

Estudo Comparativo de Técnicas Utilizadas na Detecção de Falhas em Linhas de Transmissão pela Abordagem Baseada na Análise Espectral do Sinal

Frederico R. Cesário*. Fernando A. Moreira**.
Washington A. Neves ***.

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

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

*** Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Campina Grande
Campina Grande, Brasil(e-mail: waneves@dee.ufcg.edu.br)

Abstract: This article presents the result of the comparison between three techniques used to detect the travelling wave signal for power lines fault location. The methods have in common the identification of the dominant frequencies of the traveling waves at the transmission line terminals as the transients propagate along the line. Among the three signal processing techniques considered, two are more traditional, the Short Time Fourier Transform (STFT) and the Wavelet Transform (WT). The third technique is the Hilbert-Huang Transform (THH), a new approach based on an elaborate adaptive method used for data analysis of non-linear and non-stationary processes. The three techniques have in common the spectrogram whose analysis provides signal parameters, among them, the instant of arrival of the traveling wave at the measuring terminal at the end of the line. The result of the comparison shows that the Hilbert-Huang Transform can accurately extract the arrival time of the traveling wave.

Resumo: Este artigo apresenta a comparação entre três técnicas utilizadas para detectar o sinal da onda viajante para a localização de falhas em linhas de transmissão. Os métodos têm em comum a identificação de frequências dominantes das ondas viajantes incidentes nas extremidades conforme propagação dos transitórios ao longo da linha. Dentre as três técnicas de processamento de sinais consideradas, duas são mais tradicionais, a Transformada de Fourier de Tempo Curto (STFT) e a Transformada Wavelet (TW). A terceira técnica é a Transformada de Hilbert-Huang (THH), uma nova abordagem por método adaptativo elaborado usado para análise de dados de processos não lineares e não estacionários. As três técnicas têm em comum o espectrograma cujo resultado da análise traz parâmetros do sinal, dentre eles, o instante de chegada da onda viajante no terminal de medição da extremidade da linha. O resultado da comparação mostra que a Transformada de Hilbert-Huang pode extrair com precisão o tempo de chegada da onda viajante.

Keywords: Short Time Fourier Transform; Wavelet Transform; Hilbert-Huang transform; Spectrogram; Fault current; Fault Detection..

Palavras-chaves: Transformada de Fourier de Tempo Curto; Transformada Wavelet; Transformada de Hilbert-Huang; Espectrograma; Corrente de falta; Detecção de falta.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de sistemas digitais para proteção e controle dos sistemas elétricos tem contribuído para o aumento da segurança e da confiabilidade do sistema. O software dedicado de um relé digital do sistema de proteção identifica defeitos e auxilia a manutenção da continuidade ou do restabelecimento do fornecimento de energia da área em falta, dentro do menor tempo possível. Dentre as tarefas básicas do sistema de proteção, duas etapas são a detecção e a classificação de falhas. Uns dois princípios mais usados para a detecção é o da comparação de amostras de corrente fase a fase conforme parâmetros estipulados de operação. Se ocorrer uma mudança significativa entre a nova amostra e a correspondente um ciclo antes, em qualquer uma das três correntes de linha, a falta será detectada. A classificação da falta é incorporado ao algoritmo para permitir uma rápida identificação das fases em falta e, com isso, diminuir o tempo do cálculo dos parâmetros que

identificarão a localização da falta (Coury et al., 2011). Diversas pesquisas são relatadas no sentido de desenvolver sistemas de processamento e análise de dados a fim de proporcionar a assistência necessária para tomada de decisão para reduzir a quantidade de falhas que ocorrem no sistema elétrico como também a duração destas falhas.

Curtos-circuitos podem conter oscilações e impulsos de alta frequência, geralmente não estacionários, compostos pela componente fundamental, componente CC e uma certa combinação de harmônicos. Existem técnicas de detecção que utilizam métodos baseados nos componentes de frequência fundamental e métodos baseados nos transitórios de alta frequência gerados pela falta. Esses últimos são conhecidos na literatura como métodos de ondas viajantes (Coury et al., 2011). Neste artigo, utilizando o método de ondas viajantes, são aplicadas de forma individual para o mesmo sinal amostrado três técnicas distintas, a Transformada de Fourier de Tempo Curto, a Transformada Wavelet e a Transformada

de Hilbert Huang, as quais usam em comum o espectrograma como representação da informação em ambos os domínios, tempo e frequência, com alta taxa de amostragem, para identificar a presença de transitórios de alta frequência.

O artigo é estruturado em duas partes. A primeira, seção 2, traz a fundamentação teórica resumida da Transformada de Fourier de Tempo Curto, da Transformada Wavelet e da Transformada de Hilbert-Huang que respalda as metodologias empregadas. A Segunda tem as seções 3 e 4. A 3 traz o sinal a ser analisado pelos três métodos para comparação, obtido pela simulação da falta no ATP do sistema de transmissão da Fig.2. Seção 4 tem espectrograma com a detecção da falta de cada técnica e a discussão considerando a precisão do instante da falta e características do método.

2. BASE TEÓRICA

A seguir é apresentada a fundamentação teórica que servirá de base para a análise e interpretação dos resultados das simulações.

2.1 Transformada de Fourier de Tempo Curto

A Transformada de Fourier de Tempo Curto (STFT) é uma ferramenta poderosa que permite analisar o espectro de frequência de um sinal não periódico. É uma função de duas variáveis: tempo t e a frequência ω . Consiste em rastrear o comportamento espectral ao longo do tempo executando a transformada rápida de Fourier em vários segmentos de janela de sinal (Souza, 2004). Em (1) a STFT representa o conteúdo espectral a cada instante de um sinal:

$$X_t(e^{j\omega}) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \omega(t-m) \cdot x(m) \cdot e^{j\omega m} \quad (1)$$

Em (1) $\omega(t-m)$ é uma sequência de janelas reais que determinam a porção do sinal de entrada que recebe ênfase para um índice de tempo particular, t , onde $\omega = 2\pi k/N$ é a frequência em radianos, N é número total de amostras de bandas de frequência de índice k , com $k = 0, 1, \dots, N-1$, $\omega(m)$ é a janela simétrica selecionada de tamanho L amostras, sendo $L \leq N$ para que o sinal seja reconstruído. O tamanho de L é definido a partir da informação prévia do sinal de modo a ter a segurança que o intervalo escolhido seja aproximadamente estacionário.

Quando consideramos $X_t(e^{j\omega})$ como a transformação Fourier de uma sequência $\omega(t-m)x(m)$, com $-\infty < m < \infty$ e t fixo, temos que o STFT será função do tempo de t , que leva todos os valores inteiros de modo a "deslizar" a janela $\omega(t-m)$ ao longo da sequência $x(m)$.

A função da janela usada é *Hanning* e pode ser escrita da seguinte forma:

$$\omega(n) = \begin{cases} 0,5 - 0,5 \cos\left(\frac{2\pi n}{M-1}\right), & 0 \leq n \leq M-1 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2)$$

Ao multiplicar a função da janela pelo sinal de entrada, o mesmo é dividido em pequenos segmentos no tempo (Souza, 2004), (Carvalho, 2013). Assim, cada janela exhibe o conteúdo

espectral deste intervalo de tempo que mapeia o sinal em uma função bidimensional de tempo e frequência. Independentemente dos componentes serem de alta ou baixa frequência, o tamanho da janela será o mesmo. Na relação entre tempo e frequência, quanto maior a precisão no tempo, menor será a precisão em frequência, e vice-versa (Carvalho, 2013).

2.2 Transformada Wavelet

A técnica da Transformada Wavelet possibilita a extração de aspectos locais do sinal analisado, sendo possível realizar uma análise espectral de determinado ponto de um sinal não estacionário (Oliveira, 2007). Por possuírem propriedades de localização, podem ser usadas com um número pequeno de coeficientes necessários para representar um sinal com muitas informações (Pinto, 2005).

A Transformada Wavelet na forma Discreta (TWD) pode ser usado matematicamente de duas maneiras, ortonormalmente ou por quadros. O método de quadro é a implementação computacional da Transformada Wavelet, resultando na decomposição da frequência e do tempo de ondas sobrepostas (Nery Júnior, 2016).

A TWD para sinais em tempos contínuos pode ser definida por:

$$TWD_{m,n} = 2^{\frac{m}{2}} \int_0^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-n \cdot 2^m}{2^m}\right) dt = C_{\psi_{m,n}} \quad (3)$$

onde t é o tempo, m é toda a variável relacionada à frequência, n é toda a variável relacionada ao tempo, $f(t)$ é o sinal que está sendo analisado, ψ é uma função oscilatória do tipo de janela, também chamada de wavelet mãe e $C_{\psi_{m,n}}$ é o coeficiente ligado a cada tempo e frequência.

2.2.1 Análise Multiresolução

A Análise Multiresolução (AMR) é a maneira mais comum de implementar a DWT. Um exemplo simples é encontrado na Fig. 1. Da compressão de imagem à supressão de ruído em todos os tipos de sinal (Nery Júnior, 2016), a análise multiresolução pode ser facilmente implementada, desenvolvendo uma separação de passa alta (detalhe) e passa baixa frequência (aproximação).

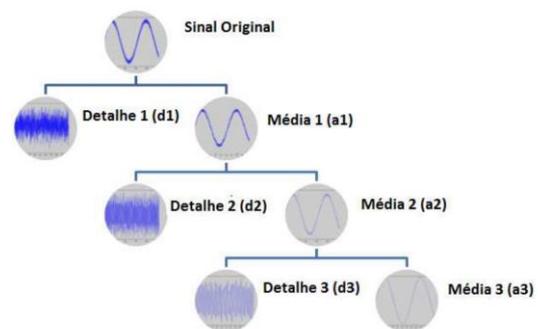


Fig 1 Estrutura da AMR (Nery Júnior, 2016).

A Transformada Wavelet permite a filtragem de aproximação e de detalhe até um determinado nível. Isso resulta em base ampla e flexível para análise das informações do sinal. Portanto ela tem a característica de ser capaz de filtrar componentes de baixa intensidade e manter poucos coeficientes com alta intensidade com as informações representativas e relevantes do sinal.

2.3 Transformada de Hilbert Huang

A Transformada de Hilbert Huang (HHT) é um método empírico de análise de sinais cuja base de expansão é adaptativa para produzir uma representação espectral fisicamente significativa de sistemas não lineares e sinais não estacionários (Cesário, 2020). O método consiste em duas etapas descritas a seguir.

2.3.1 Decomposição empírica em modos

Conforme Huang et al. (1998), um sinal $x(t)$ é estratificado em uma combinação linear de IMFs (Funções do Modo Intrínseco) $c_i(t)$ e resíduo $r_n(t)$. O sinal é decomposto, sem usar projeção em bases predefinidas, em um conjunto de AM-FM, componentes da média nula, chamada de Funções do Modo Intrínseco (IMFs), formando uma base de expansão obtida a partir do próprio sinal (Sarno Filho, 2018).

Ao final do processo, o sinal original pode ser representado por “n” IMFs e um resíduo:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (4)$$

O resultado final da decomposição EMD em IMFs de alta e baixa frequência contém oscilações de frequência mais baixas nos componentes de ordem superior, o que é razoável porque o processo de triagem é baseado em sucessivas extrações de componentes de baixa frequência (envoltórios) até obter um IMF, comportando-se como um rastreador de componentes de alta frequência.

2.3.2 Transformada de Hilbert

É aplicada às IMFs a Transformada de Hilbert para construção de seu espectro (HS), distribuição de energia em tempo e frequência que preserva a localização temporal dos eventos associados ao sinal.

$$HS\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(t - \tau)}{\pi\tau} d\tau \quad (5)$$

Um conceito de Frequência Instantânea (Instantaneous Frequency - IF) com significado físico e aplicável a uma ampla variedade de sinais (incluindo os não-estacionários) conforme estabelecido por Gabor (1946) e Boashash (1992) como a derivada do $\varphi(t)$ do sinal analítico $z(t)$ gerado a partir do sinal real $x(t)$ através da HS (Molla e Hirose, 2010):

$$z(t) = x(t) + jHT\{x(t)\} = \alpha(t)e^{j\varphi(t)} \quad (6)$$

onde $\alpha(t)$ e $\varphi(t)$ são, respectivamente, a amplitude instantânea e a fase instantânea de $z(t)$ e $HT\{x(t)\}$ é a transformada de Hilbert (Boashash, 1992). A IF é então definida como:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \varphi(t) \quad (7)$$

Em (7) a IF é uma função do tempo com um único valor, que pode ser interpretado como a da frequência que melhor representa um determinado instante do sinal em análise. Fisicamente, isso só faz sentido para sinais monocomponentes, caracterizados por ter uma única frequência ou uma faixa estreita de variantes de frequência ao longo do tempo, que podem gerar sinais analíticos com amplitude instantânea e frequência instantânea bem definida $\alpha(t)$ e $f(t)$ (Molla e Hirose, 2010) e (Huang et al, 1998). Para sinais multicomponentes, categoria à qual pertencem sinais não estacionários, a noção de IF de valor único perde significância física, uma vez que podem apresentar mais de um modo de oscilação simultânea. Então é necessário fazer a decomposição em um conjunto de componentes oscilatórios AM/FM chamados IMFs (Funções do Modo Intrínseco), que são considerados monocomponentes (Molla e Hirose, 2010) e (Huang et al, 1998).

Com a frequência e a amplitude, é construída uma distribuição de energia tempo-frequência, que é chamada de espectro de Hilbert. O espectro é capaz de refletir as características essenciais do sinal intrínseco.

3. SISTEMA ELÉTRICO ANALISADO

A Fig.2 apresenta a modelagem da uma linha de transmissão 500 kV de 250 km de comprimento, utilizando a interface gráfica do software ATP. Uma falta trifásica para terra (impedância de 0,001 Ω – curto franco) foi aplicada no circuito, 0,1 segundo após o início da simulação, a uma distância de 150 km do terminal local de medição (lado VTHL/ZTHL da Fig.2). Na modelagem do sistema de transmissão com o uso do ATP foram inseridos os valores para parametrização da linha e torre de transmissão conforme Tabela 1 e Fig.3.

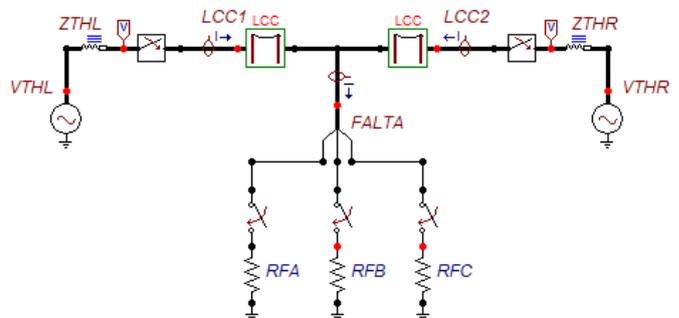


Fig. 2 Sistema elétrico simulado no ATP.

Embora que a simulação ter sido da falta trifásica, neste trabalho foi usado a contribuição da corrente da fase A que já traz características suficientes para a comparação entre os

métodos. A Fig.4 em o registro da corrente da fase A no terminal local de medição.

Tabela 1. Parâmetros da Linha de Transmissão e da Torre.

Arranjo das Fases	Configuração horizontal da Torre
Condutor Fase	
Altura da torre	24 m
Altura dos isoladores	12 m
Espaçamento entre as fases	11 m
Número de pára-raios	2
Raio interno dos condutores	0,463 cm
Raio externo dos condutores	1,257 cm
Espaçamento dos sub-condutores	40 cm
Resistência DC	0,08998 Ω /km
Condutor Pára-raio	
Altura da torre	33 m
Altura dos isoladores	20 m
Espaçamento	16 m
Raio	0,4572 cm
Resistência DC	4,188 Ω /km

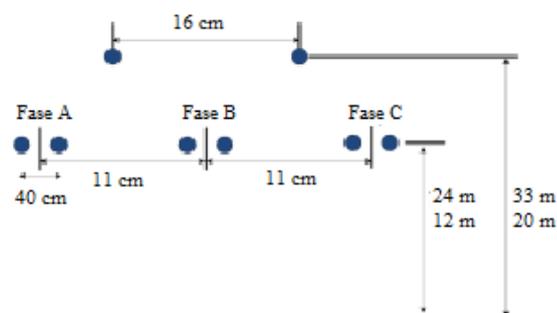


Fig. 3 Parametros da torre e da linha de transmissão 500 kV/60Hz.

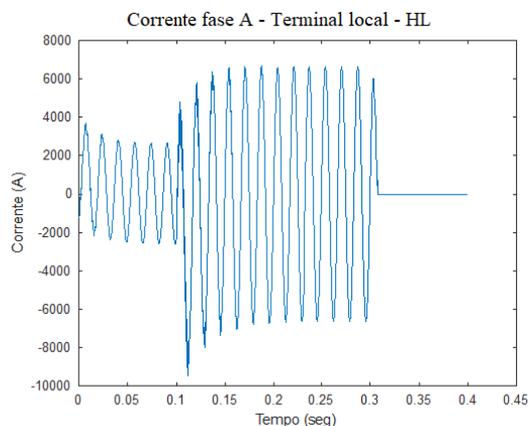


Fig. 4 Corrente de fase I_a com curto-circuito fase terra no instante de 0,1s do início da simulação.

4. APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS

Serão apresentados a seguir os resultados para a aplicação dos três métodos simulados no Matlab.

4.1 Abordagem baseada na Transformada de Fourier de Tempo Curto

Para a análise utilizando a transformada de Fourier de tempo curto, a STFT, foram testadas janelas $\omega(t-m)$ do tipo *Hanning* de 16ms e 32ms com superposição de 15,9ms e 31,9ms. Os resultados podem ser vistos nas Figs. 5 e 6, respectivamente.

O que se pode perceber nestas figuras é que a janela mais curta (16ms) consegue mostrar com melhor precisão o instante da falta de 0,1s. A janela mais longa (32ms) tem menor precisão que a janela curta, porém consegue mostrar um espalhamento de energia das altas frequências na proximidade do instante da falta. Em ambas as janelas não é possível verificar com clareza a frequência fundamental de 60 Hz.

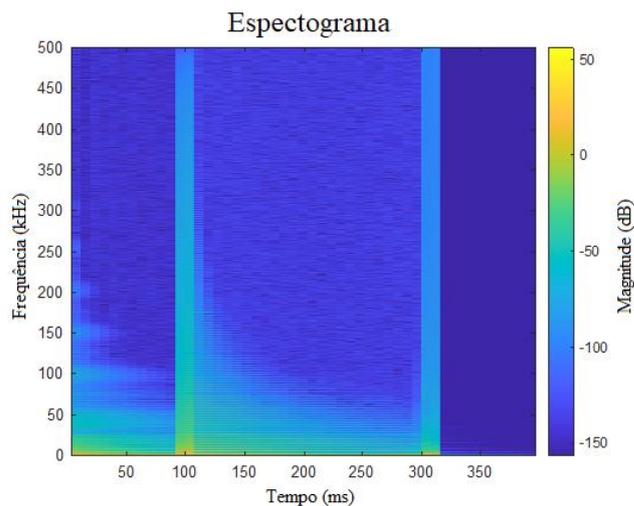


Fig. 5 Espectrograma da STFT janela tipo *Hanning*(16ms) I_a (HL) com curto-circuito fase-terra no instante $t = 0,1$ s.

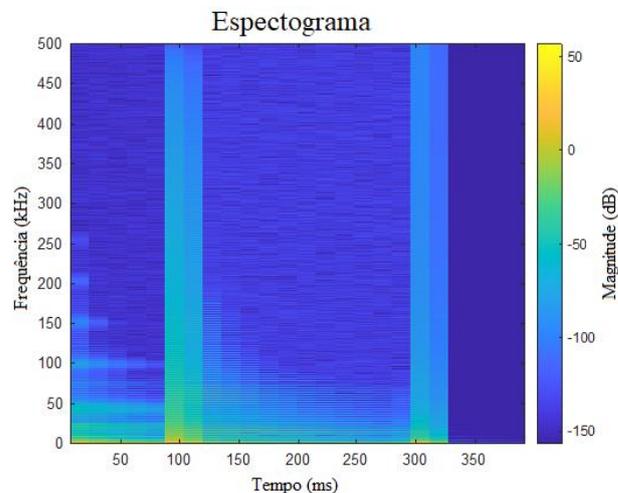


Fig. 6 Espectrograma da STFT janela tipo *Hanning*(32ms) I_a (HL) com curto-circuito fase-terra no instante $t = 0,1$ s.

4.2 Abordagem baseada na Transformada Wavelet

Para efeitos dos resultados TWD utilizados neste artigo sendo ortonormais, foram utilizados componentes não redundantes (Neri Júnior, 2016). A corrente I_a foi processada para obter os coeficientes wavelet através de uma janela fixa, onde analisa-se os valores do detalhe d_4 em 5 níveis de decomposição. A Fig. 7 traz a Análise Multiresolução (AMR) da corrente I_a . Usou-se a aproximação e o detalhe de nível 5 (a_5 e d_5) para

reconstrução de I_a , onde os componentes de escalas menos significativas foram filtrados. Observa-se na Fig. 8 que a corrente I_a reconstruída mantém as características básicas da corrente I_a original da Fig. 4. A Fig. 9 traz no detalhe de parte da superposição das correntes I_a original e I_a recomposta. Veja que há uma re o resultado da filtragem dos um exemplo simples é encontrado na Fig. 1. Da compressão de imagem à em todos os tipos de sinal

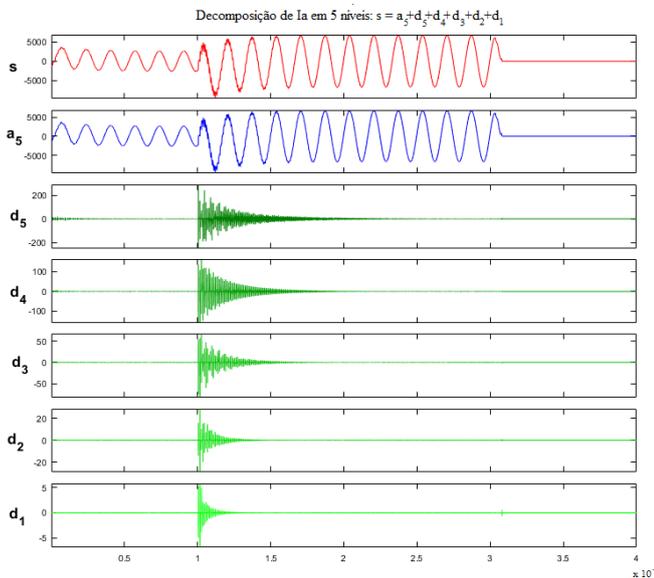


Fig. 7 Análise Multiresolução (AMR) da corrente I_a .

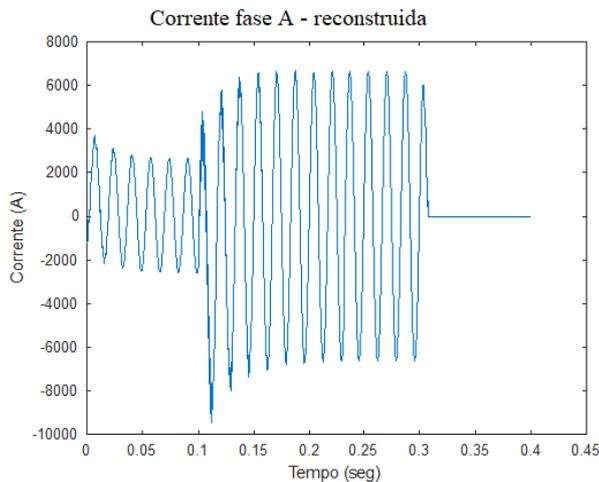


Fig. 8 Corrente de fase I_a reconstruída por a_5 e d_5 .

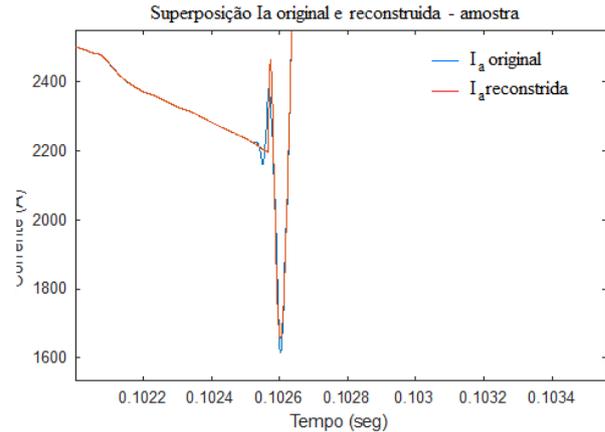


Fig. 9 Detalhe filtragem - Correntes superpostas I_a original e I_a reconstruída a partir de a_5 e d_5 .

O espectrograma da Fig. 10 tem o resultado melhorado em relação à Fig. 5, ia que representa as frequências mais significativas. Nela, é mostrada a detecção do momento inicial do curto-circuito (0,1s). A magnitude do espectrograma passa de uma escala menor para uma escala maior no instante $t = 0,1$ s.

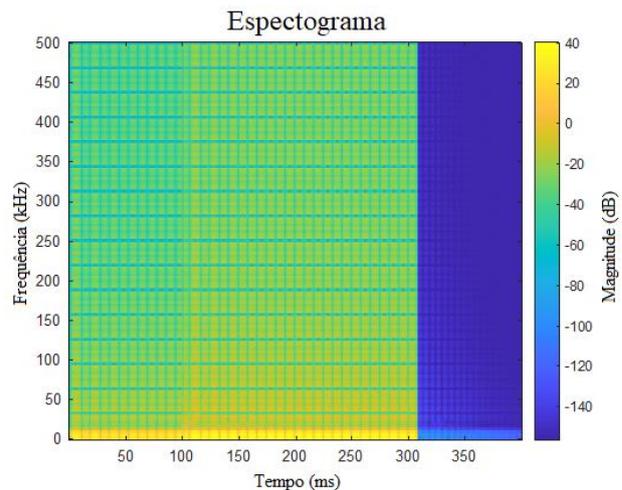


Fig. 10 Espectrograma da TW de I_a (HL) com curto-circuito fase-terra no instante $t = 0,1$ s

4.3 Abordagem baseada na Transformada de Hilbert Huang

Para os resultados do HHT foi avaliada a corrente de falta da fase A. As componentes das IMFs da corrente de falta da fase A são extraídas por meio da Decomposição em Modo Empírico. A Fig. 11 mostra o resultado da EMD que inclui nove componentes de IMF e um resíduo. Os resultados mostram que as IMF_1 , IMF_2 , IMF_3 , IMF_4 e IMF_5 tem a concentração das oscilações de frequência mais altas presentes na corrente I_a . As demais componentes têm oscilações mais suaves

Portanto, foi aplicada (4) para recompôr o sinal que será aplicado (6) para obter a transformada de Hilbert e traçar o espectrograma da Fig.12 onde podemos determinar exatamente o momento inicial do curto-circuito em 0,1s.

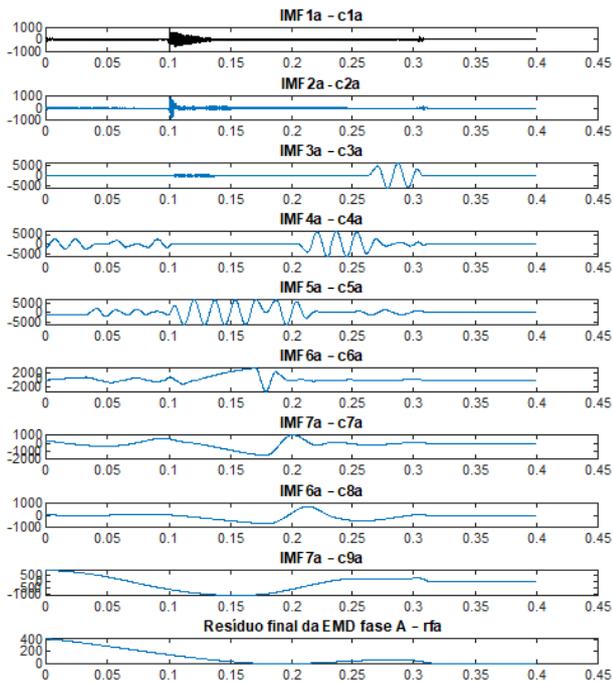


Fig. 11 IMFs e resíduo resultantes da EMD da Ia.

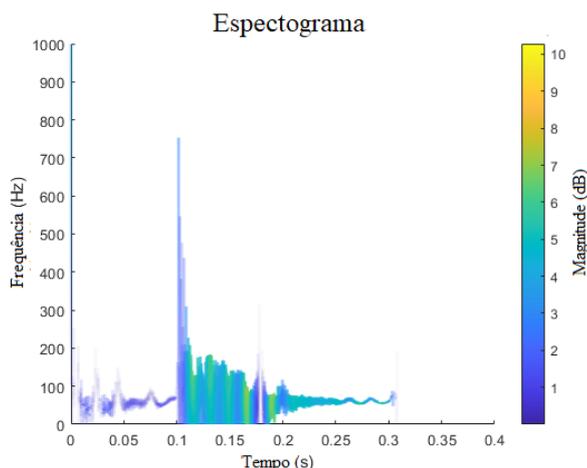


Fig. 12 Espectrograma da HT das IMF₁, IMF₂, IMF₃, IMF₄ e IMF₅ da corrente de falta da fase A.

6. CONCLUSÕES

Este artigo abordou o uso das ferramentas Transformada de Fourier de Tempo Curto (STFT), Transformada Wavelet (WT) e Transformada de Hilbert Huang (HHT) para detectar uma falta em linha de transmissão adicionada aos componentes de alta frequência presentes no espectrograma.

No uso do STFT quanto menor a janela de observação, melhor será a localização no tempo, mas pior será a resolução em frequência. Não pode obter locais precisos simultaneamente em tempo e frequência. Ao reduzir bandas para obter uma melhor resolução temporal, o custo computacional aumenta por ter mais bandas para analisar.

A Transformada Wavelet (WT) tem a característica de ser capaz de filtrar componentes de baixa intensidade. Pode-se utilizar uma wavelet mãe com suporte temporal finito (base

pré-definida). Poucos coeficientes com alta intensidade representam as informações do sinal mais relevantes. A compressão é obtida (entre outras etapas) aproximando-se do sinal no domínio transformado. Coeficientes de baixa intensidade são descartados. Apenas os coeficientes de maior intensidade são usados para reconstruir o sinal de tal forma que há redução do esforço computacional na recomposição do sinal.

A transformada de Hilbert-Huang (HHT) destina-se principalmente à análise de dados a partir de sinais não estacionários e sistemas não lineares. A HHT não tem fundamentos matemáticos sólidos (é um método heurístico). O método depende do próprio sinal sob análise. Trata-se de um método adaptativo cujo preço pago é a dificuldade de estabelecer uma base teórico-analítica sólida, sendo definido como um algoritmo computacional.

Comparando com a Transformada Wavelet o método HHT é auto-adaptativo e suas propriedades de localização tempo-frequência são melhores conforme visto no espectrograma da Fig. 12. Não é mais necessário pré-selecionar a escala de tempo, tornando o método adequado para detectar as altas frequências características da falta.

A partir dessas considerações teóricas e resultados apresentados (gráficos e análises), conclui-se que os métodos que utilizam a HHT apresentam representações mais precisas do que os baseados na WT, as quais, por sua vez, são melhores do que as baseadas na STFT.

Os trabalhos futuros, no entanto, devem expandir a aplicação desta ferramenta, testando-a para outros tipos de faltas, bem como desenvolvendo um sistema abrangente para detectar, classificar e localizar curtos-circuitos em linhas de transmissão. Para este último propósito, no entanto, os sistemas de inteligência artificial devem ser adicionados ao conjunto de análises.

REFERÊNCIAS

- Boashash, B. *Estimating and interpreting the instantaneous frequency of a signal. part I: fundamentals*. Proc. IEEE 80, pp. 520–538 (1992).
- Carvalho, T. C. de O. *Análise e Implementação de Métodos Aplicados aos Sinais Variantes no Tempo Presentes em Sistemas Elétricos de Potência*. Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, pp.169, (2013).
- Cesário, F. R. Moreira, F. A.; Neves, W. L. A. Neri Jr., A. L. *Análise Comparativa na Detecção de Falta: Transformada de Wavelet e Transformada de Hilbert-Huan* in Congresso Brasileiro de Automática, 2020, Congresso Virtual, CBA 2020 – XXIII (2020).
- Cohen, L. *Time-Frequency Analysis*. Prentice Hall, pp. 30-31 (1995).
- Coury, D. V. Oleskovicz, M. Giovanini, R. *Proteção Digital de Sistemas de Potência dos Relés Eletromecânicos aos Microprocessados Inteligentes*. 1. ed. São Carlos, SP: Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. v. 1. 378p (2007).

- Gabor, D. *Theory of communication: the analysis of information*. Proc. IEE, vol. 93(III), pp. 429–441 (1946).
- Huang, N. E. Shen, Z. Long, S. R. Wu, M. L. Shih, H. H. Zheng, Q. Yen, N. C. Tung, C. C. Liu, H. H. *The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis*. Proc. Roy. Soc. London, vol. 454, pp. 903–995 (1998).
- Molla, M. K. I. e Hirose, K. *Hilbert spectrum in time-frequency representation of audio signals considering disjoint orthogonality*. *Advances in Adaptive Data Analysis*, vol. 2, no. 3, pp. 313-336 (2010).
- Neri Júnior, A. L. Moreira, F. M. Souza, B. A. *Uma Revisão da Transformada Wavelet Aplicada à Localização de Falhas de Energia em Redes Elétricas de Transmissão e Distribuição*. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE, 2016, Natal, artigo 0358 (2016).
- Oliveira, H. M. de. *Análise de sinais para engenheiros*. [S.l.]: Brasport (2007).
- Pinto, S. C. D. *Análise de Formas 3D usando Wavelets 1D, 2D e 3D*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo (2005).
- Sarno Filho, E. P. Fernandes Jr, A. C. L. Simas Filho, E. F. Seixas, J. M. *Processamento de Sinais de Sonar Passivo usando a Decomposição Empírica em Modos*. In: XXXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, 2018, Campina Grande. XXXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (2018).
- Souza, S. A. *Classificação de distúrbios em redes elétricas Qualidade da energia Transformada de Fourier Janelada*. Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, pp. 111(2004).