c \quad X_2^s \quad \dots \quad X_n^c \quad X_n^s]^T. \quad (11)$$

O uso do algoritmo MQR permite a estimação dos parâmetros em (11). Assim, as amplitudes e fases das componentes de tensão podem ser determinadas por (7) e (8) respectivamente. Desta forma, a tensão \hat{v} é estimada, e para cada instante t_k , o erro pode ser calculado por:

$$e[k] = v[k] - \hat{v}[k]. \quad (12)$$

O critério de parada da estimação é definido como sendo 10^{-3} para o valor do erro.

O parâmetro θ pode ser estimado pela seguinte equação:

$$\hat{\theta}_k = \hat{\theta}_{k-1} + \mathbf{P}_k \varphi_k e[k], \quad (13)$$

sendo \mathbf{P}_k a matriz de covariância que também é atualizada:

$$\mathbf{P}_k = \mathbf{P}_{k-1} - \frac{\mathbf{P}_{k-1} \varphi_{k-1} \varphi_{k-1}^T \mathbf{P}_{k-1}}{1 + \varphi_{k-1}^T \mathbf{P}_{k-1} \varphi_{k-1}}. \quad (14)$$

O laço do algoritmo de MQR consiste em resolver as equações (12), (13) e (14). Com esta nova função, o algoritmo de estimação passa a ser doravante denominado de HMQR (Harmônico-MQR) e que ainda possui a vantagem de não conter atrasos, comum a filtros, e melhora o desempenho do sistema de controle utilizado.

Nos padrões internacionais IEC STD 61000-3-6 e IEEE STD 519 e também no brasileiro Prodist [5], a diminuição da tensão passa a ser considerada um afundamento quando a amplitude diminui 10% em relação ao valor nominal.

Um método para a detecção deste limite, em conjunto com um algoritmo MQR similar ao apresentado nesta seção, foi apresentado e avaliado em [24]. A detecção é indicada por um sinal lógico que usa uma técnica de janela com média móvel. Além disso, esta configuração incrementa a sensibilidade do método e permite que o DVR atue apenas quando necessário.

III. SISTEMA COMPENSADOR E CONTROLE

O esquemático do sistema em consideração é mostrado na Figura 1. Este é um sistema monofásico equivalente de

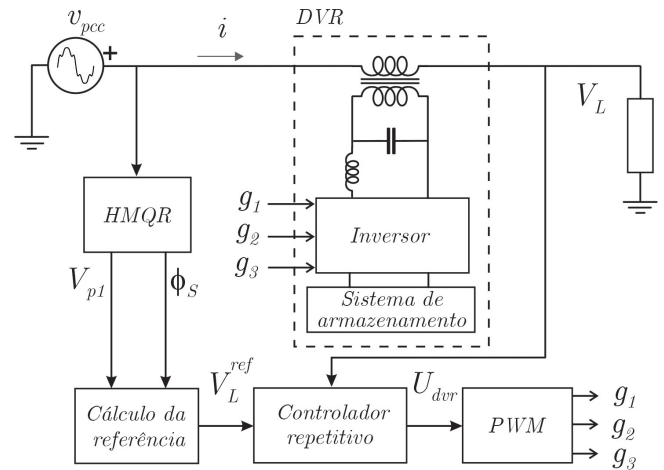


Fig. 1. Esquema monofásico equivalente de compensação da rede elétrica para proteção da carga sensível.

compensação da rede elétrica para carga sensível. O DVR está alocado entre a rede e a carga. Ele consiste de um conversor CC-CA baseado em IGBTs, um sistema de armazenamento de energia, filtros LC e transformadores para injetar tensão em sua saída. A tensão da rede, v_{pcc} , é o ponto de conexão comum (PCC). A corrente i supre a carga sensível. A tensão do DVR é U_{dvr} , e V_L é a tensão da carga. Os parâmetros associados com o transformador de acoplamento são a resistência e a indutância de dispersão.

O sistema de aquisição de dados e controle também estão mostrados na Figura 1. Consistem de sensores para medição de tensão, um bloco para estimação de parâmetros da tensão medida, um outro de controle para determinar a tensão de referência. A ação de controle é aplicada no inversor.

Dada a nomenclatura, a tensão da carga pode ser expressa por:

$$V_L(t) = v_{pcc}(t) - Ri(t) - L \frac{d}{dt} i(t) + U_{dvr}(t). \quad (15)$$

De forma mais detalhada, o controle apresentado funciona a partir da medição da tensão da rede v_{pcc} , que é a variável de entrada para o esquema. Então é necessário extrair o módulo e fase desta tensão para atender a estratégia proposta de produção da tensão a ser produzida pelo inversor, U_{dvr} . No caso em que o afundamento da rede é acompanhado de distorção harmônica é necessário extrair a componente fundamental para que a restauração seja realizada apenas nela. O procedimento correto para o restaurador de tensão é que as demais componentes harmônicas não sejam corrigidas. Caso esse fosse o propósito, a estrutura de um filtro ativo de potência seria mais adequada. A tensão U_{dvr} é a referência para a

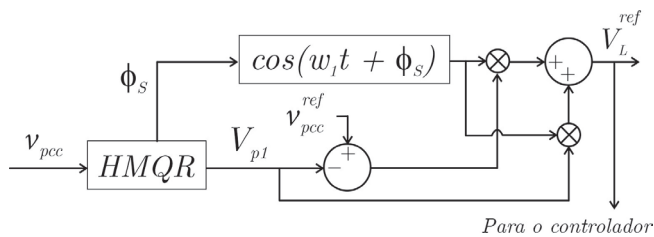


Fig. 2. Esquema de controle para regular a tensão da carga.

produção dos sinais PWM necessários para o gatilhamento dos IGBTs do inversor. Como o conversor utilizado neste trabalho é um de quatro braços e que produz tensões de dois níveis, uma estratégia de modulação escalar adequada é apresentada em [25]. A estrutura para extração da fundamental e produção da tensão de referência na carga está apresentada na Figura 2. A tensão de referência produzida segue para um controlador com o objetivo de melhorar a dinâmica da resposta e garantir erro nulo em regime permanente. Neste trabalho, o controlador utilizado é um repetitivo pois a realimentação da rede contém distorções e trata-se de um controle adequado para este tipo de aplicação. Maiores detalhes deste controle estão descritos em [14], [15].

O bloco *HMQR* contém o algoritmo que identifica a amplitude e a fase da componente fundamental da tensão distorcida, v_{pcc} . A identificação da amplitude e fase na frequência de 60 Hz tem dupla função no esquema. A fase, ϕ_s , faz com que a tensão que será produzida como referência esteja sincronizada com a da rede elétrica. A amplitude da fundamental, V_{p1} , quando comparada com a amplitude nominal da rede elétrica, v_{pcc}^{ref} , determina o nível de amplitude a ser restaurado pelo compensador. Caso fosse utilizado uma estimação recursiva convencional para sinais senoidais em *HMQR*, ambas variáveis ficariam deterioradas na presença de componentes harmônicas [26].

IV. MÉTODO DE INSERÇÃO DE TENSÃO

Existem algumas formas de inserção de tensão na rede pelo compensador, que se diferenciam pela escolha de qual grandeza se pretende otimizar. Em [27] são apresentadas três dessas possibilidades, sendo que as duas com gastos reduzidos, otimizam o uso da potência na inserção ou do nível de tensão do barramento CC. Esta última tem um atrativo por permitir que se utilize um inversor com dimensões menores dos capacitores do barramento CC, o que viabiliza um dispositivo de custo reduzido. Assim, este método de inserção é utilizado neste trabalho. A ideia deste método é realizada quando a tensão inserida pelo compensador está em fase com a tensão da rede. Esta proposição foi configurada para a compensação do afundamento. A ideia é manter o nível de tensão pré-afundamento pela inserção somente da tensão fundamental. Como resultado, o DVR compensa afundamentos e a carga é protegida deste evento. A tensão DVR é descrita como segue:

$$U_{dvr} = V_u \cos(\omega_1 t + \phi_s). \quad (16)$$

Como já mostrado no esquemático da Figura 2, para a restauração da componente fundamental é também necessário o conhecimento de sua amplitude durante o afundamento,

bem como realizar a sincronização entre a fundamental e a tensão a ser inserida. A Figura 3 ilustra a determinação da amplitude a ser restaurada. Para deixar os cenários

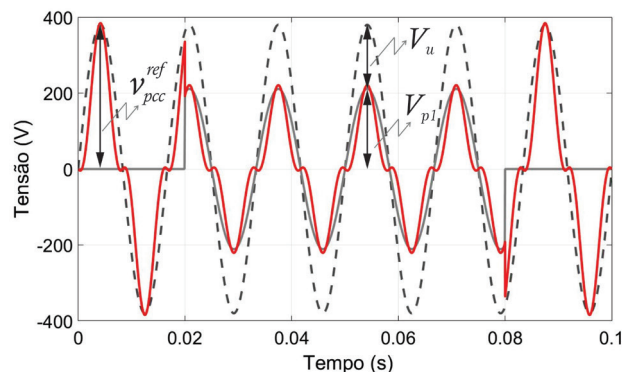


Fig. 3. Afundamento de tensão com distorção harmônica.

apresentados mais próximos do usual das redes elétricas, nas tensões são contempladas componentes harmônicas ímpares até a 13ª ordem. Este formato será utilizado para analisar o desempenho dos métodos de compensação propostos. As componentes harmônicas ficam de fora do procedimento de correção e não são compensadas pelo dispositivo restaurador. Então, o método proposto tem a vantagem de produzir uma única componente para compensar somente o afundamento, o que permite uma vida útil mais longa das baterias do dispositivo. Desta forma, o dispositivo torna-se mais eficiente e cumpre efetivamente seu propósito. Estas afirmações são validadas nas próximas seções.

V. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Os resultados de simulação discutidos neste trabalho são realizados na plataforma Matlab/Simulink.

No cenário a seguir, o evento é testado em uma das fases da rede. A tensão nominal para os casos apresentados é 380 V. Assim, todas as tensões restauradas na carga precisam alcançar este nível de tensão ($\pm 10\%$) para que o procedimento seja considerado bem sucedido. O afundamento de 40% inicia em 20 ms e finaliza em 80 ms. Como mostrado e pode ser percebido na Figura 4, a tensão da carga é compensada e menos distorcida do que a do pré-afundamento, pois a fundamental foi restabelecida diminuindo percentualmente o nível do harmônico. Ainda pode ser observado que os períodos transitórios no início e fim do evento são pouco expressivos no que se refere aos níveis de sobrepico e tempo de acomodação. A duração de ambos é aproximadamente 1 ms. Este desempenho quando comparado com [21], [22] é similar ao primeiro e melhor que o segundo, pois neste, na maioria dos resultados, a acomodação do transitório se deu em 10 ms. Com a supressão do afundamento, a tensão da rede continua distorcida sem a atuação do DVR, pois como já mencionado, o equipamento deve atuar apenas na restauração do evento de curta duração.

Em seguida, o método proposto foi comparado com outro de compensação para sistemas com distorções harmônicas e afundamentos de tensão. No método descrito por [14], [15], o DVR compensa o afundamento e mitiga todos os efeitos

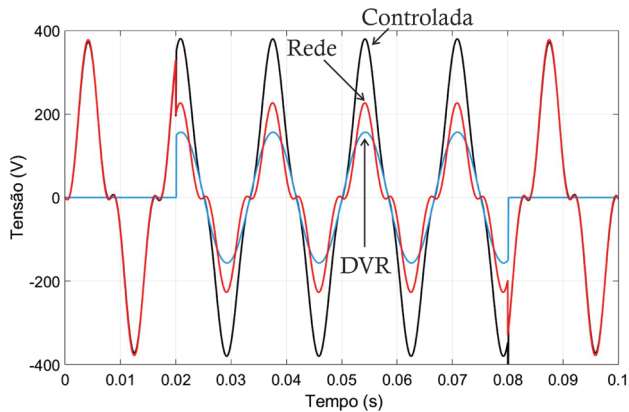


Fig. 4. Tensões da rede distorcida/afundada e controlada utilizando o método proposto.

da distorção harmônica como mostrado na Figura 5. A

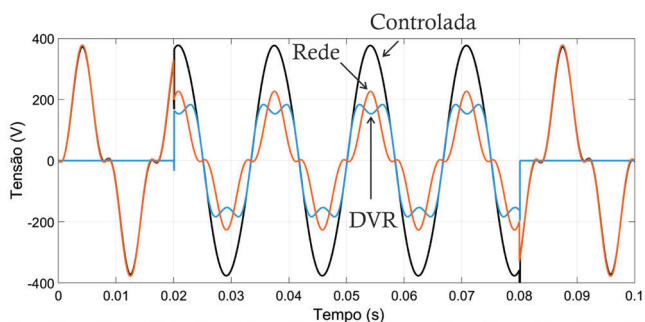


Fig. 5. Tensões da rede distorcida/afundada e controlada utilizando o método proposto por [14], [15].

compensação de todos os efeitos de distorção requer mais potência ativa do que aquela usada no método proposto neste trabalho. Além disso, pelo fato de as distorções harmônicas serem problemas de regime permanente, seria exigido a operação contínua do equipamento, que não é adequado ao DVR com o barramento CC suprido por baterias que somente suportam variações de tensão de curta duração.

A Figura 6 mostra a comparação entre as potências ativas do DVR utilizadas. A que é proposta neste trabalho está indicada por P1, e nos métodos de [14], [15], P2. As curvas da Figura 6 mostram que durante a falta, no método proposto é usada uma potência ativa menor para compensar satisfatoriamente a tensão afundada. O nível de redução neste consumo de potência é de aproximadamente 40%, o que representa uma quantidade expressiva de atenuação. Isso tem relevância principalmente quando é necessário realizar o dimensionamento do banco de baterias que suprem o barramento CC do inversor, com benefícios em termos de custos.

VI. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A plataforma experimental do DVR mostrada na Figura 7 foi utilizada para verificar os resultados de simulação e para validar o método de compensação proposto neste trabalho. Ela foi construída para testes em escala laboratorial e tem flexibilidade para receber diferentes propostas de modulação e controle. Consiste de transformadores, filtros LC, sensores de tensão e um controlador de sinais digitais (DSC) da

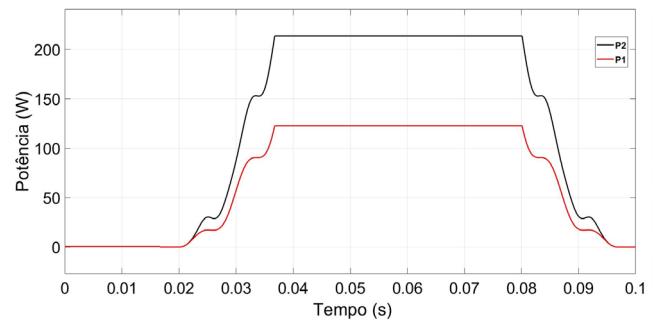


Fig. 6. Evolução das potências ativas durante o evento.

texas Instruments TMS320F28335. O principal dispositivo da bancada é o conversor de potência CC-CA de quatro braços da Semikron que faz uso de IGBTs e acionado pelo DSC. A frequência de chaveamento é de 10 kHz em todos os experimentos e este conversor foi projetado para uma potência de 5 kVA. O sistema de aquisição de dados consiste de sensores de efeito Hall. Todos os testes foram realizados com bancos de resistores de potência. A Tabela I

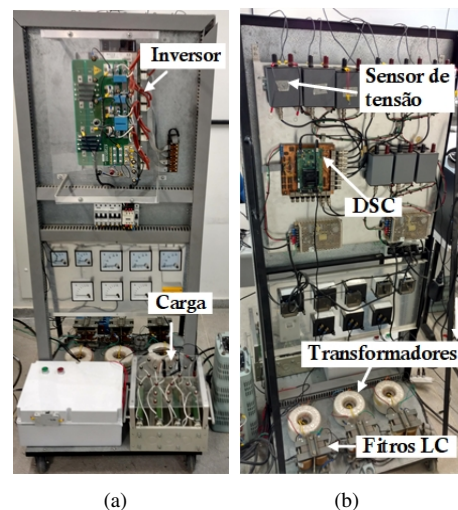


Fig. 7. Protótipo experimental. (a) Parte frontal. (b) Parte traseira.

mostra os parâmetros utilizados na plataforma experimental. O barramento CC é constituído de quatro capacitores de $2200\mu\text{F}/450\text{V}$ equivalente a $2200\mu\text{F}/900\text{V}$. Estes mesmos valores também foram utilizados na plataforma de simulação. Os parâmetros do filtro foram calculados para que a frequência de corte esteja em torno de 890 Hz. A frequência de amostragem utilizada no DSC é de 10 kHz, o que corresponde a um período de $100\mu\text{s}$ de intervalo entre as amostras nas medições. O núcleo dos transformadores série utilizados pelo sistema DVR é feito de material ferromagnético de grãos orientados em formato toroidal.

Uma fonte geradora de distúrbios na rede elétrica foi utilizada para produzir ambos, os afundamentos e as distorções harmônicas para serem reguladas pelo sistema de controle do DVR. Os níveis de afundamentos e distorções programados para a tensão da rede foram os mesmos dos casos utilizados na simulação. A Figura 8 exibe a tensão da rede experimental na tela do osciloscópio. A tensão de referência é configurada para a amplitude de 380 V e um afundamento

TABELA I
Parâmetros do sistema

Parâmetro	Valor
L (filtro)	2mH
C (filtro)	16 μ F
R equivalente (carga)	180 Ω
barramento CC	2200 μ F/900 V
saturação do transformador	0.38Wbturn
relação de transformação	1:1

de 40% é produzido em uma das fases. Esta tensão da rede é considerada uma tensão afundada típica utilizada para analisar o desempenho dos métodos de compensação propostos. Também, este é um cenário crítico pois contém dois diferentes problemas de qualidade de energia.

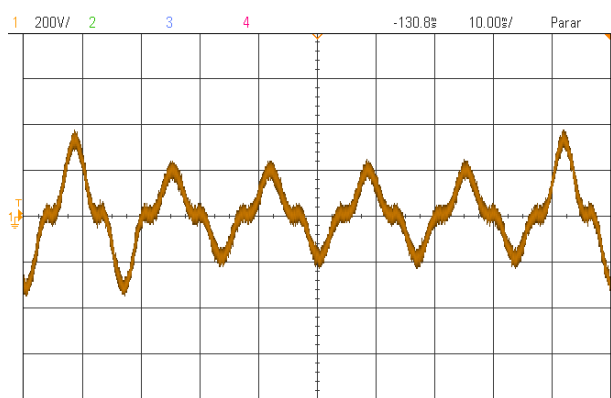


Fig. 8. Tensão experimental da rede.

A Figura 9 exibe as tensões da rede afundada, a inserida pelo DVR e a da carga. A curva controlada mostra que o valor nominal é alcançado após a restauração.

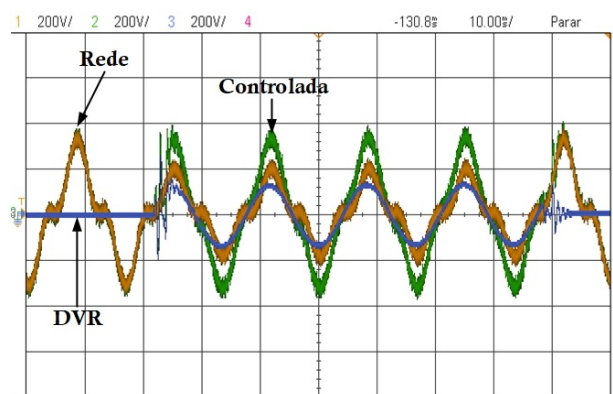
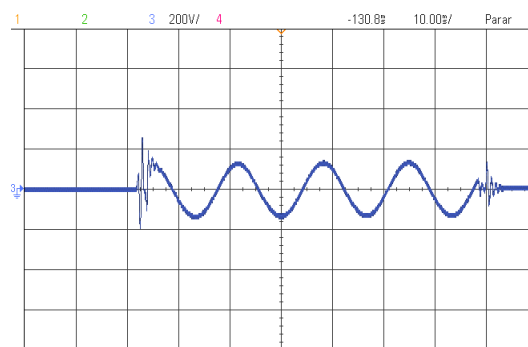


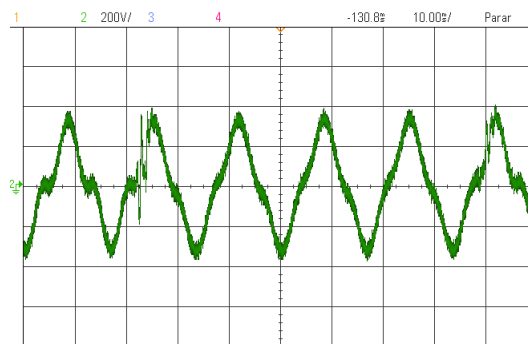
Fig. 9. Resultado experimental utilizando o método proposto.

A tensão inserida pelo compensador é mostrada isoladamente na Figura 10.a. Como pode ser percebido, existem oscilações no início e fim do evento, mas a estabilização é conseguida num período de tempo menor que 4 ms para o pior caso, que é no início do transitório. As normas estabelecem que somente é considerado um evento de curta duração a partir da metade do período da forma de onda, que no caso, é de aproximadamente 8 ms. A faixa de tempo de duração da oscilação é 1/4 do período da forma de

onda, e portanto, está em conformidade. Quando comparado este desempenho com [22], o tempo de acomodação do transitório é menos da metade do que foi alcançado. Isto comprova que o método apresentado estima e corrige a amplitude da fundamental muito rapidamente. A Figura 10.b mostra a tensão restaurada na carga e que sua amplitude é devidamente restabelecida ao valor nominal. A frequência de chaveamento do inversor é elevada em relação à fundamental da rede. Como pode ser observado nas tensões analisadas, existe a penetração de componentes de alta frequência com baixa amplitude, apesar da presença dos filtros. No entanto, essas componentes influenciam menos de 0,2% no índice de distorção harmônica total.



(a)



(b)

Fig. 10. Resultado experimental utilizando o método proposto. (a) Tensão do DVR. (b) Tensão da carga.

A Figura 11 exibe o outro cenário de correção da tensão na carga, regulado pelo sistema de controle do DVR. Este é um cenário crítico em que a ação do DVR mitiga também as interferências dos harmônicos. Assim, a tensão da rede é restaurada durante a ocorrência do evento. Pode-se observar que a tensão recuperada tem um perfil muito mais próximo ao senoidal quando comparado ao caso em que somente a fundamental é restaurada.

O resultado da ação do DVR, visto na Figura 12.a, mostra que para a eliminação das componentes harmônicas de tensão da carga faz-se necessária a inserção de uma tensão com formato não-senoidal. As oscilações no começo e final do evento têm também duração de aproximadamente 1/4 de período da fundamental. A tensão de carga, vista na Figura 12.b, sugere que o DVR poderia ser usado para, além de mitigar o efeito das tensões afundadas, eliminar o efeito das componentes harmônicas na carga. Porém, como já discutido,

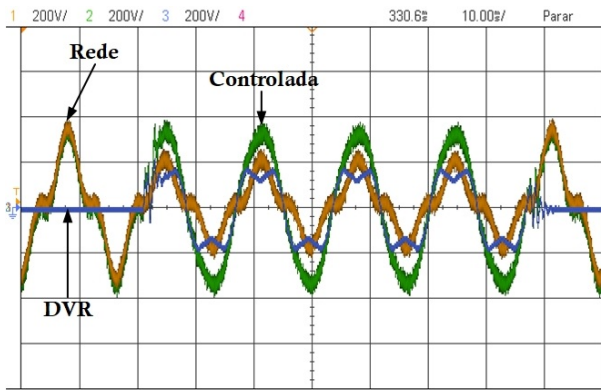


Fig. 11. Resultado experimental utilizando o método proposto por [14], [15].

não é o propósito do dispositivo. O nível de tensão nominal de referência foi estabelecido na carga.

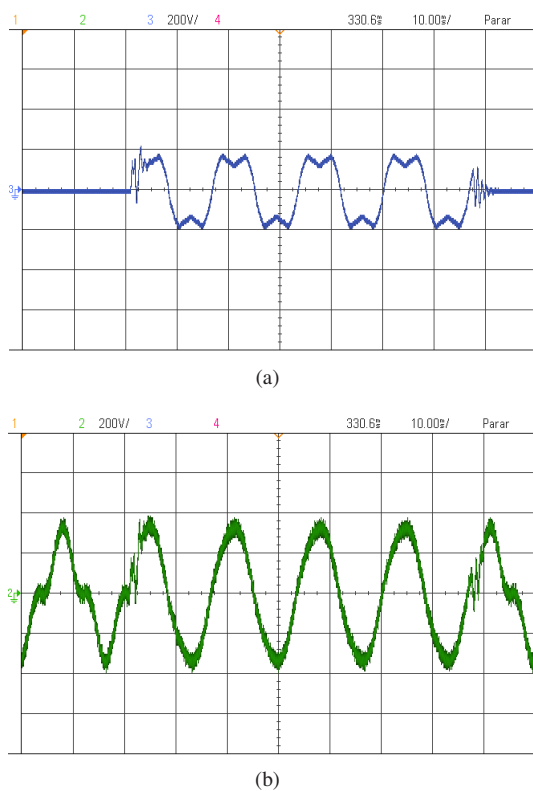


Fig. 12. Resultado experimental utilizando o método proposto por [14], [15]. (a) Tensão do DVR. (b) Tensão da carga.

VII. CONCLUSÕES

Este trabalho propõe um método de inserção de tensão para o DVR e o uso de uma técnica recursiva de mínimos quadrados. Todos os cenários de distúrbios apresentados necessitaram de correção, pois os níveis de tensão estão abaixo das tolerâncias especificadas pelo PRODIST. Assim, o método proposto pode mitigar o afundamento de tensão nos sistemas com distorção harmônica da rede pela inserção somente da tensão de frequência fundamental. A recomposição dos níveis de tensão na carga em ambos os cenários com e sem inclusão das componentes harmônicas para o

DVR têm desempenhos similares. No entanto, a potência desprendida pelo dispositivo para o cenário de inserção somente da componente fundamental, que é o caso proposto neste trabalho, é expressivamente menor do que o caso com componentes inclusas. Isto pode ser considerado uma importante vantagem de desempenho da proposição, uma vez que pode-se ter um ganho na vida útil nas baterias do dispositivo. A decisão pela restauração apenas da componente fundamental não é feita por opção, mas sim pela imposição do DVR que tem em sua concepção a correção de variações rápidas de tensão, e desta forma, é suprido por baterias, o que o impede de realizar correções de regime permanente, como é o caso dos harmônicos. Simulações e experimentos incluindo as mesmas distorções nos dois cenários foram usadas para verificar a proposição. Os resultados mostram a eficiência do DVR para mitigar o afundamento de tensão nos sistemas com distorções harmônicas e com bons desempenhos na rápida atuação e sem picos ou duração longa de oscilações no surgimento e extinção do evento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por meio dos processos 4374352018-0 e 4307792018-6.

REFERÊNCIAS

- [1] Y. Han, Y. Feng, P. Yang, L. Xu, Y. Xu, F. Blaabjerg, "Cause, Classification of Voltage Sag, and Voltage Sag Emulators and Applications: A Comprehensive Overview", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 1922–1934, Dec. 2020.
- [2] J. A. Martinez, J. Martin-Arnedo, "Voltage sag studies in distribution networks - part II: voltage sag assessment", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 3, pp. 1679–1688, Jul. 2006.
- [3] J. Esteves, K. Brekke, K. Niall, M. Delfanti, M. Bollen, "Voltage quality monitoring, dips classification and responsibility sharing", *Proc IEEE 15th Int Conf Harmon Qual Power*, pp. 1–6, Oct. 2011.
- [4] C. C. M. Cunha, S. R. Silva, "Simulações e testes de sensibilidade de acionamentos a velocidade variável frente a afundamentos de tensão", *Eletrônica de Potência*, vol. 8, no. 2, pp. 61–68, Nov. 2003.
- [5] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST, Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica*, 2018.
- [6] J. A. Pomilio, S. M. Deckmann, "Caracterização e Compensação de Harmônicos e Reativos de Cargas Não-lineares Residenciais e Comerciais", *Eletrônica de Potência*, vol. 11, no. 1, pp. 9–16, Março 2016.
- [7] W. M. Grady, S. Santoso, "Understanding power system harmonics", *IEEE Power Engineering Review*, vol. 21, no. 11, pp. 8–11, Dec. 2001.
- [8] G. J. Wakileh, "Harmonics in rotating machines", *Electric Power Systems Research*, vol. 66, no. 1, pp. 31–37, Jul. 2003.

- [9] P. Kanjiya, B. Singh, A. Chandra, K. Al-Haddad, “SRF theory revisited to control self-supported dynamic voltage restorer (DVR) for unbalanced and nonlinear loads”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, no. 5, pp. 2330–2340, Sept.-Oct. 2013.
- [10] D. A. Fernandes, S. R. Naidu, A. M. N. Lima, “A Four Leg Voltage Source Converter Based Dynamic Voltage Restorer”, in *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 3760–3766, Aug. 2008.
- [11] Y. W. Li, D. M. Vilathgamuwa, F. Blaabjerg, P. Loh, “A Robust Control Scheme for Medium-Voltage-Level DVR Implementation”, *IEEE Trans Ind Electron*, vol. 54, no. 4, pp. 2249–2261, Aug. 2007.
- [12] S. Jothibas, M. Mishra, “A Control Scheme for Storageless DVR Based on Characterization of Voltage Sags”, *IEEE Trans Power Del*, vol. 29, no. 5, pp. 2261–2269, Oct. 2014.
- [13] R. Grinó, R. Costa-Castelló, E. Fossas, “Digital repetitive control of a single-phase current active filter”, in *European Control Conference (ECC), 2003*, pp. 3494–3497, Sept. 2003.
- [14] P. Sanchez, E. Acha, J. Calderon, V. Feliu, A. Cerrada, “A versatile control scheme for a dynamic voltage restorer for power quality improvement”, *IEEE Trans Power Del*, vol. 24, no. 1, pp. 277–284, Jan. 2009.
- [15] D. A. Fernandes, F. F. Costa, J. R. Martins, A. S. Lock, E. R. da Silva, M. A. Vitorino, “Sensitive load voltage compensation with a suitable control method”, in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2015 IEEE*, pp. 1639–1644, Sept. 2015.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] P.-T. Cheng, C.-C. Huang, C.-C. Pan, S. Bhattacharya, “Design and Implementation of a Series Voltage Sag Compensator Under Practical Utility Conditions”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 39, no. 3, pp. 844–853, May-Jun. 2003.
- [19] A. Florio, A. Mariscotti, M. Mazzucchelli, “Voltage Sag Detection Based on Rectified Voltage Processing”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 4, pp. 1962–1967, Oct. 2004.
- [20] B. Polajzer, G. S. D. Dolinar, “Instantaneous positive-sequence current applied for detecting voltage sag sources”, *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 9, no. 4, pp. 319–327, Mar. 2014.
- [21] V. A. Katic, A. M. Stanisavljevic, “Smart Detection of Voltage Dips Using Voltage Harmonics Footprint”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 5, pp. 5331–5342, Sept.-Oct. 2018.
- [22] A. K. Sadigh, K. Smedley, “Fast and Precise Voltage Sag Detection Method for Dynamic Voltage Restorer (DVR) Application”, *Electric Power System Research*, vol. 130, no. 1, pp. 192–207, Jan. 2016.
- [23] R. Naidoo, P. Pillay, “A New Method of Voltage Sag and Swell Detection”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 2, pp. 1056–1063, Apr. 2007.
- [24] 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.
- [25] D. A. Fernandes, F. F. Costa, E. Santos-Jr, “Digital-Scalar PWM Approaches Applied to Four-Leg Voltage-Source Inverters”, *IEEE Trans Ind Electron*, vol. 60, no. 5, pp. 2022–2030, May 2013.
- [26] F. F. Costa, A. J. M. Cardoso, D. A. Fernandes, “Harmonic analysis based on kalman filtering and prony’s method”, in *IEEE International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, Powereng*, vol. 1, pp. 696–701, May 2007.
- [27] J. G. Nielsen, F. Blaabjerg, “A detailed comparison of system topologies for dynamic voltage restorers”, *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 41, no. 5, pp. 1272–1280, Sep./Oct. 2005.

DADOS BIOGRÁFICOS

João Raphael Souza Martins, recebeu os títulos de Engenheiro Eletricista, Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica, respectivamente pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) em 2011, Universidade Federal da Paraíba (UFPB) em 2016 e UFCG em 2020. De 2015 a 2016 foi Professor no Instituto Federal da Paraíba (IFPB). Atualmente é Professor do Instituto de Computação da Universidade Federal de Alagoas (UFAL). Seus interesses de pesquisa estão nas aplicações de controle e qualidade de energia.

Darlan Alexandria Fernandes, recebeu o título de Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal da Paraíba, em 2002 e os títulos de Mestre e Doutor pela Universidade Federal de Campina Grande, em 2004 e 2008, respectivamente. Entre 2007 e 2011 foi professor do Departamento da Indústria do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte. Desde 2011 é Professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba. Entre 2018 e 2019, realizou pós-doutorado no CPES (Center for Power Electronics Systems) na Virginia Polytechnic Institute and State University (Virginia Tech), Blacksburg, Estados Unidos. Suas áreas de interesse são aplicações de dispositivos eletrônicos de potência em sistemas de distribuição, qualidade de energia, sistemas fotovoltaicos e medições de impedâncias para avaliação da estabilidade de conversores de potência conectados à rede elétrica.

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.

Fabiano Fragoso Costa, possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (1997), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande (2001) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande (2005). Atualmente é professor associado da Universidade Federal da Bahia no Departamento de Engenharia Elétrica. Seus interesses em pesquisa incluem tópicos relacionados à modelagem de conversores chaveados por meio técnicas de impedância; estabilidade de sistemas chaveados interconectados no domínio da frequência, com ênfase em inversores LCL conectados à rede elétrica; métodos de sincronização

por malha de captura de fase (PLLs) e técnicas de estimação de impedância de redes elétricas. É membro da Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência e Membro Senior do Instituto de Engenharia Elétrica e Eletrônica (IEEE). Atualmente, é pesquisador visitante junto ao CPES (Center for Power Electronics Systems) da Virginia Tech (EUA).

Edison Roberto Cabral da Silva recebeu o grau de Eng. Eletricista (1965) pela Escola Politécnica de Pernambuco, o grau de Mestre pela UFRJ (1968), e o especialista em Automática (1970) e de Doutor em Eletrônica Industrial (1972) pela Universidade Paul Sabatier de Toulouse, França. Realizou pós-doutorado na Universidade de Wisconsin-Madison e no Instituto Politécnico de Toulouse. Foi professor visitante na UFRJ, UFPB e na Universidade de Indianapolis/IUPUI, EUA. É Professor Emérito da UFCG e continua ativo como pesquisador, sendo vinculado aos cursos de pós-graduação em Engenharia Elétrica da UFPB e da UFCG. Foi Presidente da Sociedade Brasileira de Automática e recebeu Medalha de Ouro CAPES/COFECUB (cooperação francesa) por serviços prestados. Organizou congressos nacionais e internacionais. É membro Honorável da SOBRAEP e Life-Fellow do IEEE, pertencendo, também, à SBA, e às Sociedades PELS, IAS, IES e PES do IEEE. Suas atuais áreas de interesse são estruturas de conversores e sistemas de energia alternativa, além do diagnóstico de faltas em conversores. É co-autor do livro "Advanced Power Electronics Converters: Pwm Converters Processing AC Voltages", IEEE/Wiley.