

Uma Revisão da Transformada Wavelet Aplicada à Localização de Falhas de Energia em Redes Elétricas de Transmissão e Distribuição

Almir Laranjeira Neri Júnior
Petrobras
Salvador, Brasil
almir.neri@petrobras.com.br

Fernando Augusto Moreira
UFBA
Salvador, Brasil
moreiraf@ufba.br

Benemar Alencar de Souza
UFCG
Campina Grande, Brasil
benemar@dee.ufcg.edu.br

Resumo – A transformada Wavelet é uma ferramenta matemática amplamente utilizada em diversas áreas devido a sua capacidade de processar dados. Este artigo apresenta uma revisão, através de artigos selecionados, da aplicação desta transformada na localização de falhas de energia em redes elétricas de transmissão e distribuição.

Palavras-chave – Transformada Wavelet, Sistemas de Potência, Localização de Falhas de Energia

I. INTRODUÇÃO

A transformada Wavelet foi desenvolvida para processar sinais de frequência variável no decorrer do tempo, e desde meados da década de 1980 tem recebido diversos aprimoramentos [1]. Este artigo visa apresentar como esta ferramenta matemática pode ser aplicada em estudos de sistemas de potência, em especial a análise tempo-frequência de sinais de tensão e corrente. Existem outras aplicações computacionais envolvendo wavelets em sistemas de potência, mas não serão aqui avaliados.

Existem diversos livros e artigos que tratam da transformada Wavelet [1]-[7]. Uma pesquisa rápida na internet pode trazer boas referências para quaisquer necessidades. Este artigo se inicia resumindo as características da transformada de Fourier convencional e a transformada de Fourier de tempo curto, uma espécie de precursora da Wavelet. Em seguida, diversas formulações das transformadas Wavelet são apresentadas, nas formas contínua, discreta, análise multiresolucional e pacote de Wavelets.

As seções III e IV detalham a aplicação das Wavelets na localização de falhas de energia. Como a abordagem é distinta, a seção III foca nas redes de transmissão, enquanto a seção IV foca nas redes de distribuição. A seção V, por fim, apresenta a conclusão do artigo.

II. TRANSFORMADA WAVELET

Uma revisão sucinta das características matemáticas e das formas de implementação computacional da transformada Wavelet é necessária para que seja possível compreender sua aplicação em tópicos de sistemas de potência. Esta seção começa com a transformada de Fourier e sua versão com janelas, passando pelas duas formulações clássicas das Wavelets e encerrando com o pacote de Wavelets.

A. Transformada de Fourier

A transformada de Fourier é uma operação integrativa que consegue extrair os componentes de frequência de um sinal. Sua formulação básica está na equação 1. Os cálculos consideram a totalidade do sinal em análise, $x(t)$, gerando uma função $X(\omega)$ que mostra todos os componentes de frequência presentes, desconsiderando mudanças de frequência no tempo.

$$FT = \int_{-\infty}^{\infty} x(t).e^{-j\omega t}.dt = X(\omega) \quad (1)$$

onde t é o tempo, ω é a frequência angular em radianos/seg., $x(t)$ é o sinal variante no tempo e $X(\omega)$ é o sinal variante na frequência. Um problema que aparece na transformada de Fourier é que, à exceção de casos bem particulares, como sinais com componentes de frequência constantes e infinitas, não se pode realizar a operação inversa, ou seja, conhecendo $X(\omega)$ não é possível reconstruir $x(t)$.

B. Transformada de Fourier de Tempo Curto

Uma evolução da transformada de Fourier é a aplicação de uma função do tipo janela, bem localizada no tempo, de modo a produzir um intervalo definido da função $x(t)$. Este tipo é denominado Transformada de Fourier de tempo curto, STFT na sigla em inglês para *short-time Fourier transform* [3]. O resultado da transformada passa a ser a função $X(\omega, t_i)$, onde t_i é o tempo discreto definido para a função janela.

$$STFT_{w,t} = \int_{-\infty}^{\infty} x(s).g(s-t).e^{-j\omega s}.ds = X(\omega, t) \quad (2)$$

Onde s é uma variável auxiliar, t é o tempo, ω é a frequência, $x(s)$ é o sinal variante no tempo, $g(s-t)$ é a função do tipo janela e $X(\omega, t)$ é o sinal variante na frequência vinculada ao tempo definido para cada janela.

A função janela não pode ser um impulso, já que os componentes de frequência de um impulso cobrem todo o espectro possível. Desta forma, a transformada de Fourier de tempo curto obedece ao princípio de incerteza de Heisenberg na formulação frequência-tempo: quanto mais precisa é a frequência que se deseja identificar num determinado sinal, menos preciso é o momento em que esta frequência acontece, e vice-versa.

Um caso particular desta transformada é quando se usa uma função gaussiana como janela. Ela é denominada transformada de Gabor [3], em homenagem ao cientista que primeiro propôs a formulação. Controlando a gaussiana, é possível escolher o melhor compromisso de precisão tempo-frequência que se deseja para cada caso em questão.

Como a função janela tem um intervalo definido, esta transformada tem aplicações de acordo com a faixa de frequências em foco. Uma boa janela para baixas frequências é muito imprecisa para altas frequências, e uma janela precisa para altas frequências pode nem perceber frequências mais baixas. Caso a janela tenha um tamanho adequado para o sinal avaliado, é possível efetuar a reconstrução deste sinal conhecendo-se os resultados da transformada.

C. Transformada Wavelet Contínua

A transformada Wavelet Contínua (TWC) parece ser uma evolução natural da STFT, como pode ser visto na equação 3. A função Ψ , denominada wavelet mãe, substitui simultaneamente a função janela e os senos e cossenos de Fourier.

$$WT_{a,b} = \left| a \right|^{-\frac{1}{2}} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) \cdot dt = C_{\psi(a,b)} \quad (3)$$

onde t é o tempo, a é a variável vinculada à frequência, b é a variável vinculada ao tempo, $f(t)$ é o sinal variante no tempo, Ψ é a wavelet mãe e $C_{\psi(a,b)}$ é o sinal variante na frequência vinculada ao tempo.

Uma das principais limitações da STFT, o fato da janela de observação possuir um tamanho fixo durante toda a análise do sinal, é corrigida através de versões comprimidas ou expandidas da wavelet mãe através da variável a . Assim, em altas frequências o tamanho da janela é estreito, e em baixas frequências o tamanho se amplia proporcionalmente.

De fato, usar senos e cossenos não é mais mandatório. Obedecendo a algumas restrições matemáticas [1]-[2], diversas wavelet mães foram criadas, e outras tantas podem vir a ser desenvolvidas para aplicações específicas. A função Ψ original, a wavelet mãe, precisa ter limites de duração e frequência claramente definidos. A aplicação da TWC acaba sendo um cálculo redundante, já que a variação contínua de a e b traz a sobreposição de intervalos e frequências na duração do espectro de tempo e frequência de cada versão da wavelet mãe.

D. Transformada Wavelet Discreta

A Transformada wavelet discreta (TWD), numa primeira impressão, aparenta apenas ser a ferramenta computacional para implementar a transformada contínua. Isso é verdade para a formulação em *frames*, já que existe uma nítida sobreposição de tempos e frequências.

Com a formulação ortonormal, no entanto, uma nova abordagem de aplicações da wavelet surge, em especial na sua formulação diádica, apresentada na equação 4. A TWD possui muitas propriedades interessantes [1]-[3]. Uma das formas mais comuns de se aplicar esta transformada é na análise

multiresolucional (MRA, do inglês *Multiresolutional Analysis*).

$$WT_{n,m} = 2^{-\frac{m}{2}} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \psi^* \left(\frac{t-n \cdot 2^m}{2^m} \right) \cdot dt = C_{\psi(m,n)} \quad (4)$$

onde t é o tempo, m é a variável inteira vinculada à frequência, n é a variável inteira vinculada ao tempo, $f(t)$ é o sinal variante no tempo, Ψ é a wavelet mãe e $C_{\psi(m,n)}$ é o sinal variante na frequência vinculada ao tempo.

E. Análise Multiresolucional

A MRA é uma das maneiras mais comuns de implementar a transformada Wavelet. Da compressão de imagens a filtros de ruído em áudio à detecção de sinal [2], a MRA pode ser implementada computacionalmente de forma bem fácil. Uma forma simples de entender a análise multiresolucional é através da figura 1.

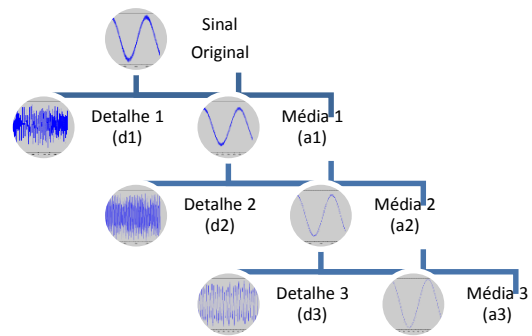


Figura 1 – Estrutura da MRA

Uma aplicação da MRA para a redução de ruído em sinais [2],[7] está na figura 2.

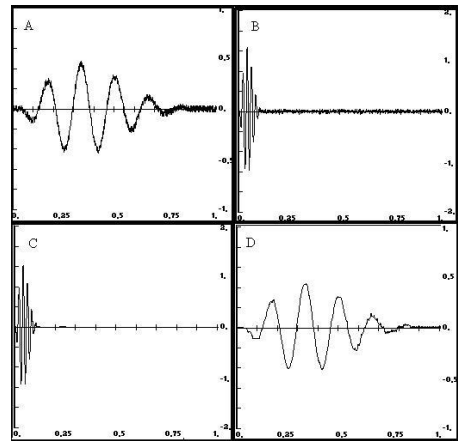


Figura 2 – Estágios de remoção de ruído usando wavelets: a) Sinal original com ruído b) Análise Multiresolucional c) limiar aplicado removendo valores d) reconstrução do sinal com redução de ruído

Uma boa descrição do funcionamento da MRA é que ele opera como um par de filtros de frequência [1]-[2]. Uma função associada à wavelet mãe, denominada função escalar, é utilizada para filtrar as baixas frequências, gerando um sinal

“médio”, e o filtro baseado na wavelet mãe seleciona as frequências elevadas, gerando um sinal de “detalhe”. O processo é recursivo, gerando vários níveis de detalhe e um nível final médio. A MRA tem excelentes propriedades de reconstrução do sinal.

F. Pacote de Wavelets

O pacote de Wavelets é uma expansão da MRA, aplicando o processo recursivo não apenas no resultado de baixa frequência, mas em ambos. A figura 3 apresenta este dado de modo mais explícito. O pacote de wavelets pode obter melhor definição em altas frequências, o que pode ser útil para algumas aplicações.

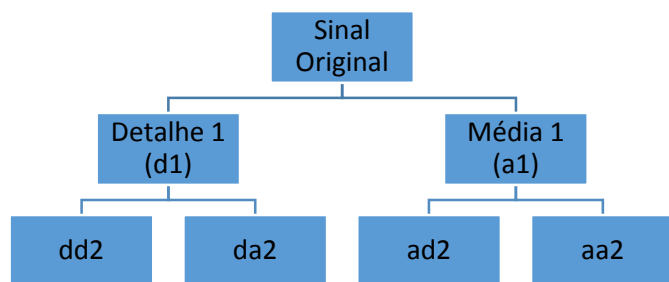


Figura 3 – Estrutura do Pacote de Wavelets

III. LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM REDES DE TRANSMISSÃO

A maioria das técnicas que localizam faltas de energia em redes de transmissão se baseiam na teoria das ondas viajantes.

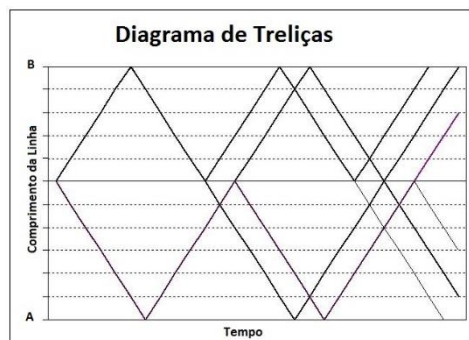


Figura 4 – Diagrama de Lattice, ou diagrama de treliças

Considerando a frequência característica da linha e o tempo de atraso em que cada sinal atinge as extremidades da linha (onde, em geral, se encontram os medidores), o sistema computacional consegue calcular a localização da falta.

Na figura 4 é possível ver um diagrama de treliças mostrando o sinal refletindo numa linha de transmissão. A linha central é o local onde aconteceu o curto-circuito, e as extremidades da linha estão representadas pelas letras A e B. O momento em que o sinal atinge cada terminal é facilmente identificado, permitindo a sistemas que usem medição em uma extremidade da linha ou em ambas, localizarem a falta.

A primeira técnica de localização de faltas de energia em linhas de transmissão usando Wavelets foi desenvolvida por Magnago e Abur [8]. Eles aplicaram uma Wavelet mãe do tipo daub4 em um sinal com 100kHz de taxa de amostragem, e usaram dois algoritmos, um para detectar faltas de fase, outro para detectar faltas a terra, já que as velocidades de propagação de onda são diferentes. Magnago e Abur usaram monitoramento em ambas as extremidades da linha, e compararam os resultados com o que se pode obter usando apenas um medidor. Eles detalharam melhor os resultados obtidos com um único medidor em outro trabalho [9].

Xiaoli et al. [10] colocaram medidores em ambas as extremidades da linha, e aplicaram uma Wavelet mãe do tipo B-Spline, chegando a resultados semelhantes a Magnago e Abur [8]. Gaffor et al. [11], também com medidores em ambas as extremidades, usaram duas Wavelets mãe biortogonais. Biorth 2.2 detecta o evento usando um limiar, e biorth 4.4 localiza a falta através de um rede neural artificial dupla, um algoritmo para falhas na fase, outro para falhas a terra.

Thomas et al. usaram a mesma daub4 já empregada por Magnago e Abur [8] em um sistema de transmissão completo [12], com diversas linhas de transmissão e vários pontos de monitoramento. Os sinais foram processados com uma amostragem de 1.250kHz, mas com filtro a 500kHz para dessincronizar os medidores. O algoritmo é baseado em medições individuais, aplicando uma correlação cruzada com coeficientes médios. Silva et al. [13] empregaram a análise multiresolucional em sinais com 240kHz de taxa de amostragem para identificar a localização de falta em linhas com 3 terminais, com medidores múltiplos, sincronização por GPS e baseado nas frequências fundamentais e harmônicas.

Chanda et al. [14] usam medidores em ambas as extremidades da linha. Com uma taxa de amostragem de 12.500Hz eles aplicaram a transformada wavelet discreta para remover a segunda e terceira harmônicas (97-195Hz), em seguida efetuaram uma interpolação cúbica em cada terminal para identificar o local da falta. O trabalho de Reddy e Mohanta [15] usa a MRA para filtrar o sinal original, extrair o detalhe d3 e concluir a etapa de classificação da falta. Em seguida a linha de transmissão é dividida em frações definidas, e um sistema inteligente baseado em lógica nebulosa (fuzzy) define em que intervalo a falta aconteceu. No artigo seguinte [16], eles desenvolvem esta aplicação considerando o efeito de variações de carga para a classificação e localização do evento. Bhowmik et al. [17] apresentam uma abordagem similar a Reddy e Mohanta, dividindo a linha de transmissão em trechos para calcular o local da falta de energia, mas usando redes neurais, e não lógica nebulosa.

Adaptando a técnica convencional de localização através da impedância fasorial com a aplicação das ondas viajantes e a transformada Wavelet, Ngu e Ramar [18] propõem um método para linhas com múltiplos terminais. Medidores em cada terminação das linhas detectam a falta, e baseado no terminal mais próximo, a distância é calculada. Jamali et al. [19] focam em transitórios com arco, e não faltas permanentes. Com uma taxa de amostragem de 2.500Hz, eles eliminam a corrente pré-falta e ruídos, em seguida aplicam uma rede de wavelets,

similar a uma rede neural, mas empregando coeficientes calculados pela transformada Wavelet, para computar o local de falta, alcançando erros menores que 0,05%.

Apresentando em dois artigos um pacote amplo de hardware e software, Jiang et al. [20]-[21] usam uma taxa de amostragem de 3.840Hz para criar 3 grupos de processamento, um para detectar a falta, outro para classificá-la e um terceiro para calcular a localização da falta. A detecção é feita usando componentes simétricas para não confundir com cargas desbalanceadas. Uma Wavelet mãe daub4 é aplicada em MRA sobre a tensão e a corrente, e pelas técnicas PCA (análise do componente principal, em inglês) e SVM (Máquinas de Vetores de Suporte, também em inglês) a classificação é obtida. Por fim, uma rede neural estrutural adaptativa, capaz de ser treinada simultaneamente à sua operação, localiza a falta.

Baseado na propriedade das wavelets como filtros espelho em quadradura (QMF, Quadrature Mirror Filters), Argyropoulos et al. [22] apresentam um algoritmo para selecionar os coeficientes ótimos do diagrama de treliças de modo a construir uma Wavelet específica para aprimorar a detecção de pico em curtos em linhas de transmissão, permitindo assim maior precisão no trabalho de localização de falta. Valsan e Swarup [23] desenvolveram um método de localização de falta através da Wavelet mãe daub6, focando no conteúdo entre 500Hz e 1kHz para detectar, classificar e por fim localizar a falta através de uma topologia com medidores nos extremos da linha.

Jung et al. [24] aplicam os conceitos de localização de faltas em linhas de transmissão para proteger e acelerar o reparo de cabos subterrâneos. Após remover ruídos do sinal, e monitorando ambas as extremidades do cabo, um algoritmo duplo identifica a metade problemática, e um algoritmo baseado em medição única calcula a distância. Silva et al. [25] apresentam um algoritmo baseado em redes neurais no domínio complexo e na transformada wavelet estacionária, que nada mais é que uma MRA sem aplicar a ação de reduzir na metade os dados após cada passo da transformada discreta.

Korkali et al. [26] mostram uma técnica para localizar faltas de energia em redes complexas de transmissão usando medidores localizados estrategicamente de modo a abarcar o máximo de locais. A técnica pretende otimizar a quantidade de medidores para redes ramificadas, considerando no entanto interpolação entre os resultados de cada medidor para localizar o evento. Dasgupta et al. [27] usam a Wavelet mãe daub4 e computam entropias através de uma rede neural de modo a precisar o local em falta na linha de transmissão.

O artigo de Yusuf et al. [28] obtém bons resultados com uma wavelet estacionária e a funcionalidade da função determinante para extrair e simplificar os dados da falta. Em seguida emprega uma máquina de vetor de suporte para classificar o tipo da falta, e a regressão de vetor de suporte (Support Vector Regression, SVR) para cada um dos dez tipos de evento de falta (AG, BG, ABC, etc.) de modo a precisar o local do curto-circuito.

Um artigo que faz um resumo bastante didático das técnicas mais atuais em localização de faltas de energia em redes de transmissão é a referência [29].

IV. LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

A localização de faltas de energia em sistemas de distribuição usando a transformada Wavelet possui uma abordagem distinta dos eventos em redes de transmissão. A teoria das ondas viajantes continua sendo empregada, mas a topologia radial ramificada e a consequente profusão de reflexões e refrações do sinal complicam os cálculos.

Magnago e AburV. [30] são novamente os precursores, continuando o desenvolvimento do artigo anterior [8], empregando DWT com uma taxa de amostragem de 100kHz para identificar o trecho defeituoso, e em seguida o método fasorial na frequência fundamental para calcular a distância da falta em relação ao ponto de medição. Bo et al. [31] avaliam uma rede de distribuição simplificada, usando alta frequência de amostragem (10MHz) para avaliar a polaridade da corrente de arco e o intervalo entre diversas reflexões. O método é bastante preciso, mas na prática funciona de modo similar ao que é realizado em linhas de transmissão. Yan et al. [32] usam uma taxa de amostragem ainda maior que Bo, 100MHz, e aplicam o pacote de Wavelets para detectar o ramal com problemas comparando os dados pré-calculados de um autovetor da rede. Os intervalos entre as reflexões permitem calcular o local da falta. Os conceitos básicos deste artigo são bastante promissores.

Peretto et al. [33] inserem monitores em cada nó do Sistema sincronizados através de GPS, e com uma amostra de 10MHz e a Wavelet mãe daub4 computam os intervalos entre sinais para achar o ponto com defeito, diferenciando os algoritmos de falta de fase e falta à terra devido às distintas velocidades de propagação. Nouri et al [34] trabalham de modo semelhante a Peretto, mas com um algoritmo que calcula múltiplas distâncias para cada medidor e avalia desta forma o mais preciso.

O artigo de Chunju et al. [35] aplica uma taxa de amostragem relativamente baixa, somente 1.200Hz, e tenta identificar faltas fase-terra em sistemas aterrados pela bobina de Petersen. Usando a wavelet mãe daub4, eles avaliam o conteúdo harmônico pré e pós-falta, e um sistema inteligente baseado em redes neurais e lógica nebulosa (*fuzzy*) classifica o tipo de falta e indica a distância do local de falha para o ponto de medição, mas eles não testam esta técnica em sistemas ramificados. Dwivedi, Singh e Srivastava [36] operam de modo similar a Chunju, com apenas um medidor, usando a daub4 numa análise multiresolucional num sinal amostrado a 1kHz. O detalhe d3 da MRA (60Hz-200Hz) identifica o ramo defeituoso, mas o algoritmo não computa a distância do curto-circuito em relação à fonte. Souza et al. [37] alcançam praticamente o mesmo efeito que Dwivedi empregando um algoritmo distinto e sistemático, com regras de decisão. Jalali and Moslemi [38] também param apenas na identificação do ramo em falta. Primeiro calculam a matriz modal JMarti de cada ramo, em seguida calculam o fator S representando essa matriz, e por fim comparam os coeficientes do detalhe d3 da transformada contínua com cada fator S.

Borghetti et al. [39]-[41] nesses 3 artigos desenvolveram um sistema que emprega a transformada wavelet contínua e a teoria de ondas viajantes para identificar com precisão o local

em que o curto acontece, usando apenas um elemento de medição na fonte de potência. Em todos os casos ele utiliza um circuito simples com um tronco e duas derivações e calcula as frequências e tempo de resposta esperados para cada ramo em falta. Este trabalho aparenta ser uma das técnicas mais promissoras para aplicação prática.

No primeiro artigo [39] eles usam a Wavelet mãe Morlet para calcular as frequências e os intervalos de cada local de curto. Com apenas um medidor, a taxa de erros é elevada, mas quando mais medidores sincronizados são usados, a precisão passa a ser bastante satisfatória, devido à verificação de dados confiáveis.

No segundo artigo [40] é apresentada uma nova Wavelet mãe que não está formalmente estruturada, já que não se pretende atuar na reconstrução do sinal. O objetivo é ter precisão na detecção do evento de falta. Neste caso, em que pesem incertezas, os valores das frequências medidas são bem mais próximos das frequências esperadas, mas ainda passível de erros quando operando com medidor único. No terceiro artigo vinculado a este tema [41] eles incrementam a técnica ao agregar os intervalos repetidos entre ondas de mesma frequência, reforçando o conteúdo dos cálculos baseados apenas nas frequências esperadas. Eles também apresentam uma versão em miniatura para testes e para coletar dados experimentais.

Nakhli et al. [42] desenvolveram os conceitos implementados por Borghetti usando redes neurais e a análise multiresolucional das wavelets para efetuar o cálculo da distância do curto em relação à origem ao mesmo tempo em que identificavam a derivação em que a falta aconteceu. A maior limitação prática da técnica é a alta taxa de amostragem de 10MHz.

Jahromi et al. [43] focam em redes de distribuição rurais no intuito de evitar incêndios em épocas de seca ou motivados por cabo ao solo. Numa rede de 63 barras, 4 pontos terminais são monitorados e sincronizados com GPS de modo a observar as diferentes frentes de onda e filtrar, usando a Wavelet mãe Biorthogonal 2.4 num sinal de 2MHz, os impulsos que permitem classificar os diferentes locais através de um algoritmo Floyd-Warshall.

Goudarzi et al. [44] testam na rede padrão de 34 barras do IEEE uma sistema de duplo algoritmo. Usando 4 medidores espalhados em terminais da rede sincronizados por GPS, um sistema baseado em DWT permite identificar a seção defeituosa, e um cálculo entre os tempos das frentes de onda obtidos através da análise do mesmo sinal por CWT permite calcular com precisão de menos de 1% de erro o local da falta.

O trabalho de Bísaro et al. [45], por fim, associa à localização de falta de energia um módulo para análise de qualidade de energia. Ambos os algoritmos usam redes neurais do tipo Fuzzy-ARTMAP. Efetuando testes através de simulações de uma rede real de 134 barras em que se colocaram 4 medidores em pontos não terminais, numa taxa de amostragem de apenas 7,68kHz e empregando a Wavelet mãe daub4, eles obtêm bons resultados de identificação do local de falta, com a ressalva de às vezes confundir nós adjacentes como o local da falta.

V. CONCLUSÕES

A transformada Wavelet é uma poderosa ferramenta para a análise de sinais variantes no tempo e na frequência, características da corrente e tensão dos sistemas elétricos. Neste artigo são sumarizadas algumas referências que mostram a aplicação da transformada Wavelet ao problema de localização de curtos-circuitos em redes de transmissão e distribuição.

Cada um dos trabalhos citados tem suas características peculiares, mas métodos de limiar, identificação de frequências ou faixas de frequência e a associação com sistemas inteligentes aparecem com bastante predominância. Quantidades de medidores e sua localização, bem como a taxa de amostragem, também se apresentam como fatores importantes de decisão, bem como uma escolha apropriada da wavelet mãe.

Os autores deste artigo estão desenvolvendo estudos na localização de faltas de energia em sistemas de distribuição que em breve virão a público, desenvolvendo conceitos definidos em Yan [32], Borghetti [39]-[41] e Nakhli [42].

REFERÊNCIAS

- [1] I. Daubechies, Ten Lectures on Wavelets, SIAM, 1992
- [2] J. S. Walker, A Primer on Wavelets and their Scientific Applications, CRC Press, 1999
- [3] C. Gargour, M. Gabrea, V. Ramchandran, J.-M. Lina, "A Short introduction to wavelets and their applications", IEEE Circuits and Systems Magazine 2009; 9(2): 57-68
- [4] A. W. Galli, G. T. Heydt, P. F. Ribeiro, "Exploring the power of wavelet analysis", IEEE Computer Application in Power Systems 1996; 9(4): 37-41
- [5] R. M. de C. Fernandez, H. N. D. Rojas, "An Overview of wavelet transforms application in power systems", 14th Power System Computation Conference – PSCC 2002
- [6] T. K. Sarkar, C. Su, "A Tutorial on wavelets from an electrical engineering perspective, part 2: The continuous case", IEEE Antennas and Propagation Magazine 1998 ; 40(6): 36-49
- [7] T. K. Sarkar, C. Su, R. Adve, M. Salazar-Palma, L. Garcia-Castillo, R. R. Boix, "A Tutorial on wavelets from an electrical engineering perspective, part 1: Discrete wavelet techniques", IEEE Antennas and Propagation Magazine 1998; 40(5): 49-68
- [8] F. H. Magnago, A. Abur, "Fault location using wavelets", IEEE Transactions on Power Delivery 1998; 13(4): 1475-80
- [9] A. Abur, F. H. Magnago, "Use of time delays between modal components in wavelet based fault location", International Journal of Electrical Power and Energy Systems 2000; 22: 397-403
- [10] Z. Xiaoli, Z., Xiangjun, L. Li, S. S. Choi, W. Yuanyuan, "Fault location using wavelet energy Sspectrum analysis of traveling waves", 8th International Power Engineering Conference – IPEC 2007: 1126-30
- [11] S. A. Gafoor, P. V. R. Rao, "Wavelet based fault detection, classification and location in transmission lines", 1st International Power and Energy Conference – PECon 2006: 114-8
- [12] D. W. P. Thomas, C. Christopoulos, Y. Tang, P. Gale, J. Stokoe, "Single ended travelling wave fault location scheme based on wavelet analysis", 8th IEE International Conference on Developments in Power System Protection 2004
- [13] M. Silva, M. Oleskoviczb, D. V. Coury, "A hybrid fault locator for three-terminal lines based on wavelet transforms", Electric Power Systems Research 2008; 78: 1980-8
- [14] D. Chanda, N. K. Kishore, A. K. Sinha, "A Wavelet

- multiresolution analysis for location of fault on transmission lines", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* 2003; 25: 59-69
- [15] Reddy, M. J., Mohanta, D. K., "A Wavelet-fuzzy combined approach for classification and location of transmission line faults", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* 2007; 29: 669-78
- [16] M. J. Reddy, D. K. Mohanta, "Adaptive-neuro-fuzzy inference system approach for transmission line fault classification and location incorporating effects of power swings", *IET Generation, Transmission & Distribution* 2008; 2(2): 235-244
- [17] P. S. Bhowmik, P. Purkait, K. Bhattacharya, "A novel wavelet transform aided neural network based transmission line fault analysis method", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* 2009; 31: 13-19
- [18] E. E. Ngu, K. Ramar, "A combined impedance and traveling wave based fault location method for multi-terminal transmission lines", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* 2011; 33: 1767-75
- [19] S. Jamali, N. Ghaffarzadehy, "A New method for arcing fault location using discrete wavelet transform and wavelet networks", *European Transactions on Electrical Power* 2012; 22(5): 601-15
- [20] J. Jiang, C. Chuang, Y. Wang, C. Hung, J. Wang, C. Lee, Y. Hsiao, "A Hybrid framework for fault detection, classification and location – part I: concept, structure and methodology", *IEEE Transactions on Power Delivery* 2011; 26(3): 1988-98
- [21] J. Jiang, C. Chuang, Y. Wang, C. Hung, J. Wang, C. Lee, Y. Hsiao, "A Hybrid framework for fault detection, classification and location – part II: implementation and test results", *IEEE Transactions on Power Delivery* 2011; 26(3): 1999-2008
- [22] P. E. Argyropoulos, H. Lev-Ari, "Customized wavelets for fault location in power systems", *North America Power Symposium (NAPS)* 2011
- [23] S. P. Valsan, K. S. Swarup, "Wavelet transform based digital protection for transmission lines", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* 2009; 31: 379-88
- [24] C. K. Jung, J. B. Lee, X. H. Wang, "A validated accurate fault location approach by applying noise cancellation technique", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* 2012; 37: 1-12
- [25] A. P. A. da Silva, A. C. S. Lima, S. M. Souza, "Fault location on transmission lines using complex-domain neural networks", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* 2012; 43:720-7
- [26] M. Korkali, H. Lev-Ari, A. Abur, "Travelling-wave-based fault location technique for transmission grids via wide-area synchronized voltage measurements", *IEEE Transactions on Power Systems* 2012; 27(2):1003-11
- [27] A. Dasguptaa, S. Nathb, A. Dasc, "Transmission line fault classification and location using wavelet entropy and neural network", *Electric Power Components and Systems* 2012; 40(15): 1676-89
- [28] A. A. Yusuf, A. A. Jimoh, J. L. Munda, "Fault location in transmission lines based on stationary wavelet transform, determinant function feature and support vector regression", *Electric Power System Research*, 2014; 110: 73-83
- [29] L. de Andrade, T. P. de Leão, "Fault location for transmission lines using wavelet", *IEEE Latin America Transactions*, 2014; 12(6):1043-48
- [30] F. H. Magnago, A. Abur, "A New fault location technique for radial distribution system based on high frequency signals", *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting* 1999; 1: 426-31
- [31] Z. Q. Bo, G. Weller, M. A. Redfern, "Accurate fault location technique for distribution system using fault-generated high-frequency transient voltage signals", *IEE Proceedings in Generation Transmission and Distribution* 1999; 146(1): 73-79
- [32] F. Yan, Z. Chen, Z. Liang, Y. Kong, P. Li, "Fault location using wavelet packets", *International Conference on Power Systems Technology – PowerCon* 2002; 4: 2575-9
- [33] L. Peretto, R. Sasdelli, E. Scala, R. Tinarelli, "Fault location method integrating a distributed measurement system and wavelet analysis", *Instrumentation and Measurement Conference – IMCT* 2007
- [34] H. Nouri, C. Wang, T. Davies, "An Accurate Fault location technique for distribution lines with tapped load using wavelet transform", *IEEE Porto Power Tech Conference* 2001; 3
- [35] F. Chunju, K. K. Li, W. L. Chan, Y. Weiyong, Z. Zhaoning, "Application of wavelet fuzzy neural network in locating Single line to ground fault (SLG) in distribution lines", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* 2007; 29: 497-503
- [36] U. D. Dwivedi, S. N. Singh, S. C. Srivastava, "A Wavelet based approach for classification and location of faults in distribution systems", *IEEE Indian Conference – INDICON* 2008; 2: 488-93
- [37] B. A. Souza, K. M. Silva, H. D. M. Braz, J. A. C. B. Silva, A. V. Fontes, "Fault location for distribution systems based on decision rules and wavelet transform", *International Conference and Exhibition on Electricity Distribution CIGRE* 2005
- [38] D. Jalali, N. Moslemi, "Fault location for radial distribution systems using fault-generated high-frequency transients and wavelet analysis", *International Conference and Exhibition on Electricity Distribution CIGRE* 2005
- [39] A. Borghetti, S. Corsi, C. A. Nucci, M. Paolone, L. Peretto, R. Tinarelli, "On the use of continuous-wavelet transform for fault location in distribution power systems", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* 2006; 28: 608-17
- [40] A. Borghetti, M. Bosetti, M. Di Silvestro, C. A. Nucci, M. Paolone, "Continuous-wavelet transform for fault location in distribution power networks: definition of mother wavelets inferred from fault originated transients", *International conference on Power Systems Transients - IPST* 2007, paper 271
- [41] A. Borghetti, M. Bosetti, M. Paolone, A. Abur, "Integrated use of time-frequency wavelet decompositions for fault location in distribution networks: theory and experimental validation", *International conference on Power Systems Transients - IPST* 2009, paper 313
- [42] M. Pourahmadi-Nakhli, A. A. Safavi, "Path characteristic frequency-based fault locating in radial distribution systems using wavelets and neural networks", *IEEE Transactions on Power Delivery* 2011; 26(2): 772-81
- [43] A. T. Jahromi, P. Wolfs, S. Islam, "Travelling wave fault location in rural radial distribution networks to reduce wild fire risk", *Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, 2015, 1-6
- [44] M. Goudarzi, B. Vahdi, R. A. Naghizadeh, S. H. Hosseini, "Improved fault location algorithm for radial distribution systems with discrete and continuous wavelet analysis", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* 2015; 67:423-30
- [45] A. A. P. Biscaro, R. A. F. Pereira, M. Kezunovic, J. R. S. Mantovani, "Integrated fault location and power quality analysis in electric power distribution systems", <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7175076>.