

Aplicação da Transformada de Hilbert-Huang na Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Utilizando a Teoria das Ondas Viajantes

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 an application of the Hilbert-Huang transform and the traveling wave theory for fault location in transmission lines, using data from two terminals, for a test system with a 200 km long transmission line between two voltage sources. The MATLAB/Simulink® software was used to simulate different fault conditions and analyze the voltage signals, through the programmed algorithm, to estimate the fault location. The numerical and graphical results obtained proved the efficiency and high precision in locating the fault for the methodology used, when compared to the techniques found in the literature, considering all types of faults, different fault occurrence locations and fault resistances.

Resumo: Este artigo apresenta a aplicação da transformada de Hilbert-Huang e a teoria das ondas viajantes para a localização de faltas em linhas de transmissão, a partir de dados de dois terminais, para um sistema teste que possui uma linha de 200 km entre duas fontes de tensão. O *software* MATLAB/Simulink® foi utilizado para a simulação de diferentes condições de falta e análise dos sinais de tensão, através do algoritmo programado, para o cálculo da localização da falta. Os resultados numéricos e gráficos obtidos comprovaram a eficiência e alta precisão na estimação da localização da falta para a metodologia utilizada, quando comparados às técnicas encontradas na literatura, considerando todos os tipos de faltas, a variação do local de ocorrência e resistência da falta.

Keywords: Fault diagnostics; fault classification; fault location; Hilbert-Huang Transform; traveling wave theory; transmission lines.

Palavras-chaves: Diagnósticos de faltas; classificação de faltas; localização de faltas; transformada de Hilbert-Huang; teoria das ondas viajantes; linha de transmissão.

1. INTRODUÇÃO

A localização de faltas é um problema desafiador dada a emergência de atuação e identificação precisa da ocorrência, a fim de permitir a rápida restauração do sistema elétrico em que há a demanda por energia de qualidade. Em virtude da grande exposição, as linhas de transmissão (LT) são responsáveis por aproximadamente 68% das interrupções não programadas do sistema elétrico. Cerca de 78% das faltas podem ser monofásicas, 14 % podem ser bifásicas e 8% podem ser trifásicas, compreendendo ou não o terra (Mamede Filho; Mamede, 2020; Sato; Freitas, 2015). Assim, a avaliação da qualidade do serviço é imprescindível, devido a necessidade da constante melhoria nos indicadores de continuidade do fornecimento de energia elétrica.

Devido à ocorrência da falta, componentes de alta frequência surgem sobrepostos à componente da frequência fundamental

nas formas de onda de tensão e corrente. Esses componentes de alta frequência resultam das ondas viajantes/trafegantes que se propagam em velocidades próximas à velocidade da luz e se refletem nos extremos e descontinuidades do sistema elétrico (Brown, 2009; Zanetta Jr., 2020).

A análise dos métodos de localização de faltas em sistemas aéreos tem sido empregada há muitas décadas (Stringfield; Marihart; Stevens, 1957). Os métodos para a localização de faltas podem ser baseados em três classes: teoria dos circuitos, técnicas de ondas viajantes (TOV) e aplicação de inteligência artificial (Geethanjali; Sathiyi 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 extrair as mensagens que o sinal carrega consigo. A

transformada de Fourier é a precursora para a análise de sinais, porém não é adequada para análises de sinais no domínio do tempo para o caso de sinais não estacionários (Xiao'an et al., 2018). A transformada Wavelet (TW) é um dos métodos mais utilizados na extração dos dados característicos dos sinais para o diagnóstico de faltas em sistemas de potência, pois analisa sinais não estacionários (Chen; Huang; He, 2016). A transformada de Hilbert-Huang (THH) é um método de análise mais adaptativa, muito aplicável para sinais não estacionários em sistemas não lineares. A THH realiza a decomposição dos sinais e considera oscilações nos sinais em locais específicos (Rilling; Flandrin; Gonçalves, 2003).

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. Silveira, Seara e Zurn (2001) apresentaram a localização de faltas em linhas de transmissão utilizando a transformada Wavelet Daubechies-4 (Db4) e a teoria das ondas viajantes. Jimenez et al. (2021) utilizaram a técnica WCM (*Wavelet Correlation Modes*) e autovalores para representação do sinal em um algoritmo melhorado para a localização de faltas em um sistema com múltiplos terminais. Shaik e Pulipaka (2015), Sharma, Saini e Saxena (2016) e Fahim et al. (2021) utilizaram a TW (Bior4.4, Db4 e Db4, respectivamente) para a extração de características dos dados na detecção da falta e diferentes arquiteturas das Redes Neurais Artificiais (RNA) para a classificação da falta. Ligo et al. (2009) utilizaram a THH para a identificação do tempo de chegada da onda viajante, que pode ser precisamente detectada pela amplitude instantânea e o trabalho faz a análise de uma falta monofásica em um sistema de potência. Aggarwal, Malik e Sharma (2016) e Singh, Mahela e Manglani (2018) apresentaram a extração das características dos dados usando a decomposição de modo empírico (EMD) e a classificação das faltas através da rede neural probabilística e algoritmo da árvore de decisão, respectivamente.

Xiao'an et al. (2018) e Huang e Attoh-Okine (2005) apresentam uma análise comparativa das características das transformadas de Fourier, Wavelet e de Hilbert-Huang para a análise de dados em sinais. Nota-se vantagens quanto a aplicação da THH em relação à TW, como a sua independência de uma função base para análise (visto que a TW depende de uma Wavelet mãe) e a capacidade de descrever a frequência conforme a variação do tempo. Possibilitando assim, menor erro na estimativa da localização de falta, pois a THH é capaz de melhor identificar a frequência instantânea máxima do sinal com o distúrbio. Assim, a partir dessa identificação, associa-se tal amplitude característica ao tempo de chegada da onda no terminal de leitura. A literatura considera nas simulações para a localização de faltas, principalmente: a variação do local da falta, o ângulo de incidência da falta e diferentes resistências de faltas.

Diferente dos trabalhos que utilizam a THH somente para detecção e classificação de faltas (Manglik; Li; Ahmad, 2016; Aggarwal; Malik; Sharma, 2016; Singh; Mahela; Manglani, 2018; Kapoor, 2019; Cesário et al., 2020), este trabalho utiliza

também o método para a localização de faltas combinado à TOV, assim como em (Ligo et al., 2009; Li; Wu; Xu, 2013), que estimam a localização para um tipo de falta bifásica com terra e monofásica, respectivamente. No entanto, este trabalho apresenta o estudo para todos os tipos de faltas, com a variação do local da falta, simulando ocorrências a cada 10% em todo o comprimento da linha de transmissão, e variando as resistências de falta. O ângulo de incidência foi considerado fixo em 90°.

O texto está organizado como segue: as seções 2 e 3 abordam os conteúdos da teoria das ondas viajantes e transformada de Hilbert-Huang, respectivamente. Na seção 4 apresenta-se a aplicação da THH para a localização de faltas no sistema elétrico de potência. A análise dos resultados e discussões são apresentadas na seção 5. E as conclusões do trabalho são apresentadas na seção 6.

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, como apresenta a Fig. 1 (Krzysztof et al., 2011).

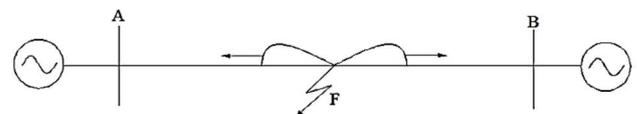


Fig. 1 Propagação de uma onda eletromagnética resultante de uma falta.

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.

O tempo de propagação (τ) do ponto da falta até o local medido é dado por (3) (Akmaz et al., 2018).

$$\tau = \frac{x}{v} \quad (3)$$

onde, x é a distância entre o ponto da falta até o local medido.

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).

Os localizadores de ondas viajantes podem ser divididos em cinco tipos: A, B, C, D e E, segundo o método de medida adotado. Os cinco tipos são apresentados em Gale et al. (1993). Localizadores do tipo D, utilizados neste trabalho, executam medidas em ambos os terminais da linha. Para a correta determinação da distância, o tipo D requer o uso de dois dispositivos sincronizados nos terminais da linha. Ao se empregar dados de dois terminais, os métodos que empregam ondas viajantes têm uma excelente precisão (Coser, 2006).

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 (4).

$$d = \frac{l + (t_{11} - t_{21}) \cdot v}{2} \quad (4)$$

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, segundo a Fig. 1, dado em s.

3. TRANSFORMADA DE HILBERT-HUANG

A transformada de Hilbert-Huang criada por Huang et al. (1998) é um método de análise muito aplicável para sinais não estacionários e usa a EMD, que não admite uma definição analítica e é um algoritmo adaptativo para decompor sinais não estacionários em funções de modo intrínseco (IMF) (Rilling; Flandrin; Gonçalves, 2003).

A decomposição do sinal em um número finito, geralmente pequeno, de funções de modo intrínseco é parte da transformada de Hilbert-Huang 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 IMFs é chamado de peneiramento (*sifting*) (Braz et al., 2017).

A Fig. 2 apresenta a árvore da EMD, em que $s(t)$ é o sinal original, que é composto pelas componentes de IMFs $c_i(t)$ e pelo resíduo do sinal $r_i(t)$, resultante da decomposição do mesmo (Xiao'an et al., 2008).

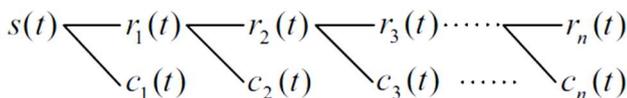


Fig. 2 Árvore da decomposição empírica dos modos.

Após a decomposição, a transformada de Hilbert é aplicada ao IMF para obter a frequência instantânea dos dados. Quando o sinal é decomposto em uma série de IMFs $c_i(t)$, sua transformada de Hilbert correspondente é definida como (5) (Liguó et al., 2009; Xiao'an et al., 2008).

$$Y_i(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{c_i(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (5)$$

A apresentação final dos resultados é uma distribuição energia-tempo-frequência, chamada de espectro de Hilbert (Huang et al., 1998). A Fig. 3 ilustra a THH resumidamente.



Fig. 3 Resumo descritivo da THH.

Assim, um sinal analítico $Z_i(t)$ pode ser construído como (6).

$$Z_i(t) = c_i(t) + jY_i(t) = a(t)e^{j\theta(t)} \quad (6)$$

onde, $a_i(t)$ é a amplitude instantânea definida por (7) e $\theta_i(t)$ é a fase instantânea definida por (8).

$$a_i(t) = [c_i(t)^2 + Y_i(t)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$\theta_i(t) = \arctan(Y_i(t)/c_i(t)) \quad (8)$$

A frequência instantânea $f_i(t)$ de $c_i(t)$ é resultante de (9).

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta_i(t)}{dt} \quad (9)$$

4. APLICAÇÃO DA THH PARA A LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

4.1 Sistema teste estudado

O sistema proposto consiste em uma linha de transmissão de 200 km, operando em 60 Hz, entre duas fontes, que representam grandes áreas com o suprimento de energia. A Fig. 4 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.

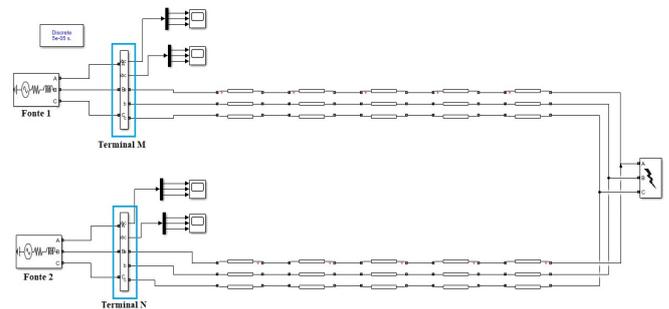


Fig. 4 Sistema teste para o estudo das situações de faltas.

4.2 Metodologia proposta para a localização de faltas

A Fig. 5 ilustra a metodologia proposta para a localização de faltas em um sistema teste de transmissão de energia, que utiliza os dados de dois terminais, sendo um terminal de medição e o outro um terminal remoto, com a análise dos sinais de tensão da(s) fase(s) faltosa(s).

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	

Inicialmente, diferentes tipos de faltas são simuladas, com a variação do local de ocorrência na linha e da resistência de falta. A análise é realizada através dos sinais de tensões lidos no sistema faltoso, que são gravados nos terminais M e N. Logo após, os sinais de tensões no terminal M são decompostos em suas IMFs, nos seus respectivos níveis e a IMF do nível 1 (IMF1) é utilizada para a aplicação da transformada de Hilbert. Os sinais de tensão foram decompostos utilizando uma frequência de amostragem de 20 kHz.

Para a detecção da ocorrência de falta, o módulo do vetor resultante de cada fase é analisado e o valor equivalente ao momento subtransitório é chamado de coeficiente de Hilbert-Huang (CHH), que é, posteriormente, utilizado na classificação do tipo de falta.

Na classificação quanto ao tipo da falta, a análise é realizada nos dados de tensões lidos no terminal M e tendo definido o CHH para cada uma das fases, o valor é comparado com o equivalente a 50% do CHH quando o sistema está sem falta (CHHsf). Caso o valor do CHH seja menor do que 0,5xCHHsf, a fase está faltosa. Caso contrário, a fase está sã. O valor percentual de 50% foi determinado por tentativa e erro, a partir do comportamento observado para o período de ocorrências da falta nas simulações realizadas.

A THH é capaz de identificar o tempo de ocorrência da falta com sucesso, através da decomposição do sinal faltoso lido em suas IMFs, a primeira IMF é escolhida em razão da melhor caracterização dos dados e a transformada de Hilbert é aplicada. Assim, o cálculo da localização é realizado através da teoria das ondas viajantes utilizando (4), em que o tempo equivalente ao máximo valor do módulo do vetor encontrado na transformada de Hilbert resultante da primeira fase faltosa analisada, para ambos os terminais, é identificado e escolhido para estimação da distância.

Vale ressaltar que, apesar deste trabalho utilizar os dados dos sinais de tensão para todas as etapas do processo, para a detecção e classificação de faltas, os sinais de correntes podem ser também utilizados para as soluções. No entanto, por recomendação da literatura e testes que foram realizados pelos autores, os dados obtidos pelos sinais de tensão são capazes de melhor determinar a localização da falta no sistema de potência (Liguio et al., 2009; Moravej et al., 2015).

A programação do algoritmo da transformada Hilbert-Huang e o cálculo da localização da falta, que utiliza a teoria das ondas viajantes, foi realizada em linhas de comando, no ambiente do MATLAB®. Os dados de tensão das faltas simuladas são gerados usando o *SimPowerSystems toolbox*, no ambiente do Simulink®.

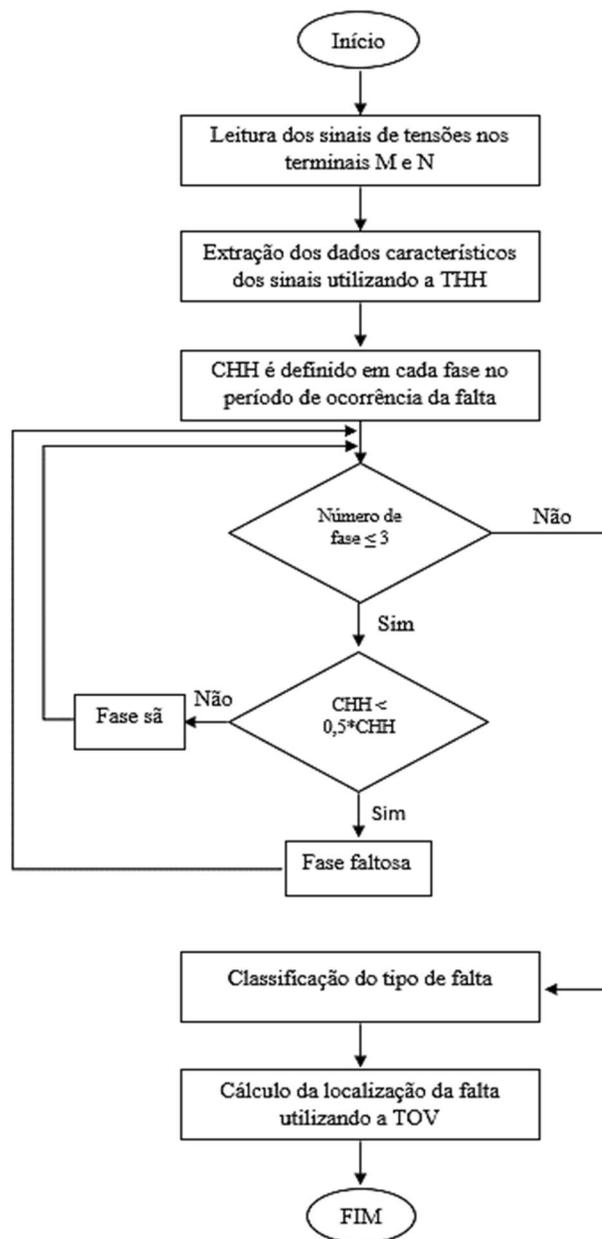


Fig. 5 Metodologia proposta para a análise das faltas.

5. 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 análise das etapas neste processo, os sinais de tensões foram lidos em ambos os terminais (M e N) das fontes de

tensão de 765 kV e os mesmos são decompostos a partir do algoritmo que utiliza a transformada de Hilbert-Huang para a extração dos dados característicos dos sinais. As tensões são lidas 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.

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 taxa de acerto para a classificação das faltas é de 100%, porém devido a análise ser realizada pelo sinal de tensão, o algoritmo não faz menção se há o aterramento nas faltas bifásicas e trifásicas.

A variação da resistência de falta (R_F) foi realizada utilizando os valores de 1 Ω , 10 Ω , 20 Ω , 50 Ω , 60 Ω e 100 Ω .

O erro entre a distância estimada e distância teórica foi calculado usando (10).

$$\text{Erro (\%)} = \frac{d_{THH-TOV} - d_{exato}}{l} 100\% \quad (10)$$

onde, d_{THH-T} é a distância estimada, calculada através da utilização da THH aplicada à teoria das ondas viajantes; d_{exato} é a distância exata da falta, o valor definido na simulação; l é o comprimento total da linha de transmissão (Saha; Izykowski; Rosolowski, 2010; Akmaz et Al., 2018; Ahmadimanesh; Shahrtash, 2013).

A Fig. 6 ilustra o comportamento da corrente oriunda de uma falta do tipo bifásica sem terra (AB), no instante de 0,02 s, em 90% da LT, com $R_F = 1 \Omega$. Da Fig.7 à Fig. 11 apresentam-se o comportamento dos processos realizados pelo algoritmo que utilizam a THH para a localização da falta, com o erro de 0,128%, para a ocorrência no instante de 0,1 s.

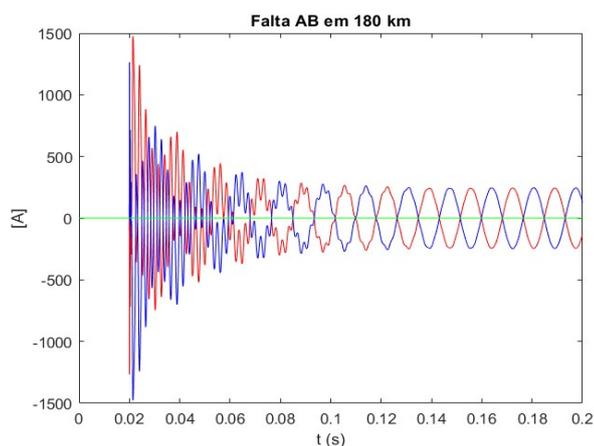


Fig. 6 Correntes oriundas da falta AB.

A Fig. 7 mostra a decomposição empírica dos modos do sinal lido da fase A, no terminal M, suas respectivas IMFs e o residual, a partir do sinal lido no sistema de potência para o período de amostragem adotado de 5×10^{-5} s.

As Figs. 8 e 9 representam o comportamento da amplitude instantânea para a fase A lida em ambos os terminais (M e N),

respectivamente. Através do valor máximo encontrado, após a ocorrência da falta, em 0,1 s, obtém-se o tempo em que a frente de onda chega ao terminal e possibilita o cálculo da localização da falta, que utiliza a teoria das ondas viajantes. Os valores encontrados mostram que a THH é capaz de extrair efetivamente as singularidades da onda viajante, permitindo assim uma alta precisão da localização da falta.

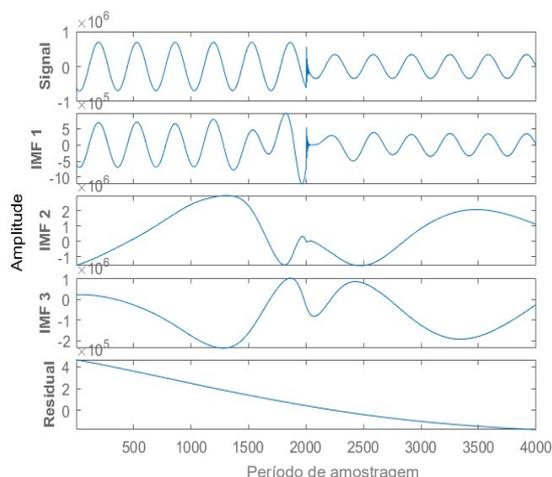


Fig. 7 EMD da fase A lida no terminal M.

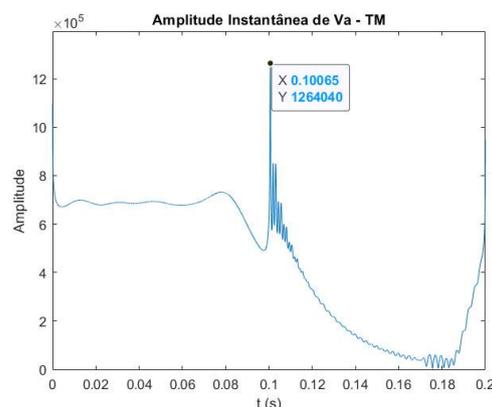


Fig. 8 Amplitude instantânea no terminal M da falta AB.

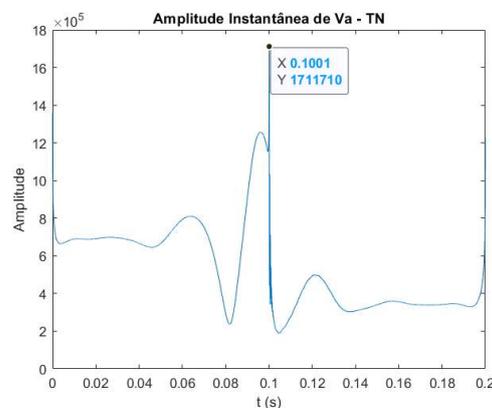


Fig. 9 Amplitude instantânea no terminal N da falta AB.

As Figs. 10 e 11 apresentam o resultado gráfico da transformada de Hilbert-Huang, que é a distribuição energia-tempo-frequência, também conhecida como espectro de Hilbert. Em que, para o eixo das ordenadas, a frequência tem a sua ordem de 10^4 Hz e para o tempo, no eixo das abscissas, em 10^{-1} s. Nota-se que, para o regime permanente, no terminal M, a energia para a fase analisada, apresenta seu valor entre -100 dB e -150 dB. Após a ocorrência da falta, no tempo após 0,1 s, há o aumento considerável da energia, observando uma variação de -50 dB a 50 dB, predominando valores próximos ao limite máximo. Enquanto, para o terminal N é possível observar o valor máximo de energia, para toda a variação de frequência, principalmente, no momento da falta.

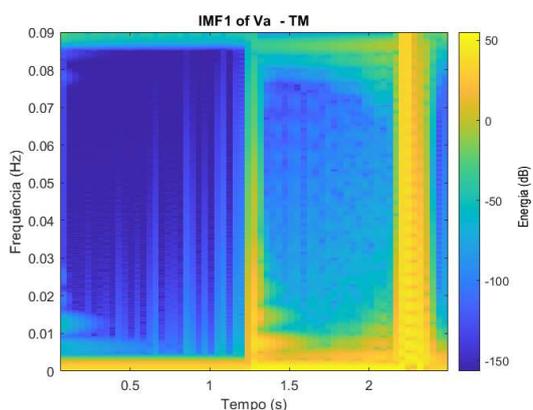


Fig. 10 Espectro de Hilbert para a fase A no terminal M.

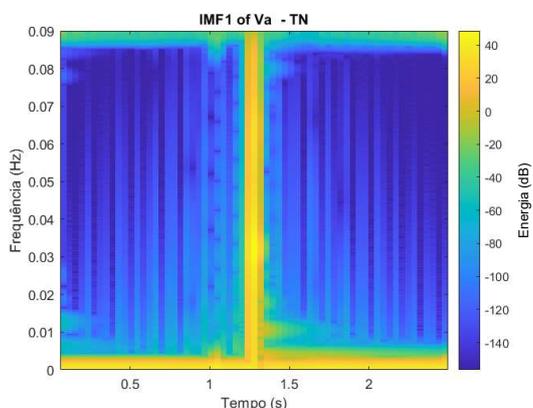


Fig. 11 Espectro de Hilbert para a fase A no terminal N.

Ao todo, considerando todos os tipos de falta, a variação da localização da falta e da resistência de falta, 540 cenários foram analisados e a Tabela 2 apresenta uma fração da análise com o objetivo de demonstrar os resultados encontrados.

As Figs. 12 e 13 apresentam as análises comparativas do erro com a R_F e a localização da falta na extensão da LT, respectivamente, baseadas nos casos apresentados na Tabela 2. Na Fig. 12 é possível observar a influência da R_F na precisão da localização da falta em que, generalizando, o valor de 1Ω apresenta resultados com melhor precisão (geralmente, com erro menor que 1%) para diferentes tipos e locais de ocorrências das faltas.

Enquanto na Fig. 13, observa-se que o erro percentual é menor quanto mais próximo, até 20 km neste caso (10% da LT), a falta estiver do terminal de leitura do sinal. A exceção é para a ocorrência a 50% da LT em que o erro é de 0%, para todos os tipos de faltas e independente da R_F utilizada não houve alteração na precisão da localização da falta. Nota-se que há uma simetria da precisão na localização das faltas em relação aos terminais observados.

Tabela 2 Resultados encontrados para o sistema teste.

Tipo de Falta	R_F (Ω)	Localização (km)		Erro (%)
		Teórica	Calculada	
BC, AB, ABCG	1	20	20,254	0,128
ABCG, ABG	1	40	42,000	1,002
AG	50	40	42,000	1,002
ABCG, AB	1	60	56,500	1,749
AG	20	60	56,500	1,749
ABCG, BC, ABG	1	80	78,250	0,874
AG, BG, CG, ACG, ABG, BCG, ABC, ABCG	1	100	100,000	0
AC, AB	10	100	100,000	0
ABC, ABCG, AB	1	120	121,750	0,874
ABCG, ABC, AB	1	140	143,490	1,749
AG	20	140	143,490	1,749
CG	100	140	143,490	1,749
AB, ABCG	1	160	157,990	1,002
CG	60	160	157,990	1,002
ABCG, AB	1	180	179,745	0,128

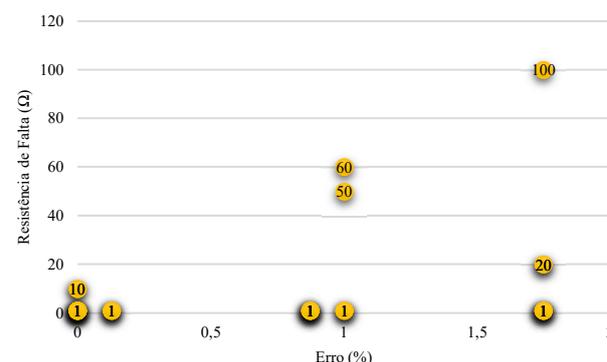


Fig. 12 Análise do erro variando a resistência de falta.

A Tabela 3 apresenta uma análise específica da precisão do cálculo de localização para a falta monofásica (AG). Nota-se que a precisão para localizar a falta é prejudicada quando a resistência de falta é variada em sua incidência simulada para os pontos de ocorrência observados. Ou seja, o menor erro de localização depende do valor da R_F para tal tipo de falta e local de ocorrência. Esta sensibilidade pode ser atribuída à técnica

de extração dos dados característicos, neste trabalho a THH utiliza a EMD. Observou-se que quando varia-se a R_F , a resolução para identificação do sinal é alterada, conforme testes realizados pelos autores. Para melhoria dessa precisão, sugere-se a utilização da THH com a *Ensemble Empirical Mode Decomposition* (EEMD) para avaliar melhor independência da variação da R_F (Li; Wu; Xu, 2013).

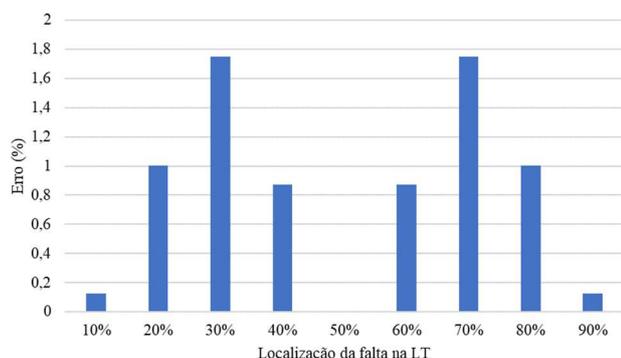


Fig. 13 Variação do erro na extensão da LT.

Tabela 3 Análise da precisão variando a resistência de falta.

$R_F(\Omega)$	Erro da localização da Falta (%)	
	Ocorrência em 20% da LT	Ocorrência em 70% da LT
$R_F = 20 \Omega$	11,876	1,749
$R_F = 50 \Omega$	1,002	8,998

Através dos resultados obtidos nesse trabalho, investigou-se também a eficiência da técnica empregada para a extração dos dados característicos dos sinais de tensão nos terminais M e N, comparando o intervalo dos erros percentuais obtidos para os cenários analisados, que é menor quando observado os resultados das metodologias encontradas na literatura, para sistemas análogos ao estudado nesse artigo, como a transformada rápida de Fourier e a transformada Wavelet (Akmaz et al., 2018; Bello; Siriani, 2018). A Tabela 4 apresenta os valores mínimos e máximos dos erros encontrados pelos autores e na literatura.

Tabela 4 Comparação das técnicas de análise dos sinais.

Técnica aplicada	Erro médio (%)
Transformada rápida de Fourier	[0,18-6,58]
Transformada Wavelet	[0,12-2,47]
Transformada de Hilbert-Huang	[0,13-1,75]

6. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou a detecção, classificação e localização de faltas com dados de dois terminais utilizando a THH para a extração dos dados característicos dos sinais de tensão e a TOV para o cálculo da localização da ocorrência da falta na LT. As simulações foram realizadas considerando todos os tipos de faltas, com variação do local e da resistência de falta, sem considerar as condições de carregamento do sistema.

A aplicação da THH foi motivada devido o sinal em análise ser não estacionário, ou seja, há variação da frequência no tempo. Os resultados comprovaram que a THH é capaz de identificar o tempo de chegada da onda viajante no terminal com eficiência e apresentou precisão média dos resultados analisados de 99,26%.

Portanto, através da análise realizada foi possível comprovar que a associação da THH aplicada à TOV soluciona o objetivo proposto para a localização de faltas no sistema teste estudado, apresentando menor intervalo do erro percentual quando comparado com os resultados encontrados na literatura.

REFERÊNCIAS

- Aggarwal, A.; Malik, H.; Sharma, R. (2016) Feature extraction using EMD and classification through Probabilistic Neural Network for fault diagnosis of transmission line. *International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), IEEE*.
- Ahmadimanesh, A.; Shahrtash, S. M. (2013) Time-time-transform-based fault location algorithm for three-terminal transmission lines. *IET Generation, Transmission & Distribution*, v. 7, n. 5, p. 464–473.
- 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.
- Bello, A. Sirjani, R. (2018) A Comparative Study of Different Traveling Wave Fault Location Techniques. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, v. 13, i. 5, p. 71-85.
- 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/sbse.2017.113.
- Brown, R. E. (2009) *Electric Power Distribution Reability*. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, p. 453.
- Cesário, F. R.; Moreira, F. A.; Neves, W. A.; Neri Jr., A. L. (2020) Análise Comparativa na Detecção de Falta: Transformada Wavelet e Transformada de Hilbert-Huang. XXIII Congresso Brasileiro de Automática, DOI: <https://doi.org/10.48011/asba.v2i1.1301>.
- 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.
- 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 transoms 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.
- 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.
- Huang, N. E.; Shen, Z.; Long, S. R.; Wu, M. C.; Shih, H. H.; Zheng, Q.; Yen, N. C.; Tung, C. C.; and Henry H. Liu. (1998) The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society Lond. A*, v. 454, p. 903-995.
- Huang, N.; Attoh-Okine, N. O. (2005) *The Hilbert-Huang Transform in Engineering*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Jimenez, H. A.; Guillen, D.; Tapia-Olvera, R.; Escobar, G.; Beltran-Carbajal, F. (2021) An improved algorithm for fault detection and location in multi-terminal transmission lines based on wavelet correlation modes. *Electric Power Systems Research*, v. 192, p.–.
- Kapoor, G. (2019) Detection and classification of four phase to ground faults in a 138 kV six phase transmission line using Hilbert Huang transform. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, v. 11, n. 4.
- Kryzstof, 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.
- Shaik, A. G.; Pulipaka, R. R. V. (2015) A new wavelet based fault detection, classification and location in transmission lines. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 64, p. 35-40.
- Sharma, P.; Saini, D.; Saxena, A. (2016) Fault Detection and Classification in Transmission Line Using Wavelet Transform and ANN. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, v. 5, n. 3, p. 284-295.
- 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.; Marihart 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.