

Localização de faltas em linhas de transmissão baseada na decomposição variacional dos modos e operador de energia Teager

Andressa P. Oliveira*. Fernando A. Moreira**
Alessandra F. Picanço***

**Colegiado de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Oeste da Bahia-UFOB, Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa-BA, Brasil, e-mail: (andressap.oliveira@ufob.edu.br);
Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Bahia-UFBA, Salvador-BA, Brasil.*

***Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Bahia-UFBA, Salvador-BA, Brasil, (e-mail: moreiraf@ufba.br).*

*** *Departamento de Engenharia Elétrica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia-IFBA, Salvador-BA, Brasil, (e-mail: alepicanco@ifba.edu.br).*

Abstract: This paper presents the application of the variational mode decomposition associated with the Teager energy operator to extract the characteristic data from two terminals for fault location in transmission lines using the traveling wave theory in a test system with 200 km long transmission line between two voltage sources. The simulation was performed using the MATLAB/Simulink® software, reading voltage and current signals, considering all types of faults, the variation of the occurrence location, fault inception angle and fault resistance. The numerical and graphic results proved the low dependence of the fault resistance in the estimation of the distance from the local of occurrence to the main reading terminal and showed high accuracy for the methodology used.

Resumo: Este artigo apresenta a aplicação da decomposição variacional dos modos associada ao operador de energia Teager para a extração dos dados característicos dos sinais na localização de faltas em linhas de transmissão utilizando a teoria das ondas viajantes, a partir de dados de dois terminais, para um sistema teste que possui uma linha de 200 km entre duas fontes de tensão. A simulação do sistema de potência foi realizada através do *software* MATLAB/Simulink®, com a leitura dos sinais de tensão e corrente, considerando todos os tipos de faltas, a variação do local de ocorrência, do ângulo de incidência e da resistência da falta. Os resultados numéricos e gráficos comprovaram a baixa influência da resistência de falta na estimação da distância do local de ocorrência ao terminal principal de leitura e mostraram alta precisão para a metodologia utilizada.

Keywords: Fault diagnostics; fault location; variational mode decomposition; traveling wave theory; Teager energy operator; transmission lines.

Palavras-chaves: Diagnósticos de faltas; localização de faltas; decomposição variacional dos modos; operador de energia Teager; teoria das ondas viajantes; linha de transmissão.

1. INTRODUÇÃO

Devido à vasta extensão no sistema elétrico de potência (SEP), a linha de transmissão de energia elétrica é um objeto de estudo relevante dada a sua grande exposição e incidência de faltas. A localização dessas faltas é um problema desafiador, pois a identificação precisa da ocorrência e a atuação da proteção do trecho atingido permitirá a rápida restauração do sistema (Saha; Izykowski; Rosolowski, 2010).

As faltas ou interrupções do serviço de energia elétrica são definidas por sinais transitórios de alta frequência que acontecem sobrepostos à componente de frequência fundamental nas formas de onda de tensão e corrente. Esses sinais são, na verdade, ondas viajantes que se propagam em velocidades próximas à velocidade da luz no vácuo e refletem

nos extremos e descontinuidades do sistema elétrico (Brown, 2009; Zanetta, 2020).

A análise dos métodos de localização de faltas em sistemas aéreos tem sido empregada há muitas décadas (Stringfield; Marihart; Stevens, 1957). Tais métodos podem ser baseados em três classes: teoria dos circuitos, técnicas de ondas viajantes e aplicação de inteligência artificial (Geethanjali; Sathiy Priya, 2009; Akmaz et al., 2018; Chan et al., 2019).

Apesar dos sinais de tensão e corrente apresentarem as informações do comportamento no sistema, faz-se necessário que técnicas para análise dos mesmos sejam utilizadas, a fim de extraírem as mensagens que o sinal carrega consigo. A literatura apresenta a utilização de diferentes técnicas (clássicas, de inteligência artificial e híbridas) para a detecção, classificação e localização de faltas em sistemas elétricos de

potência (Li et al., 2013; Xiao'an et al., 2018; Singh; Mahela; Manglani, 2018; Arranz et al., 2021). Os artigos estudados para a localização de faltas consideraram na aplicação, principalmente: variação do local da falta; o ângulo de incidência da falta; e diferentes resistências de falta.

Em Zhang et al. (2022), a decomposição variacional dos modos é utilizada associada com a rede neural convolucional para a localização de faltas em um sistema de distribuição, a partir do sinal de corrente em sua componente de sequência positiva. Os resultados encontrados, a partir da variação do local de ocorrência e resistência de falta, apresentaram ótima precisão e habilidade de generalização, quando comparado aos métodos tradicionais. Sahani e Dash (2019) utilizaram os sinais de corrente para estimar a localização de falta em linha de transmissão com compensação série, em um sistema elementar, utilizando a decomposição variacional dos modos (DVM) otimizada e o vetor randômico P-norma como dados de entrada para a rede neural artificial com a arquitetura ELM (do inglês, *Extreme Learning Machine*). A análise realizada consistiu em uma grande variação de condições da operação do sistema para diferentes resistências de falta, ângulo de incidência, local de ocorrência da falta e percentual do nível da compensação série. Ge et al. (2019) e Huai et al. (2021) aplicaram a DVM associada ao operador de energia Teager (OET) para a localização de falta em um sistema de ultra alta tensão e de alta tensão em corrente contínua, respectivamente. Ambos utilizaram na análise a variação das resistências de falta, ângulo de incidência fixo e a teoria das ondas viajantes para a estimação do local de ocorrência da falta. No entanto, este trabalho apresenta a aplicação da DVM associada ao OET para a extração dos dados característicos do sinal de tensão em sua componente de sequência positiva na localização de faltas em linhas de transmissão de corrente alternada utilizando a teoria das ondas viajantes, considerando a variação do ângulo de incidência para todos os tipos de faltas, da resistência de falta e do local da falta, simulando ocorrências a cada 10% em todo o comprimento da linha de transmissão.

O texto está organizado como segue: as seções 2, 3 e 4 abordam os conteúdos da teoria das ondas viajantes (TOV), a decomposição variacional dos modos e o operador de energia Teager, respectivamente. Na seção 5 apresenta-se a aplicação da DVM e OET para a localização de faltas no SEP. A análise dos resultados e discussões são apresentadas na seção 6. E as conclusões do trabalho são apresentadas na seção 7.

2. TEORIA DAS ONDAS VIAJANTES

As ondas viajantes estão associadas à propagação de ondas eletromagnéticas que resultam de curtos-circuitos em linhas de transmissão, objetivo de estudo desse trabalho, e análogo ao fenômeno advindo das descargas atmosféricas ou operações de chaveamento no sistema elétrico. As ondas de tensão geradas se propagam em ambos os sentidos da linha, a partir do ponto de falta.

A chegada dessas ondas nos terminais da linha é dependente da velocidade da onda e os parâmetros da linha de transmissão determinam essa velocidade, definida conforme (1).

$$v = \lambda f \quad (1)$$

onde, λ é o comprimento da onda, dado em km, e f é a frequência, dada em Hz.

A velocidade de propagação da onda é dada em km/s, conforme (2) (Zanetta Jr., 2020).

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2)$$

onde, L é a indutância da LT por unidade de comprimento e C é a capacitância da LT por unidade de comprimento.

A precisa localização de faltas depende tanto dos instantes iniciais dos transitórios como da determinação da velocidade da onda na linha de transmissão (Silveira; Seara; Zurn, 2001; Krzysztof et al., 2011).

Assim, utilizando o método baseado na teoria das ondas viajantes, que analisa a onda viajante direta e a onda reversa identificadas é possível estimar a localização da falta, através de (3).

$$d = \frac{l + (t_{11} - t_{21}) \cdot v}{2} \quad (3)$$

onde, l é o comprimento da linha de transmissão, t_{11} é o instante quando a primeira onda gerada chega no terminal M, dado em s; t_{21} é o instante quando a primeira onda gerada chega no terminal N, dado em s.

3. DECOMPOSIÇÃO VARIACIONAL DOS MODOS

A decomposição do sinal em um número finito, geralmente pequeno, em funções de modo intrínseco é parte da transformada de Hilbert-Huang, criada por Huang et al. (1998), e nos permite a identificação de parâmetros inerentes ao sinal, pois cada uma delas possui variações de amplitudes e frequências próprias. O processo de aquisição das funções de modo intrínseco (IMF, do inglês *Intrinsic Mode Function*) é chamado de peneiramento (*sifting*) (Braz et al., 2017).

A decomposição variacional dos modos é uma técnica recente que surgiu como uma ferramenta robusta para o processamento de sinais não estacionários. A DVM é utilizada na extração dos dados característicos dos sinais, que permite a decomposição do sinal de entrada em IMFs, a fim de facilitar a identificação da chegada das ondas viajantes nos terminais de leitura (Dragomiretskiy, Zosso, 2014; Huai et al., 2021).

O algoritmo para decomposição do sinal pela DVM em IMFs é o seguinte (Ge et al., 2019; Zang et al., 2022):

1. Para cada modo ($u_k(t)$), o sinal analítico é encontrado a partir da transformada de Hilbert e a seu espectro unilateral pode ser calculado como (4).

$$\left[\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right] u_k(t) \quad (4)$$

onde $\delta(t)$ é a função de Dirac e u_k é o k-ésimo componente dos modos.

2. O espectro de cada modo é modulado para a banda correspondente de base pela combinação da frequência central estimada (w_k), como em (5).

$$\left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) u_k(t) \right] e^{-jw_k t} \quad (5)$$

3. A norma do quadrado do gradiente do sinal demodulado anterior (L^2) é calculado para estimar a largura de banda de cada sinal dos modos. O problema variacional restrito é expresso em (6), onde f é a componente de sequência positiva da tensão como sinal de entrada.

$$\min_{\{u_k\}\{w_k\}} \left\{ \sum_k \left\| \partial \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) u_k(t) \right] \right\|_2^2 \right\} \quad (6)$$

s. a $\sum_k u_k = f$

4. O fator de penalidade quadrático (α) e o operador de multiplicação de Lagrange (λ) são apresentados para transformar o problema variacional restrito em problema variacional irrestrito. A função do Lagrangeano aumentado é expresso em (7).

$$L(\{u_k\}, \{w_k\}, \lambda) = \sum_{k=1}^K \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) u_k(t) \right] e^{-jw_k t} \right\|_2^2 + \left\| x(t) - \sum_{k=1}^k u_k(t) \right\|_2^2 + (\lambda(t), x(t) - \sum_{k=1}^k u_k(t)) \quad (7)$$

Assim, utilizando a multiplicação do operador e alternando o método da direção, além de atualizar em cada iteração o $u^{n+1}, w^{n+1} e \lambda^{n+1}$, buscando estender o “ponto de sela” do Lagrangeano, e satisfazer o critério de parada, as bandas independentes serão obtidas.

4. OPERADOR DE ENERGIA TEAGER

O operador de energia Teager é um operador não linear com as vantagens de alta precisão na demodulação de sinais e alta velocidade de processamento. Além de ser capaz de identificar rapidamente a energia instantânea do sinal em tempo real e detectar com eficiência qualquer variação abrupta no sinal (Ge et al., 2019).

Kaiser (1993) definiu o OET nos domínios discreto e contínuo como uma ferramenta para a análise das componentes dos sinais a partir do ponto de vista da energia. Para os sinais no domínio contínuo, pode ser definido pelo operador apresentado em (8).

$$\Psi[x(t)] = \left(\frac{dx(t)}{dt} \right) \cdot x(t) \frac{dx^2(t)}{dt^2} \quad (8)$$

onde, ψ é o OET e x é o sinal no domínio contínuo de análise. Enquanto o operador correspondente para o sinal discreto é dado em (9).

$$\Psi[f(n)] = f^2(n) - f(n+1)f(n-1) \quad (9)$$

Como pode ser visto nas definições de (4) e (5), a amplitude ou frequência do sinal varia rapidamente e o valor da energia calculada utilizando o OET será grande. Ao analisar o gráfico dos valores da energia com tal aplicação, o primeiro pico corresponde ao momento que a onda surge para a sua detecção.

5. APLICAÇÃO DA DVM E OET PARA A LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

5.1 Sistema teste estudado

O sistema proposto consiste em uma linha de transmissão de 200 km, operando em 60 Hz, entre duas fontes de tensão, que representam grandes áreas com o suprimento de energia. A Fig. 1 apresenta o sistema teste estudado que foi modelado no ambiente do MATLAB/Simulink®. Os detalhes das fontes e da linha de transmissão são apresentados na Tabela 1 (Sing; Mahela; Manglani, 2018). A linha de transmissão completa consiste em dez elementos de linha com parâmetros distribuídos, dependentes da frequência, 20 km cada, que auxiliou na simulação do sistema de potência com as diferentes ocorrências de faltas ao longo do trecho.

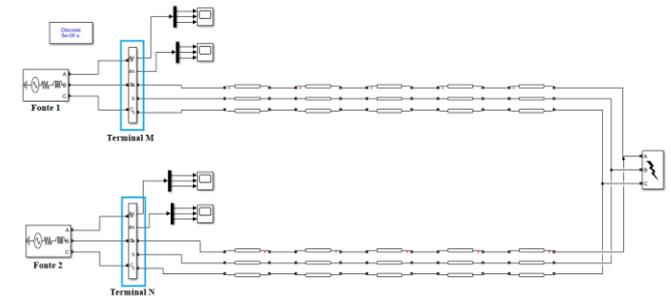


Fig. 1 Sistema teste para o estudo das situações de faltas.

Tabela 1 Parâmetros do sistema proposto.

Parâmetros	Fonte	
	Terminal M	Terminal N
Tensões das fontes	765 kV _{L-L} , 20°	765 kV _{L-L} , 0°
Z _{s1}	(17,177+45,917j) Ω	(15,31+45,917j) Ω
Linha de Transmissão		
z ₁	(0,01273+0,3519j) Ω/km	
z ₀	(0,3864+1,5556j) Ω/km	
C ₁	12,74x10 ⁻⁹ F/km	
C ₀	7,751x10 ⁻⁹ F/km	

5.2 Metodologia proposta para a localização de faltas

Para a análise do sistema teste, os sinais de tensões e correntes foram lidos em ambos os terminais (M e N) com as faltas

simuladas em 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80% e 90% de distância do terminal M, para o comprimento da linha de 200 km e com a variação do ângulo de incidência (0° e 90°) para todos os tipos de faltas. Esses sinais foram decompostos utilizando uma frequência de amostragem de 20 kHz.

A classificação e precisão das faltas são realizadas e calculadas a partir da análise do sistema sem falta e com os dez tipos conhecidos (AG, BG, CG, ABG, ACG, CBG, AB, AC, CB e ABC). A variação da resistência de falta (R_F) foi realizada utilizando os valores de 10 Ω , 50 Ω , 100 Ω , 500 Ω e 1000 Ω .

Para a análise dos dados característicos dos sinais de tensão e de corrente, em suas componentes de sequência positiva, através da DVM associada ao OET, para a localização de faltas utilizando a TOV no sistema em análise, o seguinte procedimento é realizado:

- As simulações para o sistema teste estudado foram realizadas usando o *SimPowerSystems toolbox* no ambiente do MATLAB/Simulink®, variando os ângulos de incidência, locais de ocorrência e resistências de falta;
- No ambiente do MATLAB®, para o algoritmo programado, as componentes de sequência positiva do sinal de corrente são determinadas para as fases lidas no terminal M, visto que o método das componentes simétricas conduz a previsões apuradas sobre o comportamento do sistema;
- O ponto máximo do vetor resultante de cada fase é analisado e no momento equivalente ao subtransitório, o índice desse local é identificado e chamado de índice de falta (IF);
- Dada a identificação do IF, esse valor é comparado com 75% do IF quando o sistema está sem falta (IFsf). Caso o valor do IF seja menor do que $0,75 \times \text{IFsf}$, a fase está faltosa. Caso contrário, a fase está sã. Assim, é possível detectar a falta na fase e logo após, classificá-la quanto o seu tipo de falta. O valor percentual de 75% foi determinado por tentativa e erro, a partir do comportamento observado para o período de ocorrências da falta nas simulações realizadas;
- Para o cálculo da localização da falta, a componente de sequência positiva do sinal de tensão da fase faltosa é aplicado na DVM. A decomposição em IMFs é realizada e a IMF1, que é o primeiro nível da decomposição das funções de modo intrínseco, é escolhida, em virtude da sua melhor resolução apresentada;
- O OET é utilizado para visualizar pontos específicos no sinal. Neste caso, o operador de energia Teager é aplicado ao sinal da IMF1 e o momento da chegada da onda viajante no terminal é identificado a partir do tempo equivalente ao máximo valor do módulo do vetor de energia encontrado nos pontos de leitura (terminais M e N);

- A estimação da distância para o terminal M é encontrada, priorizando a primeira fase faltosa analisada, para ambos os terminais, utilizando a teoria das ondas viajantes através de (4).

A Fig. 2 apresenta a ilustração dos passos apresentados para a metodologia utilizada. Vale ressaltar que, apesar deste trabalho utilizar os dados do sinal de corrente em sua componente de sequência positiva somente para a detecção e classificação das faltas, o sinal de tensão em sua componente de sequência positiva é também capaz de determinar a localização da falta no sistema de potência, conforme recomenda a literatura e testes que foram realizados pelos autores (Liguo et al., 2009; Moravej et al., 2015; Huai et al., 2021; Zhang et al., 2022).

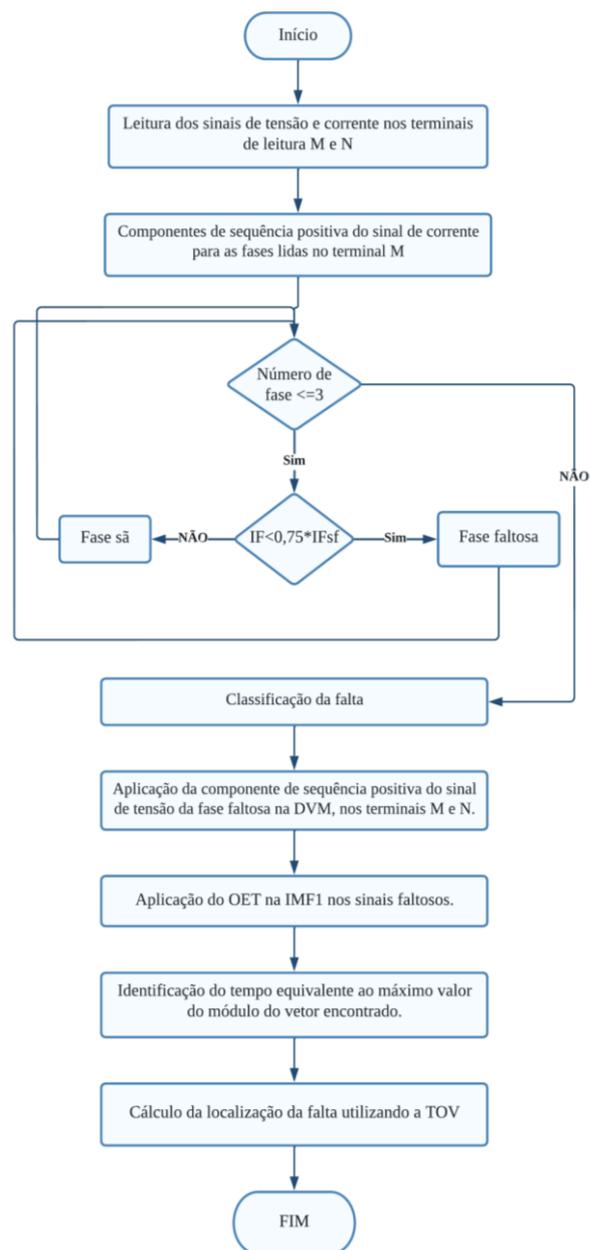


Fig. 2 Metodologia aplicada para a localização da falta.

6. ANÁLISE DE RESULTADOS E DISCUSSÕES

O sistema proposto para estudo é utilizado para análise de detecção, classificação e localização de faltas em sistemas elétricos de potência, a fim de prover a proteção efetiva da linha de transmissão através de dispositivo de atuação, a partir da leitura de dados de dois terminais. Para a detecção e classificação, as componentes de sequência positiva dos sinais de corrente foram utilizadas. Enquanto para a localização, as componentes de sequência positiva dos sinais de tensão faltosos foram utilizadas e decompostas pela DVM, sendo a IMF1 aplicada ao OET para a identificação do tempo de chegada da onda viajante no terminal de leitura. A estimativa da distância do terminal M foi calculada através de (4).

Ao todo, considerando a variação do ângulo de incidência (0° e 90°) para todos os tipos de falta, a variação do local de ocorrência da falta e da resistência de falta, 900 cenários foram analisados. A taxa de acerto para a detecção e classificação das faltas foi de 100%. No entanto, para a localização das faltas, 96,22% do universo analisado apresentou a estimativa da distância do local de ocorrência ao terminal M. Os 3,78% dos cenários desconsiderados foram de faltas monofásicas analisadas, que tiveram sua localização não contabilizada devido ao erro de localização ter sido maior que 15% do valor teórico.

A fim de apresentar o comportamento analisado em cada cenário, a Fig. 3 apresenta a decomposição variacional dos modos do sinal lido da fase A, para uma falta do tipo monofásica (AT), no instante de 0,02 s, em 90% da LT, com $R_F = 500 \Omega$, para o ângulo de incidência de 90° , no terminal M, suas respectivas IMFs e o residual, para o período de amostragem adotado de 5×10^{-5} s. Tal tipo de falta e local de ocorrência foram escolhidos devido à alta incidência de faltas monofásicas (cerca de 78% no SEP) e pela incidência estar mais distante do primeiro terminal de leitura, respectivamente (Mamede Filho; Mamede, 2020; Sato; Freitas, 2015).

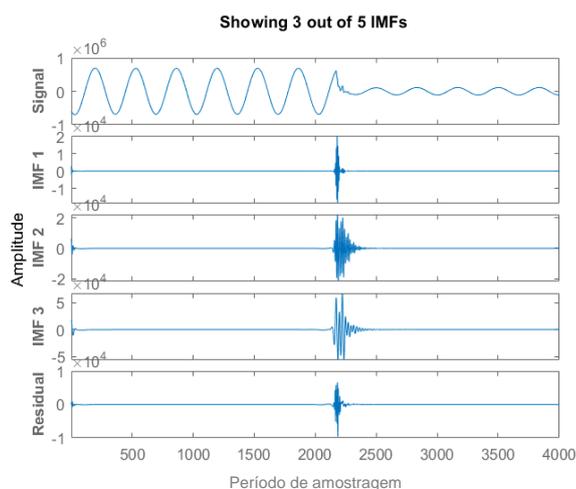


Fig. 3 VMD da fase A lida no terminal M.

As Figs. 4 e 5 apresentam a aplicação do OET para a IMF1 dos terminais M e N, respectivamente, em que a estimativa do local de falta é realizada com o erro percentual de 0,128%, para a

ocorrência, no instante de 0,1 s. Observa-se que o momento de magnitude máxima das curvas aponta para o tempo de chegada da onda viajante em cada terminal. Após a identificação desse tempo equivalente, os valores são aplicados em (4), visto que a velocidade de propagação da onda é calculada utilizando os dados da indutância e capacitância conhecidas por unidade de comprimento para a LT estudada.

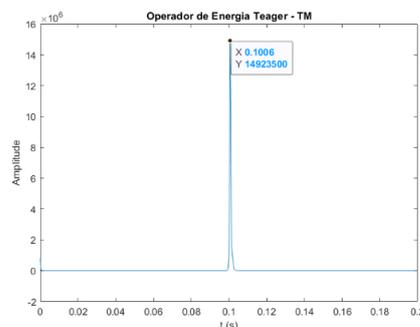


Fig. 4 Comportamento resultante do OET no terminal M.

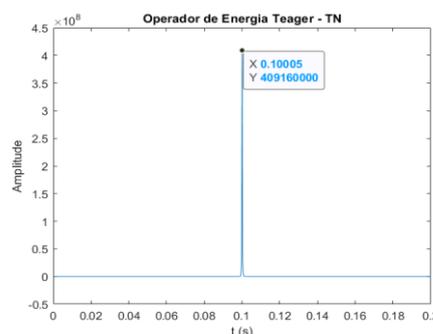


Fig. 5 Comportamento resultante do OET no terminal N.

As Figs. 6 a 8 apresentam a influência da R_F para as faltas monofásica (CT), bifásica com terra (BCT) e trifásica (ABC) na extensão da LT, respectivamente. Os três tipos de faltas analisadas apresentaram comportamentos comuns como: erro percentual de 0% em 50% da LT; maiores erros de localização nos dois locais de análise mais próximos aos terminais na LT; valores similares do erro, independentemente do valor da R_F , para os locais de 30% a 70% da LT.

Na falta CT, da Fig. 6, para o ângulo de incidência de 90° , observa-se que a variação das R_{FS} não influencia na variação do erro percentual em toda a extensão da LT. No entanto, para o ângulo de incidência de 0° , observou-se a dificuldade de estimação dos resultados para os valores de 10Ω , 50Ω e 100Ω , principalmente, em toda a extensão da linha, o que ocasionou maior erro percentual médio, visto que poucos resultados foram considerados em virtude do erro percentual ter sido maior que 15%. A falta CT foi escolhida para representação devido as faltas AT e BT, para os ângulos de incidência analisados, nas R_{FS} de 10Ω e 50Ω , para 10% e 90% da LT, terem os valores de estimação do local de ocorrência da falta desconsiderados (erro percentual maior que 15%).

Para a falta BCT, apresentada na Fig. 7, e trifásica (ABC), apresentada na Fig. 8, os maiores erros percentuais foram

obtidos para as R_F s de 500 Ω e 1000 Ω , independente do ângulo de incidência analisado. Para ambas as faltas, observou-se pouca influência da variação das R_F s no trecho de 30% a 70% da LT.

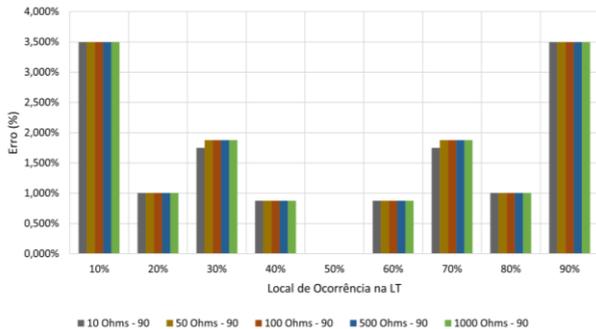


Fig. 6 Influência da R_F para falta CT.

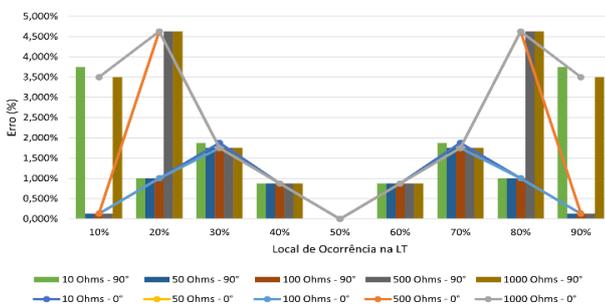


Fig. 7 Influência da R_F para falta BCT.

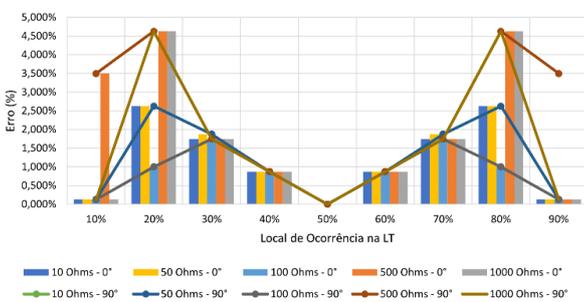


Fig. 8 Influência da R_F para falta ABC.

Uma fração da análise realizada para todos os cenários é apresentada na Tabela 2, com o objetivo de demonstrar, de forma homogênea, em toda extensão da LT, o comportamento da metodologia aplicada neste trabalho. Nota-se que os maiores erros percentuais encontrados foram em faltas monofásicas, com ângulo de incidência da falta em 0° , principalmente, comprovando que quando avaliada a incidência da falta ao sinal de tensão em seu cruzamento por zero, há dificuldade para estimar o local de ocorrência.

A análise comparativa das localizações teóricas e estimadas são apresentadas nas Figs. 9 e 10. Para a Fig. 9, que apresenta os resultados encontrados [km] para a falta CT em toda a extensão da LT, para o ângulo de incidência de 90° , observa-se o baixo erro absoluto para todas as R_F s analisadas. Assim, a eficiência da metodologia foi comprovada, visto que para o ângulo de incidência de 90° é quando a onda de tensão lançada

tem os seus máximos valores e é o mais comum de ser encontrado nas ocorrências de faltas. No entanto, para o ângulo de incidência de 0° , como alguns resultados foram desconsiderados, devido ao erro percentual ter sido maior que 15%, a análise do erro absoluto ficaria incompleta para essa representação. Na Fig. 10, em que a falta trifásica é analisada, o comportamento linear das curvas comprova o pequeno erro absoluto entre a localização teórica e a localização estimada para todos os valores de resistências de faltas e ângulos de incidências analisados.

Tabela 2 Resultados encontrados para o sistema teste.

Local de Ocorrência	Ângulo de Incidência	Tipo de falta	R_F (Ω)	Erro (%)
10%	$0^\circ/90^\circ$	AT	500	0,128
		ABT	50	0,128
		BC	100	0,128
		ABC	Todas, exceto 500	0,128
20%	$0^\circ/90^\circ$	BT	100	3,497
		ACT	500	4,627
		AB	50	2,623
		ABC	100	1,002
30%	0°	CT	500	9,126
	90°		1,876	
	$0^\circ/90^\circ$	BCT	100	1,749
		AC	50	1,876
		ABC	Todas, exceto 50	1,749
		AT	Todas	0,874
40%	$0^\circ/90^\circ$	ABT	Todas	0,874
		BC	Todas	0,874
		ABC	Todas	0,874
		Todos	Independente	0%
60%	$0^\circ/90^\circ$	BT	Todas	0,874
		ACT	Todas	0,874
		AB	Todas	0,874
		ABC	Todas	0,874
70%	0°	CT	1000	9,126
	90°		1,876	
	$0^\circ/90^\circ$	BCT	10	1,876
		AC	500	1,749
80%	$0^\circ/90^\circ$	ABC	50	1,876
		AT	100	4,627
		ABT	10	2,623
		BC	50	1,002
90%	$0^\circ/90^\circ$	ABC	100	1,002
		BT	500	0,128
		ACT	10	0,128
		AB	1000	0,128
		ABC	Todas, exceto em 500 para 90°	0,128

A Fig. 11 ilustra o comportamento do erro percentual médio em toda extensão da LT para todos os tipos de faltas e ângulo de incidência de 90°. Em destaque às curvas de 100 Ω e 500 Ω, que apresentam os maiores e os menores erros percentuais médios para as faltas analisadas, respectivamente. Os maiores erros médios encontrados devem-se às faltas monofásicas AT e BT, visto que dada a sua desconsideração de resultados devido a alto erro local encontrado, a média do erro percentual foi calculada para uma menor quantidade de pontos na extensão da LT. A falta monofásica CT apresentou menores valores de erro percentual médio, independente da R_F analisada. Em contrapartida, as faltas bifásicas e trifásicas demonstraram menores valor de erro médio para a $R_F = 100 \Omega$.

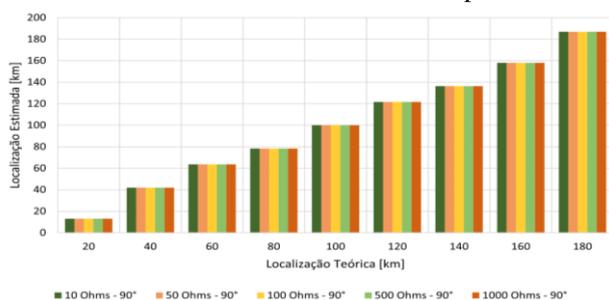


Fig. 9 Precisão da localização estimada para a falta CT.

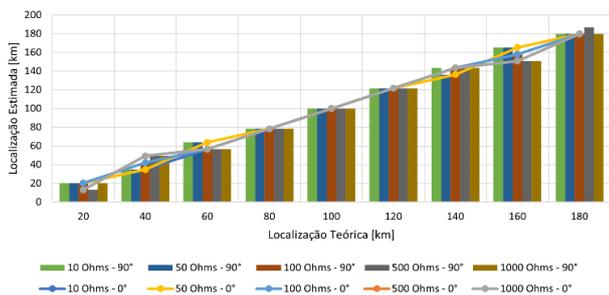


Fig. 10 Precisão da localização estimada para a falta ABC.



Fig. 11 Erro médio na extensão da LT.

7. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou a detecção e a classificação, a partir dos sinais de corrente em sua componente de sequência positiva, e a localização de faltas, com dados de dois terminais, utilizando a DVM associada com o OET para a extração dos dados característicos dos sinais de tensão em suas componentes de sequência positiva e a TOV para o cálculo da distância da ocorrência de falta na LT. As simulações foram realizadas

considerando a variação do ângulo de incidência para todos os tipos de faltas, do local de ocorrência e da resistência de falta, sem considerar as condições de carregamento do sistema.

A aplicação da DVM foi motivada em virtude do sinal em análise ser não estacionário e à sua característica técnica de decomposição do sinal, que apresenta melhor resolução para identificar o momento exato da brusca alteração de frequência no mesmo. Em contrapartida, a utilização do OET permitiu identificar as variações da magnitude e frequência do sinal com alta eficiência computacional, quando comparado à utilização da transformada de Hilbert, segundo a literatura e testes realizados pelos autores deste trabalho (Huai et al., 2021).

Observou-se que para as faltas monofásicas há um erro médio percentual maior na extensão da LT, para o ângulo de incidência da falta em 0°, quando comparado aos demais tipos de faltas, ao ponto dos autores terem desconsiderado a estimativa, dado o erro percentual ter sido maior que 15% do valor teórico. Comprovando assim a dificuldade de localização dada à magnitude mínima da tensão no momento de ocorrência da falta.

Quanto a variação da resistência de falta, notou-se pouca influência no comportamento do sistema para a estimativa da distância do local de falta ao terminal M, exceto nos 20% mais próximos de cada um dos terminais, em que a variação da R_F se mostrou mais relevante para a precisão do cálculo de estimativa, em valores específicos de R_{FS} , segundo o comportamento apresentado nas Figs. 6 a 8.

Portanto, através da análise realizada foi possível comprovar que a associação da DVM e OET aplicada à TOV soluciona o objetivo proposto para a localização de faltas no sistema teste estudado, sendo capaz de identificar o tempo de chegada da onda viajante no terminal de leitura com eficiência e apresentando precisão média dos resultados obtidos de 98,104%.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- Akmaz, D.; Mamis, M. S.; Arkan, M.; Tagluk, M. M. (2018) Transmission line fault location using traveling wave frequencies and extreme learning machine. *Electrical Power Systems Research*, v. 155, p.1-7.
- Bewley, L. V. (1931) Traveling waves on transmission systems. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, v. 50, n. 2, p. 532–550.
- Braz, V. S.; Souza, A. C. S.; Araújo, L. C.; Rodrigues, G. F. (2017) Estudo da decomposição em modos empíricos e sua aplicação em sinais não estacionários. XXXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, DOI: 10.14209/sbrt.2017.113.
- Brown, R. E. (2009) *Electric Power Distribution Reability*. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, p. 453.

- Chan, S.; Oktavianti, I; Puspita, V.; Nopphawan, P. Convolutional Adversarial Neural Network (CANN) for Fault Diagnosis within a Power System. *International Conference on Information and Communications Technology*, IEEE, p. 596-601, 2019.
- Chen, K.; Huang, C., He, J. (2016) Fault detection, classification and location for transmission lines and distribution systems: a review on the methods. *High Volt.*, v. 1, n. 1, p. 25–33.
- Coser, J. (2006) Contribuições aos métodos para localização de faltas em alimentadores de distribuição. 196 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC.
- Dragomiretskiy, K.; Zosso, D. (2014) Variational Mode Decomposition. *IEEE Transactions on Signal Processing*, v. 62, no. 3, pp. 531-544, Feb.1. DOI: 10.1109/TSP.2013.2288675.
- Fahim, S. R.; Sarker, S. K.; Muyeen, S. M.; Das, S. K.; Kamwa, I. (2021) A Deep Learning Based Intelligent Approach in Detection and Classification of Transmission Line Faults. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, DOI:10.1016/j.ijepes.2021.107102.
- Gale, P. F.; Crossley, P. A.; Xu, B.; Ge, Y.; Cory, B. J.; Barker, J. R. G. (1993) Fault Location Based on Travelling Waves. *Fifth International Conference on Developments in Power System Protection*, p. 54-59.
- Geethanjali, M.; Sathiya Priya, K. (2009) Combined wavelet transforms and neural network (WNN) based fault detection and classification in transmission lines. *International Conference on Control, Automation, Communication and Energy Conservation*. IEEE.
- Grainger, J. J.; Stevenson, W. D. (1986) *Power System Analysis*. 1. ed. New York: McGraw-Hill.
- Ge, M.; Gao, H.; Liu, Z.; Yu, D. (2019) Fault location of UHV DC transmission line based on variational mode decomposition and energy operator. *2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP)*, pp. 616-620. DOI: 10.1109/APAP47170.2019.9224996.
- Li, Z. B.; Wu, B. X.; Xu, Y. H. (2013) The Applied Research of the Hilbert-Huang Transform and Wavelet Transform in the Fault Location of Transmission Line. *Applied Mechanics and Materials*, v. 291-294, p. 2432-2436.
- Liguo, Z.; Xu, H.; Jian, J.; Tianye, G.; Yongsheng, M. (2009) Power Systems Faults Location with Traveling Wave Based on Hilbert-Huang Transform. *International Conference on Energy and Environment Technology*, IEEE Computer Society.
- Huai, Q.; Kaipei, L.; Hooshyar, A.; Ding, H.; Chen, K.; Liang, Q. (2021) Single-ended line fault location method for multi-terminal HVDC system based on optimized variational mode decomposition. *Electric Power Systems Research*, v. 194, 107054, ISSN 0378-7796, <https://doi.org/10.1016/j.epr.2021.107054>.
- Huang, N.; Attoh-Okine, N. O. (2005) *The Hilbert-Huang Transform in Engineering*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Kaiser, F. J. (1993) Some useful properties of Teager's energy operators. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, pp. 149-152 vol.3. DOI: 10.1109/ICASSP.1993.319457.
- Krysztof, G.; Kowalik, R.; Rasolomampionona, D.; Anwar, S. (2011) Traveling Wave Fault Location in Power Transmission Systems: An Overview. *Journal of Electrical Systems*, p. 287-296.
- Manglik, A.; Li, W.; Ahma, S. U. (2016) Fault detection in power system using the Hilbert-Huang Transform. *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, 16429278. Canada: IEEE.
- Mamede Filho, J. M.; Mamede, D. R. (2020) *Proteção de sistemas elétricos de potência*. 2. Ed. Rio de Janeiro: LTC.
- Moravej, Z.; Movahhedneya, M.; Radman, G.; Pazoki, M. (2015) Effective fault location technique in three-terminal transmission line using Hilbert and discrete wavelet transform. *International Conference on Electro/Information Technology (EIT)*, 15519739. USA: IEEE. DOI: 10.1109/EIT.2015.7293336
- Rilling, G.; Flandrin, P.; Gonçalves, P. A. A. (2003) On empirical mode decomposition and its algorithms. *EURASIP Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing*. Grado, Italy: IEEE.
- Sato, F.; Freitas, W. *Análise de curto-circuito e princípios de proteção em sistemas de energia elétrica*. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.
- Saha, M. M., Izykowski, J., & Rosolowski, E. (2010). *Fault Location on Power Networks*. Power Systems. 1. Ed. London: Springer.
- Sahani, M.; Dash, Pk.K. (2019) Fault location estimation for series-compensated double-circuit transmission line using parameter optimized variational mode decomposition and weighted P-norm random vector functional link network, *Applied Soft Computing*, v. 85, 105860, ISSN 1568-4946. DOI: 10.1016/j.asoc.2019.105860.
- Silveira, P. M.; Seara, R.; Zurn, H. H. (2001) Localização de faltas por ondas viajantes - uma nova abordagem baseada em decomposição wavelet. *Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, p.–.
- Singh, B.; Mahela, O. P.; Manglani, T. (2018) Detection and Classification of Transmission Line Faults Using Empirical Mode Decomposition and Rule Based Decision Tree Based Algorithm. *8th Power India International Conference (PIICON)*, IEEE.
- Stringfield, T. W.; Marhart D. J.; Stevens R. F.; (1957) Fault Location Methods for Overhead Lines. *Transactions of the AIEE, part III – Power Apparatus and Systems*, v. 76 (Aug.), p. 518-539.
- Xiao'an, Q.; Zeng, X.; Xiaoli, Z.; Zewen, L. (2008) Traveling Wave Based Distribution Lines Fault Location Using Hilbert-Huang Transform. *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, p.–.
- Zanetta Jr., L. C. (2020) *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*. 2. ed. São Paulo: EdUSP.
- Zhang, Q.; Ma, W.; Li, G.; Ding, J.; Xie, M. (2022) Fault diagnosis of power grid based on variational mode decomposition and convolutional neural network, *Electric Power Systems Research*, v. 208, 107871, ISSN 0378-7796. DOI: 10.1016/j.epr.2022.107871.