

Localização de Faltas em Sistemas Radiais de Distribuição: Análise Comparativa para Distintas Estratégias de Medição de Ondas Viajantes

C. V. C. Grilo* L. S. Lessa* D. V. Coury* R. A. S. Fernandes**

* Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP (e-mail: caio.vinicius@usp.br, leonardolessa@usp.br, coury@sc.usp.br).

** Departamento de Engenharia Elétrica, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, SP (e-mail: ricardo.asf@ufscar.br)

Abstract: Faults in distribution systems directly affect the indices of power quality and the system's reliability, causing high financial costs. Therefore, precisely determining the fault location reduces the time spent for the system's maintenance and restoration, especially when there are permanent faults. The objective of this work is to present a fault location algorithm based on the theory of traveling waves. The algorithm consists of analyzing the high frequency signals of the fault, using the Discrete Wavelet Transform, which accurately detects the reflected waves, after the fault, at the ends of the line. The proposed approach was validated using simulations in the software PSCAD/EMTP, considering the CIGRE test system with radial topology. The results obtained are promising, since the faults were located with average errors less than 1%.

Resumo: Faltas em sistemas de distribuição afetam diretamente os índices de qualidade da energia elétrica e confiabilidade do sistema, gerando altos custos financeiros. Logo, determinar precisamente o local da falta, reduz o tempo despendido para a manutenção e reestabelecimento do sistema, principalmente quando há ocorrência de faltas permanentes. Este trabalho apresenta um algoritmo de localização de faltas baseado na teoria de ondas viajantes. O algoritmo consiste em analisar os sinais de altas frequências, oriundos da falta, utilizando a Transformada Wavelet Discreta, que detecta com precisão as ondas refletidas, após a falta, nas extremidades da linha. A abordagem proposta, foi validada por meio de simulações no *software* PSCAD/EMTP, considerando o sistema teste CIGRE com topologia radial. Os resultados obtidos são promissores, visto que as faltas puderam ser localizadas com erros médios inferiores a 1%.

Keywords: Distribution System; Fault Location; Radial Feeder; Travelling Waves; Wavelet Transform.

Palavras-chaves: Alimentadores Radiais; Localização de Faltas; Ondas Viajantes; Sistema de Distribuição; Transformada Wavelet.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento dos sistemas de energia elétrica nos últimos anos, de acordo com Gururajapathy et al. (2017), propiciaram o desenvolvimento de estudos para melhorias dos sistemas de proteção, especificamente em termos da localização de faltas, visto que essa é uma etapa que compõem um esquema completo de proteção. Segundo Mohod and Ghatge (2012), cerca de 80% das interrupções no fornecimento de energia aos consumidores são causadas por falhas nos sistemas de distribuição. Dessas interrupções, aquelas consideradas permanentes podem afetar drasticamente os indicadores de qualidade do serviço, resultando em elevados custos financeiros às concessionárias. Por isso,

* O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – código de financiamento 001 e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) – processo nº 2021/04872-9

a rápida e precisa localização das faltas representa uma tarefa de suma importância para garantir a confiabilidade do sistema.

Portanto, muitos métodos foram desenvolvidos para localizar faltas em sistemas de distribuição (Gholami et al., 2020). Tais métodos são divididos primordialmente em dois grupos (Stefanidou-Voziki et al., 2022), a saber: (i) baseadas no cálculo de impedância aparente; e (ii) fundamentadas na teoria de ondas viajantes.

Dashti et al. (2018) e Aboshady et al. (2019) utilizam os fasores de tensão e corrente medidos nos terminais do sistema para estimar o local da falta por meio do cálculo da impedância aparente. No entanto, essa técnica apresenta localizações menos precisas para faltas com resistência elevada. Nesse sentido, Robson et al. (2014) e Galvez and Abur (2021) empregam a teoria de ondas viajantes, em que os sinais de tensão e corrente adquiridos em altas

frequências de amostragem (durante a falta) garantem que a localização da falta seja menos afetada por variações da resistência de falta.

De acordo com Jia (2017), o emprego de localizadores de faltas baseados em ondas viajantes utilizando dois terminais mostra-se mais preciso quando comparado às técnicas que fazem uso do cálculo da impedância aparente. Entretanto, conforme mencionado por Wang et al. (2020), a precisão dos localizadores baseados em ondas viajantes têm forte dependência da correta detecção dos tempos das reflexões das ondas nas extremidades da linha. No sentido de garantir maior precisão na detecção do tempo de chegada das ondas viajantes, tem sido vastamente empregada a Transformada *Wavelet* Discreta (TWD), pois, segundo Dwivedi and Yu (2011), a mesma possui melhor capacidade em realizar análises tempo-frequência.

Neste sentido, o presente trabalho propõe uma técnica para sistemas radiais de distribuição utilizando a TWD como ferramenta de análise das discontinuidades nos sinais de tensão adquiridos durante a falta. Para tanto, a aquisição dos sinais é feita em alta frequência (taxa de amostragem de 12 MHz). Assim, ainda foi realizada uma análise comparativa da abordagem proposta em cenários com medições disponíveis de um e dois terminais, visto que as distintas estratégias de medição têm implicações diretas nos investimentos das concessionárias.

O trabalho está organizado conforme segue. A Seção 2 apresenta os fundamentos da localização de faltas baseada na teoria de ondas viajantes. A Seção 3 apresenta a abordagem proposta, baseada na TWD, tanto para um quanto para dois terminais de medição. A Seção 4 apresenta o sistema teste e detalhes sobre as simulações realizadas usando o *software* PSCAD/EMTP. Os resultados com suas discussões são apresentados na Seção 5. Por fim, a Seção 6 traz as conclusões advindas desse trabalho.

2. TEORIA DE ONDAS VIAJANTES

Ao considerar a representação de uma linha monofásica de comprimento l , conectada a dois barramentos A e B (Figura 1), o diagrama de Lattice (Figura 2) pode ser utilizado para exemplificar as reflexões analisadas.

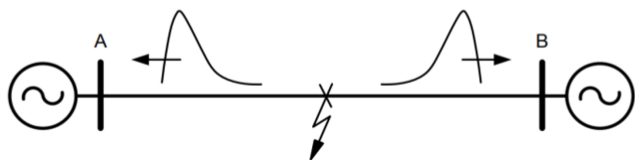


Figura 1. Representação simplificada do trecho entre barras A e B.

Dada uma falta a uma distância d do barramento A, com base no modelo proposto por Bewley (1963), devido à mudança abrupta nos parâmetros do sistema, serão notadas ondas viajantes que percorrerão o sistema em ambas as direções (Singh et al., 2020). Por sua vez, ao encontrar uma descontinuidade (as terminações do sistema) esta onda se reflete e volta ao ponto de falta. Assim, ao conhecer o intervalo de tempo entre as reflexões é possível estimar o local da falta (Dong et al., 2020).

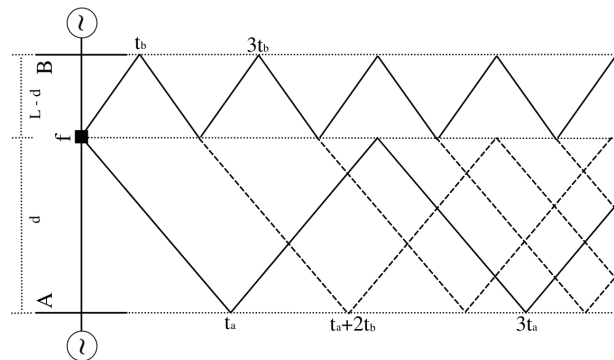


Figura 2. Representação do diagrama de Lattice.

3. ALGORITMO PROPOSTO PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM ALIMENTADORES RADIAIS

Com a finalidade de melhor explicar o algoritmo proposto para localização de faltas em alimentadores radiais de distribuição de energia elétrica, o mesmo pode ser visualizado por meio do fluxograma da Figura 3. Na sequência, cada um dos procedimentos que compõem esse fluxograma são descritos em maiores detalhes.

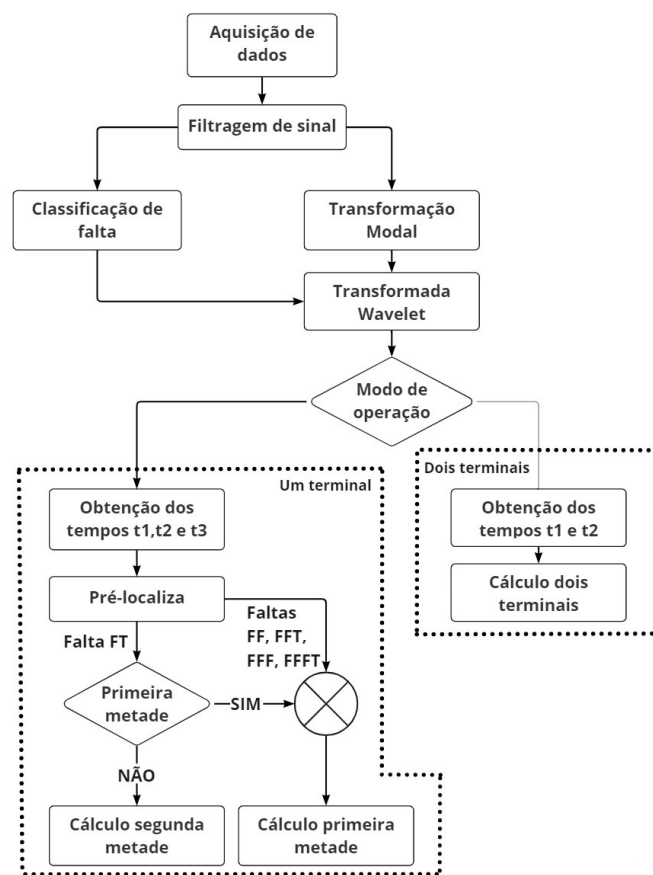


Figura 3. Fluxograma do algoritmo proposto para localização de faltas em alimentadores radiais.

3.1 Aquisição de Dados

Neste estágio, os sinais de tensão são obtidos pelos medidores alocados no sistema, seja para um ou dois terminais.

Assim, cada medidor é responsável pela aquisição dos sinais das tensões trifásicas, os quais foram amostrados a uma taxa de 12 MHz, conforme proposto por Liang et al. (2015). No caso de dois terminais, considerou-se que as medições são sincronizadas por GPS (*Global Positioning System*), seguindo portanto a proposição de Xiangjun et al. (2004).

3.2 Filtragem do Sinal

Um fator importante é a limitação da banda de frequências, isso porque os dados coletados devem ser amostrados seguindo o Teorema de Nyquist para garantir que não ocorra o *aliasing*.

Na abordagem proposta, empregou-se um filtro Butterworth de segunda ordem devido às suas características: (i) banda passante plana; (ii) atenuação de 40 dB por década; e (iii) por ser usualmente aplicado em sistemas de proteção (Campos et al., 2014).

3.3 Classificação da Falta

A classificação das faltas é realizada pelo sistema de proteção, em que são feitas comparações de fasores trifásicos de corrente e também das componentes de sequência zero (Silva et al., 2005). No entanto, é válido comentar que esse estágio somente é mandatório quando se emprega medições de apenas um terminal, visto que é necessário distinguir as faltas Fase-Terra (FT) dos demais tipos de faltas.

3.4 Transformação Modal

Em sistemas trifásicos, as fases são mutuamente acopladas e, portanto, faz-se necessário o desacoplamento (Zhao et al., 2016; Kumar and Saxena, 2019). Portanto, a transformação modal é utilizada para decompor os sinais das tensões em componentes modais (modo terra e dois modos aéreos), conforme a Equação 1:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

em que V_0 , V_α e V_β são respectivamente as componentes de modo terra e modos aéreos (α e β); V_a , V_b e V_c são as tensões das fases A, B e C, respectivamente. Assim, as velocidades de propagação (V_p) de cada modo podem ser calculadas por meio da Equação 2:

$$V_p = \frac{1}{\sqrt{L \times C}} \quad (2)$$

onde L e C são as indutâncias e capacitâncias de cada modo (terra ou aéreos).

De acordo com Jiang et al. (2000), após a transformação modal é comum adotar o modo α , visto que esse abrange todos os tipos de faltas (exceto aquelas que ocorrem entre as fases B e C). Por este motivo, é necessário classificar a falta em paralelo à transformação modal, visto que dessa forma a Transformada *Wavelet* (apresentada na próxima subseção) pode usar outro modo (terra ou β) para melhorar o processo de localização deste tipo de falta.

3.5 Transformada Wavelet Discreta

A TWD tem capacidade de determinar descontinuidades em formas de ondas. Logo, a aplicação dessa técnica para localização de faltas em sistemas elétricos é adequada, pois consegue aferir os instantes de tempos das reflexões das ondas viajantes geradas durante uma situação de falta (Pukhova et al., 2017; Kumar and Saxena, 2019). Representa-se a TWD por meio da Equação 3:

$$TWD(m, k) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_n x(n) \Psi \left(\frac{k - nb_0 a_0^m}{a_0^m} \right) \quad (3)$$

em que, $\Psi(\cdot)$ é a *Wavelet* mãe; os parâmetros de escala e translação a e b são funções de um parâmetro inteiro m , que permite uma expansão da *Wavelet* mãe em *Wavelets* filhas; k está relacionado com o número de amostras do sinal de entrada; e n é o nível de decomposição do sinal.

Devido à possibilidade de realizar decomposição tempo-frequência, por meio da TWD torna-se capaz a análise multirresolução. Esse processo de decomposição encontra-se ilustrado na Figura 4. Assim, são usados bancos de filtros passa-alta (h_1) e passa-baixa (h_0), onde o sinal original ($f(x)$) é decomposto pelos coeficientes dos bancos de filtros em detalhes (d_n) e aproximações (a_n).

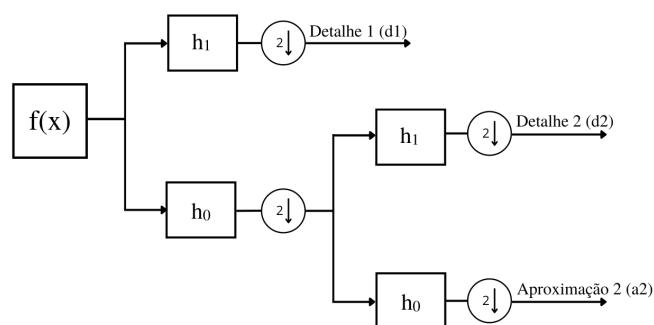


Figura 4. Decomposição do sinal no processo de análise multirresolução.

3.6 Modo de Operação

A abordagem proposta permite que o operador escolha qual modo de operação deseja utilizar, o qual está relacionado à estratégia de medição adotada pela concessionária, ou seja, para medições em um ou dois terminais. Dessa forma, esse trabalho investiga a robustez da abordagem proposta com o intuito de garantir que não haja qualquer prejuízo em termos da precisão no processo de estimação da distância da falta.

3.7 Localização de Faltas

Como mencionado, a abordagem proposta permite estimar o local de falta com medições provenientes de um ou dois terminais. Ao utilizar a técnica com dados provenientes de dois terminais, é necessária a sincronização de tempos dos

medidores e a necessidade de um canal de comunicação entre os medidores. Ao utilizar a técnica com dados provenientes de um terminal, essa sincronização não é necessária, contudo, deve-se executar um estágio de pré-localização da falta em casos de faltas do tipo FT. Assim, na sequência, os algoritmos implementados para cada estratégia de medição são explanados em detalhes.

Medições em dois terminais Apesar de necessitar da sincronização das medições, essa técnica é mais precisa e mitiga problemas relacionados à múltipla estimação do local de falta em sistema de distribuição com topologia radial.

O primeiro estágio deste algoritmo realiza a detecção da chegada de uma onda viajante por meio da comparação do coeficiente de detalhe 1 ($d1$) do modo aéreo (α) a um limiar adaptativo definido pelo máximo valor (em regime permanente) acrescido de uma margem de 10%.

Ao calcular a primeira frente de onda em cada terminal, é possível estimar a distância da falta por meio da Equação 4:

$$d = \frac{l - V_p \times T_{atraso}}{2} \quad (4)$$

em que d é a distância da falta (em metros); V_p é a velocidade de propagação da onda no trecho referente ao modo α (em m/s); l é o comprimento do trecho coberto pelo medidor (em metros); t_{atraso} é a diferença dos tempos entre os terminais de medição (em segundos).

Medições em um terminal Para essa estratégia de medição, a detecção do instante de chegada das ondas viajantes é similar ao algoritmo usado para medições em dois terminais. Contudo, esse algoritmo deve ser executado de forma recursiva, até a chegada da segunda frente de onda proveniente da reflexão.

Com os instantes de tempo aferidos, há uma pré-localização da falta. Essa etapa deve ser realizada, pois aferiu-se que em casos de faltas do tipo FT, as reflexões provenientes do terminal remoto não podem ser desprezadas. Logo, dependendo do local da falta, as reflexões entre o terminal remoto (ou ponto de falta) podem ser similares, acarretando em erros de detecção. Portanto, caso a falta seja do tipo FT, será necessário distinguir se ocorreu na primeira metade ou na segunda metade do trecho coberto pelo medidor.

A pré-localização da falta é determinada por meio da diferença entre os tempos das reflexões iniciais com relação ao modo α e ao modo terra, como proposto por Abur and Magnago (2000). Quanto maior a distância de falta, maior será a diferença entre os tempos de propagação e reflexão em ambos os modos. Caso esse valor exceda o máximo de tempo de reflexão para o meio da linha, essa falta ocorreu na segunda metade, caso contrário, ocorreu na primeira metade.

Com isso, a distância da falta pode ser estimada. Para faltas do tipo FT na primeira metade e para demais tipos de faltas, a distância é calculada pela Equação 5.

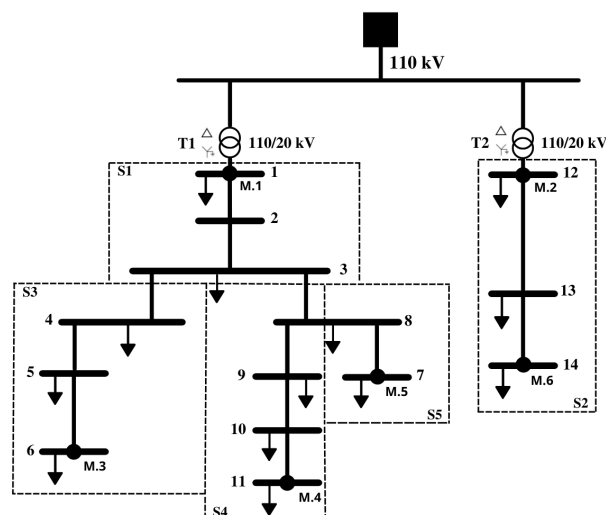


Figura 5. Diagrama unifilar do sistema teste CIGRE.

$$d = \frac{|3t_a - t_a| \times V_p}{2} \quad (5)$$

Para faltas do tipo FT localizadas na segunda metade, a distância é estimada por meio da Equação 6.

$$d = l - \frac{|(t_a + 2t_b) - t_a| \times V_p}{2} \quad (6)$$

em que t_a e t_b são os tempos de viagem da onda do ponto de falta ao terminal A e B, respectivamente (dados em segundos).

4. SISTEMA TESTE

Conforme previamente mencionado, nesse trabalho foi considerado o sistema teste do CIGRE (Figura 5), o qual é equilibrado e dispõe de 14 barras com dois transformadores abaixadores de tensão de 110/20 kV, T1 e T2. Os medidores, denominados de M.1 até M.7, foram alocados nas extremidades de cada ramo, conforme mostrado no diagrama unifilar. Ademais, o sistema foi dividido em zonas que não se sobrepõem, S1 a S5.

O sistema foi modelado e simulado no *software* PS-CAD/EMTP, levando em consideração os quatro tipos de faltas (fase-terra, fase-fase, fase-fase-terra e fase-fase-fase) e os locais mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Locais da ocorrência da falta para cada ramo do sistema.

Local	Ramo			
	M.1 e M.3	M.1 e M.4	M.1 e M.5	M.2 e M.6
Aprox. 10%	0,993 km	0,993 km	0,993 km	0,790 km
Aprox. 25%	2,483 km	2,483 km	2,483 km	1,975 km
Aprox. 40%	3,972 km	3,972 km	3,972 km	3,160 km
Aprox. 50%	4,965 km	4,965 km	4,965 km	3,950 km
Aprox. 75%	7,448 km	7,450 km	7,450 km	5,925 km
Aprox. 90%	8,937 km	8,946 km	9,171 km	7,110 km

O ângulo de incidência (ϕ) foi variado em 0 e 90 graus, a resistência de falta (R_f) foi adotada em 0, 25, 50 e 100 Ohms.

Inicialmente, a taxa amostral das simulações foi definida em 12 MHz. Com o intuito de comparar a influência da discretização dos sinais, também foram realizadas simulações considerando uma taxa amostral de 1,2 MHz.

Ao utilizar a estratégia baseada em dois terminais de medição, foram adotados os pares de medidores mostrados na Tabela 2. Quando considerado apenas um terminal de medição, empregou-se os sinais em conformidade com os medidores apresentados na Tabela 3.

Tabela 2. Medidores utilizados para a estratégia baseada em dois terminais de medição.

Falta entre barras	Medidor utilizado
1 e 3	M.1 - M.3 ou M.1 - M.4 ou M.1 - M.5
3 e 6	M.1 - M.3
3 e 8	M.1 - M.4 ou M.1 - M.5
8 e 11	M.1 - M.4
8 e 7	M.1 - M.5
12 e 14	M.2 - M.6

Tabela 3. Medidor utilizado para a estratégia baseada em um terminal de medição.

Falta entre barras	Medidor utilizado
1 e 3	M.1
3 e 6	M.1
3 e 8	M.1
8 e 11	M.1
8 e 7	M.1
12 e 14	M.2

5. RESULTADOS

Em conformidade com a abordagem proposta, os resultados foram então avaliados em termos das estratégias de medição.

5.1 Medições realizadas em dois terminais

Com o intuito de exemplificar os resultados obtidos para dois terminais, a Figura 6 apresenta os coeficientes de detalhe no primeiro nível (d1) de decomposição da Transformada *Wavelet* para o modo aéreo α quando da ocorrência de uma falta do tipo AT. Os gráficos expõem os picos que representam a chegada da onda viajante nos pontos de medição (no caso, para os medidores M.1 e M.3), sendo que a falta foi aplicada a 1 km da barra 1 (com impedância de 0 Ohm e ângulo de incidência de 0°).

Analisando a Figura 6, é possível notar que o primeiro pico ocorreu em M.1 (3,0045 ms), enquanto o segundo pico ocorreu M.3 (3,0310 ms). Portanto, o atraso de tempo foi de 26,5 ms. Assim, a distância da falta estimada foi de 1,088 km. O erro absoluto é de 88 m, ou seja, um erro relativo de 0,89%.

Foram analisados todos os tipos de faltas em quatro ramos do sistema. Na Figura 7 são apresentados os valores médios de erros alcançados para faltas com ϕ de 90 graus. O pior desempenho do localizador foi obtido para as faltas bifásicas e trifásicas, no ramal entre os medidores M.1 e M.4. No entanto, ao analisar os erros médios, os resultados podem ser considerados satisfatórios.

Também foi analisado o cenário para faltas com ϕ de 0 graus. Os erros médios alcançados são apresentados na

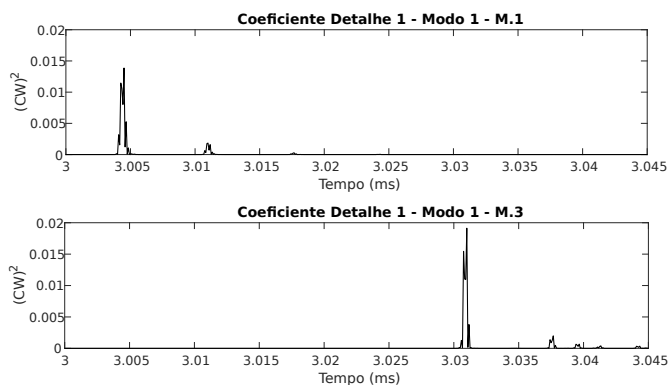


Figura 6. Coeficientes de detalhe no primeiro nível de decomposição da Transformada *Wavelet* para falta monofásica (medição em dois terminais).

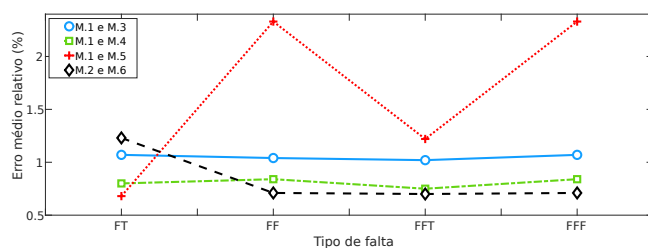


Figura 7. Médias do erro relativo para cada tipo de falta considerando $R_f = 0 \Omega$ $\phi = 90^\circ$.

Figura 7. As faltas com ϕ de 0 graus causam uma menor perturbação no sistema, conseqüentemente, CW menores, o que dificulta a localização. Para o caso analisado, o ϕ teve pouca influência na precisão da falta, uma vez que a abordagem proposta é capaz de distinguir pequenas variações nos CW, permitindo assim uma boa precisão na detecção.

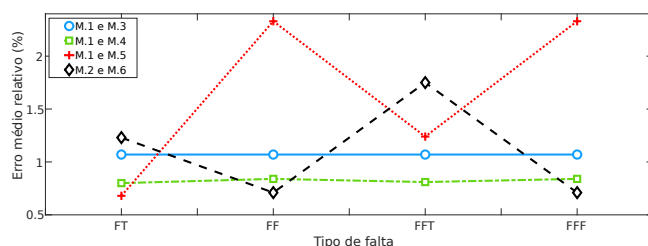


Figura 8. Médias do erro relativo para cada tipo de falta considerando $R_f = 0 \Omega$ $\phi = 0^\circ$.

Por fim, também foi analisada a influência da R_f . Em métodos baseados no cálculo da impedância aparente, a R_f é um dos parâmetros que contribuem para erros na localização. Nos resultados alcançados, Tabela 4, a R_f não contribuiu para a precisão da localização.

Também foi realizada uma análise da influência da taxa amostral com a precisão encontrada. A Figura 9 ilustra a média da precisão alcançada para todas as simulações realizadas com taxa amostral de 1,2 MHz e com 12 MHz. Diferente dos parâmetros R_f e ϕ , a taxa amostral tem influência direta na precisão alcançada.

Tabela 4. Média de erros para diferentes resistências de falta.

Resistência	Faltas			
	FT	FF	FFT	FFF
0 Ω	0,94 %	0,98 %	0,92 %	1,07 %
25 Ω	0,94 %	0,98 %	0,92 %	1,07 %
50 Ω	0,94 %	0,98 %	0,92 %	1,07 %
100 Ω	0,94 %	0,98 %	0,92 %	1,07 %

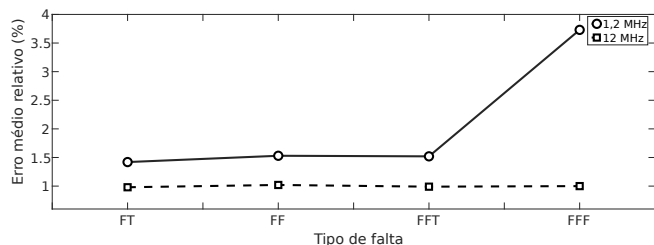


Figura 9. Comparação entre taxa amostral e erro relativo para cada tipo de falta.

5.2 Medições realizadas em um terminal

Os mesmos casos analisados para a estratégia de medição usando dois terminais foram considerados para um terminal. Na Figura 10, são apresentados os CW observados do M.1.

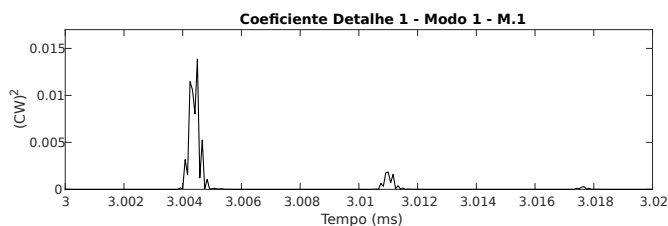


Figura 10. Coeficientes de detalhe no primeiro nível de decomposição da Transformada Wavelet para falta monofásica (medição em um terminal).

Segundo o diagrama de Lattice (Figura 2), $3T_a$ corresponde ao segundo pico dos CW, cujo instante de ocorrência é de 3,011 ms. O instante de tempo referente ao T_a é 3,0045 ms. Portanto, a distância estimada da falta foi de 0,950 km em relação a M.1, ou seja, apresentou um erro absoluto de 50 metros (erro relativo de 0,5 %).

Também foram analisados erros médios para a localização com dados provenientes de um único terminal. A Figura 11 ilustra os resultados alcançados para esse algoritmo, conforme Tabela 3. Os resultados alcançados apresentaram erros próximos a 1%, ou seja um erro absoluto médio de 100 metros na localização.

À semelhança da estratégia que emprega medições em dois terminais, esse algoritmo também não apresentou variação dos resultados em função de R_f e ϕ . Contudo, foram encontrados problemas relacionados à múltipla estimação do local de falta. A múltipla estimação ocorreu no alimentador conectado por meio de T1 ao barramento de alta tensão, visto que esse possui quatro zonas (S1, S3, S4 e S5). Assim, faltas localizadas na zona S3 podem ser estimadas também em S4 e S5. A mesma questão ocorre para as faltas situadas nas zonas S4 e S5.

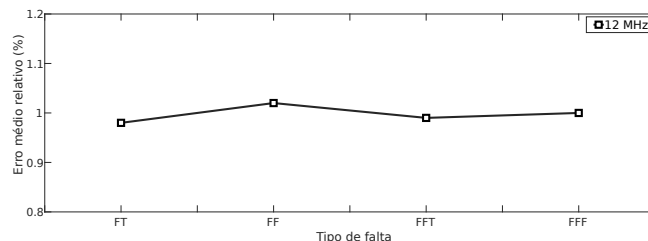


Figura 11. Erros médios para os quatro tipos de faltas ao utilizar medição em um terminal.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma abordagem com base na teoria de ondas viajantes para localização de faltas em sistemas radiais de distribuição de energia elétrica. As simulações foram realizadas em ambiente computacional com auxílio do *software* PSCAD/EMTP. A abordagem fez uso da Transformada Wavelet como ferramenta de detecção dos tempos de reflexão das frentes de onda. A rotina de localização de faltas pode operar com dois algoritmos distintos, ficando a critério do operador e da necessidade da concessionária em termos de política/investimento em medição. Ambos os algoritmos permitiram a estimação precisa da distância de falta. Contudo, o uso de dois terminais não apresentou problemas relacionados à múltipla estimação do local de falta. Nesse sentido, em trabalhos futuros, uma sub-rotina será proposta para mitigar o problema da múltipla estimação do local das faltas ao se empregar a estratégia de medição em terminal único, visto que essa traz vantagens diretas quanto aos investimentos financeiros das concessionárias em relação ao monitoramento de faltas em sistemas radiais de distribuição de energia elétrica.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo pelas facilidades oferecidas.

REFERÊNCIAS

- Aboshady, F.M., Thomas, D.W., and Sumner, M. (2019). A new single end wideband impedance based fault location scheme for distribution systems. *Electric Power Systems Research*, 173, 263–270.
- Abur, A. and Magnago, F. (2000). Use of time delays between modal components in wavelet based fault location. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 22, 397–403.
- Bewley, L.V. (1963). *Traveling waves on transmission systems*. Dover Publications, New York.
- Campos, J., Neves, W., Fernandes, D.J., and Costa, F. (2014). Impact of anti-aliasing filter and mimic filter on digital protection relaying. *XX Congresso Brasileiro de Automática*.
- Dashti, R., Daisy, M., Shaker, H.R., and Tahavori, M. (2018). Impedance-based fault location method for four-wire power distribution networks. *IEEE Access*, 6, 1342–1349.
- Dong, X., Wang, H., Xin, Z., Shi, S., and Wang, B. (2020). Distribution system fault location method using

- reclosure-generating traveling waves. In *IEEE PES General Meeting (PESGM)*, 1–5.
- Dwivedi, A. and Yu, X. (2011). Fault location in radial distribution lines using travelling waves and network theory. In *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 1051–1056.
- Galvez, C. and Abur, A. (2021). Fault location in meshed distribution systems using a minimum number of digital fault recorders. In *North American Power Symposium (NAPS)*, 1–6.
- Gholami, M., Abbaspour, A., Moeini-Aghtaie, M., Fotuhi-Firuzabad, M., and Lehtonen, M. (2020). Detecting the location of short-circuit faults in active distribution network using pmu-based state estimation. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 11(2), 1396–1406. doi: 10.1109/TSG.2019.2937944.
- Gururajapathy, S., Mokhlis, H., and Ilias, H. (2017). Fault location and detection techniques in power distribution systems with distributed generation: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 949–958.
- Jia, H. (2017). An improved traveling-wave-based fault location method with compensating the dispersion effect of traveling wave in wavelet domain. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017.
- Jiang, J.A., Yang, J.Z., Lin, Y.H., Liu, C.W., and Ma, J.C. (2000). An adaptive pmu based fault detection/location technique for transmission lines. i. theory and algorithms. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 15(2), 486–493.
- Kumar, R. and Saxena, D. (2019). Fault location in distribution network using travelling waves. *International Journal of Energy Sector Management*, 13(3), 651–669.
- Liang, R., Fu, G., Zhu, X., and Xue, X. (2015). Fault location based on single terminal travelling wave analysis in radial distribution network. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 66, 160–165.
- Mohod, S.B. and Ghate, V.N. (2012). Techniques for detection of power quality disturbance waveform—a review. *International Journal of Electrical, Electronics and Computer Systems*, 8(2), 563–567.
- Pukhova, V., Gorelova, E., Ferrini, G., and Burnasheva, S. (2017). Time-frequency representation of signals by wavelet transform. In *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*, 715–718.
- Robson, S., Haddad, A., and Griffiths, H. (2014). Fault location on branched networks using a multiended approach. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 29(4), 1955–1963.
- Silva, M., Oleskovicz, M., and Coury, D.V. (2005). Uma nova ferramenta baseada na transformada wavelet para localização digital de faltas. *Controle & Automação*, 16(3), 345–358.
- Singh, R., Shukla, D.S., Thakura, P., and Pati, S. (2020). Fault analysis during integration of hybrid system to microgrid using impedance and travelling wave based method. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*, 12, 655–661.
- Stefanidou-Voziki, P., Sapountzoglou, N., Raison, B., and Dominguez-Garcia, J. (2022). A review of fault location and classification methods in distribution grids. *Electric Power Systems Research*, 209, 108031.
- Wang, Z., Ma, X., Lu, Y., Wang, C., Lin, X., and Sui, Q. (2020). Single-ended data based fault location method for multi-branch distribution network. *Energy Reports*, 6(2), 385–390.
- Xiangjun, Z., Li, K., Zhengyi, L., and Xianggen, Y. (2004). Fault location using traveling wave for power networks. In *39th IAS Annual Meeting*, 2426–2429.
- Zhao, J.W., He, T., Liu, C.M., and Li, K. (2016). Travelling wave fault location for distribution line based on improved morphological gradient algorithm. In *2016 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C)*, 156–159.