

LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO O FILTRO DE SAVITZKY-GOLAY

MATEUS C. C. SANTOS, PAULO M. SILVEIRA

*Instituto de Sistemas Elétricos de Energia – ISEE, Universidade Federal de Itajubá
Campus Itajubá, Av. BPS, 13003, 37500-903, Itajubá, MG*

E-mails: mateuscandido2012@gmail.com, pmsilveira@unifei.edu.br

Abstract— A new application of the Savitzky-Golay (SG) filters in fault location for transmission lines based on traveling waves is presented. The ability of the SG filters to handle noisy signals improves the robustness of the detection process in the presence of noise while requiring only low computational effort.

Keywords— Fault location, transient, signal processing, Savitzky-Golay filter.

Resumo— Uma metodologia baseada em ondas viajantes para localização de faltas em linhas de transmissão utilizando filtro de Savitzky-Golay (SG) é apresentada. A característica dos filtros SG em lidar com sinais ruidosos melhora a robustez do processo de detecção na presença de ruídos enquanto que um baixo esforço computacional é requerido

Palavras-chaves— Localização de faltas, transitórios, processamento de sinais, filtro de Savitzky-Golay.

1 Introdução

A presença de transitórios de alta frequência nos sinais de tensão e de corrente são características inerentes em todo sistema elétrico de potência, quando da ocorrência de faltas. Esses podem ser analisados de modo a fornecer importantes informações sobre a ocorrência de certos eventos ajudando, por exemplo, a descobrir a localização de uma falta ou mesmo a uma tomada de decisão em novos relés de proteção. Porém, caso estes transitórios não sejam bem capturados, em tempo e magnitudes, as informações geram falsas características levando a tomadas de decisões erradas. Uma informação errônea dos instantes dos picos dos transitórios poderá introduzir grandes erros na localização de uma falta, dificultando enormemente o trabalho da equipe de manutenção em caso de faltas permanentes.

A maioria das linhas, inevitavelmente, atravessam terrenos de difícil acesso e, às vezes, com condições climáticas difíceis, o que torna a verificação física muito demorada. No entanto, pesquisas sobre as técnicas de localização de faltas em linhas de transmissão mostram que métodos precisos e rápidos são de grande importância para a engenharia, pois podem acelerar a restauração do sistema, reduzir o tempo de interrupção e melhorar a confiabilidade do sistema, além de diminuir os prejuízos financeiros causados pela falta de energia elétrica.

No geral, os métodos para localização de faltas em linhas de transmissão (LTs) têm sido classificados em duas categorias básicas: (i) métodos baseados em componentes fundamentais e (ii) métodos baseados nos transitórios de alta frequência gerados pela falta. Esses últimos costumam cair dentro dos conceitos das assim chamadas ondas viajantes ou trafegantes.

Métodos baseados em componentes fundamentais estão sujeitos a erros devido ao efeito combinado da corrente de carga, da resistência de falta (R_f), tipo de falta, ângulo de incidência da falta, *infeed* remoto, impedâncias mútuas de sequência zero, dentro outros. Melhorias em tais medições têm sido alcançadas com dispositivos instalados em ambos os terminais de uma linha de transmissão, via sistema de posicionamento global (GPS) (Kezunovic, 1995).

Algumas propostas abordadas na literatura fazem uso de redes neurais (RNs) para localização de faltas. Na maioria dos casos o uso de componentes na frequência do sistema, extraídos no período pós-falta, tem sido mais vantajoso, implicando em RNs de menor dimensão, treinamento mais rápido e melhores resultados. Nestes casos, quaisquer componentes de alta frequência, como ondas viajantes, harmônicos, etc., devem ser pré-filtrados (Jorge, 1999). Porém, acabam tornando os métodos baseados em RNs muito similares aos métodos baseados na forma de onda, os quais podem estar sujeitos a erros como anteriormente mencionados.

Silveira (2001a), desenvolveu algoritmos de localização de faltas em linhas de transmissão baseados em ondas viajantes, sendo estas capturadas e analisadas com o auxílio da Transformada Wavelet (TW), obtendo-se, já naquela época, resultados muito promissores para uso em futuros dispositivos. Porém, um dos grandes problemas enfrentados (Silveira, 2001b), e que se deseja resolver era, em certos casos, a quantidade de ruído não-correlacionado existentes nos sinais capturados. O localizador funcionava bem com SNR (*Signal Noise Ratio*) acima de 50 dB, em ângulo de incidência da falta próximo de zero. Porém, para esta mesma condição e SNR de menor valor, o método apresentava dificuldades, pois os transitórios da falta se confundiam com os níveis elevados de ruído.

A mitigação da influência do ruído tem sido timidamente abordada em alguns estudos acerca do

tema em questão, encontrando-se ainda espaço para aperfeiçoamentos e desenvolvimentos de novas técnicas. Neste cenário, a busca por métodos cada vez mais eficientes, que sejam mais robustos diante de ruídos, que não demandam muito esforço computacional e que também possam melhorar a confiabilidade de relés de proteção, localizadores de falta ou outros dispositivos eletrônicos inteligentes (IEDs), é um desafio estimulador.

Mais recentemente, um novo estudo utilizando o filtro de Savitzky-Golay (SG) mostrou-se robusto em relação aos ruídos e um esforço computacional reduzido na detecção da saturação em transformadores de corrente (Schettino, 2016).

As aplicações das técnicas de suavização e diferenciação do filtro SG encontram-se aplicadas nas áreas de processamento de imagens, biomedicina e química e pouco ainda foi produzido nas áreas de qualidade de energia, proteção e instrumentação relacionadas a sistemas elétricos de potência (Schaffer, 2011).

Assim, diante das limitações apresentadas pelos métodos atuais conhecidos, o presente trabalho apresenta uma nova proposta para minimizar as dificuldades citadas, ou seja, mesmo na presença de ruídos na captura dos sinais de tensão e/ou corrente, com baixo SNR, a taxa de acerto no pin-point de uma falta passa a ter maior confiabilidade e menor erro.

Para dar suporte à metodologia empregada, este artigo apresenta inicialmente um breve resumo do filtro SG. Após isso, apresenta a descrição do algoritmo para a localização de faltas em LTs. Finalmente, são apresentados os resultados do método utilizando o filtro SG em comparação com a Transformada Wavelet (TW), na presença de ruídos não correlacionados (WGN).

2 Os filtros de Savitzky-Golay

Uma técnica de suavização e diferenciação de dados obtidos experimentalmente e contaminados por ruído, através de interpolação polinomial, utilizando o conceito de mínimos quadrados (*least squares* - LS), foi apresentada por Savitzky e Golay. (Savitzky, 1964). O intuito inicial dos autores foi apresentar uma ferramenta de análise de dados na área da química analítica destinada à implementação nos, à época emergentes, computadores digitais. Embora o trabalho de Savitzky e Golay tenha sido considerado um "divisor de águas" na área de química analítica computacional, tendo sido eleito, pelos editores da revista *Analytical Chemistry*, o quinto mais importante artigo já publicado na revista (Riordon, 2000), pouco se conhecia do mesmo na área elétrica.

Savitzky e Golay sistematizaram o uso do LS e da interpolação polinomial na análise de dados experimentais. Eles demonstraram que os coeficientes $c = [c_0 \ c_1 \ c_2 \ \dots \ c_p]^T$ do polinômio f de um filtro LS de ordem p em um intervalo $2m+1$ para uma entrada de dados $y = [y_{-m} \ y_{-(m-1)} \ \dots \ y_0 \ \dots \ y_{m-1} \ y_m]^T$ (tal que, $p < 2m + 1$) pode ser obtido da seguinte maneira:

$$c = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot y = A^+ \cdot y \quad (1)$$

Onde

$$A = \begin{bmatrix} (-p)^0 & \dots & (-1)^0 & 1 & 1^0 & \dots & p^0 \\ (-p)^1 & \dots & (-1)^1 & 0 & 1^1 & \dots & p^1 \\ (-p)^2 & \dots & (-1)^2 & 0 & 1^2 & \dots & p^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ (-p)^m & \dots & (-1)^m & 0 & 1^m & \dots & p^m \end{bmatrix} \quad (2)$$

Além disso, a relação entre a derivada de ordem k ($k \leq p$) do polinômio e o dado no centro da janela e o coeficiente c_k é

$$f^k(0) = k! \ c_k \quad (3)$$

As linhas da matriz A^+ definem uma família de filtros de resposta ao impulso finita (FIR) invariável no tempo, chamados de filtros SG, em que cada linha é capaz de estimar o valor do sinal (filtro de suavização) ou suas derivadas (filtros de diferenciação) no centro da janela dos dados observados. A abordagem LS faz uso de informações de todas as amostras contidas na janela, atenuando assim a influência do ruído.

As ondas viajantes que refletem ao chegar no terminal de medição são vistas como "variações abruptas" no sinal de tensão e, portanto, um método derivativo se torna interessante neste contexto. Assim, foi utilizado o filtro de Savitzky-Golay diferenciador de 1ª ordem ($k=1$), o que corresponde à segunda linha da matriz A^+ , obtida pela aproximação LS de um polinômio de terceiro grau ($p=3$) em uma janela de 7 amostras, conforme Eq. 4.

$$A^+ = \frac{1}{252} \begin{bmatrix} -24 & 36 & 72 & 84 & 72 & 36 & -24 \\ 22 & -67 & -58 & 0 & 58 & 67 & -22 \\ 15 & 0 & -9 & -12 & -9 & 0 & 15 \\ -7 & 7 & 7 & 0 & -7 & -7 & 7 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Essas características se mostram suficientes para capturar eficazmente as informações relevantes à localização de faltas.

O filtro SG diferenciador de 1ª ordem sg1 foi aplicado ao sinal de tensão v em volts (V), sendo n o índice das amostras, conforme Eq. 5.

$$sg1[n] = \frac{1}{252} \{22v[n] - 67v[n-1] - 58v[n-2] + 58v[n-4] + 67v[n-5] - 22v[n-6]\} \quad (5)$$

Visando intensificar os picos, ou seja, os instantes em que as ondas viajantes chegam ao terminal, o sinal sg1 é elevado ao quadrado, originando sg1sq, conforme Eq. 6.

$$sg1sq[n] = (sg1[n])^2 \quad (6)$$

A Figura 1 ilustra o processo de detecção através do filtro SG. A Figura 1(a) mostra os transitórios presentes em um sinal de tensão contaminada por WGN durante a ocorrência de uma falta na LT. A

Figura 1(b) revela a saída do filtro diferenciador sg1 e a Figura 1(c) representa os picos obtidos através de sg1sq.

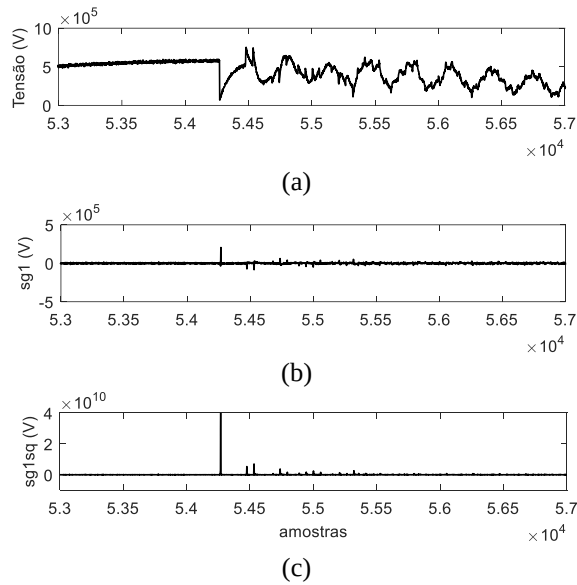


Figura 1. (a) Transitórios na onda de tensão; (b) Saída do filtro sg1; (c) Estimação dos picos através do filtro sg1sq.

O bom comportamento dos filtros de Savitzky-Golay em relação ao ruído é esperado, uma vez que o uso da interpolação polinomial considera as informações contidas nas amostras vizinhas em torno do ponto de interesse. Essa característica permite atenuar o ruído inerente às medições.

Além do mais, a aproximação LS em sistemas bem representados por modelos lineares contaminados por ruído gaussiano leva a estimadores eficientes. Mesmo em modelos não lineares, porém bem-comportados, contaminados por ruído não gaussiano, os estimadores LS tendem a obter desempenho satisfatório (Kay, 2010).

3 Metodologia Proposta

As ondas viajantes representam nada mais do que a propagação de energia elétrica em uma LT. Quando ocorre um curto-circuito (falta), as consequentes mudanças na energia armazenada produzem ondas viajantes. Essas ondas viajam do ponto de falta, em ambos sentidos, até os terminais da LT. Quando a onda encontra uma descontinuidade de impedância (fontes, transformadores, etc.) ela é refletida (parte se refrata) e retorna ao ponto de defeito, onde ocorre uma nova reflexão por causa da descontinuidade ali existente e assim sucessivamente até desaparecerem devido à atenuação (Bhunja, 2002). Essa dinâmica, configura-se, como sendo transitórios de alta frequência.

Esse problema pode ser representado através do diagrama de Lattice, conforme Figura 2. Nesta figura, amplamente conhecida, as ondas se propagam em ambas as direções a partir do ponto de falta e sofrem reflexões e refrações.

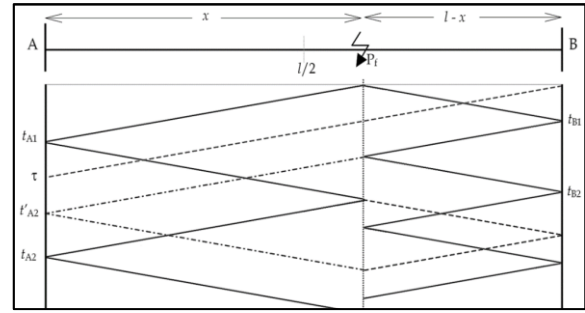


Figura 2 - Diagrama de Lattice.

Sabe-se que, por causa do acoplamento mútuo entre fases nas linhas de transmissão, existirão diferentes modos de propagação das ondas, modos aéreos v_1 e v_2 e modo terra v_0 , sendo este existente somente no caso das faltas aterradas. Os modos v_1 e v_2 são iguais nas linhas equilibradas e ocorrem em velocidades próximas à velocidade da luz, quando que o modo terra a velocidade é menor em função da propagação pelo meio de retorno terra (Silveira, 2001a).

Esses modos de propagação podem ser separados com o uso das transformações modais como, por exemplo, a transformada de Clarke, Wedepohl ou outras. Neste trabalho, as linhas de transmissão foram modeladas como sendo completamente transpostas e por isso pode-se usar a matriz de transformação de Clarke:

$$S_{\text{modal}} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} S_{\text{fase}} \quad (7)$$

onde S_{fase} e S_{modal} são os sinais no domínio da fase e no domínio modal, respectivamente.

Após o uso da transformação modal sobre os sinais, aplica-se o filtro diferenciador de Savitzky-Golay de 1ª ordem (sg1sq) para capturar os transitórios de alta frequência, ou seja, as mudanças abruptas de tensão que representam o instante de chegada da onda viajante no terminal de medição. Para fins de comparação, a Transformada Wavelet foi também aplicada nesta etapa, de modo a mostrar a eficiência de ambas as técnicas na localização dos picos mesmo na presença de elevado nível de ruído. A Figura 3 apresenta essa diferença na robustez de cada ferramenta na detecção dos picos diante de um sinal de tensão com SNR de 30 dB.

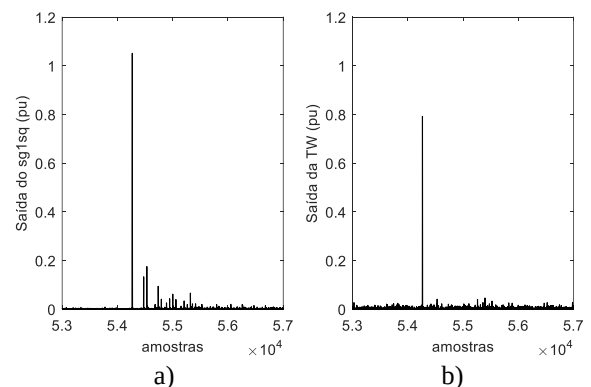


Figura 3. Transitórios de alta frequência em sinal contaminado por WGN; a) Através do filtro SG; b) Através da TW.

Cabe mencionar que a detecção do primeiro pico é baseada em um limiar previamente definido, o qual é ajustado em função do histórico do nível de ruído em regime permanente presente no sinal, chamado de limiar adaptativo. Após essa detecção, o instante de ocorrência do primeiro pico é obtido. Por sua vez, o segundo pico é detectado utilizando-se um segundo limiar que considera os amortecimentos das ondas viajantes. Após a detecção, o instante do segundo pico é obtido (Figura 4a). São feitos os devidos ajustes nos limiares conforme o tipo de filtro utilizado, Savitzky-Golay ou Wavelet, afim de se obterem os melhores resultados.

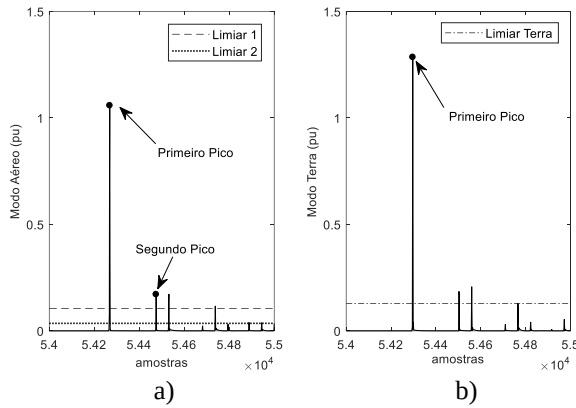


Figura 4. Saída do filtro SG. a) modo aéreo e b) modo terra.

Assim, para determinar a distância x da falta, de acordo com o diagrama de Lattice, são apresentados dois caminhos semelhantes. O primeiro utiliza os dados de apenas um terminal enquanto o outro necessita de dados sincronizados de dois terminais.

2.1 Método 1 – Utilizando apenas um terminal de medição

O diagrama de Lattice da Figura 2 mostra que a distância x da falta pode ser calculada, a partir do terminal A, pela seguinte equação:

$$x = \frac{v(t_{A2} - t_{A1})}{2} \quad (8)$$

Sendo v a velocidade de propagação das ondas ($v = 1/\sqrt{LC}$; onde L e C são, respectivamente, os valores de indutância e capacitância por unidade de comprimento da LT); t_{A1} o tempo de propagação da primeira frente de onda originada no ponto de falta até o terminal A; t_{A2} é o tempo de propagação da segunda frente de onda que chega ao terminal, considerando-se o tempo de retorno dessa primeira onda até o ponto de falta e desse ponto novamente ao terminal A. A Eq. (8) é usada para faltas não aterradas, pois, nesses casos, as ondas refratadas no ponto de defeito, provenientes do terminal remoto, podem ser desprezadas.

No caso das faltas aterradas, as ondas refletidas no terminal remoto e refratadas no ponto de falta não podem mais ser desprezadas e duas diferentes condições devem ser consideradas:

- i. Faltas na primeira metade da linha.
A distância pode ser calculada por (8) após a obtenção do intervalo de tempo entre as duas primeiras ondas que chegam ao terminal de medição.
- ii. Faltas na segunda metade da linha.
Nestes casos, a primeira onda refletida no terminal remoto e refratada no ponto de falta chegará antes da segunda onda direta refletida no ponto de falta, como mostrado no diagrama de Lattice da Figura 2. Sendo assim, a distância da falta pode ser calculada pela equação (9):

$$x = l - \frac{v(t'_{A2} - t_{A1})}{2} \quad (9)$$

onde l é o comprimento total da linha e t'_{A2} o tempo de propagação a segunda frente de onda que chega ao terminal A considerando a refração no ponto de falta, conforme Figura 2.

Para saber se a falta ocorreu na primeira ou na segunda metade da linha é necessário realizar uma análise envolvendo o modo terra e o modo aéreo. Sabe-se que a velocidade do modo terra é menor do que a do modo aéreo. Logo, o primeiro pico do modo terra (t_{A0}) estará atrasado com relação primeiro pico do modo aéreo (t_{A1}), visualizado na Figura 4 e na Figura 5. Portanto, através do intervalo de tempo entre as duas primeiras subsequentes ondas do modo aéreo ($\Delta t_i = t_{A2} - t_{A1}$), pode-se calcular uma distância x_1 usando a Eq. (8) e outra distância x_2 pela Eq. 9 (complemento de x_1). Ainda, com o intervalo de tempo entre o primeiro pico do modo terra e o primeiro do modo aéreo ($\Delta t_e = t_{A0} - t_{A1}$), de acordo com a Figura 4, e sabendo-se o tempo total de propagação da onda (τ) por toda a LT, dois valores de v_0 podem ser calculados:

$$v_{01} = \frac{2x_1}{2\Delta t_e + \Delta t_i} \quad (10)$$

$$v_{02} = \frac{2x_2}{2\Delta t_e + 2\tau - \Delta t_i} \quad (11)$$

Um dos dois valores obtidos estará fora de uma provável faixa de variação da velocidade de propagação do modo terra (por exemplo $v_0 = 0,7v_1 \pm 10\%$). Se isso acontecer com (11), a falta ocorreu na primeira metade da linha, conseqüentemente a distância x_1 estará correta. Caso contrário, a falta ocorreu na segunda metade da LT e, portanto, a distância x_2 será verdadeira.

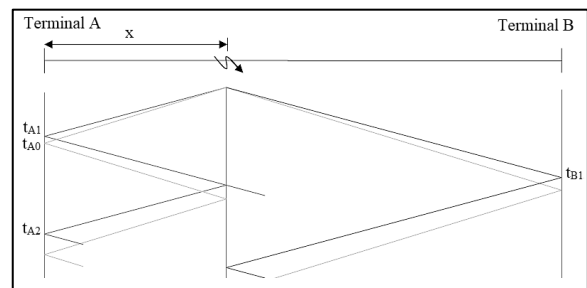


Figura 5. Diagrama de Lattice envolvendo o terra.

2.2. Método 2 – Utilizando dois terminais de medição sincronizados

Neste método não há necessidade de distinguir se a falta é aterrada ou não e se ocorreu na primeira metade da linha ou na segunda. Além disso, não é necessário obter a segunda frente de onda para o mesmo terminal. É necessário, somente, o registro da primeira frente de onda do modo aéreo para cada terminal (t_{A1} e t_{B1}), conforme Figura 6. Assim, a distância da falta poderá ser obtida através da seguinte expressão:

$$x = \frac{1 - v(t_{B1} - t_{A1})}{2} \quad (12)$$

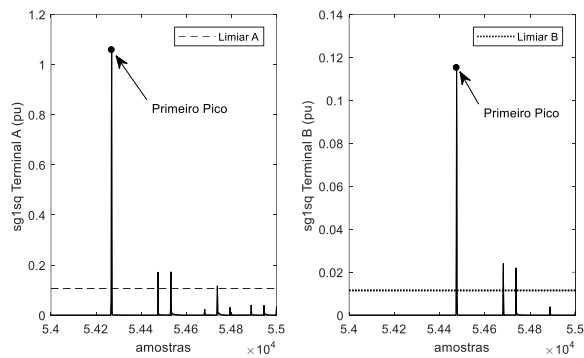


Figura 6. Saídas do filtro SG no modo aéreo para o terminal A e B, respectivamente.

4 Avaliação do Desempenho dos Métodos

Estudos foram feitos afim de comparar os resultados entre o filtro SG e a tradicional Transformada Wavelet (TW). O algoritmo para localização de faltas é o mesmo para os dois casos, diferenciando apenas no momento de extrair os picos das ondas viajantes, aplicando assim o filtro *sg1sq* e o filtro *TW* sem dizimação do tipo Daubechies com quatro coeficientes de acordo com (Silveira, 2001), além dos ajustes na política de limiar para cada tipo de filtro.

Os dados de sinais faltosos foram obtidos através de simulações nos programas MATLAB/Simulink. Duas linhas de diferentes características, conforme Figura 7, foram modeladas por parâmetros distribuídos com dependência da frequência.

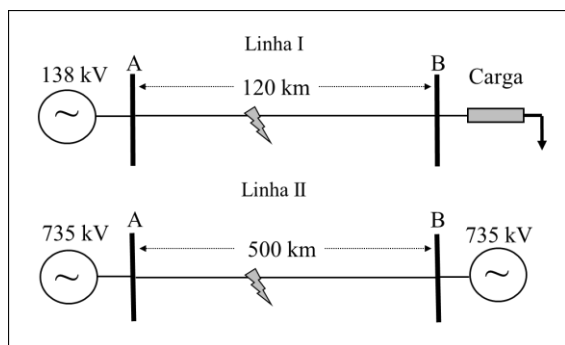


Figura 7. Sistema de transmissão simulados.

Tendo em vistas a atual tecnologia de amostragem e processamento de sinais que apresenta alto poder de captura e velocidade, o intervalo de amostragem adotado foi de 1 μ s. Foram considerados vários tipos de faltas em diferentes localizações ao longo da linha, com diferentes ângulos de incidência e resistência de falta.

A Tabela 1 mostra a quantidade de faltas localizadas em relação ao nível de ruído presente no sinal e considerando um ângulo de incidência de falta ($\alpha_i = 0$) e resistência de falta ($R_f = 100$), além de aplicar todos os tipos de faltas (AT, BT, CT, AB, BC, CA, ABT, BCT, CAT e ABC) em diferentes pontos da linha (variando de 10 a 90% da LT, em passos de 10%), totalizando 2160 casos simulados.

Tabela 1 – Quantidades de faltas localizadas em (%).

Método		1 Terminal		2 Terminais	
		SG	WT	SG	WT
LINHA I	SNR 80	100.0	100.0	100.0	100.0
	SNR 70	100.0	98.9	100.0	100.0
	SNR 60	100.0	78.9	100.0	100.0
	SNR 50	90.0	43.3	100.0	94.4
	SNR 40	68.9	1.1	87.8	67.8
	SNR 30	28.9	1.1	67.8	35.6
LINHA II	SNR 80	100.0	100.0	100.0	100.0
	SNR 70	100.0	97.8	100.0	100.0
	SNR 60	100.0	80.0	100.0	100.0
	SNR 50	90.0	44.4	100.0	100.0
	SNR 40	57.8	0.0	98.9	90.0
	SNR 30	14.4	0.0	87.8	62.2

Para simular diversos cenários possíveis de curto-circuito, um banco de dados contendo 12960 foi gerado, no qual considerou-se as variações em α_i (0, 30, 45, 60 e 90), em R_f (0, 10, 50, 70 e 100) e nos tipos e distâncias das faltas. Assim, foram obtidos os seguintes gráficos, conforme Figura 8, representando a robustez dos métodos perante uma faixa de ruídos nos dois tipos de linhas simuladas.

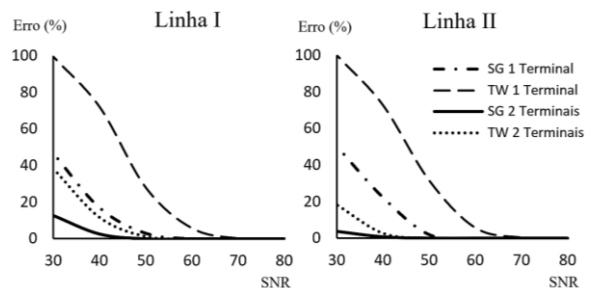


Figura 8. Desempenho dos métodos na presença de ruídos na Linha I e Linha II, respectivamente.

Por meio desses resultados, percebe-se o ganho significativo na performance de localização diante de sinais ruidosos utilizando o filtro SG em relação à Wavelet. O filtro SG apresentou maior eficiência em ambos os métodos: utilizando um terminal ou utilizando dois terminais. Este último, como já era de se esperar, é mais robusto daquele que utiliza dados de apenas um terminal.

A capacidade de tratar com sinais ruidos pelos filtros SG, permite extrair informações importantes mesmo em sinais com baixo SNR. Diferentemente da TW, o filtro SG, através da interpolação polinomial e aproximação LS, considera os valores das amostras vizinhas ao ponto de interesse. É por esse motivo que reagem melhor e permitem atenuar os ruídos inerentes às medições.

Em relação aos erros, cabe ressaltar que normalmente é encontrado na literatura uma expressão para calcular o erro de localização utilizando o comprimento da linha no denominador, conforme Eq. 13 (Parentoni, 2007), (Livani, 2014), (Almeida, 2014), (Lopes, 2016), (Souza 2017).

$$\varepsilon \% = \left| \frac{X_{\text{real}} - X_{\text{encontrado}}}{X_{\text{Linha}}} \right| \cdot 100\% \quad (13)$$

No entanto, como o comprimento da linha é maior que a distância da falta, o erro calculado se torna menor do que deveria, mascarando-o. No presente trabalho, teve-se o cuidado de adotar a expressão que leva em consideração o valor real da falta no denominador, representando com mais fidelidade o valor do erro, conforme Eq. 14.

$$\varepsilon \% = \left| \frac{X_{\text{real}} - X_{\text{encontrado}}}{X_{\text{real}}} \right| \cdot 100\% \quad (14)$$

5 Conclusão

Pelos resultados apresentados pode-se concluir que o método utilizando o filtro SG, além de requerer um esforço computacional menor, é mais robusto perante ruídos em relação ao método utilizando transformada wavelet, muitas vezes apresentados na literatura (Magnago, 1998), (Andrade, 2014), (Livani, 2014), (Yusuff, 2014).

O esquema utilizando dados de apenas um terminal apresenta resultados satisfatórios. Porém, quando se utiliza dois terminais, o algoritmo se torna mais simples e robusto, apresentando melhores resultados. No entanto, por se tratar da obtenção de dados sincronizados de dois terminais, o método torna-se mais oneroso, muito embora o custo de sistemas de sincronização via GPS vem melhorando cada vez mais e sua tecnologia passa a ser comum nos dias atuais.

Por fim, acredita-se que os algoritmos baseados nos filtros SG têm enorme potencial para fazer parte em uma nova geração de relés de proteção e localizadores de falta de LT, além de abrir caminho para a utilização destes em outras aplicações na engenharia de sistemas elétricos de potência.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Centro de Estudos em Qualidade da Energia e Proteção Elétrica (QMAP) da Universidade Federal de Itajubá pelo apoio estrutural e pelas facilidades proporcionadas para o desenvolvimento deste trabalho, bem como ao

apoio financeiro recebido por parte da FAPEMIG - Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais.

Referências Bibliográficas

- Almeida, A. R.; Almeida, O. M.; Silva, J. P.; Alves, M. S.; Abreu, F. M. (2014). Localização de Falhas em Sistemas de Transmissão de Alta Tensão a partir de Registros Oscilográficos Usando Análise de Componentes Independentes. V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Foz do Iguaçu, PR.
- Andrade, L.; Leão, T. P. (2014). Fault Location for Transmission Lines Using Wavelet. IEEE Latin America Transactions, Vol. 12, No. 6, pp. 1043-1048.
- Bhunia, S.; Roy, K.; Segura, J. (2002). A Novel Wavelet Transform Based Transient Current Analysis for Fault Detection and Localization. 39 th Design Automation Conference, New Orleans, LA.
- Jorge, D. C.; Coury, D. V.; Carvalho A. C. (1999). Redes Neurais Artificiais Aplicadas a Localização de Falhas em Linhas de Transmissão de Energia Elétrica, IV Congresso Brasileiro de Redes Neurais, S. J. Campos, pp. 888-999.
- Kay, S. M. (2010). Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory. 2. ed. New Jersey: Prentice Hall.
- Kezunovic, M.; Perunicic, B. (1995). Synchronized Sampling Improve Fault Location, IEEE Computer Applications in Power, pp. 30-33.
- Livani H.; Evrenosoglu, C. Y. (2014). A Machine Learning and Wavelet-Based Fault Location Method for Hybrid Transmission Lines. IEEE Transactions on Smart Grid, Vol.5(1), pp.51-59.
- Lopes, F. V.; Küsel, B. F.; Silva, K. M. (2016). Traveling Wave-Based Fault Location on Half Wavelength Transmission Lines. IEEE Latin America Transactions, Vol. 14, No. 1, pp. 248-253.
- Magnago, F. H.; Abur, A. (1998). Fault Location Using Wavelets. IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 13, no. 4, pp. 1475-1480.
- Parentoni, M. C.; Silveira, P. M.; Assunção, F. O. (2007). Localização de Falhas em Sistemas de Três Terminais, através da Teoria de Ondas Viajantes, Utilizando Dados de Dois Terminais. XIX SNPTEE, Rio de Janeiro, RJ.
- Riordon, J.; Zubritsky, E.; Newman, A. (2000). Top 10 articles. Analytical Chemistry Journal, v. 72, n. 9, p. 324A-329A.
- Savitzky A. and. Golay M. J. E (1964). Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures, Anal. Chem. J., vol. 36, pp. 1627-1639.
- Schafer, R. W. (2011). What is a Savitzky-Golay Filter ?, IEEE Signal Process. Mag., vol. 28, no. 4, pp. 111-117.
- Schettino, B.; Duque, C. A.; Silveira P. M. (2016). Current-Transformer Saturation Detection Using Savitzky-Golay Filter, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 31, pp. 1400-1401.

- Silveira, P. M.; Zurn, H. H. (2001a). Localização de faltas por ondas viajantes: uma nova abordagem baseada em decomposição de Wavelet, Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - XVI SNPTEE, Campinas, SP.
- Silveira, P. M.; Zurn, H. H. (2001b). Identificação e Localização de Faltas utilizando Análise por Decomposição Wavelet para Relés de Linhas de Transmissão, Tese defendida na Universidade Federal de Santa Catarina.
- Souza, D. M.; Christo, E. S.; Almeida, A. R. (2017). Location of Faults in Power Transmission Lines Using the ARIMA Method. *Journal Energies* October 2017, Vol. 10, 1596.
- Yusuff, A. A.; Jimoh, A.A.; Munda, J.L. (2014). Fault Location in Transmission Lines Based on Stationary Wavelet Transform, Determinant Function Feature and Support Vector Regression. *Electric Power Systems Research*, Vol.110, pp.73-83.