

Received May 06, 2024; accepted September 01, 2024; Date of publication September 12, 2024.  
The review of this paper was arranged by Associate Editor Roberto F. Coelho and Editor-in-Chief Heverton A. Pereira.

Digital Object Identifier <http://doi.org/10.18618/REP.e202433>

# Estratégia de Controle Baseada em Componentes de Sequência Aplicada a um Sistema FV-DVR: Falhas Assimétricas

Jefferson R. P. de Assis<sup>1</sup>, Darlan A. Fernandes<sup>2</sup>, Maurício B. de R. Corrêa<sup>3</sup>,  
Alfeu J. Sguarezi Filho<sup>4</sup>, Fabiano F. Costa<sup>5</sup>, Edison R. C. da Silva<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Universidade Federal de Campina Grande, Departamento de Engenharia Elétrica, Campina Grande – PB, Brasil.

<sup>2</sup>Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Engenharia Elétrica, João Pessoa – PB, Brasil.

<sup>3</sup>Universidade Federal de Alagoas, Instituto de Computação, Maceió – AL, Brasil.

<sup>4</sup>Universidade Federal do ABC, Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas, Santo André – SP, Brasil.

<sup>5</sup>Universidade Federal da Bahia, Departamento de Engenharia Elétrica, Salvador – BA, Brasil.

e-mail: jefferson.assis@ee.ufcg.edu.br; darlan@cear.ufpb.br; mauricio@ic.ufal.br;  
alfeu.sguarezi@ufabc.edu.br; fabiano.costa@ufba.br; edison.roberto@cear.ufpb.br.

**RESUMO** Neste trabalho, apresenta-se uma estratégia de controle aplicada a um sistema para inserção de energia fotovoltaica na rede e compensação de tensão na carga. Como parte da estratégia de controle, faz-se uso de uma técnica que utiliza separadamente as componentes de sequência positiva, negativa e zero da tensão no Ponto de Acoplamento Comum (PAC), aqui denominada Decomposição Instantânea em Componentes de Sequência (DICSE). A metodologia proposta provê ao sistema a capacidade de operar adequadamente mesmo durante a ocorrência de falhas assimétricas no PAC. Para validar esta contribuição foram realizadas simulações em tempo real, onde o sistema foi submetido a dois diferentes tipos de falhas assimétricas. As falhas consideradas são do tipo curto-circuito. A partir dos resultados obtidos conclui-se que o método proposto é promissor, pois agrega mais robustez ao sistema, tendo em vista que a maioria das falhas ocorridas nos sistemas de distribuição são do tipo assimétricas.

**PALAVRAS-CHAVE** Componentes de Sequência, Falhas Assimétricas, Inversor de Tensão, Qualidade de Energia, Restauração de Tensão, Sistema Fotovoltaico.

## Control Strategy Based on Sequence Components Applied to a PV-DVR System: Asymmetrical Faults

**ABSTRACT** In this work, a control strategy is applied to a system for power injection into the grid, and it also presented a voltage compensation on the load. This is a technique that uses separately the positive, negative, and zero sequence components of the voltage at the Point of Common Coupling (PCC) to carry out the control. The proposed methodology provides the system with the ability to operate properly even during the occurrence of asymmetrical faults in the PCC. To validate this contribution, real-time simulations were carried out, where the system was subjected to two different types of asymmetrical faults. From the results obtained, it is concluded that the proposed method is promising, as it adds more robustness to the system, considering that the majority of faults occurring in distribution systems are asymmetrical.

**KEYWORDS** Asymmetrical faults, Power Quality, PV System, Sequence Components, Voltage Inverter, Voltage restoration.

## I. INTRODUÇÃO

A população mundial vem observando drásticas mudanças climáticas, e este fato fomenta o aumento das discussões sobre as melhores práticas de utilização das fontes de energia. Há uma forte tendência de que as energias renováveis dominem o fornecimento de energia nos próximos anos. Mais precisamente, é esperado um aumento de 29% em 2022 para 35% em 2025 na participação das energias renováveis na matriz energética mundial [1].

A energia solar fotovoltaica (FV) é hoje a fonte renovável mais próxima de atingir a meta de emissões líquidas de dióxido de carbono igual a zero até 2050. Prevê-se que até 2028 esta fonte representará 12,6% da geração global

de eletricidade [2]. Neste contexto, também é importante atentar para a qualidade da energia gerada, pois esta pode, por exemplo, afetar significativamente a vida útil de cargas sensíveis [3].

Problemas de qualidade de energia elétrica podem afetar uma ampla gama de sistemas e equipamentos, causando diversos tipos de inconvenientes e prejuízos. Alguns desses problemas são: harmônicos, variações de tensão de longa e curta duração, flutuações de tensão, desequilíbrios de tensão e variações de frequência.

Uma alternativa amplamente utilizada para mitigar variações de tensão de curta duração é o Restaurador Dinâmico de Tensão (DVR - *Dynamic Voltage Restorer*) [4],

[5]. O princípio de funcionamento básico de um DVR consiste na inserção de uma tensão de compensação através de um transformador de injeção. Esta tensão de compensação, quando adicionada à tensão da rede, resulta na forma de onda esperada pela carga [6].

É possível encontrar sistemas que contenham uma planta fotovoltaica conectada à rede (função: injeção de energia) e um DVR (função: compensação de tensão). Este cenário é ilustrado na Figura 1.

O elemento comum entre o sistema DVR e o sistema para inserção de energia pela planta fotovoltaica é o inversor fonte de tensão (VSI - *Voltage Source Inverter*). A topologia mais comum para um VSI trifásico possui três braços com duas chaves em cada braço. Consequentemente, um sistema FV-DVR conectado à rede requer pelo menos doze chaves para operar.

Ao longo dos anos, o inversor de nove chaves (NSI - *Nine-Switch Inverter*), às vezes chamado de conversor de nove chaves (NSC - *Nine-Switch Converter*), foi explorado em uma ampla gama de aplicações. Em [7] foi proposta a utilização de um NSI para o acionamento de máquinas hexafásicas. Uma proposta de nova topologia de sistemas de energia ininterrupta (UPS - *Uninterruptible Power Supplies*) para redes trifásicas a quatro fios foi investigada em [8]. Foi em [9] que um método de controle dual por banda de histerese para sistemas *multi-drive* baseados em um inversor de nove chaves foi apresentado.

Mais recentemente, um controle preditivo de corrente para um NSI foi proposto a fim de anular uma tensão que é projetada em um determinado plano e maximizar a tensão projetada no plano  $\alpha\beta$  tanto quanto possível para configurações de enrolamento hexafásico [10]. Já em [11], um motor de relutância duplo saliente modulado por fluxo alimentado via um NSI foi otimizado para adicionar a capacidade de regulação de corrente.

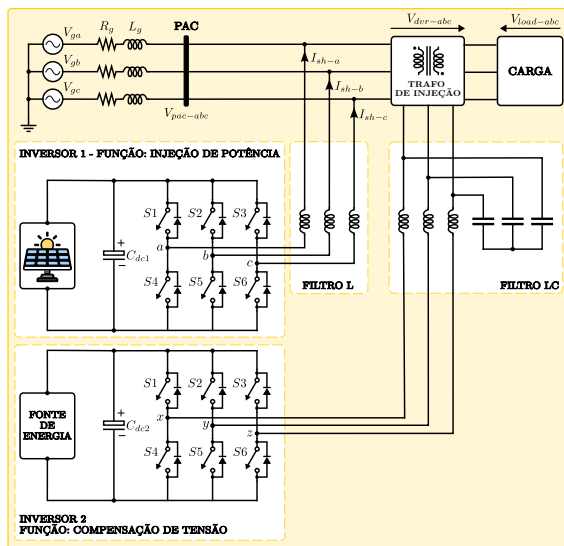


FIGURA 1. Sistemas FV e DVR independentes.

Os sistemas FV e DVR apresentados na Figura 1 podem ser integrados em um único sistema, sendo o elemento integrador um NSI. Este tipo de configuração foi apresentado pela primeira vez em [12] e é ilustrada pela Figura 2.

Sabe-se que a maioria das faltas que ocorrem em sistemas trifásicos de distribuição de energia elétrica são assimétricas, ou seja, aquelas onde apenas uma das fases deixam de operar, ou duas das fases falham simultaneamente [13], [14]. O sistema FV-DVR integrado via NSI, projetado em [12], não é capaz de operar diante de faltas assimétricas oriundas do PAC. A razão para esta limitação é que o sistema de controle proposto foi projetado para manipular tensões com amplitudes constantes, porém, em caso de faltas assimétricas no PAC, esse requisito deixa de ser atendido.

Neste trabalho, é apresentada uma abordagem capaz de munir o sistema FV-DVR integrado via NSI mostrado na Figura 2 com a capacidade de operar durante faltas assimétricas ocorridas no PAC, garantindo assim, que mesmo diante deste tipo de perturbação, a carga experimente tensão nominal. A ideia consiste em estimar as componentes de sequência positiva, negativa e zero da tensão do PAC durante a ocorrência da perturbação e usá-las como entrada para um novo bloco de controle.

Para validar a metodologia proposta neste trabalho, foram realizadas simulações em tempo real. O sistema foi submetido a dois cenários de faltas assimétricas ocorridas no PAC, o primeiro do tipo fase-terra e o segundo do tipo fase-fase-terra. Quando estes distúrbios ocorrem no PAC, o novo bloco de controle proposto é ativado, possibilitando assim a restauração completa da tensão da carga em ambos os cenários. Os resultados obtidos corroboram a metodologia proposta, o que torna o sistema mais robusto.

Ao longo deste trabalho, o sistema FV-DVR integrado via NSI tem seus modos de operação e sistema de controle descritos. Em seguida, a limitação do sistema de controle original em operar durante a ocorrência de faltas assimétricas é explicitada. Essa oportunidade de melhoria na robustez do sistema é aproveitada através da inserção do novo bloco de

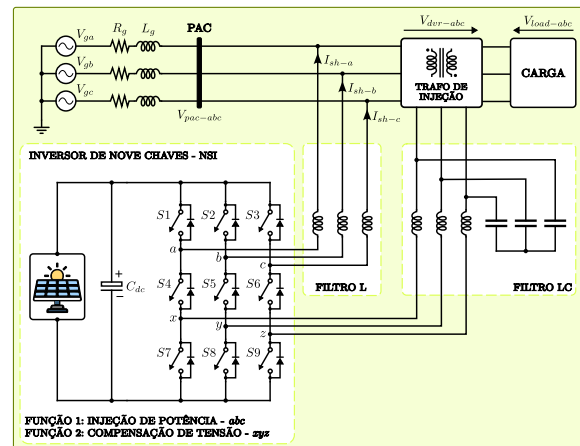


FIGURA 2. Sistema FV-DVR integrado via NSI.

controle, que tem sua construção explicada detalhadamente. Por fim, o método de validação e os resultados obtidos são apresentados e devidamente discutidos.

## II. SISTEMA FV-DVR INTEGRADO VIA NSI

O uso do NSI como elemento integrador do sistema FV-DVR é acompanhado pelo benefício da economia de três chaves quando comparado a operação isolada desses sistemas. Este fato, reduz o custo e o volume do produto final. A Figura 3 mostra o sistema FV-DVR acompanhado de seu sistema de controle e esquema de modulação. Nesta, o primeiro conjunto de saídas  $[a, b, c]$  refere-se à operação como planta fotovoltaica e o segundo conjunto de saídas  $[x, y, z]$  refere-se à operação como DVR. As chaves S1, S2 e S3 pertencem ao subsistema FV, as chaves S7, S8 e S9 pertencem ao subsistema DVR, enquanto S4, S5 e S6 são compartilhadas por ambos os subsistemas. Este sistema pode operar em quatro modos diferentes [12].

### A. MODOS DE OPERAÇÃO

#### 1) Modo 1 - Normal

Neste modo de operação, o DVR não deve realizar nenhuma tensão de compensação, pois a rede está operando em condições nominais. Para fazer com que o DVR permaneça inativo, basta fazer as saídas  $[x, y, z]$  serem submetidas ao mesmo potencial, que implica em fazer com que as chaves S7, S8 e S9 permaneçam fechadas durante este modo de operação. As chaves S1 à S6 operam em regime de Modulação por Largura de Pulso (PWM - *Pulse Width Modulation*) e o sistema insere potência ativa na rede.

#### 2) Modo 2 - Afundamento

Durante um afundamento de tensão no PAC, o sistema começa a operar no Modo 2. Neste modo, todas as chaves estão sendo controladas via PWM. O DVR é responsável por restaurar a tensão na carga de maneira proporcional ao afundamento, enquanto a planta fotovoltaica insere potência ativa na rede.

#### 3) Modo 3 - Falta

O sistema entra neste modo de operação quando ocorre uma falta trifásica no PAC, ou seja, as três fases da rede vão à terra simultaneamente. Neste caso, o subsistema fotovoltaico deve permanecer inativo, o que implica uma potência ativa inserida igual a zero. O procedimento para garantir isto é levar o conjunto de saídas  $[a, b, c]$  a experimentar o mesmo potencial. Para tanto, basta que as chaves S1, S2 e S3 permaneçam fechadas. O sistema deve ser capaz de atender a demanda total da carga, utilizando as chaves de S4 à S9 em regime de PWM. Nesta situação, o sistema passa a funcionar como um DVR suportado por uma planta fotovoltaica.

#### 4) Modo 4 - Sem Geração

O sistema entra neste modo de operação quando a planta fotovoltaica não fornece energia e permanece inativa (por exemplo, durante a noite). Nesta situação, o subsistema fotovoltaico permanece inativo enquanto consome energia ativa da rede durante intervalos de afundamento para manter o capacitor do barramento c.c. carregado no valor nominal.

A Tabela 1 resume os possíveis modos de operação do sistema FV-DVR integrado, bem como, as condições da rede

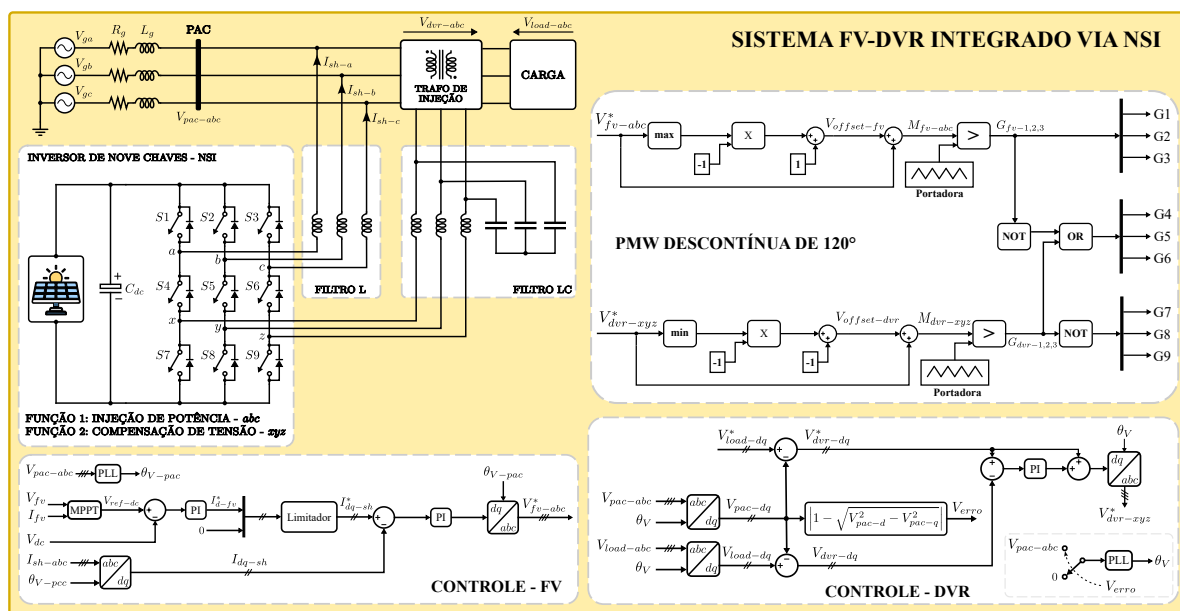


FIGURA 3. Sistema FV-DVR integrado via NSI completo utilizado para análise do comportamento diante de faltas assimétricas no PCC.

TABELA 1. Características Operacionais dos Modos de Operação

Modo	Estado da Rede	Planta FV	Estado das Chaves	
			Sempre Fechada	PWM
1	$V_{pac} = 1$ p.u.	Ativa	S7 - S8 - S9	S1 à S6
2	$V_{pac} \approx 0$ p.u.	Ativa	S1 - S2 - S3	S4 à S9
3	$0,1 \text{ p.u.} < V_{pac} < 0,95 \text{ p.u.}$	Ativa	Nenhuma	S1 à S9
4	Qualquer	Inativa	Nenhuma	S1 à S9

e da planta fotovoltaica que determinam em qual modo o sistema deve operar.

### B. ESQUEMA DE MODULAÇÃO

A técnica de modulação adotada é a PWM descontínua de  $120^\circ$ . Conforme demonstrado em [15], o uso desta técnica reduz significativamente as perdas de comutação. Além disso, quando comparada, por exemplo, com técnicas de modulação espaciais vetoriais ou esquemas PWM não senoidais, possui implementação mais simples.

Nesta estratégia é utilizado um sinal modulante para o conjunto de saídas superior  $[a, b, c]$  do NSI, e outro, para o conjunto de saídas inferior  $[x, y, z]$ , usando uma portadora triangular comum. Esses sinais de referência não devem em hipótese alguma, cruzar-se, pois isto implicaria em um curto-circuito no barramento c.c. [16]. Portanto, o sinal de referência para as fases- $abc$  deve sempre estar acima dos sinais de referência para as fases- $xyz$ . Um exemplo deste cenário é ilustrado na Figura 4. Nesta,  $a^*$  e  $x^*$  representam um sinal de referência modificado para a fase- $a$  e um sinal de referência modificado para a fase- $x$ , respectivamente. Os princípios de funcionamento desta estratégia de modulação, podem ser consultados em [15]–[17].

### C. SISTEMA DE CONTROLE DA PLANTA FV

No sistema de controle utilizado para inserção de potência ativa na rede por meio da planta fotovoltaica mostrado na Figura 3, a corrente inserida na rede ( $I_{sh-abc}$ ) é medida e transformada para o sistema de referência síncrono ( $I_{dq-sh}$ ), transformando-se em valores constantes desde que as correntes injetadas sejam equilibradas. Os valores medidos e de referência são comparados e o erro obtido é processado por um controlador PI.

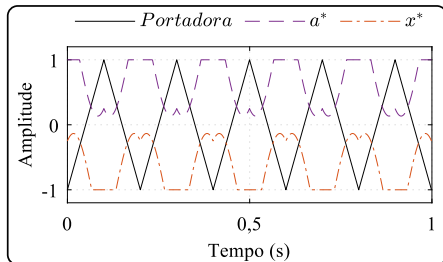


FIGURA 4. Cenário típico do arranjo de sinais de referência e portadora em uma PWM descontínua de  $120^\circ$ .

Neste trabalho uma Malha de Captura de Fase (PLL - *Phase Locked Loop*) é usada para sincronizar a corrente inserida com a tensão do PAC. Isso significa que a corrente inserida na rede estará em fase com a tensão do PAC. A intenção disto é obter um fator de potência o mais próximo possível da unidade.

A corrente de referência para o eixo  $d$  ( $I_{d-fv}^*$ ) é obtida por meio de uma malha de controle para Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (MPPT - *Maximum Power Point Tracking*) utilizando o algoritmo P&O (Perturba e Observa) [18]. A corrente de referência do eixo  $q$  é zero, conforme recomendado em [19]. O bloco Limitador é usado durante afundamentos de tensão ocorridos na rede, limitando a corrente de referência para valores proporcionais ao afundamento.

### D. SISTEMA DE CONTROLE DO DVR

O esquema de controle usado para regular os níveis da tensão inserida pelo DVR mostrado na Figura 3 tem como sinais de entrada, a tensão medida no PAC ( $V_{pac-abc}$ ) e a tensão medida na carga ( $V_{load-abc}$ ). Ambas variáveis de entrada são transformadas para o sistema de referência síncrono ( $V_{pac-dq}$ ,  $V_{load-dq}$ ), assumindo valores constantes desde que sejam de natureza equilibrada.

A diferença entre a tensão de referência da carga e a tensão do PAC resulta na referência para o DVR ( $V_{dvr-dq}^*$ ). A tensão atual do DVR ( $V_{dvr-dq}$ ) é obtida pela diferença entre a tensão medida na carga e a tensão medida no PAC. Os sinais resultantes são comparados e o erro obtido é processado por um controlador PI. Para compensar as quedas de tensão nas chaves, filtros e transformador de inserção, um sinal de  $V_{dvr-dq}^*$  é adicionado a saída do PI. Uma PLL é usada para sincronizar a tensão inserida pelo DVR com a tensão do PAC.

Uma vez que a tensão no PAC é transformada para o sistema de referência síncrono ( $V_{pac-dq}$ ), esses valores são usados como entrada para calcular o erro absoluto ( $V_{erro}$ ) entre a tensão de referência do PAC (1 p.u.) e a tensão medida no PAC em p.u. ( $V_{pac-d}$  e  $V_{pac-q}$ ), conforme a seguinte equação:

$$V_{erro} = \left| 1 - \sqrt{V_{pac-d}^2 - V_{pac-q}^2} \right| \quad (1)$$

Se o sinal de erro assumir valores maiores que 0,05, uma falta/afundamento é detectada. Quando isso ocorre, a lógica na entrada da PLL é alterada de zero para um. Isto significa que no momento em que uma falta/afundamento é detectada, a PLL começa a executar a sincronização entre a tensão que será inserida pelo DVR com a tensão do PAC.

### III. OPERAÇÃO COM FALTAS ASSIMÉTRICAS

Nesta seção é feita uma análise do comportamento do sistema de controle do DVR durante a ocorrência de uma falta assimétrica no PAC. A intenção é demonstrar que o sistema de controle apresentado na Figura 3 não foi projetado para operar diante deste tipo de perturbação, mas somente de uma

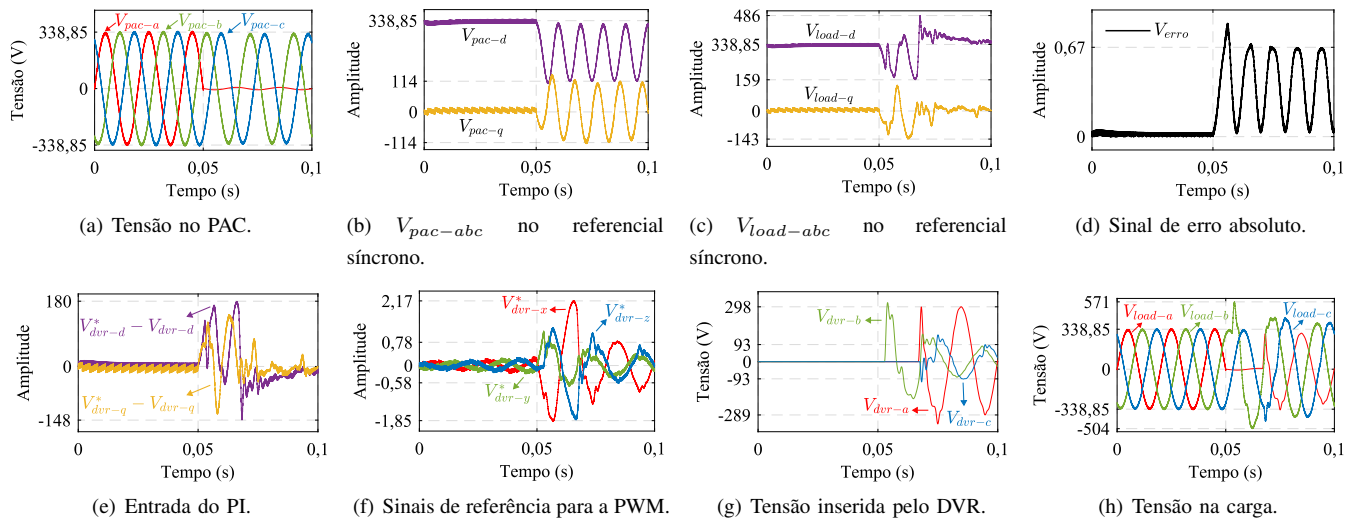


FIGURA 5. Resultados do comportamento do sistema FV-DVR integrado via NSI perante uma falta assimétrica ocorrida no PAC.

outra forma mostrada mais adiante. Isto será evidenciado por meio da análise dos resultados de simulação em tempo real obtidos para este cenário.

O sistema FV-DVR integrado via NSI apresentado na Figura 3 foi utilizado para a realização desta análise. Os parâmetros do sistema completo são apresentados na Tabela 2. Neste trabalho, as constantes proporcionais e integrais dos controladores foram definidas com auxílio da ferramenta “pidTuner” do Matlab®. Para os casos do sistema FV e DVR foram estabelecidas respostas no tempo com sobrevalor percentual variando entre 10 e 18% e com 10 ms de tempo de assentamento para ambos os casos.

Os resultados obtidos são apresentados na Figura 5. No resultado 5(a) observa-se que foi imposta uma falta assimétrica ao PAC no instante de tempo 0,05 s, quando a fase-*a* cruza o valor zero. A amplitude das fases na condição de pré-falta

é de 338,85 V. Esta falta tem as seguintes características: fase-*a* = terra e fases-*bc*, intactas.

Na Figura 5(b), pode-se observar que quando o sistema opera na presença de uma falta assimétrica no PAC, as componentes *dq* da tensão deixam de ser constantes e passam a ter natureza senoidal. A razão disto é a própria definição da transformação para o sistema de referência síncrono.

Após a ocorrência do distúrbio as componentes *dq* da tensão da carga enfrentaram um transitório com duração de cerca de 38 ms (aproximadamente dois ciclos da componente fundamental da tensão da rede, que é 50 Hz). Este comportamento é mostrado na Figura 5(c). Neste ponto, conclui-se que a comparação entre  $V_{load-dq}$  e  $V_{pac-dq}$  gera uma estimativa equivocada da tensão atual do DVR ( $V_{drv-dq}$ ).

A natureza oscilatória de  $V_{pac-dq}$  após o distúrbio implica em um erro absoluto ( $V_{erro}$ ) também oscilante, conforme mostrado na Figura 5(d). Este fato impede a ação adequada do PLL, não sendo este capaz de sincronizar a tensão a ser inserida pelo DVR com a tensão do PAC.

Antes da ocorrência da falta assimétrica, observou-se que o erro do controlador PI era aproximadamente igual a zero. Após a ocorrência do distúrbio, não observou-se tendência de erro nulo em regime permanente. Este resultado é mostrado na Figura 5(e).

No resultado da Figura 5(f), observa-se que a principal consequência do não aparecimento de sinais constantes para  $V_{pac-dq}$  é a falha em fornecer sinais de referência senoidais adequados para o esquema de modulação. Percebe-se que o resultado esperado seria que o sinal senoidal de referência para fase-*x* ( $V_{drx-x}^*$ ), assumisse valor igual a 1, enquanto as referências para as fases-*yz* deveriam ser nulas, tendo em vista que é necessário realizar a compensação de tensão apenas para a fase que sofreu o distúrbio. O sistema produziu uma referência para a fase-*x* com um amplitude de apenas aproximadamente 0,78, o que é insuficiente para restaurar por completo a tensão da carga. Para as fases-*yz* o sistema

TABELA 2. Parâmetros do sistema

Parâmetro	Valor
Tensão de linha da rede (valor eficaz)	415 V
Frequência da rede	50 Hz
Impedância da rede	$0,5 + j0,05 \Omega$
Potência nominal da carga	10 kVA
Fator de potência da carga	0,8 em atraso
Indutância dos filtros	5 mH
Capacitância do filtro LC	50 $\mu$ F
Transformador de inserção	10 kVA / 1:1
Tensão do barramento c.c.	700 V
Capacitância do barramento c.c.	3000 $\mu$ F
Frequência da portadora	20 kHz
Constante proporcional e integral - FV	32 e 100
Constante proporcional e integral - DVR	2 e 100



gerou sinais de referência para o esquema de modulação com amplitude igual a 0,58, porém, estas fases não necessitam de compensação. Como consequência, notou-se pela Figura 5(g) que o DVR inseriu tensão com amplitude de 298 V para a fase-*a* e 93 V para as fases-*bc*. Logo, como esperado, o sistema não foi capaz de restaurar por completo a tensão da fase perturbada. Além disso, inseriu tensão nas outras duas fases que estavam intactas. Este fato pode ser observado na Figura 5(h).

Considerando a curva ITI (CBEMA) [20], [21] que determina os limites aceitáveis de magnitude e duração de variações de tensão de curta e longa duração às quais uma carga sensível pode ser exposta, observou-se que durante a ocorrência da falta assimétrica o sistema transgrediu os limites recomendados. Em regime permanente, a carga ficou exposta a uma sobretensão nas fases-*bc* de 27,44%, enquanto a fase-*a* experimentou um afundamento de 12% em relação a sua tensão nominal.

As observações feitas até aqui, são suficientes para concluir que o controle apresentado para o DVR, não possui aptidão para efetuar a restauração por completo da tensão da carga durante a ocorrência de faltas assimétricas no PAC. A principal razão para esta limitação é a premissa de manipular apenas sinais constantes no sistema de referência síncrono. Diante do exposto, na próxima seção, será apresentada uma abordagem capaz de fornecer ao sistema a capacidade de operar corretamente durante a ocorrência de faltas assimétricas no PAC.

#### IV. BLOCO DE CONTROLE PROPOSTO

Para munir o sistema FV-DVR integrado via NSI com a capacidade de atuar durante faltas assimétricas no PAC, é proposta a inserção de um novo bloco de controle. Este novo componente é ativado se, e somente se, uma falta do tipo assimétrica ocorra no PAC.

O conceito da abordagem proposta consiste em estimar as componentes de sequência da tensão no PAC a partir do momento em que ocorre o distúrbio e então, transformá-las para o sistema de referência síncrono, controlando a tensão a ser inserida pelo DVR.

Para estimar as componentes de sequência da tensão da rede, foi utilizada a estratégia apresentada em [22]. Inicialmente, a partir da técnica DICSE, são coletadas amostras da tensão no PAC ( $V_{pac-abc}$ ), e por meio da transformação  $\alpha\beta 0$  são convertidas para  $V_{s0}$ ,  $V_{s\alpha}$  e  $V_{s\beta}$ , assim:

$$\begin{bmatrix} V_{s0} \\ V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{pac-a} \\ V_{pac-b} \\ V_{pac-c} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Quando as tensões da rede estão equilibradas, o vetor  $V_{s\alpha} + jV_{s\beta}$  tem magnitude constante e gira com velocidade angular constante. Para o caso em que a tensão no PAC seja desequilibrada (falta assimétrica, por exemplo), o vetor pode

ser escrito como a soma do vetor de sequência positiva  $\vec{V}_p$  com o vetor de sequência negativa  $\vec{V}_n$ , ambos girando na mesma velocidade  $\omega$ , porém, em direções opostas. A Figura 6 ilustra esse arranjo. Sabendo disso, pode-se escrever:

$$V_{s\alpha} = V_p \cos(\theta + \phi_p) + V_n \cos(\theta + \phi_n) \quad (3)$$

$$V_{s\beta} = V_p \sin(\theta + \phi_p) - V_n \sin(\theta + \phi_n) \quad (4)$$

onde:

$\phi_p$  e  $\phi_n$  são os ângulos de fase iniciais de  $\vec{V}_p$  e  $\vec{V}_n$  com  $\theta = \omega t$ . Ao expandir senos e cossenos nas expressões (3) e (4), obtém-se:

$$V_{s\alpha} = (V_{p\alpha 0} + V_{n\alpha 0}) \cos(\omega t) + (-V_{p\beta 0} + V_{n\beta 0}) \sin(\omega t) \quad (5)$$

$$V_{s\beta} = (V_{p\beta 0} - V_{n\beta 0}) \cos(\omega t) + (V_{p\alpha 0} - V_{n\alpha 0}) \sin(\omega t) \quad (6)$$

sendo:

$$V_{p\alpha 0} = V_p \cos(\phi_p), \quad V_{p\beta 0} = V_p \sin(\phi_p), \quad V_{n\alpha 0} = V_n \cos(\phi_n) \quad \text{e} \quad V_{n\beta 0} = V_n \sin(\phi_n).$$

Neste trabalho, as equações (5) e (6) são resolvidas usando o método de estimação por Mínimos Quadrados Recursivo Ponderado (MQRP) [22]. As equações (5) e (6) podem ser reescritas como:

$$V_{s\alpha} = X_0 + X_1 \cos(\omega t) + X_2 \sin(\omega t) \quad (7)$$

$$V_{s\beta} = Y_0 + Y_1 \cos(\omega t) + Y_2 \sin(\omega t) \quad (8)$$

onde:

$X_0$  e  $Y_0$  são constantes,  $X_1 = (V_{p\alpha 0} + V_{n\alpha 0})$ ,  $X_2 = (-V_{p\beta 0} + V_{n\beta 0})$ ,  $Y_1 = (V_{p\beta 0} - V_{n\beta 0})$ ,  $Y_2 = (V_{p\alpha 0} - V_{n\alpha 0})$ ,  $t = 0, T_s, 2T_s, \dots, nT_s$  e  $T_s$  o período de amostragem. Com  $\theta_s = \omega T_s$ , as equações (7) e (8) resultam em um conjunto de equações que quando escritas em forma matricial tornam-se:

$$\begin{bmatrix} V_{s\alpha}(0) \\ V_{s\alpha}(T_s) \\ V_{s\alpha}(2T_s) \\ \vdots \\ V_{s\alpha}(nT_s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & \cos(\theta_s) & \sin(\theta_s) \\ 1 & \cos(2\theta_s) & \sin(2\theta_s) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \cos(n\theta_s) & \sin(n\theta_s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0 \\ X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

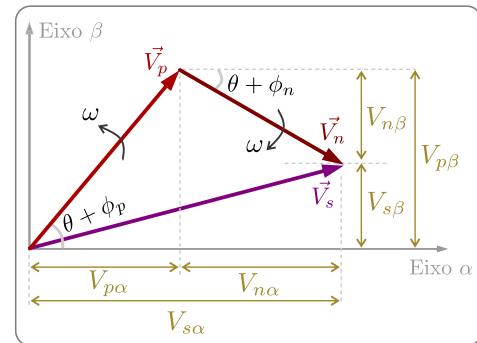


FIGURA 6. Arranjo dos vetores  $\vec{V}_s$ ,  $\vec{V}_p$  e  $\vec{V}_n$ .

$$\begin{bmatrix} V_{s\beta}(0) \\ V_{s\beta}(T_s) \\ V_{s\beta}(2T_s) \\ \vdots \\ V_{s\beta}(nT_s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & \cos(\theta_s) & \sin(\theta_s) \\ 1 & \cos(2\theta_s) & \sin(2\theta_s) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \cos(n\theta_s) & \sin(n\theta_s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_0 \\ Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

que podem ser representadas como sendo:

$$\mathbf{V}_{s\alpha} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{X} \quad (11)$$

$$\mathbf{V}_{s\beta} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{Y} \quad (12)$$

Para determinar  $\mathbf{X} = [X_0 \ X_1 \ X_2]'$  e  $\mathbf{Y} = [Y_0 \ Y_1 \ Y_2]'$  (sendo “'” a indicação de transposto), utiliza-se aqui, o método dos mínimos quadrados recursivo ponderado. As matrizes de regressores presentes nas equações (9) e (10) são idênticas. Como consequência, a solução destas equações requer um cálculo de matrizes de ganho e covariância comuns. O fluxo de tarefas do algoritmo do método de estimação via MQRP pode ser descrito da seguinte maneira:

- 1) Definir  $\mathbf{X} = \mathbf{0}$  e  $\mathbf{Y} = \mathbf{0}$ ; matriz de covariância  $\mathbf{P} = N\mathbf{I}$ , onde  $\mathbf{I}$  é uma matriz identidade  $3 \times 3$  e  $N$  um número suficientemente elevado para que seja atenuada a incerteza da estimativa inicial e que a convergência do método seja acelerada. Neste trabalho,  $N = 100$ .
- 2) Para  $j$  variando de 1 até  $n$ :
  - a) Escrever o vetor de regressores  $\mathbf{H} = [1 \ \cos \theta \ \sin \theta]$ , com  $\theta = (j-1)\theta_s$ ;
  - b) Calcular o escalar  $r = 1 + \mathbf{H}\mathbf{P}\mathbf{H}'$ , onde  $\mathbf{H}'$  é a transposta de  $\mathbf{H}$ ;
  - c) Calcular a matriz de ganho  $\mathbf{K} = \frac{1}{r}\mathbf{P}\mathbf{H}'$ ;
  - d) Calcular  $\mathbf{X}$  e  $\mathbf{Y}$ :

$$\mathbf{X} = \mathbf{X} + (V_{s\alpha} - \mathbf{H}\mathbf{X})\mathbf{K}$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{Y} + (V_{s\beta} - \mathbf{H}\mathbf{Y})\mathbf{K}$$

- e) Com  $\mathbf{X} = [X_0 \ X_1 \ X_2]'$  e  $\mathbf{Y} = [Y_0 \ Y_1 \ Y_2]'$  calcular:

$$V_{p\alpha 0} = V_p \cos \phi_p = \frac{1}{2}(X_1 + Y_2)$$

$$V_{p\beta 0} = V_p \sin \phi_p = \frac{1}{2}(Y_1 - X_2)$$

$$V_{n\alpha 0} = V_n \cos \phi_n = \frac{1}{2}(X_1 - Y_2)$$

$$V_{n\beta 0} = V_n \sin \phi_n = -\frac{1}{2}(Y_1 + X_2)$$

- f) Atualizar a matriz de covariância:

$$\mathbf{P} = \frac{1}{\lambda} \{\mathbf{P} - \mathbf{K}\mathbf{H}\mathbf{P}\}.$$

A constante  $\lambda$  é denominada fator de esquecimento e é responsável por dar um peso maior às amostras mais recentes. Em geral, adotam-se valores na faixa de 0,95 à 0,99 para  $\lambda$ . Neste trabalho,  $\lambda = 0,95$ .

As fases  $\phi_p$  e  $\phi_n$  são as fases iniciais dos vetores  $\vec{V}_p$  e  $\vec{V}_n$ . Estas, podem ser determinadas isolando-as no passo (e) do fluxo de tarefas apresentado anteriormente. De posse de

$V_{p\alpha 0}$ ,  $V_{p\beta 0}$ ,  $V_{n\alpha 0}$  e  $V_{n\beta 0}$ , calcula-se as amplitudes destes vetores.  $V_p = \sqrt{V_{p\alpha 0}^2 + V_{p\beta 0}^2}$  e  $V_n = \sqrt{V_{n\alpha 0}^2 + V_{n\beta 0}^2}$ . Assim, as fases são calculadas:

$$\phi_p = \cos^{-1} \left( \frac{1}{2V_p} (X_1 + Y_2) \right)$$

$$\phi_n = \cos^{-1} \left( \frac{1}{2V_n} (X_1 - Y_2) \right).$$

Uma vez calculados  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $Y_1$  e  $Y_2$  a cada passo de amostragem, obtém-se as componentes de sequência ( $V_{p\alpha} + jV_{p\beta}$ ) e ( $V_{n\alpha} - jV_{n\beta}$ ) instantaneamente.

Como resultado da aplicação da técnica de DICSE, estimam-se  $V_{sp}$ ,  $V_{sn}$ ,  $V_{s0}$ ,  $\phi_p$  e  $\phi_n$ , que são respectivamente: as componentes de sequência positiva, negativa e zero da tensão no PAC, o ângulo de fase de  $\vec{V}_p$  e o ângulo de fase de  $\vec{V}_n$ .

A proposta de dotar o sistema FV-DVR com a capacidade de corrigir faltas assimétricas consiste em usar separadamente as componentes de sequência positiva, negativa e zero estimadas durante a ocorrência da perturbação para realizar o controle. A metodologia consiste em comparar cada componente de sequência com valores de referência preestabelecidos. A escolha desses valores de referência é baseada nas especificações nominais do sistema. Na Figura 7, a estrutura do novo bloco de controle proposto é apresentada em detalhes, bem como, sua interação com as demais partes do sistema é explicitada.

Os valores estimados para  $V_{sp}$  e  $V_{sn}$  são utilizados diretamente como sinais de controle medidos no eixo  $d$  de referência síncrono, sendo denominados  $V_{spd}$  e  $V_{snd}$ . As componentes do eixo  $q$  são definidas como iguais a zero e chamadas de  $V_{spq}$  e  $V_{snq}$ .

Os valores de referência utilizados para execução do controle são  $V_{spd}^*$ ,  $V_{spq}^*$ ,  $V_{snd}^*$ ,  $V_{snq}^*$ , e  $V_{s0}^*$ . Os sinais resultantes da diferença entre os valores de referência e os valores estimados ( $V_{cpd}$ ,  $V_{cpq}$ ,  $V_{cnd}$ ,  $V_{cnq}$  e  $V_{c0}$ ) são transformados de  $dq$  para  $abc$ , retornando ao referencial estacionário. Os resultados desta transformação para o PAC são: a componente de sequência positiva estimada ( $V_{p-abc}$ ), a componente de sequência negativa estimada ( $V_{n-abc}$ ) e a componente de sequência zero estimada ( $V_{0-abc}$ ). Estas quando somadas, resultam nos sinais de referência a serem entregues ao esquema de modulação ( $V_{dvr-xyz}^*$ ) para inserção adequada da tensão de compensação pelo DVR.

A técnica de modulação adotada para controlar as chaves de S4 à S9 (referentes à operação como DVR) durante a atuação do novo bloco de controle é a PWM Escalar Digital. Detalhes desta estratégia de modulação podem ser encontrados em [23]. Durante o evento de falta assimétrica não deve haver inserção de corrente na rede por parte da planta fotovoltaica. Toda a energia nesta situação é utilizada para restaurar a tensão da carga. Portanto, durante este tipo de distúrbio, as chaves de S1 à S3 permanecem fechadas.

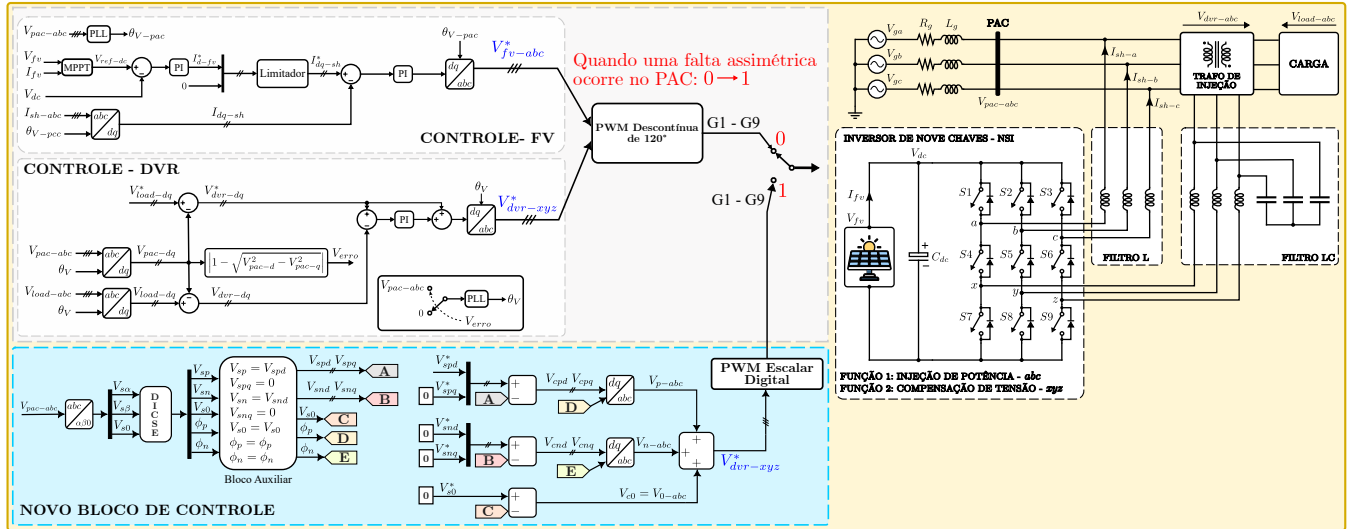


FIGURA 7. Sistema completo utilizado para a validação de novo bloco de controle.

## V. RESULTADOS

Os resultados apresentados neste trabalho foram obtidos por meio de simulações em tempo real do tipo *Model-In-the-Loop* (MIL) usando um Simulador OPAL-RT Technologies modelo OP5700. Este equipamento possui um *Field Programmable Gate Array* reconfigurável (FPGA), sistema para condicionamento de até 256 entradas/saídas, 16 portas de fibra óptica *Small Form Pluggable* (SFP) e pode ser usado como *desktop* ou em um rack padrão de 19". A plataforma de simulação em tempo real *host-simulador* utilizada para validação é apresentada na Figura 8.

Para validar a proposta de inserção do novo bloco de controle, foi utilizado o sistema completo ilustrado pela Figura 7. Os parâmetros do sistema são os mesmos utilizados na Tabela 2 para destacar a dificuldade do sistema original em atuar durante faltas assimétricas. Para verificar a capacidade de restaurar a tensão de carga durante a ocorrência de faltas assimétricas, o sistema foi submetido a uma falta monofásica, onde ocorre um curto-circuito entre a fase-*a* e o terra, enquanto as fases-*bc* permanecem intactas. A perturbação foi programada para ocorrer no instante 0,05 s. Os resultados obtidos para este cenário são apresentados na Figura 9.

Neste trabalho, o algoritmo de DICSE foi implementado em uma função do Matlab, enquanto as demais partes do sistema foram modeladas em ambiente Simulink. Uma vez modelado, o sistema foi compilado na máquina local (ML) conectada ao simulador e convertido em código C, que em seguida, foi embarcado na CPU e FPGA do simulador. A ML pode interagir em tempo real alterando parâmetros do sistema e exibindo resultados.

Na Figura 9(a) observa-se a tensão no PAC antes e depois da ocorrência da falta. Na Figura 9(b) nota-se que a DICSE estimou a componente de sequência positiva ( $V_{sp}$ ) e a componente de sequência negativa ( $V_{sn}$ ) da tensão da rede. Após a ocorrência da perturbação na rede, foi observado um

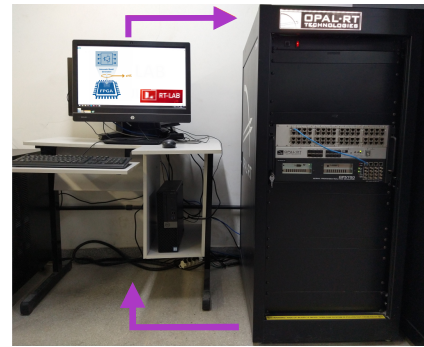


FIGURA 8. Sistema de validação em tempo real.

período transitório com duração em torno de 10 ms para o retorno efetivo das estimativas. Na Figura 9(c) notou-se que, como esperado, não houve componente de sequência zero ( $V_{s0}$ ) estimada até a ocorrência da perturbação na rede. Depois que a falta ocorreu, a DICSE começou a estimar a componente de sequência zero de forma adequada.

Os resultados da comparação entre os valores de referência preestabelecidos e os estimados para as componentes de sequência positiva, negativa e zero ( $V_{cpdq}$ ,  $V_{endq}$  e  $V_{c0}$ ), são apresentados nas Figuras 9(d), 9(e) e 9(f), respectivamente.

O sinal de referência para a componente de sequência positiva no eixo *d* ( $V_{spd}^*$ ) foi definido como sendo igual a tensão nominal da rede mais 3%. A justificativa deste ajuste é a compensação das quedas de tensão ao longo do circuito (chaves, filtragem e transformador de inserção). Os sinais de referência  $V_{spq}^*$ ,  $V_{snd}^*$ ,  $V_{snq}^*$  e  $V_{s0}^*$  são iguais a zero.

Os resultados 9(g) e 9(h) são, respectivamente, as componentes de sequência positiva ( $V_{p-abc}$ ) e negativa ( $V_{n-abc}$ ) de volta ao referencial estacionário que compõem os sinais de referência senoidais que serão entrada do esquema de modulação.



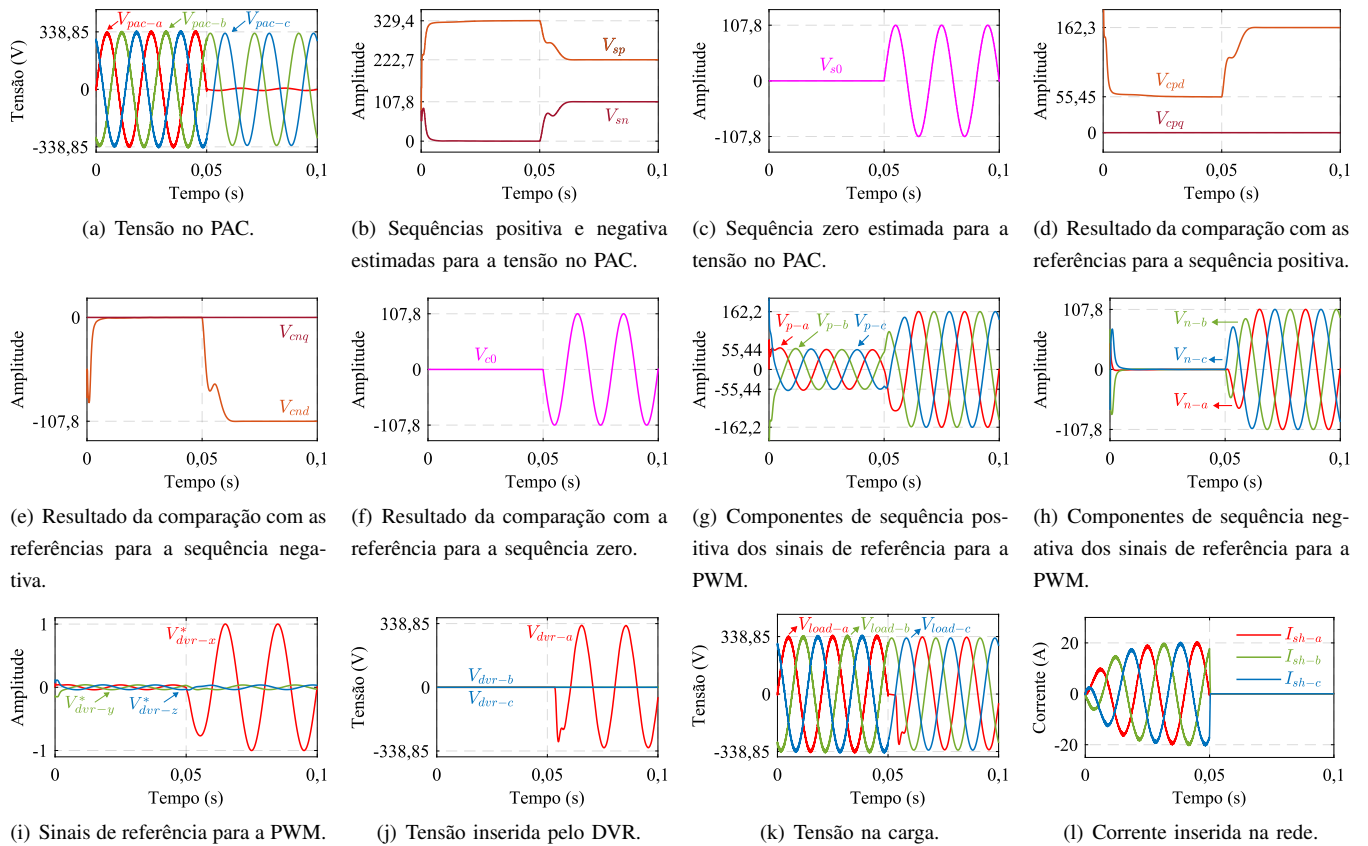


FIGURA 9. Resultados obtidos para o primeiro cenário: falta assimétrica monofásica.

De acordo com a estratégia proposta e contida no novo bloco de controle, o sinal de referência a ser entregue ao esquema de modulação é a soma  $V_{p-abc} + V_{n-abc} + V_{c0}$ . Esse resultado é apresentado na Figura 9(i). É um resultado expressivo e que valida a eficácia do novo bloco proposto. Observou-se que o sinal de referência gerado para a PWM ( $V_{dvr-xyz}^*$ ) atende a necessidade criada pela falta assimétrica de impor ao NSI a restauração apenas da fase que sofreu o distúrbio. Os sinais de referência para as outras duas fases, conforme necessário, apresentaram amplitude desprezível.

A Figura 9(j) mostra a tensão que foi produzida e inserida na rede através do transformador de inserção do DVR. Como esperado, a tensão foi inserida na rede apenas na fase que sofreu o distúrbio. Além disso, sua amplitude foi igual à tensão nominal da rede.

Na Figura 9(k) é apresentada a soma da tensão no PAC com a tensão inserida pelo DVR, sendo este resultado a tensão na carga. Após a ocorrência da perturbação, a fase perturbada passou por um transitório de aproximadamente 10 ms, sendo logo em seguida, completamente restaurada. Da Figura 9(l) pode observar-se que, como previsto, logo após a ocorrência da falta, a inserção de potência na rede pela planta fotovoltaica cessou.

Dando continuidade a validação do novo bloco de controle proposto, o sistema foi submetido a um segundo cenário.

Este, consistiu em uma falta bifásica ocorrida no PAC, onde as fases-*ab* vão para a terra, permanecendo a fase-*c* intacta. A perturbação foi programada para ocorrer no instante de tempo 0,05 s. Os resultados obtidos para este cenário são mostrados na Figura 10.

Na Figura 10(a) observa-se a tensão no PAC antes e depois da ocorrência da falta. Do resultado 10(b), notou-se que a DICSE estimou corretamente a componente de sequência positiva ( $V_{sp}$ ) e a componente de sequência negativa ( $V_{sn}$ ) da tensão da rede. Isso pode ser corroborado pelo cálculo analítico no regime permanente utilizando a matriz de Fortescue para transformação de um sistema trifásico em componentes de sequência. Após a ocorrência da falta, foi observado um período transitório com duração de aproximadamente 10 ms para o retorno efetivo das estimativas. Em 10(c) pode-se observar que, conforme esperado, não houve registro de componente de sequência zero ( $V_{s0}$ ) estimada até a ocorrência da falta na rede.

Nas Figuras 10(d), 10(e) e 10(f) são apresentados os resultados da comparação entre os valores de referência preestabelecidos e os valores estimados para as componentes de sequência positiva, negativa e zero ( $V_{cpdq}$ ,  $V_{cnq}$  e  $V_{c0}$ ), respectivamente.

Os sinais de referência entregues a PWM são compostos pelas suas componentes de sequência positiva ( $V_{p-abc}$ ),

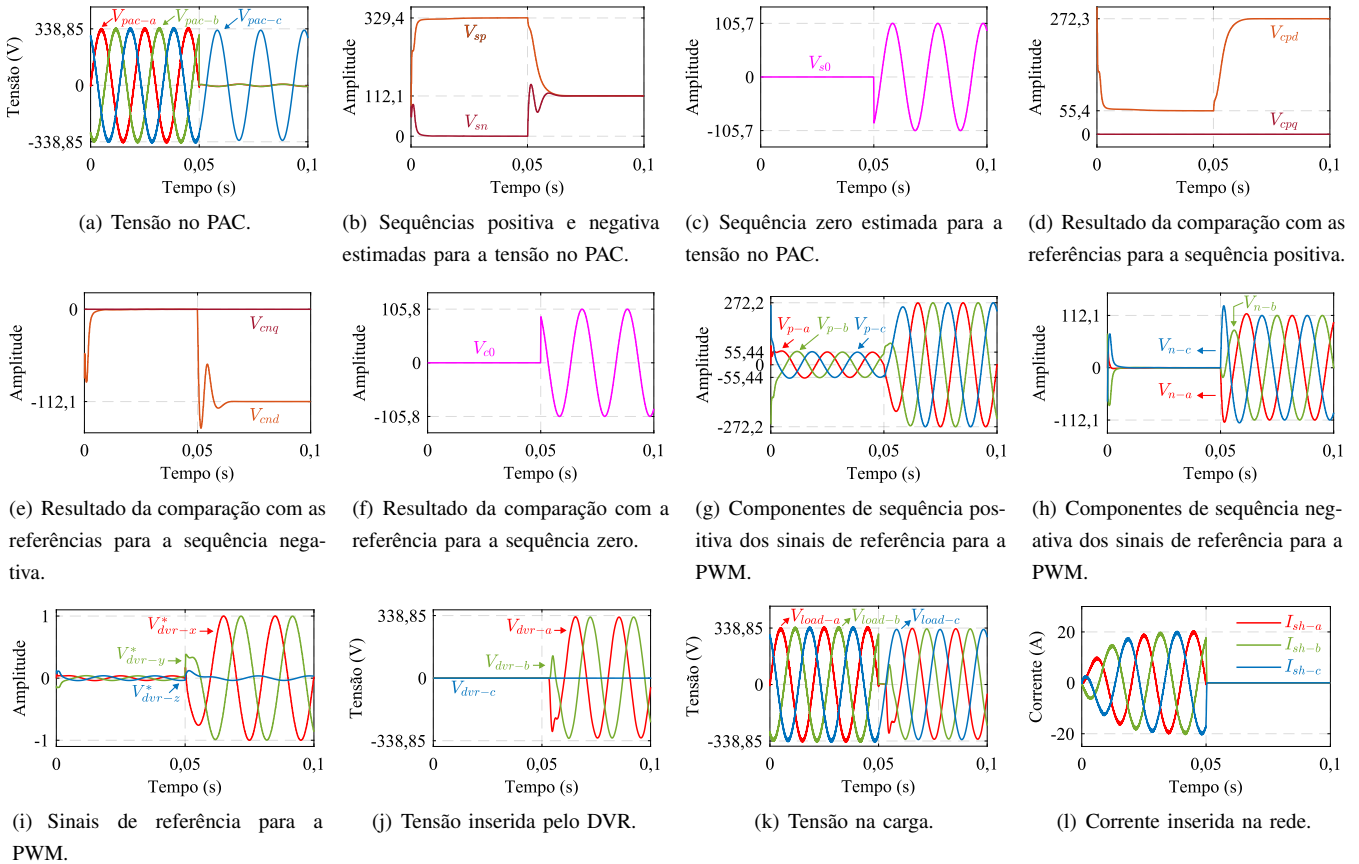


FIGURA 10. Resultados obtidos para o segundo cenário: falta assimétrica bifásica.

negativa ( $V_{n-abc}$ ) e zero ( $V_{c0} = V_{0-abc}$ ) no sistema de referência estacionário. Os resultados obtidos para as componentes de sequência positiva e negativa são apresentados nas Figuras 10(g) e 10(h), respectivamente.

Do resultado 10(i) observou-se que durante o cenário em questão o sinal de referência gerado para o esquema de modulação ( $V_{dvr-xyz}^*$ ) atendeu novamente a particularidade do evento, ou seja, impôs ao sistema a restauração apenas das duas fases perturbadas.

A Figura 10(j) mostra a tensão que foi produzida e inserida na rede através do transformador de inserção do DVR. Esta, apresentou amplitude igual a tensão nominal da rede. Logo, notou-se a partir de 10(k) que a carga experimentalmente tensão nominal após meio ciclo da fundamental da ocorrência da falta. Enquanto que, pelo resultado 10(l), constata-se que não houve inserção de potência na rede após a ocorrência do distúrbio.

Por fim, foi observado o comportamento do sistema completo diante de transições entre todos os seus modos possíveis de operação, incluindo a nova funcionalidade de ação perante faltas assimétricas. Para isso, adotou-se uma janela de observação com duração total de 0,3 s, onde a cada 0,05 segundos, ocorre uma perturbação na rede. A Tabela 3 contém a faixa de duração, bem como, as principais

características de cada evento programado. Os resultados obtidos para este cenário são apresentados na Figura 11.

Durante o Modo 1, a rede operou em condições nominais e pôde-se observar pelo resultado 11(d) que o sistema inseriu corrente na rede com amplitude de 20 A. A corrente inserida levou 30 ms (partindo de condições iniciais nulas) para entrar em regime permanente, o que equivale a 1,5 ciclo da frequência fundamental. Como esperado, não houve inserção de tensão na rede pelo DVR.

No instante 0,05 s, ocorreu um afundamento simétrico na rede com magnitude de 50% da tensão nominal. Após a detecção do evento, foi registrado um transitório com

TABELA 3. Teste de transição entre modos de operação

Faixa de Duração (Segundos)	Distúrbio	Características
0,00 → 0,05	Nenhum	Tensão na Rede = 1 p.u. (Nominal)
0,05 → 0,10	Afundamento Simétrico	Magnitude: 50% da Tensão Nominal da Rede
0,10 → 0,15	Afundamento Assimétrico	Magnitude: Fase-a = 40% da Tensão Nominal da Rede Fase-b = 70% da Tensão Nominal da Rede Fase-c = 70% da Tensão Nominal da Rede
0,15 → 0,20	Falta Trifásica	As três fases vão à terra simultaneamente
0,20 → 0,25	Falta Assimétrica Bifásica	Fases-ab vão para a terra e fase-c intacta
0,25 → 0,30	Falta Assimétrica Monofásica	Fase-a vai para terra e fases-bc intactas

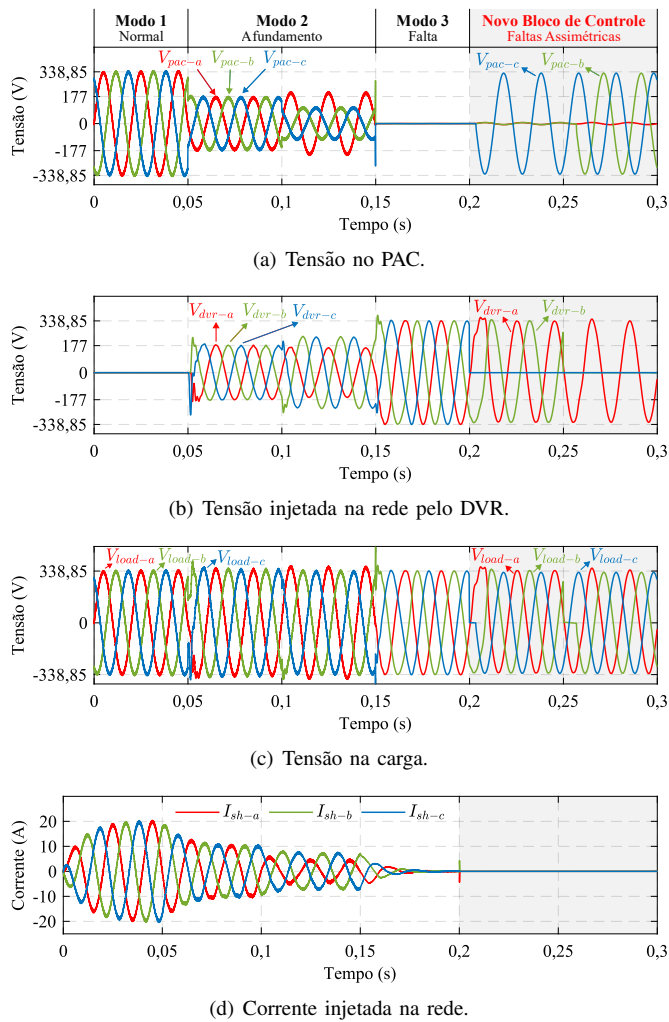


FIGURA 11. Teste de transição entre modos de operação.

duração de 10 ms, no qual foi registrada uma sobretensão com pico de aproximadamente 17% acima da tensão nominal. A carga foi exposta a esta sobretensão por 0,5 ms. Em relação a inserção de corrente na rede, foi observada uma redução na amplitude da corrente inserida proporcional a magnitude do afundamento, comportamento esperado, considerando que neste caso a energia da planta fotovoltaica também é utilizada para restaurar a tensão na carga.

Durante o afundamento assimétrico programado para ocorrer na faixa de 0,1 a 0,15 segundos, observou-se que a tensão gerada pelo DVR para a fase-*a* foi 10% maior que a tensão nominal. Para as outras duas fases a tensão gerada foi adequada à magnitude da queda que cada uma experimentou. Consequentemente, a tensão na fase-*a* da carga observada durante este evento também foi aumentada em 10% da sua tensão nominal. A razão para isso é a mesma que motivou este trabalho, que é a dificuldade do sistema de controle inadequado em operar diante de assimetrias nas tensões da rede. Uma abordagem capaz de melhorar a atuação deste sistema durante afundamentos assimétricos já

foi proposta e pode ser consultada em [24]. As correntes inseridas apresentaram reduções proporcionais a magnitude do afundamento em cada fase.

O sistema entrou no Modo 3 no instante 0,15 s após detectar a ocorrência de uma falta trifásica no PAC. Após um transitório menor que meio ciclo da frequência fundamental, o sistema foi capaz de inserir tensão nominal nas três fases perturbadas, restaurando em plenitude a tensão da carga. Conforme necessário, após a ocorrência do evento, observou-se que a corrente inserida na rede cessou após 25 ms.

A zona de operação do novo bloco de controle proposto neste trabalho corresponde à faixa de tempo que vai de 0,2 a 0,3 segundos. Foram programados os mesmos dois cenários discutidos anteriormente. Em 0,2 s ocorreu uma falta bifásica, onde as fases-*ab* falharam, enquanto a fase-*c* permaneceu íntegra. Em 0,25 s, a rede retoma a integridade da fase-*b*, entrando em uma situação de falta monofásica, onde apenas a fase-*a* segue perturbada. Para as duas faltas assimétricas, em aproximadamente 10 ms o sistema foi capaz de gerar tensões de compensação adequadas a cada cenário. Não registrou-se inserção de potência em nenhum cenário de falta assimétrica. Do resultado 11(c), conclui-se que a carga experimentou tensão nominal durante a ocorrência de todos os distúrbios de tensão ocorridos no PAC.

Ao comparar os resultados obtidos neste trabalho com os limites aceitáveis de magnitude e duração das variações de tensão às quais uma carga sensível pode ser exposta contidos na curva ITI (CBEMA) [20], [21], notou-se que durante a ação do novo bloco de controle proposto, nenhum desses limites foi transgredido.

## VI. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado um novo bloco de controle adicionado a um sistema FV-DVR integrado via NSI, tendo como objetivo dotar o sistema com a capacidade de operar adequadamente durante a ocorrência de faltas assimétricas no PAC. Os estudos realizados demonstram a validade da solução, que consiste em realizar a decomposição instantânea em componentes sequência da tensão na rede e depois utilizá-las separadamente para realizar o controle, suprimindo a falta desta funcionalidade no sistema original.

Para avaliar a contribuição apresentada foram considerados dois cenários de faltas assimétricas ocorridas no PAC, sendo o primeiro uma falta monofásica e o segundo uma falta bifásica. As validações foram realizadas utilizando-se uma plataforma de simulação em tempo real, por meio da qual foi comprovada a validade dos desenvolvimentos realizados. Verificou-se que o comportamento observado para os sinais de controle do novo bloco proposto atende a demanda imposta pelas faltas assimétricas de gerar sinais de referência para o esquema de modulação apenas para as fases perturbadas. Além disso, em ambos os cenários, o sistema restaurou completamente a tensão de carga. Não foram observadas transgressões dos limites aceitáveis de duração ou magnitude das variações de tensão na carga.

A partir dos resultados obtidos é possível concluir que o novo bloco de controle proposto agrega uma funcionalidade importante ao sistema original, visto que a maioria das faltas que ocorrem em sistemas de distribuição elétrica são do tipo assimétrica.

## AGRADECIMENTO

Os autores agradecem ao Termo de Outorga nº 019/2023, Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ) pelo suporte financeiro concedido a este trabalho.

## CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

**DE ASSIS, J.R.P.:** Conceitualização, Curadoria de dados, Análise de dados, Recebimento de financiamento, Pesquisa, Metodologia, Administração do projeto, Disponibilização de ferramentas, Desenvolvimento, implementação e teste de software, Validação de dados e experimentos, Design da apresentação de dados, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição. **FERNANDES, D.A.:** Conceitualização, Curadoria de dados, Análise de dados, Recebimento de financiamento, Pesquisa, Metodologia, Administração do projeto, Disponibilização de ferramentas, Desenvolvimento, implementação e teste de software, Supervisão, Validação de dados e experimentos, Design da apresentação de dados, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição. **CORRÊA, M.B.R.:** Conceitualização, Curadoria de dados, Análise de dados, Recebimento de financiamento, Pesquisa, Metodologia, Desenvolvimento, implementação e teste de software, Supervisão, Validação de dados e experimentos, Design da apresentação de dados, Redação - revisão e edição. **SQUAREZI FILHO, A.J.:** Conceitualização, Análise de dados, Recebimento de financiamento, Administração do projeto, Supervisão. **COSTA, F.F.:** Conceitualização, Análise de dados, Pesquisa, Metodologia, Disponibilização de ferramentas, Desenvolvimento, implementação e teste de software, Supervisão, Validação de dados e experimentos, Redação - revisão e edição. **DA SILVA, E.R.C.:** Conceitualização, Análise de dados, Supervisão, Validação de dados e experimentos, Redação - revisão e edição.

## PLÁGIO E SIMILARIDADE

O artigo foi submetido para verificação de similaridade no sistema Crossref Similarity Check (iThenticate).

## REFERÊNCIAS

- [1] International Energy Agency - IEA, "Low-emissions sources are set to cover almost all the growth in global electricity demand in the next three years", Online, 2023, URL: <https://www.iea.org/news>.
- [2] International Energy Agency - IEA, "The global power mix will be transformed by 2028", 2024, URL: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>.
- [3] X.-P. Zhang, Z. Yan, "Energy Quality: A Definition", *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*, vol. 7, pp. 430–440, 2020, doi:10.1109/OAJPE.2020.3029767.
- [4] J. V. Milanovic, Y. Zhang, "Modeling of FACTS Devices for Voltage Sag Mitigation Studies in Large Power Systems", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 4, pp. 3044–3052, 2010, doi:10.1109/TPWRD.2010.2052395.
- [5] S. R. Naidu, D. A. Fernandes, "Dynamic voltage restorer based on a four-leg voltage source converter", *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 3, no. 5, pp. 437–447, May 2009.
- [6] J. Nielsen, F. Blaabjerg, N. Mohan, "Control strategies for dynamic voltage restorer compensating voltage sags with phase jump", in *APEC 2001. Sixteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (Cat. No.01CH37181)*, vol. 2, pp. 1267–1273 vol.2, 2001, doi:10.1109/APEC.2001.912528.
- [7] M. K. Pinjala, R. Bhimasingu, "Improving the DC-Link Utilization of Nine-Switch Boost Inverter Suitable for Six-Phase Induction Motor", *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 6, no. 3, pp. 1177–1187, 2020, doi:10.1109/TTE.2020.3010337.
- [8] A. Lopes, M. C. Cavalcanti, G. M. S. Azevedo, L. R. Limongi, M. Gomes, "Sistema de Energia Ininterrupta Trifásico Baseado no Conversor de Nove Chaves", *Eletrônica de Potência*, vol. 26, p. 171–181, Jun. 2021, doi:10.18618/REP.2021.2.0065.
- [9] O. Gulbudak, M. Gokdag, "Dual-Hysteresis Band Control of Nine-Switch Inverter to Control Two Induction Motors", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 37, no. 2, pp. 788–799, 2022, doi:10.1109/TEC.2021.3131385.
- [10] M. G. Abdel-Moneim, W. E. Abdel-Azim, A. S. Abdel-Khalik, M. S. Hamed, S. Ahmed, "Model Predictive Current Control of Nine-Switch Inverter-Fed Six-Phase Induction Motor Drives Under Healthy and Fault Scenarios", *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, pp. 1–1, 2024, doi:10.1109/TTE.2024.3368791.
- [11] Z. Yu, C. Gan, K. Ni, S. Wang, X. Liu, J. Sun, R. Qu, "Optimized Nine-Switch Converter-Fed Flux-Modulated Doubly-Salient Reluctance Motor Drive With Integrated ZSC Regulation Ability Considering Efficiency Improvement", *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, pp. 1–1, 2024, doi:10.1109/TTE.2024.3357860.
- [12] A. M. Rauf, V. Khadkikar, "Integrated Photovoltaic and Dynamic Voltage Restorer System Configuration", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 6, no. 2, pp. 400–410, 2015, doi:10.1109/TSTE.2014.2381291.
- [13] G. Yalçinkaya, M. Bollen, P. Crossley, "Characterization of voltage sags in industrial distribution systems", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 34, no. 4, pp. 682–688, 1998, doi:10.1109/28.703958.
- [14] M. H. Bollen, *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*, Wiley-IEEE Press, 2000.
- [15] O. Ojo, "The generalized discontinuous PWM scheme for three-phase voltage source inverters", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 51, no. 6, pp. 1280–1289, 2004, doi:10.1109/TIE.2004.837919.
- [16] F. Gao, L. Zhang, D. Li, P. C. Loh, Y. Tang, H. Gao, "Optimal Pulsewidth Modulation of Nine-Switch Converter", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 9, pp. 2331–2343, 2010, doi:10.1109/TPEL.2010.2047733.
- [17] L. Zhang, P. C. Loh, F. Gao, "An Integrated Nine-Switch Power Conditioner for Power Quality Enhancement and Voltage Sag Mitigation", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 3, pp. 1177–1190, 2012, doi:10.1109/TPEL.2011.2115256.
- [18] T. Esum, P. L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 439–449, Jun 2007.
- [19] T. Basso, R. DeBlasio, "IEEE P1547-series of standards for interconnection", in *2003 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (IEEE Cat. No.03CH37495)*, vol. 2, pp. 556–561 vol.2, 2003, doi:10.1109/TDC.2003.1335335.
- [20] "IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment", *IEEE Std 1100-2005 (Revision of IEEE Std 1100-1999)*, pp. 1–703, 2006, doi:10.1109/IEEESTD.2006.216391.
- [21] "IEEE Recommended Practice for the Design and Application of Power Electronics in Electrical Power Systems", *IEEE Std 1662-2016 (Revision of IEEE Std 1662-2008)*, pp. 1–68, 2017, doi:10.1109/IEEESTD.2017.7874058.
- [22] D. A. Fernandes, S. R. Naidu, C. Coura, "Instantaneous Sequence-Component Resolution of 3-Phase Variables and Its Application to Dynamic Voltage Restoration", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 58, no. 8, pp. 2580–2587, 2009, doi:10.1109/TIM.2009.2015634.
- [23] D. A. Fernandes, F. F. Costa, E. C. dos Santos, "Digital-Scalar PWM Approaches Applied to Four-Leg Voltage-Source Inverters", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 5, pp. 2022–2030, 2013, doi:10.1109/TIE.2012.2217712.



[24] J. R. P. de Assis, D. A. Fernandes, F. F. Costa, P. C. Ribeiro, R. G. de Almeida, "Asymmetric Voltage Sag Compensation Capability of Dual Voltage Source Inverter", in *2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 2494–2498, 2020, doi:10.1109/ECCE44975.2020.9235392.

## DADOS BIAGRÁFICOS

**Jefferson Rafael Pereira de Assis** recebeu o título de bacharel (2019) e mestre (2021) em engenharia elétrica pela Universidade Federal da Paraíba. Atualmente é aluno do curso de doutorado em engenharia elétrica da Universidade Federal de Campina Grande. Seus interesses de pesquisa incluem aplicações de eletrônica de potência em sistemas de distribuição, qualidade de energia, integração de energias renováveis, simulações em tempo real e estabilidade de conversores conectados à rede. É membro estudante da SOBRAEP e do IEEE.

**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. É membro da Sobraep e 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. De 2004 a 2024, trabalhou no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. Atualmente é Professor na Universidade Federal de Alagoas. 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). Seus interesses de pesquisa incluem sistemas de acionamento, eletrônica de potência e energia renovável.

**Alfeu J. Sguarezi Filho** recebeu seu mestrado e seu Doutorado em Eng. Elétrica pela Universidade de Campinas, respectivamente em 2007 e 2010. É professor da Universidade Federal do ABC - UFABC, em Santo André, lecionando nas áreas de Máquinas Elétricas, Eletrônica de Potência e Acionamentos Elétricos. É membro Sênior do IEEE.

**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). Realizou pós-doutorado no CPES (Center for Power Electronics Systems) na Virginia Tech (EUA). 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).

**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 UFPB e continua ativo como pesquisador, sendo vinculado aos cursos de pós-graduação em Engenharia Elétrica na UFPB e 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.