

UM ALGORITMO ROBUSTO E RÁPIDO PARA DETECÇÃO DE AFUNDAMENTO DE TENSÃO

Joacillo L. Dantas¹, Francisco Kleber de A. Lima¹, Josep M. Guerrero², Juan C. Vasquez¹, Carlos Gustavo C. Branco¹

¹Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica, Fortaleza-CE, Brasil

²Aalborg University, Department of Energy Technology, Aalborg-Dinamarca

e-mail: joacillo@ifce.edu.br, klima@dee.ufc.br, joz@et.aau.dk, juq@et.aau.dk, gustavo@dee.ufc.br

Resumo – Afundamento de tensão é um problema recorrente em sistemas elétricos, sendo o mesmo considerado um dos mais relevantes fatores que contribuem para a deterioração da qualidade de energia elétrica. Neste artigo, um novo e abrangente algoritmo de detecção de afundamentos de tensão, batizado de ADAMF, é apresentado. O mesmo tem a capacidade de detectar, rapidamente, afundamentos de tensões simétricos e assimétricos devido à sua habilidade de monitorar, independentemente, a componente fundamental de tensão em cada fase. O valor agregado das tensões, no referencial $\alpha\beta$, é comparado com 0,9 com o intuito de detectar ocorrência deste tipo de contingência. Simulações e resultados experimentais são apresentados para validação do algoritmo proposto.

Palavras-chave – Afundamento de Tensão, Afundamento Desbalanceado e Balanceado, Algoritmo de Detecção.

A ROBUST AND FAST VOLTAGE SAG DETECTION ALGORITHM

Abstract – Voltage sag is a common problem in electrical power systems, whereby it is considered as being one of the major factors that contribute to the power quality deterioration. In this paper, a novel and generic voltage sag detection algorithm, named ADAMF, is presented. The algorithm can rapidly detect symmetric and asymmetric voltage sags due to its ability to independently monitor the fundamental voltage component of each phase. The aggregated voltages are then compared to 0.9, in order to detect voltage sags. Simulations and experimental results are given for the proposed algorithm validation.

Keywords – Balanced Voltage Sag, Sag Detection Algorithm, Unbalanced Voltage Sag.

I. INTRODUÇÃO

Sendo um dos fatores responsáveis pela diminuição da qualidade de energia em sistemas elétricos, o afundamento de tensão ocorre quando o valor eficaz da tensão na rede elétrica está entre 0,1 p.u. e 0,9 p.u., em um intervalo entre 0,5 ciclo a 3 segundos [1]. O mesmo geralmente é ocasionado por curto-circuitos, sobrecargas na rede elétrica e partida de grandes motores [2]. Um estudo sobre uma nova classificação de

afundamentos de tensão, de acordo com o tipo, características e presença de componentes de sequência zero, foi apresentado em [3], enquanto que classificações de afundamentos de tensão foram abordadas em [4], [5]. Aplicando-se o conceito de valor agregado, introduzido em [6], consegue-se facilmente identificar afundamentos de tensão balanceados. Porém, a maioria dos afundamentos são desbalanceados, e mais de 75% deles são afundamentos de tensão monofásicos [2]. Este fato tem motivado a produção de vários artigos relacionados com detecção de afundamentos assimétricos, como em [7], onde um filtro adaptativo não linear foi usado para rastrear a profundidade do afundamento. Os autores afirmam que o tempo de detecção é de 2 ms, contudo, o algoritmo não foi testado em condições de tensões distorcidas.

Um referencial síncrono, combinado com um diferenciador e um filtro passa baixa foi usado em [8] para obtenção de um detector de afundamentos. Porém, o diferenciador sofria influência de harmônicas em sistemas com distorções. Os autores somente mostraram resultados de simulação. Em [9] os mesmos autores apresentaram um aperfeiçoamento do trabalho anterior, mas fizeram a tensão cair para 0 V durante os resultados experimentais, o que na verdade está fora do intervalo considerado como afundamento de tensão [1].

Diferentes métodos de identificação da origem de afundamentos de tensão foram discutidos em [10], bem como um método generalizado de identificação de afundamentos, baseado em monitoramento de corrente, foi proposto.

Um algoritmo para rastreamento da profundidade do afundamento foi apresentado em [11]. Foram realizadas comparações com o método de detecção do valor eficaz e com o algoritmo DFT (*Discrete Fourier Transform*) para avaliação de seu desempenho. O tempo de detecção ficou acima de 105 ms, mostrando que o algoritmo é lento.

Já o detector de afundamento estudado em [12] usou a transformada de Park. Todavia, as derivadas de tensão, contidas no algoritmo, foram problemáticas durante oscilações grandes de tensão. A necessidade de incluir um filtro na saída da função derivativa acrescentou um atraso no tempo de detecção.

O trabalho desenvolvido em [13] combina linearmente, a partir de um sistema trifásico, componentes de sequência positiva e negativa no referencial síncrono dq . A transformada recursiva de Fourier, no domínio discreto, extrai a magnitude das componentes. Em simulação, os tempos de detecção para afundamentos simétricos e assimétricos foram 6,6 e 4 ms respectivamente.

Um método para detecção de afundamentos chamado de SPLL (*Soft Phase-Locked Loop*), baseado no filtro LES (*Least Error Squares*), foi discutido em [14]. O tempo necessário para detecção em simulação, para o método proposto, foi de

Artigo submetido em 20/08/2015. Primeira revisão em 13/12/2015. Segunda revisão em 17/03/2016. Aceito para publicação em 17/03/2016, por recomendação do Editor Cassiano Rech.

3 ms. Enquanto que o algoritmo WHLSE (*Weighted Least-Square*), apresentado em [15], usava a técnica de inicialização da covariância, que necessitava de meio ciclo para ser atingida. Em casos de afundamentos severos, a inicialização da covariância ocorria inúmeras vezes, provocando atrasos relevantes na detecção do afundamento.

Adotando como critério mudanças na magnitude e na fase das componentes de sequência positiva e negativa, o estudo feito em [16] apresentou um método de identificação de afundamento de tensão a partir de medições das correntes de linha.

No trabalho desenvolvido em [17] foi apresentado um algoritmo gerador de referência de tensão, que pode ser usado para regular a tensão no PCC, a fim de alimentar cargas sensíveis. Os autores utilizaram o detector de amplitude de sequência positiva proposto em [18] para identificar o afundamento de tensão. Já em [19] os autores usaram uma nova metodologia para determinação dos coeficientes de Wavelet, na transformada de mesmo nome, como uma ferramenta eficiente para caracterização de afundamentos de tensão.

Os estudos apresentados enfatizam que o afundamento de tensão é um evento preocupante. O mesmo pode ser danoso para cargas sensíveis [20]. Afundamentos de tensão também exercem uma influência negativa em geradores conectados à rede elétrica, especialmente nos Geradores de Indução Duplamente Alimentados, pois nessas máquinas o estator é conectado diretamente à rede elétrica [21], [22]. É importante também destacar a aplicação do DVR (*Dynamic Voltage Restorer*) para aumentar a capacidade LVRT (*Low Voltage Ride Through*) de turbinas eólicas e para compensar afundamentos na rede elétrica [23]–[28], a utilização de dispositivos como o STATCOM (*Static Compensator*) e o UPQC (*Unified Power Quality Conditioner*) para regulação de tensão em sistemas elétricos [29]–[31], bem como os novos códigos de rede e suas exigências em relação ao LVRT para sistemas de geração eólica [32]–[34]. Portanto, torna-se imperativa a detecção rápida e precisa dos afundamentos de tensões com o intuito de contribuir com os equipamentos que combatem os efeitos indesejados desse tipo de contingência.

Este artigo propõe um algoritmo rápido e robusto para detecção de afundamento de tensão, chamado de ADAMF, cujo acrônimo significa *Algoritmo de Detecção de Afundamentos através do Monitoramento da Componente Fundamental*. Criando três sistemas de coordenadas $\alpha\beta$ monofásicos, o algoritmo monitora individualmente a componente fundamental da tensão em cada fase do sistema, e identifica, de maneira rápida e precisa, afundamentos de tensões simétricos e assimétricos, até mesmo em condições de tensões distorcidas. Simulações e resultados experimentais são mostrados como validação do algoritmo proposto. O artigo está organizado como segue: na Seção II o algoritmo é explicitado. Simulações e resultados experimentais estão respectivamente nas Seções III e IV. A Seção V conclui esse artigo.

II. DESCRIÇÃO DO ALGORITMO ADAMF

Considerando um sistema trifásico ABC composto por três tensões senoidais denotadas, respectivamente, por $v_a(t)$, $v_b(t)$ e $v_c(t)$, e atrasando a tensão $v_a(t)$ de um quarto do período fundamental T , a tensão resultante pode ser chamada

de $v_{a\frac{\pi}{2}}(t)$. Desta forma, $v_a(t)$ e $v_{a\frac{\pi}{2}}(t)$ constituem um sistema monofásico no referencial $\alpha\beta$, sendo $v_{\alpha\alpha}(t) = v_a(t)$ e $v_{\alpha\beta}(t) = v_{a\frac{\pi}{2}}(t)$.

O *Dual Second Order Generalized Integrator-Frequency Locked Loop* (DSOGI-FLL) é um circuito para sincronização com a rede elétrica que usa uma estrutura adaptativa de rastreamento de frequência [35]. Aplicando as tensões $v_{\alpha\alpha}(t)$ e $v_{\alpha\beta}(t)$ como entradas do DSOGI-FLL este produz quatro sinais de saída: $v'_{\alpha\alpha}(t)$, $qv'_{\alpha\alpha}(t)$, $v'_{\alpha\beta}(t)$ e $qv'_{\alpha\beta}(t)$. A tensão $v_{\alpha\alpha}(t)$ está em fase com $v'_{\alpha\alpha}(t)$ e em quadratura com $qv'_{\alpha\alpha}(t)$. Da mesma forma, $v_{\alpha\beta}(t)$ está em fase com $v'_{\alpha\beta}(t)$ e em quadratura com $qv'_{\alpha\beta}(t)$. Usando os sinais de saída, conforme indicado em (1) e (2), o algoritmo extrai um sistema de tensões, em $\alpha\beta$, de valor de pico unitário. Sendo que a tensão $v_{\alpha\alpha}^+(t)$ está em fase com a componente fundamental da tensão original $v_a(t)$, e $v_{\alpha\beta}^+(t)$ está defasada de $\frac{\pi}{2}$ radianos da mesma componente. Neste artigo, a tensão $v_{\alpha\alpha}^+$ será chamada de componente fundamental normalizada da tensão da fase A, e $v_{\alpha\beta}^+$ de componente fundamental normalizada em quadratura da tensão na fase A.

$$v_{\alpha\alpha}^+(t) = v'_{\alpha\alpha}(t) - qv'_{\alpha\beta}(t) \quad (1)$$

$$v_{\alpha\beta}^+(t) = qv'_{\alpha\alpha}(t) + v'_{\alpha\beta}(t) \quad (2)$$

Adotando o mesmo procedimento para as outras fases, as componentes fundamentais normalizadas das tensões obtidas são $v_{b\alpha}^+(t)$, $v_{b\beta}^+(t)$, $v_{c\alpha}^+(t)$ e $v_{c\beta}^+(t)$. É importante enfatizar que a capacidade de filtragem do DSOGI atenua o efeito das harmônicas, de forma que as tensões fundamentais normalizadas são senóides com reduzida distorção harmônica [34], [35], tornando o algoritmo também adequado para sistemas com distorções. O diagrama de blocos ilustrando a extração da componente fundamental normalizada para a fase A pode ser visto na Figura 1, sendo $q = e^{-j\frac{\pi}{2}}$ o operador de defasagem de $\frac{\pi}{2}$ radianos, e ω' a frequência angular das tensões trifásicas rastreada pelo FLL. A divisão por $\sqrt{2}V_{aRMS}$ possibilita representar o valor de pico normalizado das tensões, que é V_{aMax} , onde V_{aRMS} é o valor eficaz da tensão na fase A. De maneira similar, o máximo valor para as fases B e C são respectivamente V_{bMax} e V_{cMax} .

O valor agregado das tensões normalizadas na fase A, no referencial $\alpha\beta$, pode ser escrito como:

$$V_{\alpha\beta Agg}^+ = \sqrt{v_{\alpha\alpha}^+(t)^2 + v_{\alpha\beta}^+(t)^2} \quad (3)$$

$$V_{\alpha\beta Agg}^+ = \sqrt{[V_{aMax}^+ \text{sen}(\omega t)]^2 + [V_{aMax}^+ \text{cos}(\omega t)]^2} \quad (4)$$

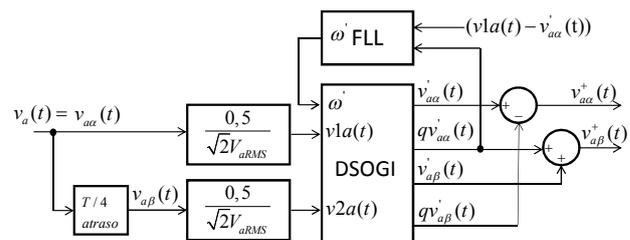


Fig. 1. Extração das componentes fundamentais normalizadas da tensão na fase A.

$$V_{a\alpha\beta Agg}^+ = V_{aMax}^+ \quad (5)$$

O circuito da Figura 1 é replicado para as fases B e C, sendo o valor agregado das tensões normalizadas determinados por:

$$V_{b\alpha\beta Agg}^+ = \sqrt{v_{ba}^+(t)^2 + v_{bb}^+(t)^2} = V_{bMax}^+ \quad (6)$$

$$V_{c\alpha\beta Agg}^+ = \sqrt{v_{ca}^+(t)^2 + v_{cb}^+(t)^2} = V_{cMax}^+ \quad (7)$$

Para tensões nominais da rede elétrica tem-se que $V_{aMax}^+ = V_{bMax}^+ = V_{cMax}^+ = 1 \text{ p.u.}$, porém, durante afundamento de tensão em alguma das fases, o valor agregado correspondente fica menor do que 1 p.u. , sendo assim, o algoritmo pode facilmente detectar, através do circuito mostrado na Figura 2, afundamentos monofásicos, bifásicos e trifásicos. O afundamento é indicado pelo sinal digital v_{sd} , durante o qual $v_{sd} = 1$, caso contrário $v_{sd} = 0$.

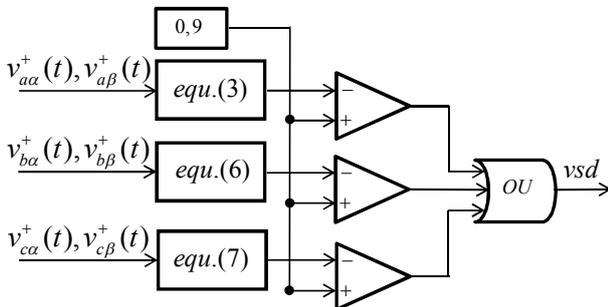


Fig. 2. Circuito de sinalização do afundamento.

III. ESTUDO POR SIMULAÇÃO

Simulações foram executadas usando o software MATLAB/SIMULINK. Os dados dos afundamentos de tensão empregados nas simulações, assim como a distorção harmônica total (THD - Total Harmonic Distortion) das tensões, são apresentados na Tabela I.

Pode-se representar a redução do valor eficaz de tensão pelo valor percentual da queda de tensão ou pelo valor percentual da tensão remanescente [1]. Este trabalho adota a tensão remanescente para especificar a profundidade do afundamento.

TABELA I
Características das Simulações

Afundamento de Tensão			
Tipo	Profundidade (p.u.)	Duração (s)	THD
Monofásico	0,4	6,0-6,4	0%
Monofásico	0,4	6,0-6,4	11,48%
Bifásico	0,6	6,0-6,4	0%

A. Afundamento Monofásico

O algoritmo foi primeiramente simulado para um afundamento monofásico de $0,4 \text{ p.u.}$ A Figura 3 mostra as tensões do sistema trifásico e a Figura 4 mostra o sinal de detecção do afundamento (v_{sd}) e o valor agregado das tensões normalizadas na fase A ($v_{a\alpha\beta Agg}^+$). O tempo de detecção foi

$3,8 \text{ ms}$, mas o mesmo depende do ponto da senoide onde o afundamento se inicia. Os valores agregados nas fases B e C não sofreram alterações ($v_{b\alpha\beta Agg}^+ = v_{c\alpha\beta Agg}^+ = 1$).

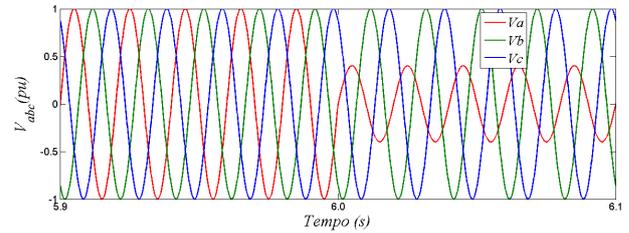


Fig. 3. Afundamento monofásico na fase A.

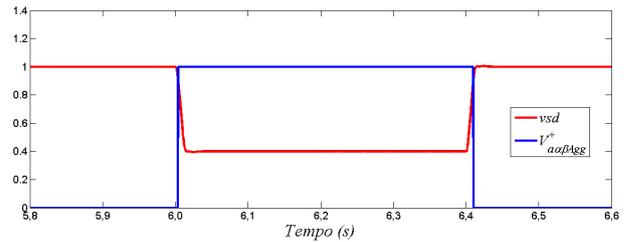


Fig. 4. Sinal digital v_{sd} e valor agregado das tensões normalizadas da fase A ($V_{a\alpha\beta Agg}^+$).

B. Afundamento Monofásico em um Sistema Distorcido

As tensões do sistema trifásico simulado apresentam $THD = 11,58\%$, sendo as distorções harmônicas individuais iguais a 10% para a 5^a harmônica, 5% para a 7^a harmônica e 3% para a 11^a harmônica. A Figura 5 mostra o sinal distorcido $v_{1a}(t)$ e a componente α da tensão normalizada, ratificando a capacidade de filtragem do algoritmo, uma vez que $v_{a\alpha}^+$ apresenta $THD = 1,73\%$. A detecção do afundamento está esboçada na Figura 6. Devido ao fato do algoritmo determinar o valor agregado a partir da tensão fundamental normalizada, o tempo de detecção para este caso é idêntico ao da Subseção III.A, sendo igual a $3,8 \text{ ms}$.

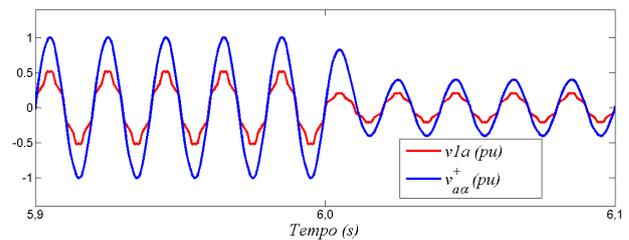


Fig. 5. Tensões v_{1a} e $v_{a\alpha}^+$.

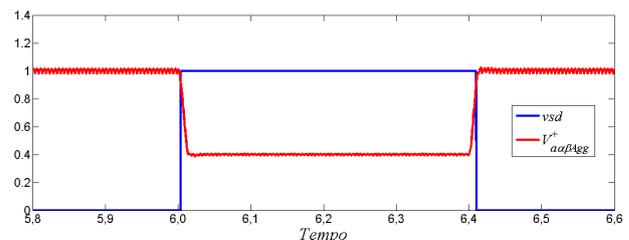


Fig. 6. Sinal v_{sd} e valor agregado da tensão normalizada da fase A em rede com $THD = 11,58\%$.

C. Afundamento Bifásico

Para o caso bifásico, simulou-se um afundamento de 0,6 p.u. nas fases A e B. A detecção ocorre quando o valor agregado se torna menor do que a referência (0,9 p.u.), e para esta simulação foi feita em 1,8 ms. O sinal de detecção do afundamento (v_{sd}) e o valor agregado da tensão da fase B estão indicados na Figura 7.

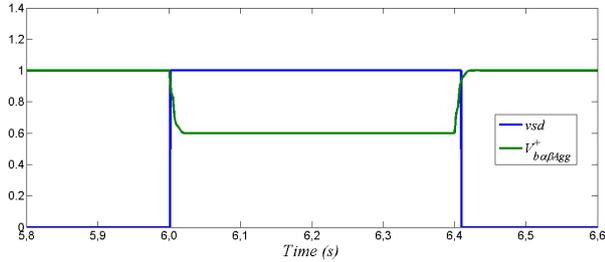


Fig. 7. Sinal v_{sd} e valor agregado da tensão normalizada da fase B ($V_{ba\beta Agg}^+$).

IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O desempenho do algoritmo proposto foi avaliado em um emulador de rede elétrica baseado em eletrônica de potência, o qual gerou os afundamentos e distorções necessárias para os testes.

A. Emulador de Rede

O experimento foi realizado no laboratório de *Microgrid Research* da universidade de Aalborg, utilizando-se o emulador de rede apresentado em [36]. O emulador é composto por dois inversores em topologia *back-to-back* com um filtro de entrada tipo *LCL* e um de saída tipo *LC*. O mesmo foi alimentado com um transformador trifásico de tensão nominal de linha 380/400 V e configurado para produzir uma tensão senoidal, em 50 Hz, de valor eficaz igual a 127 V. Um dSPACE 1006 possibilitou o gerenciamento em tempo real do algoritmo ADAMF. O esquema elétrico do emulador de rede, integrado com o dSPACE e com o algoritmo proposto, está esboçado na Figura 8.

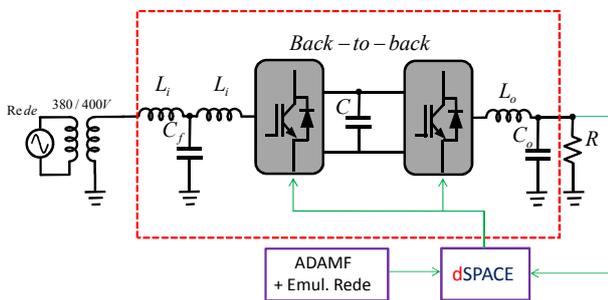


Fig. 8. Esquema do emulador integrado ao ADAMF.

Desprezando-se as componentes de sequência zero na transformada inversa de Clarke, as tensões de referência para geração do afundamento de tensão podem ser expressas, em coordenadas $\alpha\beta$, como:

$$v_{\alpha Ref}(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} v_{\alpha Ref}(t) \quad (8)$$

$$v_{\beta Ref}(t) = -\frac{v_{\alpha Ref}(t)}{\sqrt{6}} + \frac{v_{\beta Ref}(t)}{\sqrt{2}} \quad (9)$$

$$v_{c Ref}(t) = -\frac{v_{\alpha Ref}(t)}{\sqrt{6}} - \frac{v_{\beta Ref}(t)}{\sqrt{2}} \quad (10)$$

onde o subscrito *Ref* indica valor de referência. Portanto, para se conseguir um afundamento de tensão com o emulador de rede, é necessário multiplicar as tensões de referência por valores que correspondam ao tipo e profundidade de afundamento desejado, o que pode ser feito configurando-se as constantes k_1 e k_2 , de forma que:

$$v_{\alpha Ref}(t) = k_1 \sqrt{2} V_{\alpha rms} \cos(\omega t) \quad (11)$$

$$v_{\beta Ref}(t) = k_2 \sqrt{2} V_{\beta rms} \sen(\omega t) \quad (12)$$

sendo $V_{\alpha rms}$ e $V_{\beta rms}$ os valores de referência relativos à tensão eficaz nominal do sistema. De acordo com (8), (9) e (10) é possível produzir qualquer tipo de afundamento, exceto o monofásico puro, pois neste caso as outras fases também serão suavemente afetadas.

B. Afundamento Monofásico

Um afundamento monofásico de 0,4 p.u. na fase A, gerado pelo emulador de rede, foi identificado em 4,5 ms pelo ADAMF. Para esse caso fez-se $k_1 = 0,4$ e $k_2 = 1$. As Figuras 9 e 10 mostram, respectivamente, detalhes do afundamento e o tempo de detecção do mesmo. Já a Figura 11 destaca a relação entre o sinal v_{sd} e o valor agregado de tensão na fase A.

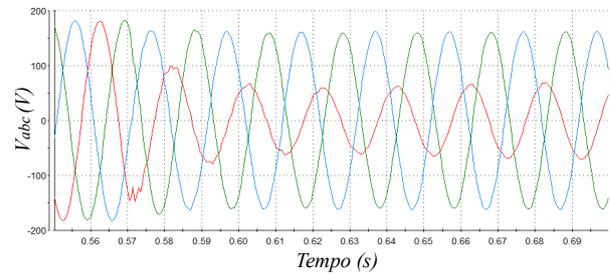


Fig. 9. Afundamento monofásico de 0,4 p.u.

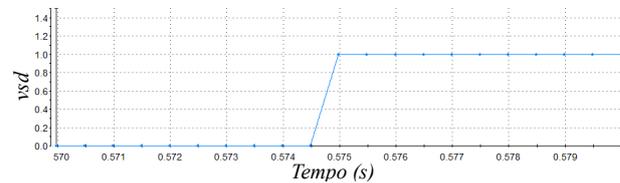


Fig. 10. Tempo de detecção do afundamento de 0,4 p.u.

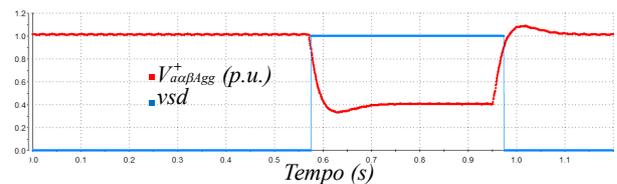


Fig. 11. Sincronismo entre v_{sd} e $V_{\alpha\beta Agg}^+$ durante afundamento.

C. Afundamento Monofásico em Sistema Distorcido

Devido à proliferação de cargas não lineares, distorções nas tensões se tornaram um problema comum em redes de distribuição [37]. O algoritmo proposto também é adequado para identificar afundamentos de tensão em sistemas contendo harmônicos. Mais uma vez desprezando-se as componentes de sequência zero, as tensões trifásicas, geradas pelo emulador de rede, podem ser descritas no referencial $\alpha\beta$ conforme [38]:

$$v_{\alpha}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} V_{\alpha n}^{+} \cos(n\omega t + \phi_{\alpha n}^{+}) + V_{\alpha n}^{-} \cos(n\omega t + \phi_{\alpha n}^{-}) \quad (13)$$

$$v_{\beta}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} V_{\beta n}^{+} \sin(n\omega t + \phi_{\beta n}^{+}) + V_{\beta n}^{-} \sin(n\omega t + \phi_{\beta n}^{-}) \quad (14)$$

onde $V_{\alpha n}^{+}$, $V_{\beta n}^{+}$, $V_{\alpha n}^{-}$ e $V_{\beta n}^{-}$ são os valores de pico da harmônica de ordem n das componentes α e β , respectivamente nas sequências positiva e negativa. Esses valores de pico são controlados pelo emulador de rede para gerar as distorções desejadas. Da mesma forma, $\phi_{\alpha n}^{+}$, $\phi_{\beta n}^{+}$, $\phi_{\alpha n}^{-}$ e $\phi_{\beta n}^{-}$ representam os ângulos de fase.

As tensões $v_{1a}(t)$ e $v_{2a}(t)$, previamente mostradas na Figura 1, contém informações sobre o conteúdo harmônico no sistema trifásico. Quando a tensão em uma das fases cai, cada componente harmônica na fase decresce na mesma proporção. Desta forma, o algoritmo só necessita verificar a componente fundamental da tensão, o que é feito através do monitoramento da tensão fundamental normalizada em cada fase. Essa característica do ADAMF permite a identificação do afundamento sem trepidação no sinal v_{sd} , mesmo que haja harmônicas na fase que sofreu o afundamento. Para fazer a validação do mesmo sobre essas condições, o emulador de rede foi configurado para produzir uma tensão trifásica com as mesmas distorções usadas na Subseção III.B, ou seja, 10% da 5ª harmônica, 5% da 7ª harmônica e 3% da 11ª harmônica. Esse nível de distorção harmônica é mais severo do que os limites harmônicos permitidos pelo *IEC Standard 519-1992* [39]. A Figura 12 mostra o afundamento monofásico de 0,4 p.u., o sinal v_{sd} e a tensão $v_{\alpha\beta Agg}^{+}$ estão na Figura 13, enquanto que a tensão distorcida $v_{1a}(t)$ e a tensão filtrada $v_{1a}^{+}(t)$ podem ser observadas na Figura 14. O algoritmo detectou o afundamento em 4,5 ms.

D. Afundamento Bifásico

Os afundamentos em duas fases representam 20% das previsões estocásticas para afundamentos de tensão [2]. Nesse experimento, configurou-se o emulador de rede para gerar um afundamento bifásico de 0,6 p.u. nas fases B e C,

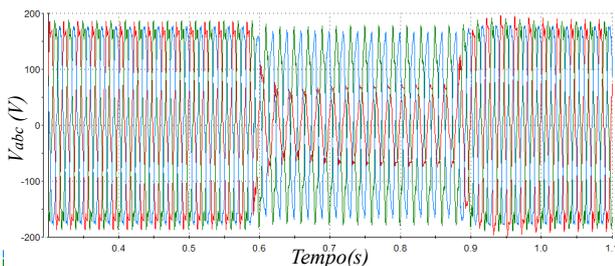


Fig. 12. Afundamento monofásico de 0,4 p.u. em sistema distorcido.

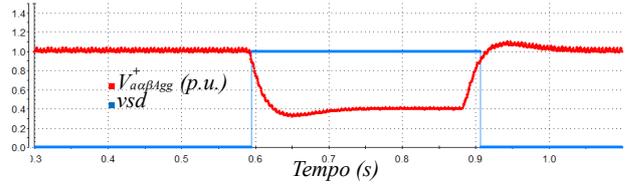


Fig. 13. Sincronismo entre o sinal v_{sd} e tensão $V_{\alpha\beta Agg}^{+}$ em sistema com distorção.

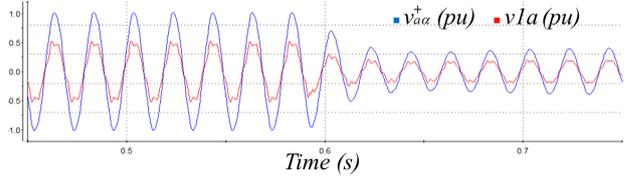


Fig. 14. Sinal v_{1a} e tensão V_{1a}^{+} .

cujo os instantes finais estão mostrados na Figura 15. O fundamento foi detectado em 4,4 ms. De acordo com (8)-(10), a fase A não é afetada, e no referencial $\alpha\beta$ apenas a componente β sofre afundamento (Figura 16). O comportamento do valor agregado da tensão normalizada da fase B e o sinal digital de detecção do afundamento estão indicados na Figura 17.

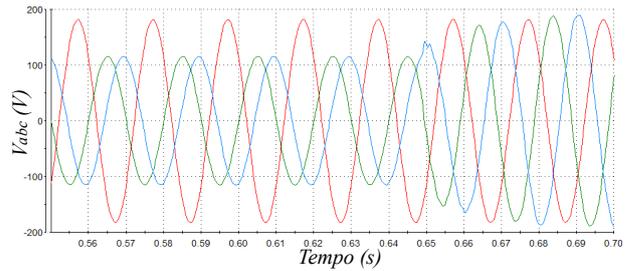


Fig. 15. Afundamento de 0,6 p.u. nas fases B e C.

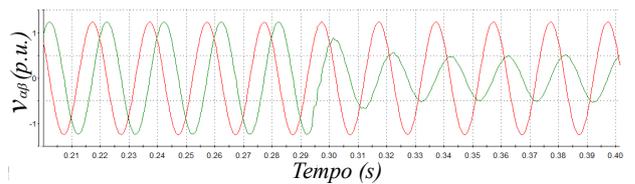


Fig. 16. Tensões trifásicas geradas no referencial $\alpha\beta$.

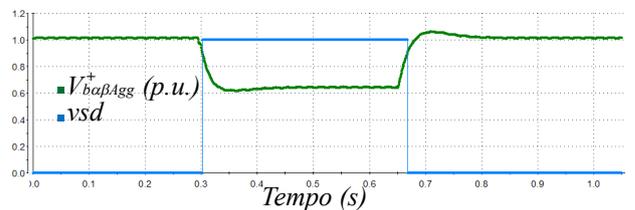


Fig. 17. Valor agregado da tensão normalizada da fase B ($V_{\beta\alpha\beta Agg}^{+}$) e sinal digital v_{sd} .

E. Afundamento Trifásico Balanceado

Representando menos de 5% das ocorrências, o afundamento trifásico balanceado é o tipo mais incomum [2]. O mesmo não origina componentes de sequência negativa. Para avaliar o desempenho do algoritmo proposto, o emulador

de rede foi configurado para produzir este tipo de contingência durante 300 ms, como evidenciado na Figura 18. O valor esperado de $0,3 p.u.$, correspondente a profundidade do afundamento aplicado, pode ser confirmado através do valor agregado da tensão na fase C, como indicado na Figura 19. Os valores agregados das tensões nas fases A e B também apresentam formas de onda semelhantes ao da fase C. O afundamento simétrico foi detectado em 4,5 ms.

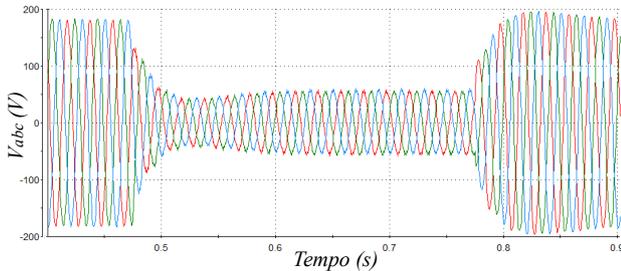


Fig. 18. Afundamento simétrico de $0,3 p.u.$.

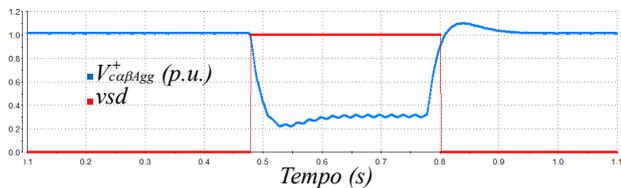


Fig. 19. Valor agregado da tensão na fase C ($V_{\alpha\beta Agg}^+$) em sincronismo com sinal detector de afundamento (vsd).

F. Afundamento Trifásico Balanceado em Sistema Distorcido

Em um afundamento de mesma profundidade e duração do experimento usado na Subseção IV.E, porém em um sistema contendo 10% da 7ª harmônica e 5% da 11ª harmônica (Figura 20), o ADAMF foi submetido ao último ensaio experimental. O sinal de detecção vsd , que atuou 4,4 ms após início do afundamento, está esboçado na Figura 21.

As tensões no referencial $\alpha\beta$ trazem o conteúdo harmônico inerente ao sistema, Figura 22, enquanto que as tensões normalizadas na fase C são tensões filtradas, conforme Figura 23.

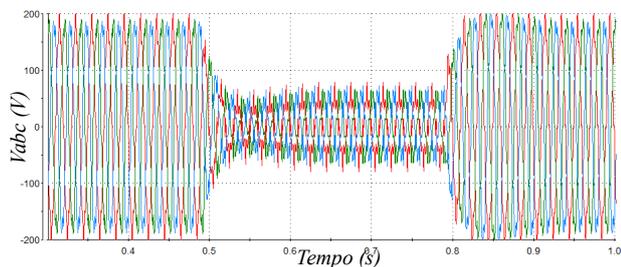


Fig. 20. Afundamento balanceado de $0,3 p.u.$ em sistema distorcido.

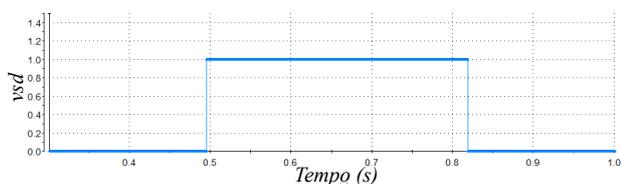


Fig. 21. Sinal de detecção do afundamento em sistema distorcido.

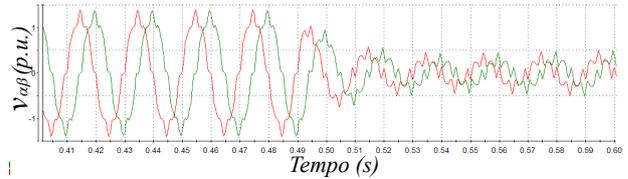


Fig. 22. Tensão trifásica, com conteúdo harmônico, no referencial $\alpha\beta$.

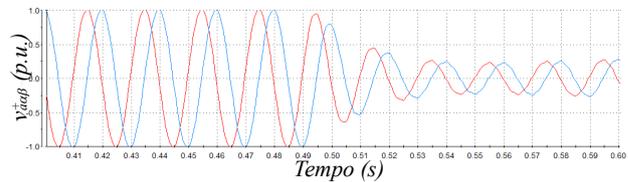


Fig. 23. Componentes normalizadas da Tensão na fase C.

V. CONCLUSÕES

Um novo e robusto algoritmo para detecção de afundamentos de tensão, chamado de ADAMF, foi proposto neste artigo. A componente fundamental normalizada da tensão, inerente ao algoritmo, foi utilizada para cálculo do valor agregado da tensão em cada fase, o qual era usado para comparação com o valor de referência de afundamento considerado.

A capacidade de monitorar cada fase do sistema trifásico de forma individual e concomitante, bem como o filtro interno sintonizado na frequência fundamental são vantagens do ADAMF em relação aos algoritmos apresentados na revisão bibliográfica. Essas características do algoritmo possibilitam que o mesmo possa identificar rapidamente todo tipo de afundamento balanceado ou desbalanceado, inclusive em condições de rede elétrica com distorções.

Pode-se apontar como desvantagem o fato do algoritmo necessitar de três circuitos de cálculo da tensão fundamental normalizada, sendo um para cada fase.

Um emulador de rede, baseado em eletrônica de potência, foi utilizado para produzir os afundamentos de tensões necessários para validação experimental do algoritmo, tendo sido comprovada sua eficiência, robustez e que o mesmo pode ser usado para aplicações em tempo real.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pelo suporte financeiro através dos Projetos SWE 249618/2013-3 e 486948/2012-9.

REFERÊNCIAS

- [1] *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*, IEEE Std. 1159-2009, 2009.
- [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, Junho 2006.
- [3] P. Thakur, A. K. Singh, R. C. Bansal, "Novel Way for Classification and Type Detection of Voltage Sag", *IET Generation, Transmission Distribution*, vol. 7, no. 4, pp. 398–404, Abril 2013.

- [4] S. Z. Djokić, J. V. Milanović, S. M. Rowland, "Advanced Voltage Sag Characterization I: Phase shift", *IET Generation, Transmission Distribution*, vol. 153, no. 4, pp. 423–430, Julho 2006.
- [5] S. Z. Djokić, J. V. Milanović, S. M. Rowland, "Advanced Voltage Sag Characterization II: Point of Wave", *IET Generation, Transmission Distribution*, vol. 1, no. 1, pp. 146–154, Janeiro 2007.
- [6] F. Buchholz, *Die Drehstrom-Scheinleistung bei Ungleichmäßiger Belastung der Drei Zweige*, vol. 2, Licht und Kraft, Zeitschrift für Elekt., 1922.
- [7] R. Naiddo, P. Pillay, "A New Method of Voltage Sag and Swell Detection", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 2, pp. 1056–1063, Abril 2007.
- [8] Y. Sillapawicharm, Y. Kumsuwan, "An Improvement of Synchronously Rotating Reference Frame Based Voltage Sag Detection for Voltage Sag Compensation Applications under Distorted Grid Voltages", in *IEEE Power Electronics and Drive Systems Conference (PEDS)*, vol. 2, pp. 100–103, 2011.
- [9] Y. Kumsuwan, Y. Sillapawicharm, "A Fast Synchronously Rotating Reference Frame-Based voltage Sag Detection Under practical Grid Voltages for Voltage Sag Compensation Systems", in *IET 6th conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD)*, pp. 1–5, 2012.
- [10] B. Polajzer, G. Stumberger, S. Seme, D. Dolinar, "Detection of Voltage Sag Sources Based on Instantaneous Voltage and Current Vectors and Orthogonal Clark", *IET Generation, Transmission Distribution*, vol. 2, no. 2, pp. 219–226, Março 2008.
- [11] S. Kamble, C. Thorat, "A new algorithm for voltage sag detection", in *Advances in Engineering, Science and Management (ICAESM)*, pp. 138–143, 2012.
- [12] F. Zaiming, L. Xiongwei, "A Novel Universal Grid Voltage Sag Detection Algorithm", in *Power Engineering and Automation Conference (PEAM)*, pp. 1–4, 2012.
- [13] S. Zhou, J. Liu, L. Zhou, Z. Yangquer, Y. Xu, "Sag Detection Algorithm for Dynamic Voltage Restorer used in Wind farms under Unbalanced and Distorted Grid Voltage Conditions", in *IEEE ECCE Asia Downunder*, pp. 601–606, 2013.
- [14] C. Guodong, Z. Liang, W. Ruiting, L. Zhang, X. Cai, "A Novel SPLL and Voltage Sag Detection Based on LES Filters and Improved Instantaneous Symmetrical Components Method", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 3, pp. 1177–1188, Março 2015.
- [15] H. Lei, X. Li, Y. Kang, Y. Duan, J. Qiu, "An Improved Method for Voltage Sag Detection Based on Weighted Least-Square Estimation with Harmonic Models", *Przeegląd Elektrotechniczny*, vol. 2012, no. 10, pp. 238–241, 2012.
- [16] B. Polajzer, G. Stumberger, D. Dolinar, "Instantaneous Positive-Sequence Current Applied for Detecting Voltage Sag Source", *IET Generation, Transmission Distribution*, vol. 9, no. 4, pp. 319–227, Maio 2015.
- [17] T. M. Terrazas, F. P. Marafao, T. C. Monteiro, A. R. Giarretta, L. Matakas, W. Komatsu, "Reference Generator for Voltage Controlled Power Conditioners", in *Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, pp. 513–519, 2011.
- [18] M. S. Padua, S. M. Deckmann, F. P. Marafao, "Frequency-Adjustable Positive Sequence Detector for Power Conditioning Applications", in *Power Electronics Specialists Conference*, pp. 1928–1934, 2005.
- [19] F. B. Costa, J. Driesen, "Assessment of Voltage Sag Indices Based on Scaling and Wavelet Coefficient Energy Analysis", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 1, pp. 336–346, Janeiro 2013.
- [20] W. E. Brumsickle, R. S. Schneider, G. A. Luckjiff, M. Divan, M. F. McGranaghan, "Dynamic Sag Corrector: Cost-Effective Industrial Power Line Conditioning", *IEEE Transactions on Industry Application*, vol. 37, no. 1, pp. 212–217, Janeiro/Fevereiro 2001.
- [21] Z. Chen, J. Guerrero, F. Blaaajerg, "A Review of The State of the Art of Power Electronics for Wind Turbines", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 8, pp. 1859–1875, Agosto 2009.
- [22] F. K. A. Lima, E. H. Watanabe, P. Rodriguez, A. Luna, "Controle de Gerador de Indução Duplamente Alimentado Diante de Afundamentos de Tensão", *Eletrônica de Potência - SOBRAEP*, vol. 14, no. 3, pp. 189–199, Agosto 2009.
- [23] P. S. Flannery, G. Venkataramanan, "Unbalanced Voltage Sag Ride-Through of a Doubly Fed Generator wind Turbine with Series Grid-Side Converters", *IEEE Transactions on Industrial Applications*, vol. 45, no. 5, pp. 1879–1887, Setembro 2009.
- [24] C. Wessels, F. Gebhardt, W. F. Funchs, "Fault Ride-Through Technique of a DFIG Wind Turbine Using Dynamic Voltage Restorer During Symmetric and Asymmetric Grid Faults", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 3, pp. 807–815, Março 2011.
- [25] A. O. Ibrahim, T. H. Nguyen, D. C. Lee, K. Su-Chang., "A Fault Ride-Through Technique of DFIG Wind Turbine Systems Using Dynamic Voltage Restorer", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 26, no. 3, pp. 871–882, Setembro 2011.
- [26] A. Rolán, F. Córcoles, J. Pedra., "Behaviour of the Doubly Fed Induction Generator Exposed to Unsymmetrical Voltage Sags", *IET Electric Power Application*, vol. 6, no. 8, pp. 561–574, Setembro 2012.
- [27] F. L. A. Jowder, "Design and Analysis of Dynamic Voltage Restorer for Deep Voltage Sag and Harmonic Compensation", *IET Generation, Transmission Distribution*, vol. 3, no. 6, pp. 547–560, Junho 2009.
- [28] F. O. Martinz, M. Galassi, A. R. Giarretta, M. A. Oliveira, F. A. T. Silva, M. Masuda, S. Copeliovitch, E. R. Zanetti, E. G. Lima, J. Camargo, S. U. Ahn, L. M. Jr, W. Komatsu, J. A. Jardini, "A Low Power Voltage Compensator", *Eletrônica de Potência - SOBRAEP*, vol. 11, no. 2, pp. 77–84, Julho 2006.
- [29] T. L. M. Assis, E. H. Watanabe, L. A. S. Pilotto, R. B. Sollero, "A New Technique to Supply Fast Varying Reactive Power Using a Statcom", *Eletrônica de Potência - SOBRAEP*, vol. 10, no. 2, pp. 33–40, Novembro 2005.
- [30] G. O. Suvire, P. E. Mercado, "Improvement Of Power Quality in Wind Energy Applications Using a

- Dstatcom Coupled with a Flywheel Energy Storage System”, *Eletrônica de Potência - SOBRAEP*, vol. 15, no. 3, pp. 239–246, Agosto 2010.
- [31] J. I. L. Uchoa, F. K. A. Lima, C. G. C. Branco, “FACTS Applied to Fix Speed Wind Turbines to Meet Grid Code Requirements”, in *Intersternal Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, pp. 1474–1479, 2015.
- [32] M. Tsili, S. Papathanassiou, “A Review of Grid Code Technical Requirements for Wind Farms”, *IET Renewable Power Generation*, vol. 3, no. 3, pp. 308–332, Setembro 2009.
- [33] M. A. R. G. Abade, J. López, L. Marroyo, G. Inwanski, *Doubly Fed Induction Machine, Modeling and Control for Wind Energy Generation*, John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [34] R. Teodorescu, M. Liserre, P. Rodriguez, *Grid Converter for Photovoltaic and Wind Power Systems*, John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [35] P. Rodriguez, A. Luna, M. C. and, “Advanced Grid Synchronization System for Power Converters under Unbalanced and Distorted Operating Conditions”, in *Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, pp. 5173–5178, 2006.
- [36] J. Eloy-Garcia, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, “Grid Simulator for Power Quality Assessment of Micro-Grids”, *IET Power Electronics*, vol. 6, no. 4, pp. 700–709, Abril 2013.
- [37] X. Wang, J. M. Guerrero, F. Blaabjerg, Z. Chen, “Secondary Voltage Control for Harmonics Suppression in Islanded Microgrids”, in *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1–8, 2011.
- [38] H. Akagi, E. H. Watanabe, M. Aredes, *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, N.Y., 2007.
- [39] *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*, IEEE Std. 519-1992, 1993.

DADOS BIOGRÁFICOS

Jocillo Luz Dantas, nascido em 01/03/1966 em Fortaleza, é engenheiro eletricista (1994) e mestre em Engenharia Elétrica (2006) pela Universidade Federal do Ceará. Ele foi, de 2008 a 2010, coordenador do curso de Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal do Ceará (IFCE), onde é professor desde 1993. Suas áreas de interesse são: eletrônica de potência, qualidade do processamento da energia elétrica, sistemas de controle eletrônicos e acionamentos de máquinas elétricas. Suas áreas de interesse são: Eletrônica de Potência, Energias Renováveis, Acionamento de Máquinas e Filtros Ativos

Jocillo L. Dantas é membro da SOBRAEP desde 2015.

Francisco Kleber de A. Lima, nascido em 03 de novembro de 1968 em Fortaleza, é Engenheiro Eletricista (1998) e Mestre em Engenharia Elétrica (2003), pela Universidade Federal do Ceará. Recebeu o título de Doutor em Engenharia Elétrica pela COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro em 2009. Ele é professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará. Suas áreas de

interesse são: Eletrônica de Potência, Qualidade de Energia, Acionamentos de Máquinas Elétricas e Filtragem Ativa.

Dr. Francisco Kleber de A. Lima é membro da SOBRAEP desde 2002.

Josep M. Guerrero, recebeu títulos de graduação em Engenharia de Telecomunicações, Mestre em Engenharia Eletrônica e de Doutor em Eletrônica de Potência, todos pela Universidade Técnica da Catalúnia, respectivamente nos anos de 1997, 2000 e 2003. Ele é professor do *Department of Energy Technology* da Universidade de Aalborg, Dinamarca, onde é responsável pelo grupo de pesquisa em *Microgrid*.

Dr. Josep M. Guerrero é *Fellow Member* do IEEE.

Juan C. Vasquez, recebeu título de graduação em Engenharia de Eletrônica pela Universidade Autônoma de Manizales, Colombia em 2004, e título de Doutor pela Universidade Técnico da Catalúnia. Ele é professor assistente do *Department of Energy Technology* da Universidade de Aalborg, Dinamarca, onde trabalha no grupo de pesquisa em *Microgrid*.

Dr. Juan C. Vasquez é *Senior Member* do IEEE.

Carlos Gustavo C. Branco, possui Graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Ceará (2002) e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Ceará (2005). Durante o Mestrado trabalhou em Projetos de P&D na área de Fontes Ininterruptas de Energia (UPS) e Conversores de Alta Potência. Desde 2005 trabalha na área de Pesquisa e Desenvolvimento de sistemas UPS Isolados em Alta Frequência, Sistemas de Energia Fotovoltaica e Acionamentos de Máquinas.

Dr. Branco atualmente é professor assistente do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, e membro do IEEE e SOBRAEP.