

Uso da Transformada Wavelet na Identificação de Parâmetros Associados à Qualidade da Energia Elétrica de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica

Thaissa M. Cesar
Universidade Federal de Goiás
thaissa.cesar@gmail.com

Sérgio P. Pimentel
Universidade Federal de Goiás
pimentel@emc.ufg.br

Enes G. Marra
Universidade Federal de Goiás
enes@emc.ufg.br

Bernardo P. Alvarenga
Universidade Federal de Goiás
bernardo@emc.ufg.br

Resumo — Este artigo aborda algumas aplicações da transformada Wavelet (TW) no monitoramento e análise da qualidade da energia elétrica (QEE) em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica (SFCR). Detalhes a respeito da aplicação da transformada Wavelet discreta (TWD) em SFCR também são descritos. A TW é uma importante contribuição para métodos de localização tempo-frequência na análise de sinais transitórios. Portanto, a TW pode ser aplicada também na detecção e classificação de distúrbios da QEE em um SFCR. Em acréscimo, um método de detecção de condição de ilhamento baseado em TW também é apresentado. Resultados obtidos a partir de simulações são apresentados e discutidos para validação da proposta de aplicação de TW na análise de SFCR.

Palavras-chaves — Geração Distribuída, Ilhamento, Qualidade da Energia Elétrica, Sistemas Fotovoltaicos, Transformada Wavelet.

I. INTRODUÇÃO

À medida que novos sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR) são instalados faz-se necessário realizar uma análise da qualidade da energia elétrica (QEE) relacionada a essa aplicação [1]. Uma das preocupações dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR) elétrica é melhorar a confiabilidade do fornecimento e a qualidade da energia elétrica no ponto de acoplamento comum (PAC). Em sistemas SFCR de grande porte, problemas relacionados à QEE e ao funcionamento de dispositivos de proteção, como flutuações de tensão, devem ser analisados [2]. Flutuações de tensão rápidas e lentas são causadas pelo chaveamento do inversor e mudanças de insolação no lado CC e por distúrbios harmônicos no lado CA [1] [2].

Os sistemas de geração de energia fotovoltaica (FV) também exigem um sistema de detecção de ilhamento confiável para evitar acidentes e garantir a segurança de pessoas, equipamentos e instalações elétricas [3]. A condição de ilhamento é definida na norma IEEE 929 como quando parte da rede

elétrica é desconectada intencionalmente ou acidentalmente do restante do sistema elétrico da concessionária, mas a parte isolada permanece energizada pelo sistema de geração distribuída de energia [4]. O risco de ilhamento pode ser considerado como um dos obstáculos para a interconexão de SFCR, particularmente quando a geração FV em um sistema se torna suficientemente alta, permitindo um equilíbrio próximo entre a capacidade do SFCR e as cargas locais fora dos horários de pico [5]. Esses sistemas praticamente equilibrados podem causar uma zona de não-detecção (ZND).

As transformadas permitem representar o sinal temporal em outro domínio e com isso possibilitam a análise de características de um sinal que podem não ser observáveis no domínio original. A maioria dos sinais é descrita originalmente no domínio do tempo e, por isso, as transformadas são muito utilizadas em processamento de sinais para se analisar o conteúdo de frequência do sinal [6] [7]. Existem vários métodos de transformações que podem ser aplicados a um sinal, entre os quais a Transformada de Fourier (TF) para análise de sinais estacionários. A TF fornece o espectro de frequência ou o conteúdo de frequência do sinal (o quanto de cada frequência existe no sinal). Porém para sinais não estacionários, cujo espectro varia com o tempo, ela não é uma ferramenta adequada, pois não fornece a informação de em qual instante no tempo essas frequências ocorrem [6].

Para superar o problema da localização tempo-frequência, outras ferramentas de processamento de sinais foram desenvolvidas, tais como a Transformada de Fourier de Tempo Curto (TFTC) e a Transformada Wavelet (TW) [8] [9]. Essa localização tempo-frequência é limitada pelo princípio da incerteza de Heisenberg. O princípio estabelece que não é possível saber quais frequências exatas existem em um dado instante de tempo, somente quais bandas de frequências existem em um intervalo de tempo. A localização em tempo-frequência é, portanto, viável apenas no sentido de quadrados médios ou “caixa de Heisenberg” e um equilíbrio deve ser alcançado entre a resolução no tempo e de frequência [7].

II. LOCALIZAÇÃO TEMPO-FREQUÊNCIA

Para representar o comportamento de frequência de um sinal localmente no tempo, o sinal deve ser analisado por fun-

Os autores agradecem à CAPES pelo apoio financeiro à execução desta pesquisa. Em acréscimo, este trabalho foi desenvolvido dentro do contexto de atividades relacionadas a um Projeto de P&D registrado na ANEEL através do código PD-3033-0002/2014 e que é patrocinado pelas empresas: Espora Energética S/A, Transenergia São Paulo S/A (TSP), Transenergia Renovável S/A (TER), e Caldas Novas Transmissão S/A (CNT).

ções que estão localizadas tanto no tempo quanto na frequência [7]. A TFTC é uma versão da TF que utiliza janelas no tempo, e seus respectivos deslocamentos, para decompor o sinal em segmentos considerados estacionários, que correspondem a diferentes bandas de frequência do mesmo sinal [6] [10]. Uma desvantagem da TFTC é que uma única janela é utilizada para analisar todas as frequências, fazendo com que a resolução tempo-frequência seja constante. Um modo de contornar a limitação da resolução fixa é utilizar transformadas com funções de base variáveis, como a TW, que permitem variar a resolução da transformação tempo-frequência no decorrer da análise do sinal [11].

A Fig. 1 mostra a resolução no plano tempo-frequência para as funções de Fourier e Wavelets. Na TFTC, Fig. 1.b, a largura da janela é a mesma durante toda a análise do sinal e na TW, Fig. 1.a, a largura da janela é adaptada para a frequência analisada. Quanto mais estreita a janela, melhor é a resolução no tempo e pior a resolução em frequência [6]. Na Fig. 1.a, pode ser observado que TW tem uma melhor resolução no tempo para componentes de altas frequências e a uma melhor resolução em frequência para componentes de baixas frequências. Apesar das larguras e alturas das caixas mudarem, a área é constante. Cada caixa, tanto na TFTC e na TW, representa uma porção igual do plano tempo-frequência determinada pela inequação de Heisenberg [6].

A TW estuda cada componente de frequência com uma resolução apropriada à sua escala [11]. Como resultado, ela é mais adequada do que a TFTC para analisar fenômenos de alta frequência de curta duração, tais como transientes em sinais [11]. A TW de um sinal $x(t)$ é definida por (1) e (2).

$$\Psi_x(a, b) = \int x(t) \cdot \overline{\psi_{a,b}(t)} dt \quad (1)$$

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2)$$

Nas equações acima o termo a é o parâmetro de escala, b é o parâmetro de deslocamento no tempo, e $\psi_{a,b}(t)$ são chamadas de wavelets, e são obtidas a partir da expansão/compressão e translação da função $\psi(t)$, chamada wavelet mãe. A função mãe deve possuir média zero, é normalizada para ter variância unitária e deve pertencer ao espaço que contenha todas as funções mensuráveis que são absolutamente e quadraticamente integráveis [10] [11].

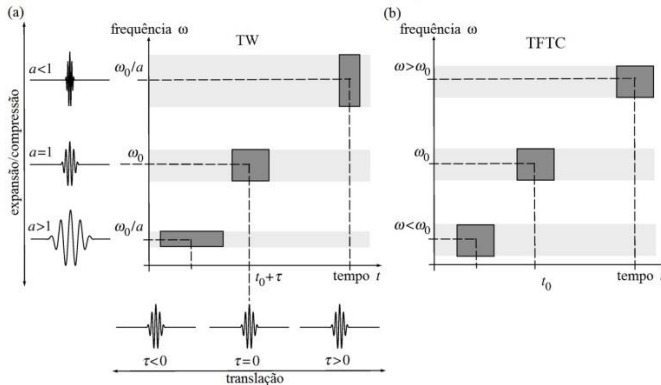


Fig. 1. Resolução no plano tempo-frequência: a) TW; b) TFTC [12].

Na Transformada Wavelet Contínua (TWC) os parâmetros a e b variam continuamente. Quando o parâmetro a é variado as wavelets cobrem diferentes escalas de frequência, a frequência é inversamente proporcional à escala. Quando o parâmetro b é variado as wavelets são deslocadas no tempo permitindo cobrir todo o sinal no domínio do tempo. Na Transformada Wavelet Discreta (TWD) os parâmetros possuem valores discretos $a = a_0^m$ e $b = nb_0a_0^m$ com m e n pertencentes aos inteiros, e $a_0 > 1$ e $b_0 > 0$ fixos.

III. APLICAÇÕES EM SFCR

A inserção dos SFCR pode ocasionar impactos diretos ou indiretos na qualidade da energia elétrica. Esses impactos podem tanto ser benéficos, quanto maléficos para a rede de distribuição na qual o SFCR é conectado [1]. Se um grande número de SFCR residenciais são conectados ao sistema de distribuição, os fluxos reversos de potência provenientes desses sistemas são capazes de proporcionar o crescimento da tensão na rede local a ponto de ultrapassar o seu limite superior aceitável [1]. Isso se deve ao perfil de carga desse tipo de consumidores ser constituído por picos durante a noite e baixa demanda ao longo do dia, quando a produção FV é alta. Além disso, esse cenário pode resultar em flutuações e alterações no perfil de tensão, e outros possíveis impactos tais como injeção de harmônicos de corrente e de tensão, desequilíbrios entre fases e problemas de atuação do sistema de proteção devido ao fluxo reverso da potência.

Dentre os aspectos de QEE que devem ser analisados, destacam-se a tensão em regime permanente, o fator de potência e os harmônicos, por se tratarem dos fenômenos que mais estão presentes e mais causam impactos quando há conexão de SFCR [13].

Outro problema que pode ocorrer em SFCR é o ilhamento não intencional. Os equipamentos podem ser danificados se o gerador FV, na condição de ilhamento, operar fora das condições normais de tensão e frequência ou se a rede elétrica for reconectada com a parte ilhada fora de sincronismo. A maioria dos casos de ilhamento pode ser detectada pelo monitoramento da tensão e da frequência da rede [14]; uma detecção mais efetiva pode ser realizada monitorando também outros parâmetros, como a potência de saída do inversor determinada a partir da medida da tensão e da corrente no lado do inversor no PAC [15]. Para tanto, é preciso que o sistema opere fora de sua ZND.

A ZND é definida em termos da diferença de potência entre a saída do inversor e a carga local (ΔP e ΔQ), isto é, dados ΔP e ΔQ suficientemente pequenos, o desvio na frequência e na tensão depois do ilhamento não será significativo para que os dispositivos de anti-ilhamento detectem a desconexão da rede em um tempo prescrito [5]. Quando a potência de saída do inversor se aproxima do valor da potência da carga local, o espectro da potência de saída do inversor tende a apresentar uma pequena variação depois da condição de ilhamento em uma banda de frequência contínua e relativamente larga [3]. Os métodos baseados na Transformada Discreta de Fourier (TDF) não permitem que essas variações sejam detectadas devido à suas baixas resoluções [3].

Por outro lado, a TWD pode detectar essas variações mesmo quando potência de saída é quase igual à potência de carga ($\Delta P \rightarrow 0$) [3]. Além disso, a TWD pode ser aplicada para a detecção e classificação de distúrbios transitórios rápidos e lentos, pois ela se baseia em uma análise multi-resolução com melhor localização no tempo para escalas menores (altas frequências) e melhor localização na frequência para escalas maiores (baixas frequências). Portanto, ela pode ser considerada uma ferramenta adequada para se analisar a QEE e detectar situações de ilhamento também em um SFCR.

IV. METODOLOGIA PROPOSTA

Para o exemplo de aplicação da TWD foi implementado um algoritmo, em ambiente MATLAB, que utiliza bancos de filtros passa baixa e passa alta para fazer uma decomposição em árvore, representada na Fig. 2. O sinal $x[n]$ é o sinal de entrada amostrado, $h[n]$ é um filtro passa alta e $g[n]$ é um filtro passa baixa, cujos coeficientes dependem da wavelet mãe escolhida. O algoritmo executa a decomposição do sinal em diferentes níveis de escala (bandas de frequência) usando uma análise multi-resolução e calcula os coeficientes de detalhes e aproximações da TWD para cada nível.

No diagrama apresentado na Fig. 2, no primeiro nível o sinal $x[n]$ é decomposto simultaneamente, através dos filtros passa-baixa e passa-alta, e decimado por um fator de dois. Depois, em cada nível seguinte apenas cada meia faixa inferior é novamente decomposta através do mesmo procedimento. Esse procedimento é conhecido também por decomposição em faixas de uma oitava sucessivas. Os estágios de decimação aplicados nas saídas para reduzir o número de amostras pela metade são requeridos para evitar a redundância de informação [16]. As saídas fornecem os coeficientes da TWD detalhados (do filtro passa-alta) e aproximados (do filtro passa-baixa) para cada nível.

No primeiro exemplo de aplicação, a TWD foi utilizada para detectar distúrbios em um sinal de tensão. A decomposição do sinal é feita em seis níveis usando como wavelet mãe a função daubechies 4 (db4). Existem várias famílias de funções que podem ser utilizadas como wavelet mãe [11]. No segundo exemplo de aplicação, a decomposição é realizada em oito níveis com o propósito de detectar condições de ilhamento. A estrutura da interface com a rede do sistema fotovoltaico com inversor, apresentado na Fig. 3, foi modelada no MATLAB/Simulink para simular a condição de ilhamento. A Tabela I apresenta os parâmetros da simulação.

O inversor monofásico possui uma topologia em ponte completa e seus estados de chaveamento são controlados através de um modulador de largura de pulsos (PWM). Um filtro LCL foi introduzido na saída do inversor para minimizar os harmônicos gerados pela modulação e ainda permitir a injeção de corrente no PAC. As duas chaves são usadas para ajuste dos parâmetros da simulação e permitir o teste da condição de ilhamento. Duas cargas de teste foram consideradas na simulação do ilhamento: uma carga resistiva (R); e uma carga ressonante (R_L , L_L e C_L), com fator de qualidade 2,5 sugerido pela norma IEEE 929 [4].

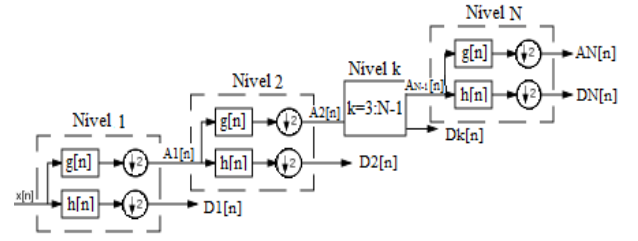


Fig. 2. Estrutura da decomposição wavelet.

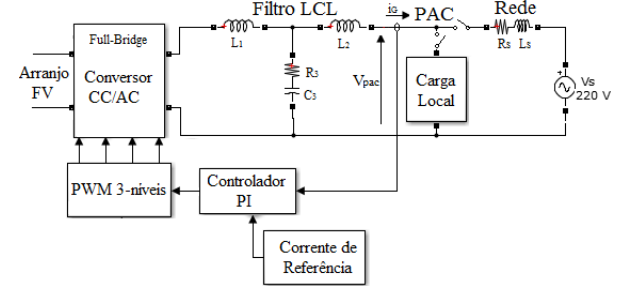


Fig. 3. Modelo da interface com a rede do sistema fotovoltaico.

TABELA I. PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO DO SFCR

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
V_{DC}	350 V	$f_{carrier}$	18 kHz
L_1	3 mH	L_L	90.25 mH
L_2	0.6 mH	C_L	76.4 μF
C_3	162.8 μF	R_L	85.92 Ω
R_3	5 Ω	R	100 Ω
L_s	0.5 mH	R_s	0.5 Ω

V. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No primeiro exemplo considerado usando MATLAB, os coeficientes detalhados e aproximados da TWD do sinal de entrada, apresentado na Fig. 4, são calculados. O sinal de entrada representa uma tensão senoidal de 60 Hz distorcida por *notches* no PAC. O *notching* de tensão é descrito pela norma IEEE 519 como um distúrbio de qualidade da energia recorrente devido à operação normal de dispositivos de eletrônica de potência. O *notching* de tensão caracteriza um caso não usual que se encaixa entre harmônicos e transientes [17].

Os componentes do notching, no exemplo, possuem uma frequência maior que a frequência fundamental 13,33 vezes (800 Hz), nos instantes 0,01875 s e 0,0375 s, e 80 vezes maior (4800 Hz) nos demais instantes. As Figs. 5 e 6 apresentam os coeficientes detalhados e aproximados, respectivamente, em ordem de escala crescente (frequência decrescente).

É conhecido que as aproximações representam melhor as componentes de baixa frequência do sinal e que os detalhes representam melhor as componentes de alta frequência [16]. Pode ser observado na Fig. 5 que quanto menor a escala, melhor é a localização no tempo dos transitórios rápidos. Isso permite identificar com maior precisão os instantes que ocorreram os distúrbios de alta frequência no sinal. Pode ser observado também na Fig. 6 que a partir do quinto nível de decomposição as aproximações representam o sinal de entrada praticamente sem transitórios. Isso sugere que elas poderiam representar uma informação redundante na identificação de situações de ilhamento.

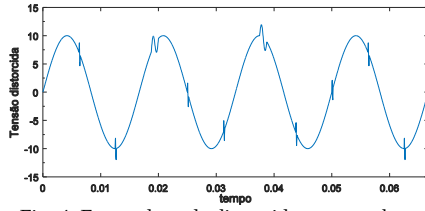


Fig. 4. Forma de onda distorcida com notches.

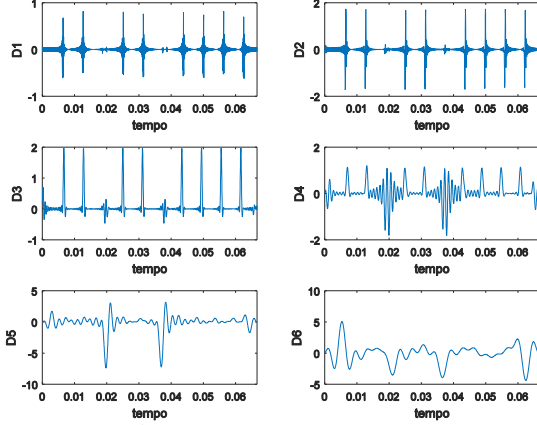


Fig. 5. Coeficientes de detalhes do primeiro exemplo.

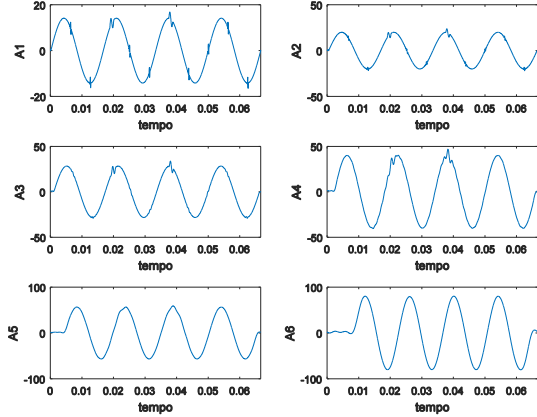


Fig. 6. Coeficientes aproximados do primeiro exemplo.

Na segunda aplicação considerada, os sinais da tensão no PAC (v_{PAC}) e da potência de saída instantânea (p_G) são medidos através do modelo de simulação do MATLAB/Simulink, mostrado na Fig. 3. Os coeficientes de detalhes da decomposição desses sinais em oito níveis foram analisados com o propósito de detecção de ilhamento. Duas cargas de teste foram consideradas, uma resistiva e uma ressonante.

A condição de ilhamento provoca uma pequena variação em uma banda de frequência relativamente larga. As variações na tensão são devidas às características dinâmicas do algoritmo de sincronização com a rede incluso nos inversores de SFCR [3]. A norma IEEE 1547 determina que o tempo de resposta do algoritmo de detecção de ilhamento deve ser menor que 2 s [18]. A condição de ilhamento pode ser detectada medindo-se a variação de amplitude em certas bandas de frequência. O tempo de resposta do algoritmo de detecção de ilhamento será menor se um nível de decomposição mais baixo for selecionado [7].

Para o caso com carga resistiva, uma condição de ilhamento foi forçada no instante $t = 0,21$ s com $\Delta P = 10\%$. A Fig.

7 mostra v_{PAC} e a corrente que flui para a rede. A injeção de corrente pelo inversor sofre interferência dos componentes de alta frequência do modelo utilizado, e depende da condição analisada (ΔP pequeno), das características da modulação PWM empregada, da dinâmica do filtro LCL e do controlador de corrente. O tempo de resposta para esse caso é curto, porque mesmo com pequenas variações na potência a condição de ilhamento pode ser facilmente detectada nas decomposições tanto de v_{PAC} , quanto de p_G . Uma mudança no espectro de v_{PAC} pode ser notada já no primeiro nível de decomposição, mas é melhor notado do quinto ao sétimo nível de decomposição, como pode ser visto na Fig. 8. O sexto nível foi selecionado para ser analisado e é apresentado na Fig. 9.

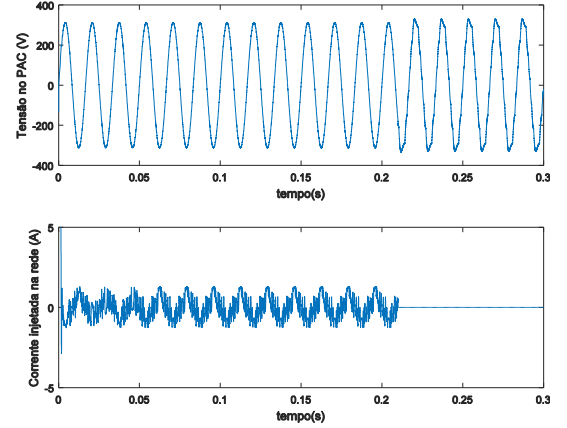


Fig. 7. v_{PAC} e a corrente injetada na rede (carga resistiva).

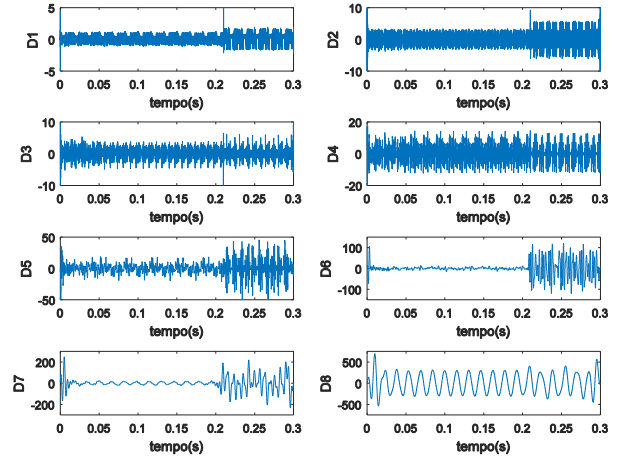


Fig. 8. Coeficientes de detalhes de v_{PAC} (carga resistiva).

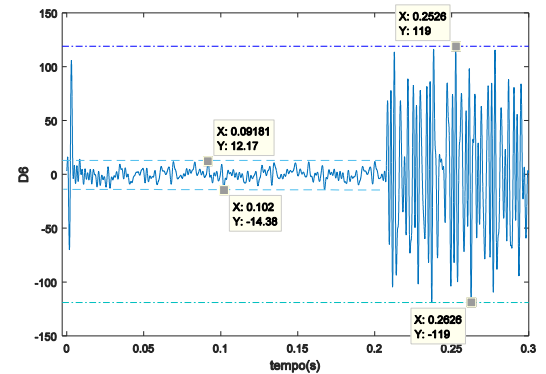


Fig. 9. Detalhe do sexto nível da decomposição de v_{PAC} (carga resistiva).

A saída da TWD de v_{PAC} tem um valor de amplitude de pico de cerca de 26,55 durante a operação normal. Depois que ocorre a condição de ilhamento, a saída atinge uma amplitude de 238 (quase 9 vezes maior) em menos de 50 ms.

Na decomposição de p_G , uma mudança pode ser notada do terceiro ao sexto nível, como pode ser visto na Fig. 10. O quarto nível foi selecionado para ser analisado e é apresentado na Fig. 11. Também há variação de amplitude na saída da TWD de p_G , ela tem uma amplitude de pico igual a 595.2 antes do ilhamento, que decresce para 123.62 (cerca de 4,8 vezes menor) depois de 30 ms da condição de ilhamento. O tempo de resposta de ambos os sinais verificados são bem inferiores aos 2s determinados na norma.

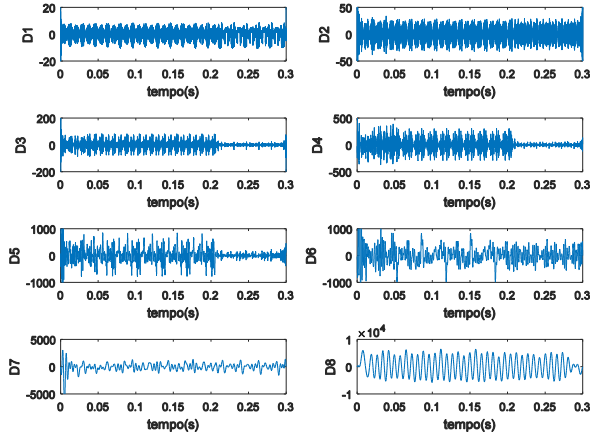


Fig. 10. Coeficientes de detalhes de p_G (carga resistiva).

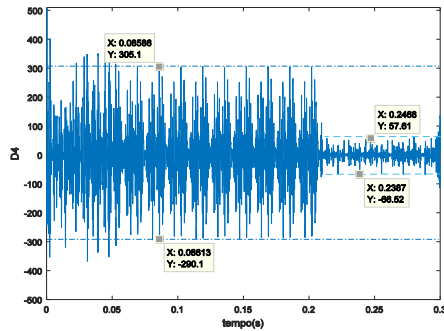


Fig. 11. Detalhe do quarto nível da decomposição de p_G (carga resistiva).

Para o caso com carga ressonante, uma condição de ilhamento foi forçada no instante $t = 0,15$ s com $\Delta P = 23\%$. A Fig. 12 mostra v_{PAC} e a corrente que flui para a rede. A ZND deste caso é maior, enquanto o tempo de resposta é mais lento. O espectro de v_{PAC} apresenta uma pequena variação na quinta banda de frequência, esta variação pode ser melhor notada no sétimo e no oitavo nível de decomposição, como pode ser visto na Fig. 13. O sétimo nível foi selecionado para ser analisado e está apresentado na Fig. 14. A saída da TWD de v_{PAC} tem uma amplitude de pico de cerca de 45,8 durante a operação normal. Depois que ocorre a da condição de ilhamento, a saída atinge uma amplitude de 275,5 (cerca de 6 vezes maior) em menos de 40 ms.

Na decomposição de p_G , uma mudança pode ser notada a partir do sexto nível, como pode ser visto na Fig. 15. O sétimo nível foi selecionado para ser analisado e está apresentado na Fig. 16.

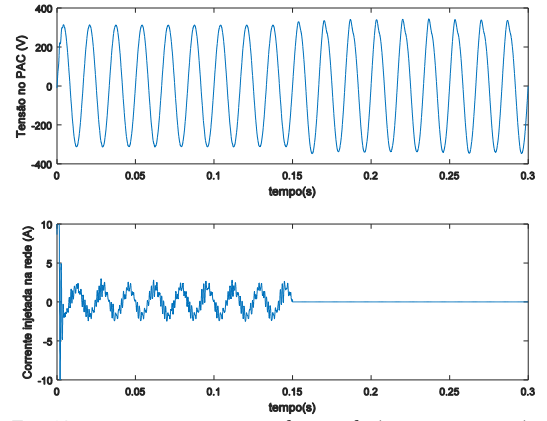


Fig. 12. v_{PAC} e a corrente injetada na rede (carga ressonante).

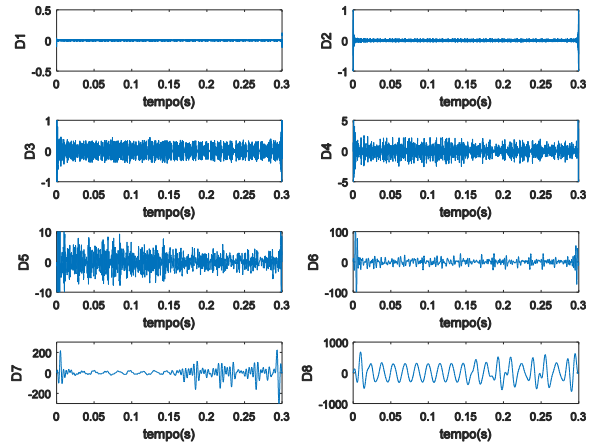


Fig. 13. Coeficientes de detalhes de v_{PAC} (carga ressonante).

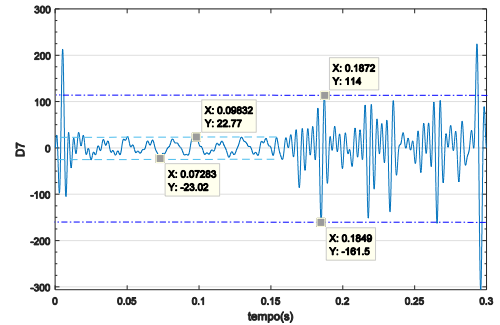


Fig. 14. Detalhe do sétimo nível da decomposição de v_{PAC} (carga ressonante).

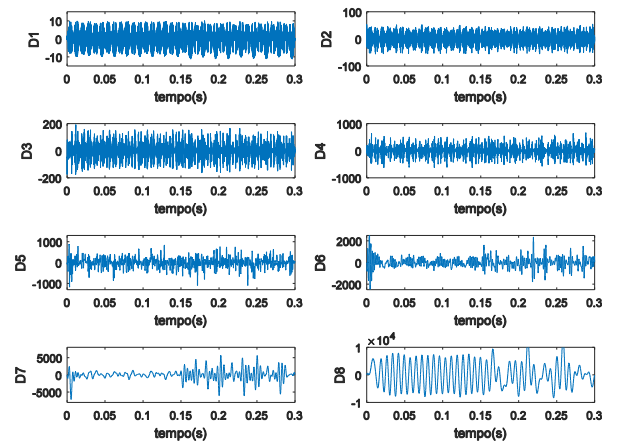


Fig. 15. Coeficientes de detalhes de p_G (carga ressonante).

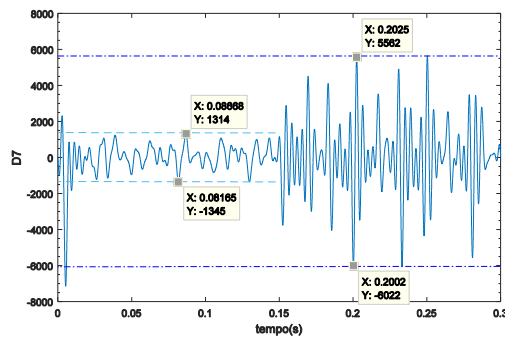


Fig. 16. Detalhe do sétimo nível da decomposição de p_G (carga ressonante).

A saída da TWD de p_G tem uma amplitude de pico de aproximadamente 2659 antes do ilhamento, que cresce para 11584 (cerca de 4,35 vezes maior) depois de 50 ms da condição de ilhamento. Apesar dos valores do tempo de resposta deste caso serem maiores, são inferiores ao limite de 2 s. Pode-se ajustar um sinal de disparo para quando a variação da amplitude for maior que um valor pré-determinado (valor de disparo), por exemplo, cerca de 3 a 5 vezes o valor de regime. O tempo de detecção real irá depender do valor de disparo ajustado.

Um nível de detecção confiável para todas as possíveis condições de operação e cargas locais não pode ser previamente selecionado [3]. A banda de frequência mais apropriada para os propósitos de detecção de ilhamento e o valor de disparo precisam ser ajustados conforme o nível de confiabilidade e tempo de resposta desejados, o que representa uma desvantagem do método. Deve ser levado em consideração que um valor de disparo muito baixo torna o algoritmo de detecção de ilhamento sensível, podendo provocar uma intervenção inoportuna durante a operação normal provocada por distúrbios na rede. De mesma forma, um valor de disparo muito alto aumenta a ZND, podendo o tempo de detecção ultrapassar o tempo permitido por norma ou até mesmo não detectar o ilhamento.

VI. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A transformada Wavelet possui mais vantagens do que técnicas como a transformada de Fourier e a transformada de Fourier de tempo curto. Por exemplo, ela fornece uma melhor localização tempo-frequência de distúrbios, devido à resolução variável. Essa característica permite localizar mudanças rápidas nos sinais (componentes de alta frequência) e também mudanças mais lentas devido a distúrbios com transitórios longos e lentos. Além de não ser necessário assumir que o sinal é estacionário ou periódico nem mesmo na janela de análise.

A análise wavelet é uma importante contribuição para os métodos de localização tempo-frequência, com aplicação prática em sistemas fotovoltaicos. Portanto, a transformada Wavelet pode ser aplicada para detecção e classificação de distúrbios, podendo ser usada tanto para análise da qualidade da energia quanto para detecção de ilhamento em um sistema fotovoltaico conectado à rede. Os resultados e discussões apresentados mostram que os objetivos (detecção de ilhamento e distúrbios na tensão através da transformada wavelet) foram atingidos com sucesso.

to e distúrbios na tensão através da transformada wavelet) foram atingidos com sucesso.

De modo a aprimorar a aplicação da TW para análise de sistemas fotovoltaicos, os autores continuam trabalhando com casos de estudo similares e explorando sua capacidade.

REFERÊNCIAS

- [1] W. N. Macêdo and R. Zilles, "Qualidade de energia da geração distribuída com sistemas fotovoltaicos conectados à rede na usp: Avaliação dos parâmetros de suprimento", in *Proc. Cong. Latinoamericano de Generación y Transmisión de Energia Eléctrica CLAGTEE'05*, Brazil, 2005.
- [2] F. Foiadelli, S. Leva and D. Zaninelli, "PQ and protection system analysis of a new topology for grid connected PV Plant", in *Proc. Int. Conf. Clean Elect. Power ICCEP'11*, Ischia, 2011, pp. 243-248.
- [3] A. Pigazo, M. Liserre, R. A. Mastromauro, V. M. Moreno and A. Dell'Aquila, "Wavelet-based islanding detection in grid-connected pv systems", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 11, pp. 4445-4455, Nov. 2009.
- [4] *IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems*, IEEE Std. 929-2000, 2000.
- [5] Z. Ye, A. Kolwalkar, Y. Zhang, P. Du, and R. Walling, "Evaluation of anti-islanding schemes based on nondetection zone concept," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 19, no. 5, pp. 1171-1176, Sep. 2004.
- [6] R. Polikar, *The wavelet tutorial*, Department of Electrical and Computer Engineering, Rowan University, 1998.
- [7] S. Mallat, *A Wavelet Tour of Signal Processing: the sparse way*, 3rd ed. Burlington, MA: Academic Press, 2009.
- [8] D. Gabor, "Theory of communication", *J. Inst. Electr. Eng.*, vol. 93, pp. 429-457, Nov. 1946.
- [9] J. Morlet, "Sampling theory and wave propagation", *NATO ASI Series Issues in Acoustic Signal-Image Processing and Recognition*, vol. 1, pp. 233-261, Berlin, 1983.
- [10] G. Kaiser, *A friendly guide to wavelets*, Boston: Modern Birkhäuser Classics, 1994.
- [11] I. Daubechies, "Ten lectures on wavelets", in *Proc. Reg. conf. series appl. math. CBMS-NSF'92*, vol. 61, Philadelphia, 1992.
- [12] B. Cazelles, M. Chavez, G. C. Magny, J. Guégan and S. Hales, "Time-dependent spectral analysis of epidemiological time-series with wavelets", *J. R. Soc. Interface*, vol. 4, no. 15, pp. 625-636, Feb. 2007.
- [13] *ANEEL Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST): Módulo 8 – qualidade da energia elétrica*, Rev. 7, 2015.
- [14] C. Jeraputra and P. N. Enjeti, "Development of a robust anti-islanding algorithm for utility interconnection distributed fuel cell powered generation," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 19, no. 5, pp. 1163-1170, Sept. 2004.
- [15] M. E. Ropp, K. Aaker, J. Haigh and N. Sabbah, "Using power line carrier communications to prevent islanding [of PV systems]," in *Proc. 28th IEEE Photovoltaic Spec. Conf.*, Sept. 15-22, 2000, pp. 1675-1678.
- [16] P. S. R. Diniz, E. A. B. Silva and S. L. Netto, *Processamento Digital de Sinais: projeto e análise de sistemas*, 2nd ed. Porto Alegre: Bookman, 2014.
- [17] *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*, IEEE Std. 519-2014, 2014.
- [18] *IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems*, IEEE Std. 1547-2003, 2003.