DOI: 10.48011/asba.v2i1.1301

Análise Comparativa na Detecção de Falta: Transformada Wavelet e Transformada de Hilbert-Huang

F. R. Cesário*, F. A. Moreira, W. A. Neves***, A. L. Neri Jr ******

**Área de Geração, Transmissão e Distribuição de Energia/ Centro Universitário SENAI CIMATEC, Av. Orlando Gomes, 1845, Piatã, Salvador, Bahia, CEP 41650-010 (e-mail: frederioc@fieb.org.br)*
***Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade Federal da Bahia - UFBA*
Rua Prof. Aristídes Novis, 2 - Federação, Salvador, Bahia, Brasil, CEP 40210-630 (e-mail:moreiraf@ufba.br)
**** Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade Federal de Campina Grande, Av. Vinte e Sete de Julho, 52-60 – Universitário, Campina Grande, Paraíba, Brasil, CEP 58429-900 (e-mail:waneves@dee.ufcg.edu.br)*
*****Petrobras, Av. Antônio Carlos Magalhães, 1113, Itaigara, Salvador, Brasil, CEP 41800-700 (e-mail: almir.neri@petrobras.com.br)*

Abstract: This paper presents results of fault detection in electrical power systems using the Wavelet Transform and Hilbert-Huang Transform. The Wavelet Transform is pointed out in the bibliographic research done as widely used in this type of application. While the Hilbert-Huang transform is a technique that started to gain space as a mathematical tool for processing signals from the electrical system. As will be shown, the simulations showed that the mentioned tools have great potential for detecting faults. In this context, some peculiarities and characteristics inherent to each tool will be pointed out.

Resumo: Este trabalho apresenta resultados da detecção de faltas em sistema elétricos de potência usando as Transformada Wavelet e Transformada de Hilbert-Huang. A Transformada Wavelet é apontada na pesquisa bibliográfica feita como amplamente utilizada neste tipo de aplicação. Enquanto a Transformada de Hilbert-Huang é uma técnica que começou a ganhar espaço como ferramenta matemática para processamento de sinais do sistema elétrico. Como será evidenciado, as simulações mostraram que as ferramentas mencionadas possuem uma grande potencialidade para a detecção de faltas. Neste contexto, serão apontadas algumas peculiaridades e características inerentes a cada ferramenta.

Keywords: Hilbert-Huang Transform; Wavelet Transform; Fault Detection; ATP Software; Electrical Power Systems.

Palavras-chaves: Transformada Hilbert-Huang; Transformada Wavelet; Detecção de Faltas; Software ATP; Sistemas Elétricos de Potência.

1. INTRODUÇÃO

Faz parte do sistema de localização de faltas em Sistema Elétrico de Potência (SEP) procedimentos formais a serem seguidos por equipes de campo e de coordenação. Elas trabalham em conjunto munidas de recursos diversos: mapas, procedimentos, informações técnicas do sistema elétrico e dados técnicos atualizados direto do campo.

Durante o curto-circuito, os parâmetros obtidos do sinal elétrico são usados para determinar o local mais provável de sua ocorrência e respectivas manobras, melhorando o desempenho destas equipes, reduzindo desta forma o impacto, a duração do defeito e aumentando, por conseguinte, a disponibilidade do SEP (Fische et al. 2012). Após o evento, os registros servirão como base de dados para análise a posterior.

Os sistemas baseados na teoria de ondas viajantes detectam o início dos transitórios em pontos específicos do sistema em análise. Aspectos do sistema transmissão como acoplamento mútuo das fases, local da falta, resistência, comprimento e impedância da linha de transmissão podem interferir no espectro de frequências dos transitórios induzidos pela falta (Salim, 2007). Portanto, o processo de detecção ideal varre uma faixa de frequência. Ele pode ser sintetizado nas seguintes etapas: Registro dos parâmetros da linha e dos sinais de corrente em regime senoidal para referências e definições de limites; Extração periódica das características online; Determinação da ocorrência da falta pela comparação registro do sinal de alta frequência com valores limites; Determinação do instante da ocorrência da falta.

Cada etapa do processo de detecção tem suas próprias complicações e problemas que precisam ser tratados almejando precisão no resultado. Muitos desses registros possuem pouca ou nenhuma relevância. Um algoritmo otimizado só deve selecionar os úteis para os estudos subsequentes. A correta e célere detecção de distúrbios nocivos para o sistema elétrico permite o restabelecimento mais rápido do SEP (Nery Jr et al, 2016a).

Este trabalho propõe avaliar a utilização da Transformada de Hilbert-Huang (THH) como ferramenta computacional tão eficaz quanto a Transformada de Wavelet (TW) no processamento de sinais do sistema elétrico para detecção de faltas.

Este artigo está estruturado da seguinte forma: A seção 2 apresenta uma breve revisão bibliográfica sobre as principais técnicas de detecção de faltas em um sistema elétrico. As seções 3 e 4 sintetizam os algoritmos de detecção utilizados nas técnicas Transformada Wavelet e Transformada de Hilbert-Huang, respectivamente. Em seguida, a seção 5 destaca as características relevantes para a detecção de faltas conforme as técnicas abordadas. A seção 6 caracteriza o sistema elétrico sob teste enquanto a seção 7 traz o registro do curto entre duas fases e terra ocorrido no sistema elétrico teste e o resultado das detecções pelas duas técnicas. Por fim, a seção 8 apresenta as conclusões do artigo.

2. SELEÇÃO DAS TÉCNICAS DE DETECÇÃO

O resultado da pesquisa sobre as técnicas de detecção de transitórios é mostrada na Tabela 1. Elas têm em comum a análise para identificação da frente das ondas viajantes que percorrem o sistema elétrico. Citam dois grandes desafios: a complexidade no processamento do sinal devido à necessidade de elevadas taxas de amostragem e a dificuldade na identificação da origem das múltiplas frentes de ondas refletidas nos pontos de descontinuidade do sistema elétrico.

Tabela 1. Resumo da revisão bibliográfica referente à detecção de transitórios (fonte própria)

Referência	Técnica empregada
Fukuyama , 1993	Inteligência Artificial
Kezunovic, 1996	Inteligência Artificial
Santoso , 1996	TW
Jamali, 2004	Coeficientes de correlação
Xiaoli, 2007)	TW + Energias Janeladas
Costa, 2008	TW + Energias Janeladas
Lin, 2008	Coeficientes de correlação
Li, 2009	THH
Costa 2010a	TW
Zimath, 2010	Filtros digitais
Han, 2012	THH
Costa , 2014	TW + Energias Janeladas
Wang, 2016	THH
Nery Jr 2016a	TW
Nery Jr 2016b	TW
Nery Jr 2018	TW
Costa , 2017	TW + Energias Janeladas
Lopes, 2017	TW
Braz, 2017	THH
Sharma, 2018	THH
Cesário, 2019	THH

TW- Transformada Wavelet
THH - Transformada de Hilbert-Huang

Este conjunto de artigos mostra que Transformada Wavelet (TW) é a técnica mais comumente empregada na detecção de faltas, mas paulatinamente diversos trabalhos tem aparecido demonstrando o uso da Transformada de Hilbert-Huang (THH) para o mesmo problema. A Tabela 2 resume as características destaques das TW e da THH. Demais técnicas, a exemplo das baseadas nas componentes da frequência fundamental, correlação, transformada de Park, podem ser tão efetivas, mas não se coadunam com o escopo deste trabalho.

A Transformada Wavelet é uma ferramenta de processamento de sinal que é ortogonal, local e adaptativa. É capaz de analisar sinais não estacionários e sistemas não lineares. Possui muitas aplicações práticas, mas em sistemas de potência o foco recai nas propriedades de identificação conjunta de tempo e frequência (Neri Jr. et. al., 2016a).

A Transformada de Hilbert-Huang é uma nova abordagem por método adaptativo elaborado para análise de dados de sistemas não lineares e não estacionários. Vem sendo proposta na literatura como técnica promissora para aplicações em sistemas elétricos e destaca-se devido a sua capacidade adaptativa do método (Huang et. al., 2008). A apresentação final dos resultados é uma distribuição amplitude-tempo-frequência do sinal analisado (Huang et. al.,2008). Elas obtêm as características do sinal em questão (Braz, 2017).

Tabela 2. Comparação entre as Transformadas (fonte própria)

	Wavelet	Hilbert Huang
Capacidade de análise	Adaptativa	Adaptativa
Frequência	Convolução local - incerteza	Diferenciação local - certeza
Sistema não-linear	Sim	Sim
Sinal não estacionário	Sim	Sim
Apresentação	Energia tempo frequência	Energia tempo frequência

3. TRANSFORMADA WAVELET

A Transformada Wavelet aplicada em estudos de sistemas de potência é utilizada na análise tempo-frequência de sinais de tensão e corrente. Ela opera de modo similar à transformada de Fourier, indicando as frequências presentes num certo sinal, mas com a vantagem de identificar os momentos em que cada frequência aparece. Existem muitos tipos de wavelet, contínuas, discretas, redundantes, pacotes de l e assim por diante, mas neste trabalho iremos detalhar e operar apenas com a transformada discreta. As referências Daubechies (1992), Galli et. al. (1996), Walker (1999), Fernandez e Rojas (2002) e Gargour et. al. (2009) fazem melhores explicações (apud Neri Jr. et. al., 2016a)

3.1 Transformada Wavelet Discreta

Transformada Wavelet Discreta (TWD) é a sigla em inglês para a Transformada Wavelet Discreta. Ela pode ser usada

matematicamente de duas formas, de modo ortonormal ou por quadros (frames). O método por quadros é a implementação computacional da Transformada Wavelet contínua, resultando na decomposição de frequência e tempo de ondas sobrepostas (Gargour et. al., 2009 apud Neri Jr. et. al., 2016a).

Algumas condições precisam ser alcançadas para que a wavelet seja considerada ortonormal. Para fins dos resultados da TWD utilizados neste trabalho, ortonormal significa, na prática, componentes não redundantes (Daubechies, 1992 apud Neri Jr. et. al., 2016a).

A formulação diádica da TWD é

$$TWD_{n,m} = 2^{\frac{m}{2}} . \int_0^{\infty_2} f(t) . \psi^* . \left(\frac{t - n.2^m}{2^m} \right) dt = C_{\psi_{m,n}} \quad (1)$$

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

Transformada Wavelet Discreta tem muitas propriedades interessantes (Daubechies, 1992; Walker, 1999; Gargour et. al., 2009 apud Neri Jr. et. al., 2016a) e aplicações (Galli et. al., 1996 apud Neri Jr. et. al., 2016a). Uma maneira muito comum de aplicar a DWT é a Análise Multiresolucional (MRA, na sigla em inglês).

3.2 Análise Multiresolucional

Análise Multiresolucional (AMR) é a maneira mais comum de implementar a Transformada Wavelet. Um exemplo simples se encontra na Figura 1. Da compressão de imagens à supressão de ruídos em todo tipo de sinal (Gargour et. al., 2009 apud Neri Jr. et. al., 2016a), a análise multiresolucional pode ser facilmente implementada em computadores.

A AMR tem boas propriedades de reconstrução, de modo que com base nos coeficientes de um determinado sinal, é possível recuperar o sinal original. Uma descrição simples é que a AMR funciona como um par de filtros recursivamente aplicados ao sinal. Uma função associada com a wavelet mãe, denominada função escalar, opera como filtro passa-baixa, gerando um sinal médio (Average), enquanto o filtro passa-alta é a derivada da própria wavelet mãe, e gera um sinal de detalhamento (Detail).

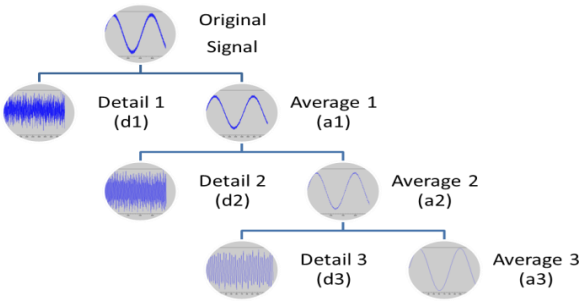

Figura 1 Estrutura da AMR (Neri Jr. et. al., 2016a).

A Transformada Wavelet permite não apenas a aproximação em um determinado nível, mas também dos detalhes. Isto resulta numa base ampla e flexível base para análise das informações condias no sinal.

4. TRANSFORMADA HILBERT-HUANG

A Transforada de Hilbert-Huang é um método de análise em tempo-frequência composto por duas etapas: a decomposição do sinal original em funções intrínsecas de modo (IMF, do inglês Intrinsic Mode Functions) utilizando o método de decomposição empírica e modos (EMD, do inglês Empirical Mode Decomposition); e a análise do espectro de Hilbert (Hunag et al., 1998) resultante da transformada de Hilbert.

4.1 Método de decomposição empírica de modos

Conforme descrito em Huang et al. (1998), um sinal $s(t)$ é decomposto em uma combinação linear de IMFs $c_i(t)$ e resíduo $r_i(t)$. O algoritmo EMD é mostrado na Figura 2.

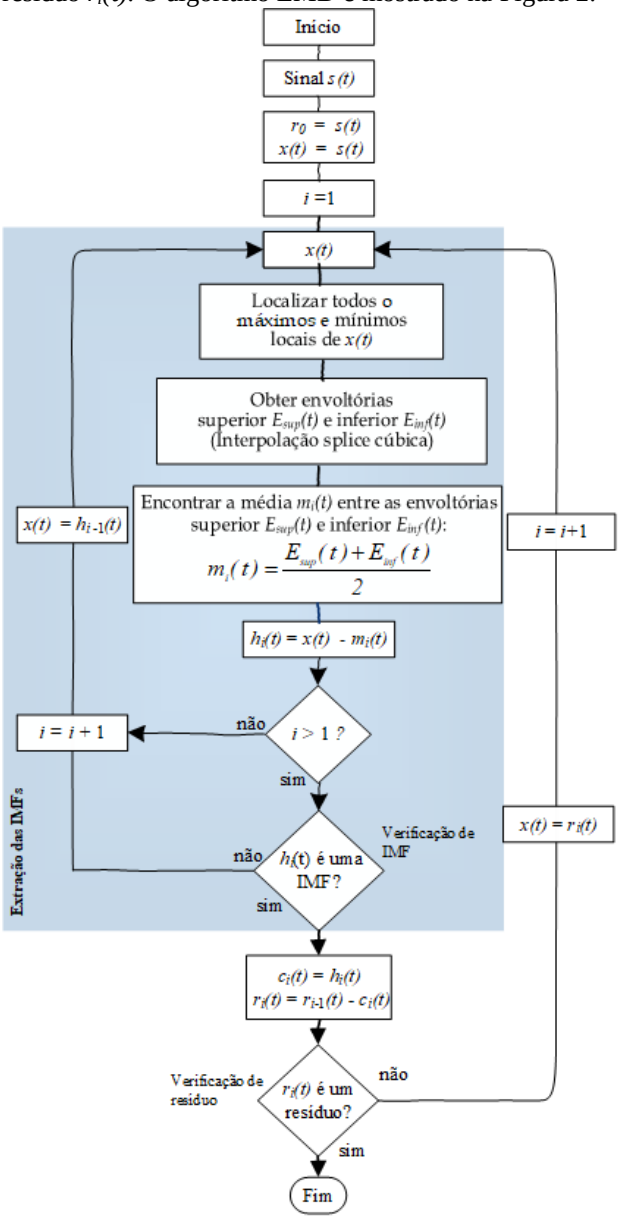

Figura2.Fluxograma da EMD (fonte própria).

O algoritmo do método EMD assegura que qualquer sinal *s(t)* possa ser decomposto em um número finito de n iterações gerando suas IMFs, formando uma base de expansão obtida a partir do próprio sinal (adaptável). Esse sinal pode ser reconstruído como a soma de *k* IMFs e um resíduo r_i, conforme apresentado em (3):

$$s(t)=\sum_{\substack{n=1\\ i=k}}^{k} c_n(t)+r_i \tag{3}$$

4.2 Transformada de Hilbert

A etapa seguinte é aplicar a Transformada de Hilbert (TH) em cada IMF, $c_n(t)$, para obter a série de amplitudes $\alpha_n(t)$ e frequências $f_n(t)$ instantâneas.

A formulação diádica do TH, $y_n(t)$, para cada IMF, $c_n(t)$, é

$$y_n(t)=\frac{P}{\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{c_n(\tau)}{t-\tau}d\tau \tag{4}$$

onde P é o valor principal de Cauchy: método de atribuir valores a certas integrais próprias indeterminadas (Huang et al.,1998).

A TH resulta em um sinal $y_n(t)$ defasado 90º de cada IMF, $c_n(t)$. Assim, adicionalmente $c_n(t)$ e $y_n(t)$ formam o sinal complexo $z_n(t)$:

$$z_n(t)=c_n(t)+jy_n(t)=\alpha_n(t)e^{j\theta_n(t)} \tag{5}$$

onde tem-se as amplitudes instantâneas:

$$\alpha_n(t)=\sqrt{c_n^2(t)+y_n^2(t)} \tag{6}$$

cujo o ângulo pode ser escrito por:

$$\theta_n(t)=\tan^{-1}\left(\frac{y_n(t)}{c_n(t)}\right) \tag{7}$$

As frequências instantâneas de $f_n(t)$ é estabelecida com significado físico e aplicável a sinais, incluindo os não estacionários, pela derivada da fase $\theta_n(t)$ do sinal analítico $z_n(t)$ gerado a partir do sinal real $x_n(t)$ através da TH (Gabor, 1946):

$$f_n(t)=\frac{1}{2\pi}\frac{d\theta_n(t)}{dt} \tag{8}$$

Por (8), tem-se que a $f_n(t)$ é uma função do tempo com valor único, que pode ser interpretado como o da frequência do sinal senoidal que melhor representa em um dado instante o sinal $x_n(t)$ sob análise. Fisicamente, isso só faz sentido para sinais monocomponente, caracterizados por possuírem uma única frequência (senoide) ou uma faixa estreita de frequências variantes com o tempo, e que podem gerar sinais analíticos com amplitudes instantâneas $\alpha_n(t)$ e frequências instantâneas $f_n(t)$ bem definidas (Huang, 1998).

Para sinais multicomponentes, categoria a que pertencem os sinais não estacionários, a noção de uma frequência instantânea com valor único perde significado físico, uma vez que podem apresentar mais de um modo de oscilação simultâneos. Nesses casos, torna-se necessária a decomposição em um conjunto de IMFs, que são consideradas monocomponentes (Sarno Filho et al, 2018).

Portanto, os distúrbios são caracterizados: por amplitudes instantâneas $\alpha_n(t)$, que tem correlação com as amplitudes instantâneas *s(t)* do sinal analisado, via $c_n(t)$ e $y_n(t)$; e por frequências instantâneas $f_n(t)$ de oscilação local, compondo uma série de dados ao longo do tempo.

Uma vez que a THH tenha sido aplicada a todas as IMFs, e calculadas as amplitudes $\alpha_n(t)$ e frequências $f_n(t)$ instantâneas, o sinal original *s(t)* pode ser expresso em (9) conforme descrito em Huang et al. (1998):

$$s(t)=\sum_{n=1}^{k}\alpha_n(t)e^{j\theta_n(t)}=\sum_{n=1}^{k}\alpha_n(t)e^{\frac{j}{2\pi}\int f_n(t)dt} \tag{9}$$

A parte real de (9) permite uma distribuição tempo-frequência-amplitude, *H(f,t)*, expresso através de (10), que representa o espectro de Hilbert.

$$H(f,t)=Re\sum_{n=1}^{k}\alpha_n(t)e^{\frac{j}{2\pi}\int f_n(t)dt} \tag{10}$$

Os resultados da Transformada de Hilbert-Huang fornecem a densidade espectral de energia no plano frequência e amplitude no tempo dos sinais multicomponentes (características não lineares e não estacionárias).

5. CARACTERIZAÇÃO DO CURTO-CIRCUITO

A mudança de características nos sinais elétricos é constatada com o aparecimento de amplitudes significativas em diferentes faixas de frequências no sinal que antes destacava-se a de regime permanente senoidal. Cada uma dessas faixas de frequência caracteriza um tipo de transitório diferente (Neto, 2017). A classificação das faixas de frequências mais usual é a proposta pela International Electrotechnical Commission (IEC) e pela Conseil International des Grands Réseaux Électriques (CIGRE): oscilações de baixa frequência, de 0,1 Hz a 3 kHz; surtos de frente lenta, de 50/60 Hz a 20 kHz; surtos de frente rápida, de 10 kHz a 3 MHz; e surtos de frente muito rápida, de 100 kHz a 50 MHz. Fundamentado nelas, Velsaco (2010) destaca a faixa de frequência para os fenômenos transitórios de faltas entre 50 Hz e 3kHz.

Uma técnica de detecção do curto-circuito pode ser da seguinte: realiza-se uma varredura nas amostras com tamanho previamente definido da onda de corrente e compara-as com as amostras de tamanho iguais no tempo anterior. Caso na comparação verifique-se a existência de componentes significativas em amplitude e de altas frequências na forma de onda do sinal de corrente além do previamente ajustado, a lógica do algoritmo do relé detecta o distúrbio.

O curto-circuito gera variação de corrente a partir de um ponto qualquer da linha de transmissão. Os relés localizados nos terminais só irão sentir tal variação quando a onda referente ao sinal elétrico em questão percorrer todo o comprimento da mesma até eles. Portanto, os algoritmos dos relés localizados nos terminais remotos não podem influenciar nas decisões sobre o sistema antes que a onda tenha se deslocado da fonte da falta até eles. A interação da

onda com a linha de transmissão e terminais remotos irá produzir uma resposta (forma de onda) que retornará para a fonte do sinal. Desta maneira, o sinal elétrico tende a se propagar para frente e para trás, como ondas viajantes, normalmente dissipando energia devido as perdas na linha (Greenwood, 1971 apud Silva et. al., 2005). A Figura 3 ilustra o diagrama de Lattice que melhor explica esse princípio.

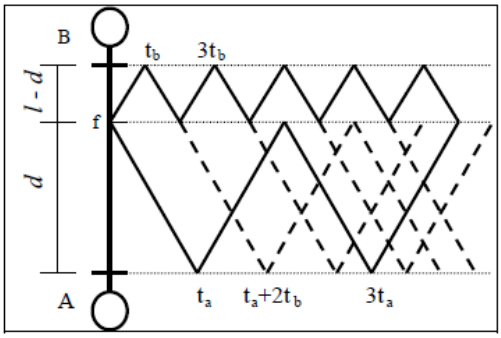

Figura 3 – Diagrama de Lattice (Fonte Silva et. al., 2005).

O método das ondas viajantes baseia-se na determinação do intervalo de tempo de viagem do sinal em análise (tensão ou corrente), entre o ponto da falta ao terminal da linha onde está instalado o relé e na velocidade de propagação desta onda na linha para estimar distância da falta.

6. O CIRCUITO ANALISADO

O circuito teórico aqui analisado (vide Figura 4) possui 5 barras e opera com 24,5 kV fase-fase. Existe apenas um ponto de medição, colocado na origem da rede, no alimentador da subestação (CT1 da Figura 4).

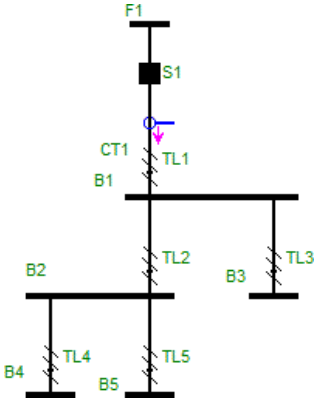

Figura 4 – Rede de simulada (Fonte Neri Jr. et. al., 2016a).

Esta rede elétrica é modelada no ATP com a configuração apresentada na Figura 5. Os dados das linhas de transmissão modeladas pela rotina LCC (o próprio bloco da linha de transmissão possui o código LCC na Figura 5), interna ao programa ATP, estão na Tabela 4.

O bloco RLC em série com o gerador senoidal é a impedância interna da fonte, e funciona também como o ponto de medição. Como o circuito simulado é teórico, a fonte é praticamente uma barra infinita, com impedância série de 0,1 mΩ. Os três blocos RLC aterrados são as cargas do circuito, cada uma delas com 300 kW de demanda, ou 2000Ω, e o bloco RLC, com uma chave controlada pelo tempo, faz parte do sistema que simula os diferentes tipos de curto-circuito.

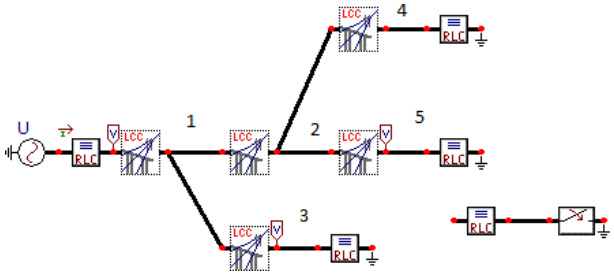

Figura 5 – Representação no ATP do circuito simulado.

Tabela 4. Dados das linhas de distribuição modeladas no ATP

Fase	r_{int}(cm)	r_{ext}(cm)	R (Ω/km)	L(m)	V_{Torre} (m)	V_{Rede} (m)
1	0.2925	0.7925	0.1	-0.65	10	7
2	0.2925	0.7925	0.1	0	10.8	7.8
3	0.2925	0.7925	0.1	0.65	10	7

7. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

O curto-circuito fase-fase-terra/ground (BCG – fase B, fase C e terra/ground G) c com impedância de curto de 1 mΩ (curto franco) e ângulo zero simulado na barra 3 do circuito ATP da Figura 5 possui o gráfico apresentado na Figura 6.

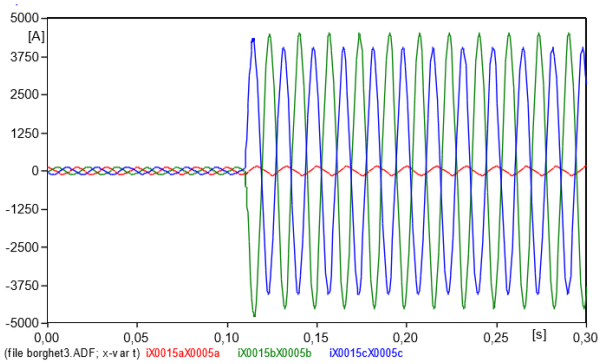

Figura 6 – Correntes trifásicas para um curto franco BCG na barra 3.

7.1 Detecção por Transformada Wavelet

Em Neri Jr. et. al. (2016a) o circuito ATP da Figura 4 foi transcrito em formato texto, e posteriormente é modificado por uma rotina Scilab da transformada Wavelet. Após realizada a simulação no ATP, os resultados de corrente foram avaliados. Essas correntes foram processadas pelo algoritmo de forma a se obterem os coeficientes wavelet. Esses coeficientes por fim são observados através de uma janela fixa, onde analisa os valores do detalhe d3 (63 kHz – 125 kHz).

As correntes trifásicas da Figura 6 foram processadas pelo algoritmo da TW de forma a se obter os coeficientes wavelet. Esses coeficientes foram observados através de uma janela fixa. Os valores dos detalhes d3 e da média A7 foram computados.

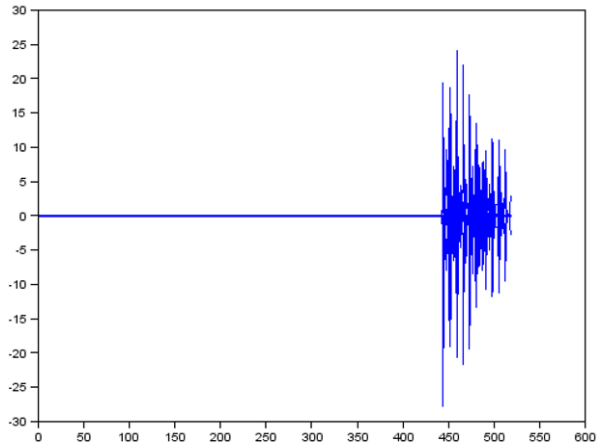

Figura 7 – Detalhe d3 das correntes em janelas sobrepostas das 3 fases para um curto franco BCG na barra 3.

A Figura 7 tem-se diversas janelas do detalhe d3 sobrepostas. Em operação normal, o valor do detalhe d3 é praticamente nulo, e no momento em que o curto-circuito se inicia ele tem um pico facilmente detectável através de um limiar neste detalhe. O eixo das abscissas é o número de amostras do detalhe d3 (no caso, 4096/23, 512 amostras), como as janelas estão sobrepostas não é possível perceber a correlação linear com o tempo. O eixo das ordenadas é o coeficiente wavelet do detalhe.

Na Figura 8 pode-se perceber que a energia do valor médio A7 nunca é nula, fica flutuando com as oscilações senoidais da fase, já que a janela de 4,1 ms, ¼ do sinal de 60 Hz, gera sinais repetitivos em condições normais. No momento do curto, no entanto, pode-se perceber que as fases com falta têm um crescimento significativamente perceptível. O eixo das abscissas representa o número de janelas processadas, portanto tem correlação com o tempo do sinal que está sendo avaliado. De fato, cada ponto representa 4,1 ms, ou seja, o curto acontece no instante 27 x 4,1 ms = 110,7 ms, corroborando com a Figura 7. O eixo das ordenadas é a energia, numa correlação com o quadrado da corrente.

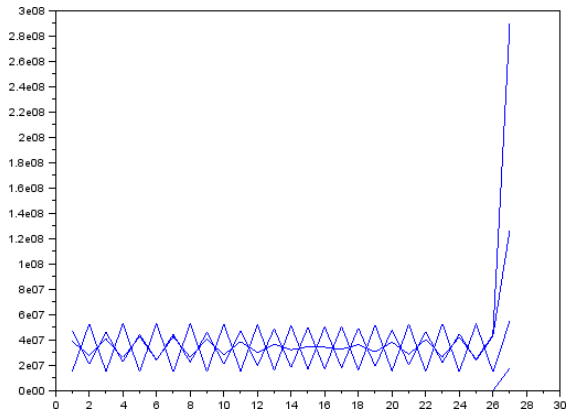

Figura 8 – Energia da média A7 das 3 fases para um curto franco BCG na barra 3.

7.2 Detecção por Transformada Hilbert-Huang

O resultado da simulação da falta no circuito ATP da Figura 5 foi transcrito para o Matlab para análise. As correntes foram processadas pelo algoritmo da EMD (do inglês Empirical Mode Decomposition) para obter as IMFs (do inglês Intrinsic Mode Functions) e resíduos. Os registros estão representados nas Figuras 9, 10 e 11 para fases A, B e C, respectivamente. Sobre cada um deles aplicou-se a Transformada Hilbert, conforme algoritmo descrito na seção 4.

Nas Figuras 9, 10 e 11 pode observar o curto-circuito já na primeira IMF de cada fase pela perturbação com a mudança de amplitude e frequência, sendo o evento mais acentuado nessa IMF_1 (de maior frequência). As fases em curto têm um maior destaque na mudança de amplitude, evidenciando o instante de 110,7 ms como o de início do evento.

O conjunto das frequências e amplitudes instantâneas para toas as IMFs geram a densidade espectral da energia. Esses espectrogramas vistos na Figura 12 mostram um desvio significativo de energia no momento da falta em cada fase. Após o inicio do disturbuio, as fases em curto tem maior destaque na mundaça de energia. Em todas tem o instante de início do distúrbio em 110,7 ms, corroborando com a Figura 5.

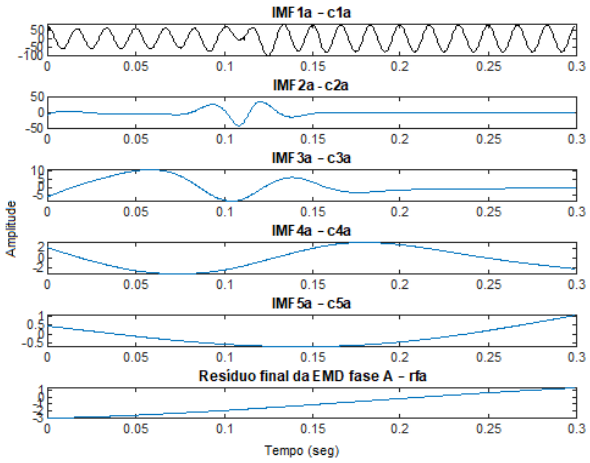

Figura 9 – Resultados das IMFs e resíduo após o término da EMD da fase A – Sistema sob curto BCG.

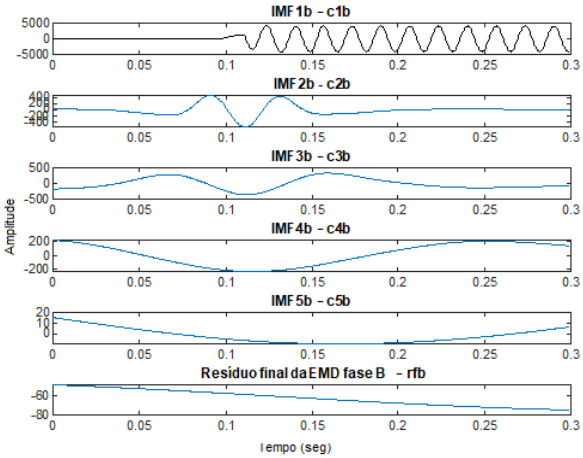

Figura 10 – Resultados das IMFs e resíduo após o término da EMD da fase B – Sistema sob curto BCG.

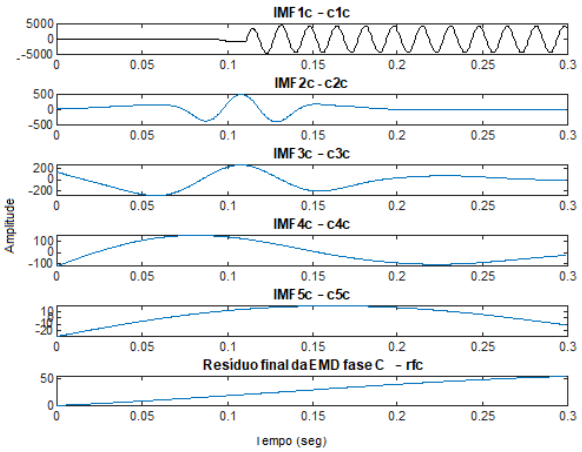

Figura 11 – Resultados das IMFs e resíduo após o término da EMD da fase C – Sistema sob curto BCG.

A Transformada de Hilbert sobre o conjunto de IMFs e resíduo resultante da EMD obtém-se o conjunto de frequências e amplitudes instantâneas no tempo resultante do método. Esses resultados são demonstrados nos espectrogramas Figura 12, com as amplitudes dB, representas pela energia do sinal. Em regime permanente tem valor médio de -139 dB para as três fases. No instante do curto-circuito fase A, B e C de -30 dB, -20 dB e -20 dB, respectivamente e durante o curto-circuito -130dB, - 106dB e -106 dB, também respectivamente.

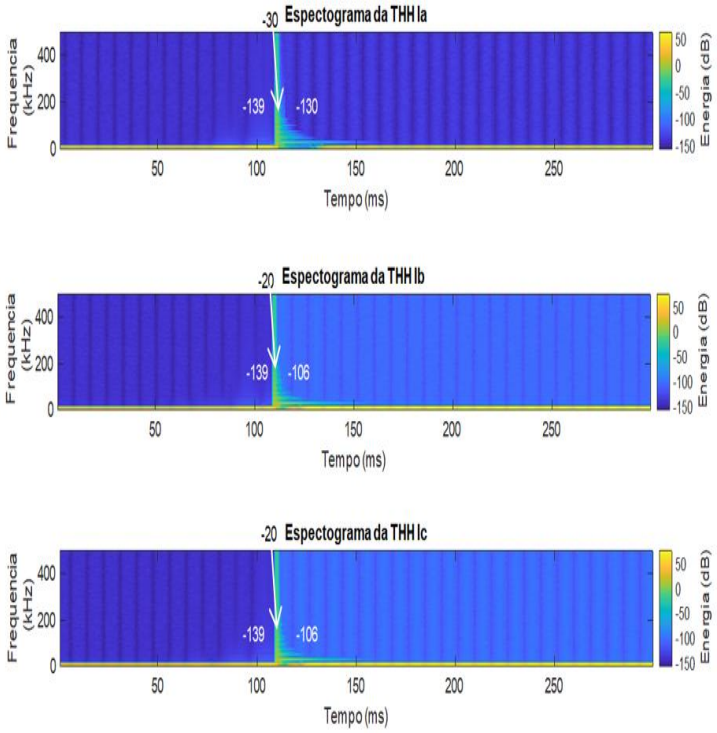

Figura 12 – Espectrogramas das IMFs fases A B e C – Sistema sob curto BCG.

8. CONCLUSÕES

Os sistemas propostos detectaram corretamente a falta proposta.

A transformada de Hilbert-Huang (THH) primordialmente destina-se à análise de dados a partir de sinais não estacionários e sistemas não lineares. O resultado até então indica que a THH é útil para a detecção de faltas de energia e as informações poderão ajudar a um restabelecimento mais rápido do sistema elétrico de potência.

Apesar da THH fornecer uma representação local (amplitude e frequência instantânea) fisicamente significativa, como teoricamente o cálculo de (4) deve ser realizado de $-\infty$ a $+\infty$ e, na prática, dispõe-se apenas de um segmento finito do sinal, haverá distorção de amplitude e de frequência dentro da janela de integração e, consequentemente, diminuição da precisão da estimativa espectral.

Vale destacar que há um efeito de borda comum a técnica. Nos resultados é verificado durante a passagem da pré-falta para falta, período subtransitório, que deve ser analisado o impacto na aplicação da técnica para detecção do início do distúrbio.

Trabalhos futuros, no entanto, deverão ampliar a aplicação desta ferramenta, testando-a para outros tipos de faltas como também desenvolvendo um sistema amplo de detecção, classificação e localização de faltas de energia. Para esta última finalidade, no entanto, sistemas de inteligência artificial deverão ser agregados ao conjunto de análise.

REFERÊNCIAS

Araújo, A. E.; Neves, W. L. Cálculo de transitórios eletromagnéticos em sistemas de energia, Editora UFMG, Belo Horizonte, MG, 2005.

Braz, V. S., Souza, A. C., Araújo e 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 - SBrT2017*, 3-6 de setembro, São Pedro, SP, 2017.

Cai, Z., Ning, F., Li, W., Gulliver, T. "Power quality signal analysis for the smart grid using the hilbert-huang transform," in Communications, Computers and Signal Processing (PACRIM), 2013 IEEE Pacific Rim Conference on, Aug 2013, pp. 296–301.

Cesário, F. R.; Moreira, F. A; Neves, W. L. A. Hilbert-Huang Transform Application in Fault Detection in Electric Power Transmission Lines. In *CLAGTEE 2019 – XIII Latin American Congress on Electricity Generation and Transmission*, 2019.

Costa, F. B.; Souza, B. A.; Brito, N. S. D. A Wavelet-Based Algorithm to Analyze Oscillographic Data with Single and Multiple Disturbances. In: *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting: Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1–8. ISSN 1932-5517.

Costa, F. B.; Souza, B. A.; Brito, N. S. D. Real-Time Detection of Fault-Induced Transitory in Transmission Lines. *IET Electronics Letters*, p. 753–755, may 2010. ISSN 0013-5194.

Costa, F. B.; Monti, A.; Lopes, F. V.; Silva, K. M.; Jamborsalamati, P.; Sadu, A. Two-Terminal Traveling-Wave-Based Transmission Line Protection, *IEEE*

Transactions on Power Delivery, vol. 32, no. 3, pp. 1382-1393, 2017.

Costa, F. B. Fault-induced transient detection based on real-time analysis of the wavelet coefficient energy. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 29, n. 1, p. 140–153, february 2014. ISSN 0885-8977.

Fischer, N., Skendzic, V., Moxley, R., Needs, J. (2012) Localização de Faltas em Relés de Proteção através de Ondas Viajantes *11th International Conference on Developments in Power System Protection*.The Institution of Engineering and Technology, 2012.

Gabor, D. - Theory of communication the analysis of information. Journal of the Institution of Electrical Engineers, v. 93, n° 26, 1946, pp. 429-441.

Fukuyama, Y.; Ueki, Y. Fault Analysis System Using Neural Networks and Artificial Intelligence. In: Proceedings of the *Second International Forum on Applications of Neural Networks to Power Systems (ANNPS'93*). [S.l.: s.n.]. p. 20–25, 1993.

Han, W. H.; Ren, H. X.; Chen, X.; Tao, X. J. The Application of Improved HHT to Harmonic Analysis and Fault Detection of Power System, *Advanced Materials Research*, vol. 354-355, pp. 1406, 1406-1411, 2012.

Huang N. E., Shen, Z., Long, S., Wu M., Shih, H., Zheng, Q., Yen, N., Tung, C., Liu, H. The Empirical mode decomposition and the Hilbert sepctrum for nonlinear and non-sationary time series analysis, *Proc R. Soc. Lond*. A, 454, 903-995, 1998.

Huang, N. E.; Wu, Z.; Long, S. R. Hilbert–Huang Transform. Scholarpedia, v. 3, n. 7, p. 2544, 2008.

IEEE Std. IEEE *Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems*, 2001.

Jamali, S.; Ghezeljeh, A. Fault Location on Transmission Line Using High Frequency Travelling Waves. *International Conference on Developments in Power System Protection*, v. 1, p. 220–223, april 2004.

Kezunovic, M.; Perunicic, B. Automated Transmission Line Fault Analysis Using Synchronized Sampling at Two Ends. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 11, n. 1, p. 441–447, 1996. ISSN 0885-8950.

Li, Z. Hilbert-Huang Transform Based Application in Power System Fault Detection. International *Workshop on Intelligent Systems and Applications*, 1-4, 2009.

Lin, D.; Jun, P.; Wenxia, S.; Jun, T.; Jun, Z. Fault Location for Transmission Line Based on Traveling Waves Using Correlation Analysis Method. In*: International Conference On High Voltage Engineering and Application (ICHVE 2008*). [S.l.: s.n.], 2008. p. 681 – 684), 2008.

Lopes, F. V. Localização de Faltas em Tempo Real Baseada na Teoria de Ondas Viajantes Usando Dados Não Sincronizados de Dois Terminais. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, maio 2014.

Lopes, D. S. Modelos Neurais Autônomos para Classificação e Localização de Defeitos Em Linhas de Transmissão, dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2017.

Neto, G. R. S. Caracterização de Períodos Relativos a Eventos de Curto-Circuito em Linhas de Transmissão, dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 2017.

Peng, Z. K., Tse, P. W., Chu, F. L. An improved Hilbert-Huang transform and its application in vibration signal analysis., *Journal of Sound and Vibration*, vol. 286pp. 187 – 205, 2005.

Neri Jr., A. L., Moreira, F. M., Souza, B. A. Detecção e Classificação de Faltas de Energia Usando a Transformada Wavelet e Métodos de Inferência, *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE*, *SBSE*, 2016, Natal, 2016a.

Neri Jr., A. L., Moreira, F. M., Souza, B. A. Uma Revisão da Transformada Wavelet Aplicada à Localização de Faltas de Energia em Redes Elétricas de Transmissão e Distribuição, *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE*, 2016, Natal, artigo 0358, 2016b.

Neri Jr., A. L., Moreira, F. M., Souza, B. A. Detecção e localização de curtos-circuitos em redes de distribuição usando a Transformada Wavelet e redes neurais artificiais. Tese (Doutorado) — Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil, maio, 2018.

Salim, R. H.; Oliveira, K. R. C.; Bretas, A. S. Fault Detection in Primary Distribution Systems using Wavelets. International conference on Power Systems Transients - IPST 2007, Lyon, França, paper 125.

Silva, M. da, Oleskovicz, M. e Coury, D. V. (2005). Uma Nova Ferramenta Baseada na Transformada Wavelet para Localização Digital de Faltas. Revista Controle & Automação. Vol. 13, nº 3, pp. 345 - 358.

Santoso, S.; Powers, E.; Grady, W.; Hofmann, P. Power Quality Assessment Via Wavelet Transform Analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 11, n. 2, p. 924 –930, april 1996. ISSN 0885-8977.

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." *XXXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais – SBrT2018*, 16-19 de setembro, Campina Grande, PB , 2018.

Wang, D.; Gao, H .L.; Luo, S. B.; Zou, G. B. Travelling Wave Fault Location Principle Based on Rogowski Coil's Differential Output and Hilbert-Huang Transform, *IET- DPSP*, 6-12, 2016.

Velasco, J. M. Power System Transients: Parameter Determination, vol. 1. Boca Raton - FL, 2010.

Xiaoli, Z.; Xiangjun, Z.; Li, L.; Choi, S.; Yuanyuan, W. Fault Location Using Wavelet Energy Spectrum Analysis of Traveling Waves. In: International Power Engineering Conference. [S.l.: s.n., 2007.

Zimath, S. L.; Ramos, M. A. F.; Filho, J. E. S. Comparison of Impedance and Travelling Wave Fault Location Using Real Faults. In: 2010 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. [S.l.: s.n., p. 1 – 5, 2010.