Filtro Differentiator-Smoother e Transformada Wavelet aplicados à localização de faltas

Juan Fabio Soares Martins*. Rodrigo Pinto Lemos *
Maria Leonor Silva de Almeida.*

** Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás, Goiás, Brasil, (e-mails: juanf03@discente.ufg.br, lemos@ufg.br, marialeonor@ufg.br)*

Abstract: This work presents the development carried out for the comparison between different techniques regarding efficiency for fault localization in a transmission line, using the theory of traveling waves. The first technique makes use of a Differentiator-Smoother filter, while the other two use the Wavelet Transform for identifying the traveling waves incident at the terminals of the line after a fault occurrence. Data acquisition for testing was performed by modeling an electrical network in the Alternative Transient Program (ATP) software, simulating short-circuits conditions in the system. Signal processing was carried out in MATLAB software, using the Wavelet Toolbox.

Resumo: Este trabalho apresenta o desenvolvimento realizado para a comparação entre diferentes técnicas quanto à eficiência para localização de faltas em uma linha de transmissão, utilizando a teoria de ondas viajantes. A primeira técnica faz uso de um filtro *Differentiator-Smoother*, enquanto as duas outras utilizam a Transformada *Wavelet*, para identificação das ondas viajantes incidentes nos terminais da linha, após a ocorrência de uma falta. A obtenção de dados para teste foi realizada por meio da modelagem de uma rede elétrica no software *Alternative Transient Program* (ATP), simulando condições de curto-circuito no sistema. O processamento dos sinais foi realizado no *software* MATLAB, utilizando a *Wavelet Toolbox*.

Keywords: Wavelet; Differentiator-Smoother filter; Fault location; Transmission lines; Travelling waves.

Palavras-chaves: *Wavelet*; Filtro *Differentiator-Smoother*; Localização de faltas; Linhas de transmissão; Ondas viajantes.

1. INTRODUÇÃO

A estabilidade da rede elétrica está diretamente relacionada à capacidade de eliminação de faltas em um curto período de tempo. Como o tempo de eliminação da falta está relacionado ao tempo de operação da proteção do sistema, é possível ampliar a capacidade de transmissão de potência deste sistema reduzindo o tempo de atuação da proteção (Huamani, 2019).

Funções de proteção utilizadas atualmente aplicam algoritmos baseados em fasores (Martins, 2012), geralmente obtidos por meio da Transformada Discreta de Fourier (TDF) ou pela Transformada Rápida de Fourier (TRF) (Cooley et. al, 1965). A aplicação dessas transformações exige janelamentos cujo período varia de 1 a 1,5 ciclo elétrico, o que resulta em um tempo total de 3 a 4 ciclos para eliminação de faltas (Schweitzer et al., 2015 e 2016b).

O uso de novas funções de proteção no domínio do tempo, baseadas em tecnologias de elevadas frequências de amostragem e processamento de sinais, da ordem de 1 MHz, permite a implementação de algoritmos ultrarrápidos para a detecção de faltas. A eficiência destes métodos está relacionada ao fato de ser dispensado janelamento exigido pelas funções de proteção tradicionais de 1 ciclo elétrico. Dessa forma, é possível aplicar técnicas que usam a detecção de ondas viajantes incidentes nos algoritmos de funções de proteção no domínio do tempo (Huamani, 2019). Como exemplo, tem-se as proteções direcional, diferencial e de distância por ondas viajantes, utilizadas pelo dispositivo SEL-T400L, além do recurso localização de faltas.

O SEL-T400L é um dispositivo eletrônico inteligente (IED) comercializado que aplica algoritmos no domínio do tempo com o enfoque na proteção de linhas de transmissão (LTs). A lógica de proteção diferencial no domínio do tempo (TW87) utilizada pelo SEL-T400L possui a estimativa da localização da falta como um dos parâmetros para liberar ou bloquear a atuação de suas funções de proteção (Schweitzer et al., 2016b).

O presente trabalho compara o desempenho da localização estimada da falta utilizando o filtro *Differentiator-Smoother*, presente no SEL-T400L, e a Transformada *Wavelet*. As simulações foram realizadas no programa ATP, a partir da modelagem de uma LT de 138 kV com dois terminais, aplicando curtos-circuitos no sistema para avaliação dos métodos propostos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção dispõe a teoria e o equacionamento utilizado para a aplicação de ondas viajantes à localização de faltas em LTs por

meio do conhecimento de parâmetros característicos da linha e da detecção da incidência de ondas viajantes nos terminais da LT.

2.1 Ondas viajantes aplicadas à localização de faltas

Distúrbios provocados na rede elétrica geram sinais de corrente e tensão sobrepostos aos sinais originais, que se propagam ao longo da LT, partindo do ponto em que foi originada a falta para ambas as direções da rede. Descontinuidades encontradas, como por exemplo curtos-circuitos ou pontos de junção entre linhas, os quais de forma geral podem ser simplificados como uma mudança na impedância característica da linha, provocam a reflexão e a refração do sinal transitório (Marques, 2018).

Os parâmetros das LTs são considerados distribuídos, de modo que distúrbios que ocorrem internamente à extensão da linha são detectados apenas no instante em que as ondas viajantes incidem nos pontos terminais da LT, ou locais de monitoramento (Lucas et al., 2020). Dessa forma, a velocidade (v) de propagação de ondas em uma linha de transmissão transposta é dada pelos parâmetros de indutância (L) e capacitância (C), por unidade de comprimento, conforme apresentado em (1), conforme Fuchs, 1979.

$$v = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \tag{1}$$

Uma vez que as ondas originadas por uma falta em uma linha propagam-se ao longo da sua extensão com velocidade dependente dos parâmetros dessa LT, dada por (1), é possível estimar o ponto de ocorrência da falta, a partir do conhecimento dos instantes de tempo em que as ondas viajantes incidem nos terminais de medição (Santos, 2019).

É possível obter uma estimativa da localização da falta utilizando dados de apenas um terminal de monitoramento, porém este método implica em maiores dificuldades devido à necessidade de distinção entre a primeira onda incidente e as ondas refletidas que incidem neste terminal. Por outro lado, há o método para localização de faltas utilizando dois terminais de medição, que facilita a abordagem por necessitar apenas da identificação dos instantes de tempo da primeira onda incidente em cada terminal, conforme apresentado por Fischer et al. (2012). Este método exige a sincronização temporal entre os pontos via *Global Positioning System* (GPS), mas em compensação apresenta maior precisão por dispensar também a necessidade de distinção do tipo de falta, se foi aterrada e se ocorreu na primeira ou segunda metade da LT.

A estimativa do ponto de ocorrência da falta (x), para o método de dois terminais, é obtida aplicando (2) (Schweitzer et al., 2016b). O comprimento total da LT é representado por l. A velocidade de propagação é dada por v e os instantes em que são detectadas as primeiras ondas incidentes nos terminais local e remoto são dados, respectivamente, por t_L e t_R. Neste trabalho foi aplicado o método via dois terminais devido à sua maior praticidade para o objeto de estudo do trabalho.

$$x = \frac{1}{2} \cdot \left(l + v \cdot (t_L - t_R)\right) \tag{2}$$

O sistema modelado para aquisição de dados no *software* ATP é retratado na Figura 1. A rede modelada apresenta os dois terminais, local e remoto, de uma linha de transmissão de 120 km e 138 kV, cujo modelo adotado foi o de uma linha perfeitamente transposta e de parâmetros distribuídos, independentes da frequência, adaptados de Santos (2019).

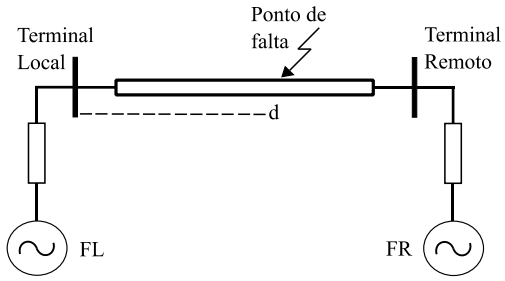

Fig. 1 Sistema modelado para aquisição de dados

Para os terminais, foram utilizadas fontes de tensão em série com uma impedância de curto-circuito de 12 Ω e relação X/R igual a 30, representando um equivalente de Thévenin. O curto-circuito aplicado foi monofásico, na fase A, com uma resistência de falta de 10 Ω, nas distâncias de 80 e 100 quilômetros do terminal local da LT. A Tabela 1 apresenta os parâmetros da linha de transmissão.

Tabela 1. Parâmetros da Linha de Transmissão 138 kV

R_+ (Ω/km)	L_+ (H/km)	C_+ (nF/km)
0,256184	0,0013	5,18
R_0 (Ω/km)	L_0 (H/km)	C_0 (nF/km
0,58449	0,00371	9,09

3. PROCESSAMENTO DE SINAIS

Nesta seção será detalhado o desenvolvimento do filtro *Differentiator-Smoother* e da Transformada *Wavelet* nos *softwares* ATP e MATLAB, abordando a aplicação destas duas ferramentas à localização de faltas.

3.1 Filtro Differentiator-Smoother

A análise de ondas viajantes por meio do filtro *Differentiator-Smoother* (DS) mostra-se de grande interesse por apresentar como uma das características as saídas padronizadas do filtro, com ganho de valor unitário, conforme exemplificado na Figura 2. Esse aspecto é de grande relevância para a análise de ondas viajantes provocadas por faltas nas LTs (Ribeiro et. al, 2018).

O Filtro DS é composto por um filtro analógico de 3ª ordem *Butterworth* passa-baixas, que limita os sinais coletados a uma frequência de 400 kHz. A aplicação deste filtro está relacionada ao efeito indesejado de *aliasing*, suavizando o sinal de entrada do Filtro DS (Schweitzer et al., 2016a).

O sinal filtrado analogicamente é então amostrado por um *Sample and Holder*, com frequência de amostragem de 1 MHz. Essa elevada frequência de amostragem é necessária para a detecção precisa das ondas viajantes incidentes nos terminais da linha de transmissão, principalmente para a aplicação de localização de faltas. Após a amostragem, os dados são convertidos em *bits*, por meio de um Conversor Analógico/Digital (A/D) de 18 *bits*. Por fim, o filtro diferencial é aplicado, ao sinal suavizado, amostrado e digitalizado.

O filtro diferencial realiza a comparação de um sinal, ao longo de uma janela de tempo, aplicando coeficientes para cada amostra do sinal, com a finalidade de detectar variações de elevada magnitude no sinal. A saída do filtro consiste no produto interno das amostras do sinal e os coeficientes do filtro, de modo que sinais com pequenas variações apresentam saída praticamente nula (Huamani, 2019).

A saída do filtro DS aplicado ao sinal de corrente é representada por i_{TW} e está disposta em (3) (Lopes et. al, 2018). N_{DS} representa o número de coeficientes utilizados do filtro em uma determinada janela de tempo, sendo adotado pelo SEL-T400L o valor de 21 amostras do sinal. O valor da amplitude do sinal amostrado ao qual foi aplicado o filtro DS é representado por A e G é o valor do ganho dos N_{DS} coeficientes, sendo que o SEL-T400L utiliza G = 0,1.

$$i_{TW} = \frac{N_{DS}}{2} \cdot (-G \cdot A) + \frac{N_{DS}}{2} \cdot (G \cdot A) \qquad (3)$$

A saída nula durante a operação em regime permanente ocorre pelo fato de que sinais de corrente e tensão da rede elétrica em frequências baixas, de 50 ou 60 Hz, quando analisados em uma janela de tempo adequada, de 21 µs para o SEL-T400L, podem ser considerados praticamente constantes. Por outro lado, após a ocorrência de uma falta, os sinais variam bruscamente, o que resulta em formas de picos na saída do filtro DS. Na Figura 2 está ilustrado o comportamento da saída do filtro após uma variação brusca de amplitude A do sinal de entrada.

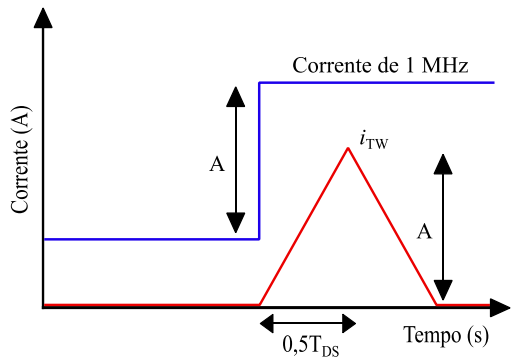

Fig. 2 Operação do Filtro Differentiator-Smoother. Adaptado de Schweitzer et al., 2016b.

A modelagem de todo o filtro DS, que engloba o filtro analógico, o *Sample and Holder*, o Conversor A/D e o filtro diferenciador foi realizada no *ATP*, utilizando a linguagem de programação MODELS, própria do *software*.

A Figura 3 apresenta a saída do Filtro DS da Fase A, vista pelo Terminal Local e Remoto, para fins de comparação entre os instantes de tempo em que são detectadas as primeiras ondas incidentes originadas pela falta, que ocorre em 0,25 s. Nota-se que devido à maior proximidade do local da falta (a 100 km do terminal local) com o terminal remoto (que está a 120 km do terminal local), as ondas viajantes ocasionadas pelo curto-circuito incidem primeiro no terminal remoto e, após o intervalo de tempo visto na Figura 3, incidem no terminal local.

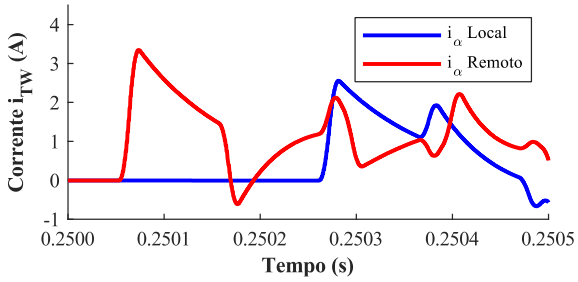

Fig. 3 Correntes TW no Terminal Local e Remoto

3.2 Transformada Wavelet

Uma das desvantagens apresentadas pela TDF na análise de eventos do sistema elétrico é a perda da informação do instante de tempo em que ocorrem, ao realizar a transformação do domínio do tempo para frequência. Esse fato torna a aplicação da TDF ineficiente para funções de proteção baseadas na detecção de transitórios (Silva et al., 2010).

Como alternativa, é possível aplicar janelamentos à Transformada de Fourier, de modo que passa a ser analisado o sinal ao longo de um determinado período de tempo específico. As desvantagens dessa técnica consistem no fato da precisão das informações a respeito de um evento estarem associadas ao tamanho adotado para a janela, que deve possuir um tamanho único, adotado para todas as frequências.

A Transformada *Wavelet*, por outro lado, consiste numa forma de onda de curta duração e valor médio nulo, apresentando também a flexibilidade de se adotar janelas deslizantes de tamanhos variáveis. No caso da Transformada *Wavelet*, a região adotada não é a de tempo-frequência, como na TDF, mas sim tempo-escala (Mallat, 2009).

A Transformada *Wavelet* Discreta (TWD) está retratada por (4) e (5), sendo que c_j representa o coeficiente de aproximação e d_j o coeficiente de detalhe da escala j. Os termos h e g são filtros passa-baixa e passa-alta, respectivamente (Daubechies, 1992). Os coeficientes de aproximação agregam informações acerca dos sinais de altas escalas, ou componentes de baixa frequência, enquanto os coeficientes de detalhe estão relacionados à baixas escalas, ou componentes de alta frequência do sinal (Freitas, 2016).

$$c_j[\mathrm{k}] = \sum_n h[n-2k] \cdot \mathrm{c}_{j-1}[\mathrm{n}] \qquad (4)$$

$$d_j[\mathrm{k}] = \sum_n g[n-2k] \cdot \mathrm{c}_{j-1}[\mathrm{n}] \quad (5)$$

De forma análoga à composição do sinal por senoides de diferentes frequências, realizada pela TDF, a TWD permite a composição do sinal pela sobreposição da multiplicação de diferentes coeficientes por *Wavelets* de escala e deslocamento apropriados.

Desse modo, é possível filtrar o sinal em aproximações, que consistem nas componentes de baixa frequência e de alta escala do sinal original, e em detalhes, que correspondem às componentes de alta frequência e baixa escala. Essa decomposição pode ser realizada em vários níveis, que, em teoria, não possui restrições, porém é recomendado que seja avaliada a natureza do sinal (Mendes, 2008).

No sistema elétrico de potência, as ondas viajantes estão mutuamente acopladas, de modo que é necessário a aplicação da Transformada de Clarke, para decompor os sinais que inicialmente se encontram no domínio das fases para o domínio modal (Lucas et al., 2020). Como o modelo adotado para linhas de transmissão neste trabalho é perfeitamente transposto, a matriz de transformação de Clarke adotada possui valores constantes, dados por (6) (Duesterhoeft et. al, 1951).

$$T = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & 1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{vmatrix} \quad (6)$$

Assim, as correntes modais (i_{mod}) são obtidas conforme disposto em (7), por meio da multiplicação das correntes de fase (i_f) pela matriz de transformação T, apresentada em (6).

$$i_{mod} = T \cdot i_f \quad (7)$$

As correntes modais são três: a componente zero e as componentes α e β, ou modos aéreos. A componente α refere-se à corrente que flui pela fase A e retorna pelas fases B e C, enquanto a componente β refere-se ao fluxo relacionado às fases B e C (Marques, 2018). Os valores da componente α da corrente elétrica no terminal local e remoto, após um curto-circuito monofásico em A, no instante de 0,25 s estão ilustrados na Figura 4.

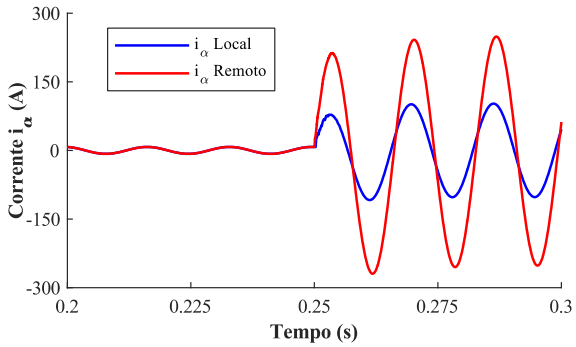

Fig. 4 Componente i_α da Fase A nos Terminais Local e Remoto.

Neste trabalho foi aplicada a Transformada *Wavelet Daubechies* 4 (db4), utilizando o *software* MATLAB *e sua biblioteca The Wavelet Toolbox*™ (MathWorks, 2024c). A decomposição do sinal de componente α das correntes modais foi obtido por meio da função *wavedec*, que aplica a Transformada Discreta de *Wavelet* unidimensional em multiníveis e retorna coeficientes de aproximação e de detalhe, sendo estes responsáveis pela detecção de transitórios de alta frequência e curta duração (MathWorks, 2024b).

Uma desvantagem do uso desta função para a análise de transitórios é o processo de decimação (subamostragem por 2), que pode ocasionar em formas distintas dos coeficientes *wavelet*, de acordo com as amostras utilizadas. Isso faz com que a Transformada Discreta de *Wavelet* seja variante conforme deslocamentos circulares nas amostras do sinal original (Silva et al., 2010). O processo de decimação pode resultar na supressão de informações e divergências entre os resultados do cálculo dos coeficientes de aproximação e detalhe (Marques, 2018).

Os coeficientes de detalhe da componente α da corrente vista pelos terminais local (em azul) e remoto (vermelho), obtidos a partir da função *detcoef* (MathWorks, 2024a) estão dispostos na Figura 5. Essa análise permite a detecção precisa dos instantes em que as primeiras ondas incidem nos terminais da linha de transmissão.

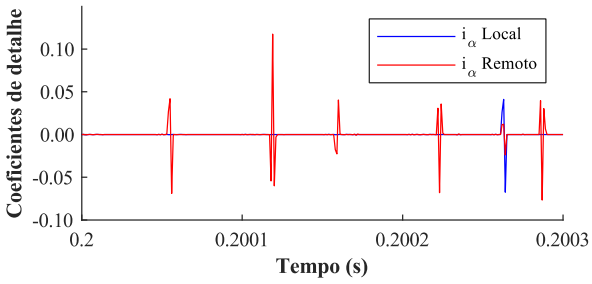

Fig. 5 Coeficientes Wavelet de i_α – Terminal Local e Remoto.

Outra análise que pode ser realizada e evita as desvantagens apresentadas pela TWD é o uso da Transformada *Wavelet* Discreta com Sobreposição Máxima (MODWT). A MODWT não realiza a subamostragem e, consequentemente, o cálculo dos coeficientes utiliza todas as amostras, tornando-a invariante no tempo, o que evita perda de informações e possibilita a estimação precisa do instante de início da falta (Marques, 2018).

A função *modwt* foi utilizada no *software* MATLAB, que retorna a Transformada *Wavelet* discreta de sobreposição máxima do sinal amostrado da componente α da corrente elétrica. A resposta da função *modwt* utilizando a *Wavelet Daubechies* 4 (db4) no nível 1 de decomposição, para um curto-circuito monofásico na fase A, em 200 ms e com resistência de 10 Ω está ilustrada pela Figura 6, enquanto o nível 4 de decomposição, para o mesmo cenário, está representado na Figura 7.

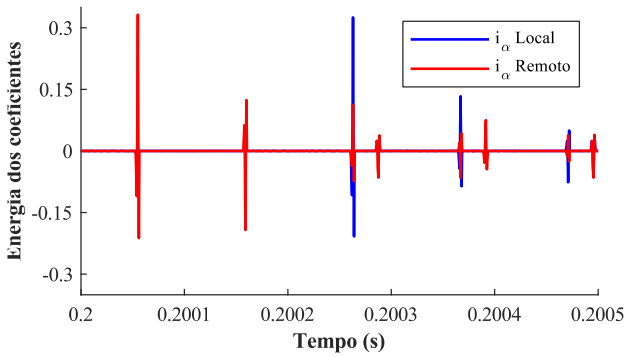

Fig. 6 Função modwt (db4) para o nível de decomposição 1.

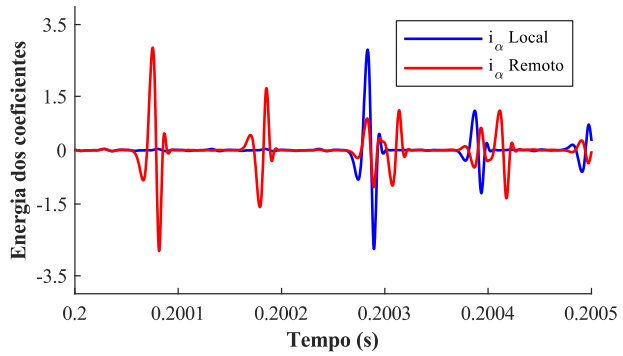

Fig. 7 Função modwt (db4) para o nível de decomposição 4.

Nota-se que, por mais que a decomposição de nível 1 possibilite a detecção dos instantes iniciais da ocorrência da falha nos terminais local (em azul) e remoto (em vermelho), a decomposição de nível 4 apresenta com maior clareza o instante inicial do transitório, distinguindo melhor as primeiras ondas incidentes e refletidas. Destaca-se o fato de que cada nível de decomposição está associado a uma específica faixa de frequência e foi escolhido o nível 4, devido à sua melhor adequação ao estudo proposto, conforme destacado em Imani et al. (2023).

O método de análise por meio da TWD e MODWT tem seu desempenho relacionado com a wavelet mãe, o que torna mais trabalhosa a escolha eficiente das faixas de frequência de interesse. Uma das desvantagens dessa dependência com a wavelet mãe é a possível atenuação de sinais resultantes de faltas nas LTs (Lopes et. al, 2018).

4. RESULTADOS

A comparação entre as distâncias estimadas pelos três métodos apresentados: Filtro *Differentiator-Smoother*, Transformada Discreta de *Wavelet* e Transformada *Wavelet* Discreta com Sobreposição Máxima está disposta nas Tabela 2 e 3. Foram aplicados curtos-circuitos monofásicos nas distâncias de 80 (conforme a Tabela II) e 100 quilômetros (disposto na Tabela III) do terminal local. A distância real do local de falta é apresentada por d, enquanto o valor estimado pelos diferentes métodos é representado por x. O erro entre a estimativa e o valor real é dado por E.

Tabela 2. Comparação das estimativas do local de falta

d = 80 km	Filtro DS	TWD	MODTWD
x (km)	75,23	75,08	75,08
E (%)	5,97	6,15	6,15

Tabela 3. Comparação das estimativas do local de falta

d = 100 km	Filtro DS	TWD	MODTWD
x (km)	90,31	90,16	90,31
E (%)	9,70	9,84	9,70

Os resultados obtidos das estimativas de distância de ocorrência da falta apresentados pelas Tabelas II e III, mostram uma eficiência semelhante para as diferentes técnicas apresentadas.

No caso da falta aplicada a 80 km do Terminal Local, o melhor desempenho foi constatado pelo Filtro DS, apresentando o menor erro de estimativa. Cabe ressaltar que não houve diferença entre a TWD e MODTWD neste caso. Para a falta a 100 km do Terminal Local, a melhor estimativa foi avaliada pelo Filtro DS e pela MODTWD, com o mesmo erro de 9,70%. Foi constatado maior erro de estimativa pela TWD, de 9,84%. De forma geral, os resultados encontrados para os três métodos mostram-se similares.

A proximidade entre os resultados encontrados pode ser atribuída à similaridade matemática entre os métodos aplicados pelo Filtro DS e pela Transformada Wavelet. Ambos consistem em uma avaliação da magnitude da variação de um sinal, por meio da aplicação do produto interno entre os valores do sinal amostrado por coeficientes pré-definidos para o filtro DS e para a TWD, conforme apresentado em (3), (4) e (5).

Um dos aspectos que se mostrou relevante foi o fato de que a magnitude das saídas do filtro DS corresponde à variação no sinal amostrado, enquanto as transformadas TWD e MODWT não apresentam esse recurso, tendo seu desempenho atrelado à *wavelet* mãe escolhida, como abordado nas Seções 3.1 e 3.2. Esse aspecto amplia o interesse no estudo do filtro DS para aplicações que utilizam ondas viajantes, pela importância desse aspecto para a parametrização de funções de proteção que utilizam os sinais de ondas viajantes como parâmetros.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentou-se a aplicação do Filtro DS e da Transformada Wavelet para detecção de transitórios no sistema elétrico. Os métodos utilizados demonstraram-se capazes de fornecer com precisão o instante de tempo em que são detectadas as ondas viajantes originadas por faltas na linha de transmissão, sendo essa informação fundamental para estimativas do local de ocorrência de uma falta na LT. Foram utilizados, em conjunto, o *software ATP*, para modelagem da rede elétrica e do Filtro DS, e o programa MATLAB, para tratamento dos dados gerados e aplicação da Transformada *Wavelet* DWT e MODWT.

Os modelos foram desenvolvidos com o intuito de comparar uma abordagem comercial de processamento de sinais,

utilizada pelo relé *SEL-T400L*, com outras metodologias consolidadas para a análise de transitórios de alta frequência, que é o caso da Transformada *Wavelet*. A aplicação prática dada para a teoria de processamento de sinais foi a localização de faltas no sistema elétrico a partir da detecção do instante em que o monitoramento dos terminais da LT detecta as ondas viajantes incidentes. Constatou-se a proximidade entre os resultados obtidos para os três diferentes métodos aplicados, possivelmente pela similaridade matemática entre os métodos.

De uma forma geral, o tópico apresentado é de grande relevância para a área de proteção do sistema elétrico, devido às elevadas capacidades de processamento que os dispositivos de proteção vêm adquirindo, permitindo o uso de técnicas de proteção avançadas e ultrarrápidas, utilizando-se de algoritmos baseados no domínio do tempo, desvencilhando-se das desvantagens apresentadas pelas técnicas clássicas de medição fasorial, podendo servir também como proteção adicional ao sistema.

REFERÊNCIAS

Cooley, J.W., Tukey, J.W. (1965). An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. Mathematics of Computation. Volume 19, pp.297-301. DOI: doi.org/10.1090/S0025-5718-1965-0178586-1.

Daubechies, I. (1992). Ten lectures on wavelets. Philadelphia, USA: SIAM, CBMS-NSF Regional Conference Series.

Duesterhoeft, W. C., Schulz, M. W. and Clarke, E. (1951). Determination of instantaneous currents and voltages by means of alpha, beta, and zero componentes. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, vol. 70, no 2, pp. 1248–1255. doi: 10.1109/T-AIEE.1951.5060554.

Fischer, N., Skendzic, V., Moxley, R. and Needs, J. (2012). Localização de faltas em relés de proteção através de ondas viajantes. 11th International Conference on Developments in Power System Protection. Traduzido para o português em julho de 2016.

Freitas, M.P. (2016). Utilização da transformada de wavelet para detecção de variações anormais de tensão em sistemas elétricos com geração distribuída. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG.

Fuchs, R. D. (1979). Transmissão de energia elétrica. Linhas aéreas; teoria das linhas em regime permanente. 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos.

Huamani, M.P.S. (2019). Implementação de algoritmos de proteção no domínio do tempo via Models-atp permitindo teste de software-in-the-loop. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas.

Imani, A., Moravej, Z. and Pazoki, M. (2023). A novel MODWT-based fault detection and classification scheme in VSC-HVDC transmission line. Electric Power Systems Research.

Lopes, F.V., Neves, W.L.A., Leite JR., E.J.S., Ribeiro, J.P.G. (2018). Aplicação do filtro differentiator-smoother durante a análise de ondas viajantes em linhas de transmissão. Congresso Brasileiro de Automática.

Lucas, F.F., Souza, E.G. e Nascimento, C.D. (2020). Localização de faltas em linhas de transmissão através de transformada de wavelet contínua, pontos de extremo e teoria de ondas viajantes. XI Computer on the Beach.

Mallat, S. (2009). A wavelet tour of signal processing: the sparse way. Amsterdam. Elsevier Inc.

Marques, L.E.V.P. (2018) Aplicação da teoria das ondas viajantes para detecção, classificação e localização de faltas em linhas de transmissão utilizando o software ATP. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina.

Martins, R.S. (2012). Apresentação do sistema de medição fasorial sincronizada e abordagem de sua implantação no estimador de estado. Projeto de Graduação. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

MathWorks. (2024). Wavelet families, disponível em: www.mathworks.com/help/wavelet/ug/wavelet-families-additional-discussion.html (acesso em: 25 de Janeiro de 2024).

MathWorks. (2024). Wavedec, disponível em: www.mathworks.com/help/wavelet/ref/wavedec.html (acesso 25 de Janeiro de 2024).

MathWorks. (2024). Detcoef, disponível em: www.mathworks.com/help/wavelet/ref/detcoef.html (acesso 25 de Janeiro de 2024).

Mendes, S.C. (2008). Transformada de wavelet aplicada a protecções digitais. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Ribeiro, E.P.A., Lopes. F.V., Ribeiro, J.P.G, Leite Jr, E.J.S. (2018). ATP/MODELS Differentiator-Smoother Filter Model Validated Using Actual Time-Domain Relay. Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS), Brasília, Brazil.

Santos, M.C.C. (2019). Localização de faltas em linhas de transmissão por ondas viajantes utilizando o filtro de Savitzky-Golay. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá.

Schweitzer III, E.O., Kasztenny, B., Guzmán, A., Skendzic, V. and Mynam, M. (2015). Speed of line protection – can we break free of phasor limitations? 68th Annual Conference for Protective Relay Engineers.

Schweitzer III, E.O., Guzmán, A., Mynam, M., Skendzic, V., and Kasztenny, B. (2016). Estimação precisa da localização da falta e do comprimento da linha baseada em um terminal usando ondas viajantes. 13th International Conference on Developments in Power System Protection. Traduzido para o português em fevereiro de 2017.

Schweitzer III, E.O., Kasztenny, B., Mynam, M., Guzmán, A. and Skendzic, V. (2016). Princípios e implementação da nova proteção de linha no domínio do tempo. 13th International Conference on Developments in Power System Protection. Traduzido para o português em fevereiro de 2017.