

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE UM ALGORITMO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS A UM TERMINAL UTILIZANDO ONDAS VIAJANTES E TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA EM UMA LINHA DE TRANSMISSÃO DE 69 kV

Momade Juma Amade
Departamento de Eletromecânica
Universidade Federal de Santa
Maria
Santa Maria-Brasil
momade.amade@acad.ufsm.br

Caison R. Ramos
Departamento de Eletromecânica
Universidade Federal de Santa
Maria
Santa Maria-Brasil
caison.ramos@acad.ufsm.br

Jean Pereira Rossini
Departamento de Eletromecânica
Universidade Federal de Santa
Maria
Santa Maria-Brasil
jean.rossini@acad.ufsm.br

Ghendy Cardoso Jr.
Departamento de Eletromecânica
Universidade Federal de Santa
Maria
Santa Maria-Brasil
ghendy@ufsm.br

Resumo — A localização eficaz de faltas em linhas de transmissão nos Sistemas Elétricos de Potência (SEP) é de extrema importância, pois permite o deslocamento preciso da equipe de manutenção. A mobilidade correta da equipe de manutenção aumenta a confiabilidade e a continuidade do fornecimento de energia. Este artigo tem como objetivo avaliar o desempenho de um algoritmo de localização de faltas para uma linha de transmissão de 69 kV. O método utilizado baseia-se em ondas viajantes e na transformada de Wavelet discreta, utilizando dados disponíveis em um único terminal. O modelo analisa a onda viajante de corrente proveniente de simulações realizadas no Simulink para uma linha de transmissão de cem quilômetros. Diversas situações foram consideradas: a influência do ângulo de incidência da falta, a relação entre a impedância da fonte e a impedância da linha, e a influência do ruído na determinação da distância até a falta. Observou-se que o algoritmo localiza corretamente diferentes tipos de faltas para distâncias de 25, 50 e 75 km, com erros variando de 0,13% a 0,65%.

Palavras Chaves - Localizador de Faltas, Linhas de Transmissão, Ondas Viajantes, Transformada de Wavelet Discreta.

I. INTRODUÇÃO

Os sistemas de energia elétrica devem garantir o fornecimento contínuo de energia, ser confiáveis e seguros durante as condições operacionais para evitar apagões. Este fato exige sistemas avançados de proteção para interromper as correntes de falta, permitindo a desconexão rápida dos equipamentos danificados.

Soma-se a isso o fato de que a energia elétrica gerada pode viajar longas distâncias por meio de linhas de transmissão, as quais estão expostas a diferentes fenômenos transitórios, como descargas atmosféricas, curtos-circuitos, sobrecargas, envelhecimento, queimadas e vandalismo [1].

Quando uma falta ocorre em uma linha de transmissão, sua localização deverá ser estimada para realizar as ações de corretivas e restaurar a sua operação normal. A rapidez na localização da falta é uma métrica de suma importância para a restauração do fornecimento de energia. Caso contrário pode resultar em grandes perdas econômicas para as concessionárias e clientes.

Visto o acima exposto, o objetivo deste artigo é analisar um algoritmo de localização de faltas em linhas de transmissão de

69 kV, utilizando o método de ondas viajantes com informações de apenas um terminal e a Transformada Wavelet Discreta.

O artigo está estruturado da seguinte forma: na segunda seção, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre ondas viajantes; na terceira seção, uma revisão sobre a Transformada Wavelet; na quarta seção, a técnica de localização de faltas é detalhada; na quinta seção, a metodologia é explicada; na sexta seção, os resultados são apresentados; e na sétima seção, são feitas as considerações finais do artigo.

II. ONDAS VIAJANTES EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Quando ocorre uma falta em uma linha de transmissão, ela gera ondas de tensão e corrente que se sobrepõem ao sinal original, propagando-se a partir do ponto de defeito em ambas as direções ao longo da linha com uma velocidade próxima à da luz. Ao encontrarem uma descontinuidade, ou seja, uma variação abrupta nos parâmetros do circuito, essas ondas são refletidas, retornando ao ponto de defeito, onde ocorrem novas reflexões. A outra parte das ondas continua a se propagar além da descontinuidade [2].

Assim, as perturbações dentro da linha de transmissão, têm impactos notados somente depois das ondas trafegarem até o ponto de medição. Este procedimento é repetido indefinidamente até que toda a energia dessas ondas se extingam.

É importante ressaltar que, estas ondas refletidas e refratadas satisfazem as equações diferenciais da linha de transmissão, condizem com princípio de conservação de energia, dispõem das mesmas propriedades que as ondas incidentes e obedecem ao princípio da superposição [3][4].

III. TRANSFORMADA WAVELET

A Transformada de Fourier é útil para a análise de sinais no domínio da frequência. No entanto, para sinais que exigem correlação simultânea nos domínios do tempo e da frequência, essa técnica se mostra ineficaz.

A avaliação detalhada do comportamento dinâmico do sinal é difícil com a Transformada de Fourier, pois suas resoluções no plano tempo-frequência são invariantes. Para a análise de sinais dinâmicos no domínio tempo-frequência

simultaneamente, a Transformada Wavelet (TW) é mais adequada.

Cada janela referida na TW é conhecida como Wavelet-Mãe (ψ). As principais características da Wavelet-Mãe são: comportamento ondulatório e concentração de energia em um intervalo finito de tempo, o que implica em um decaimento rápido de amplitude. Estas características garantem a localização espacial da própria *wavelet*-mãe[5][6][7].

A partir da *wavelet*-mãe, por meio dos parâmetros de dilatação e translação, obtém-se uma família *wavelet*. Neste caso a *wavelet* pode ser definida de acordo com (1).

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad a \in \mathbb{R}^+, b \in \mathbb{R} \quad (1)$$

Onde:

a-parâmetro de escala ou escalamento

b-parâmetro de translação

Dependendo do modo como vai ocorrer a variação dos parâmetros de escalamento. e de translação, a TW pode ser contínua ou discreta[8].

A. Transformada Wavelet Contínua

Matematicamente, a transformada *wavelet* contínua (TWC) de um sinal $f(t)$ é definida como o produto interno de entre $f(t)$ e a função *wavelet* $\psi_{a,b}(t)$ (comprimida ou expandida) e transladada, a qual providencia uma representação bidimensional de sinal contínuo unidirecional. A TWC também pode ser definida em um espaço vetorial de funções quadráticas integráveis $L^2(\mathbb{R})$, ou seja:

$$TWC_f^\psi(a,b) = \langle f(t), \psi_{a,b}(t) \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{a,b}^*(t) dt \quad (2)$$

Em que $\psi_{a,b}^*(t)$ é o conjugado de (1), considerando uma variação contínua dos parâmetros, a e b , isto é, a escala e translação, respeitando as mesmas condições que lhes são impostas.[2].

Apesar da TWC ser adequada para localizar eventos no domínio tempo-frequência, ela muito é pouco utilizada devido a sua complexidade computacional[9][10].

B. Transformada Wavelet Discreta

Segundo [2], para a implementação computacional da TWC é necessário discretizar os parâmetros de escala (a) e de translação (b) na equação (1). Pode-se efetuar a discretização dos parâmetros a e b , fazendo $a = a_0^m, b = na_0^m b_0$ em que $m, n \in \mathbb{Z}, a_0 > 1$ e $b_0 \neq 0$. A variável a_0 é denominada passo de dilatação e b_0 corresponde à variação no tempo. Esta transformação torna (2) um conjunto de coeficientes finito, todavia para uma representação de TWC [7][9].

A transformação apresentada anteriormente, geralmente é designada de expansão em série de *wavelet*, que tem objetivo de abranger todo o domínio tempo-frequência. Substituindo os

parâmetros a e b discretizados em (1), obtém-se as *wavelets*-filhas, conforme descritas em (3).

$$\psi_{m,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a_0^m|}} \psi\left(\frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right), \quad m, n \in \mathbb{Z} \quad (3)$$

Devido à maneira como as resoluções no plano tempo-frequência funcionam, uma janela maior no tempo irá capturar as partes do sinal que mudam lentamente ao longo do tempo, ou seja, as componentes de baixa frequência. Por outro lado, um intervalo de amostragem menor destacará principalmente as partes do sinal que mudam rapidamente, ou seja, as componentes de alta frequência. Isso faz com que seja ideal para analisar variações transitórias no sinal[6][8].

A Fig. 1, representa a forma como as resoluções tempo-frequência são divididas no domínio *wavelet*.

Observando-a vê-se que as escalas temporais no eixo horizontal e as frequências no eixo vertical. As diferentes regiões da figura, são diferentes escalas de tempo e frequência de um sinal, correspondendo componentes de alta frequência e curta duração, e bem representados em escalas de tempo menores e frequências mais altas. Outrossim, componentes de baixa frequência e longa duração serão mais proeminentes em escalas de tempo maiores e frequência.

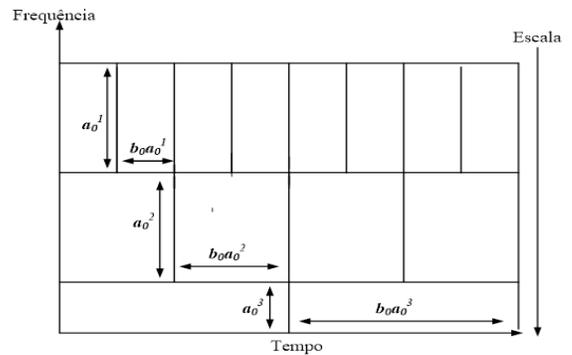


Fig.1. Resoluções tempo-frequência da TWD [10].

Por analogia a TWC, a transformada Wavelet discreta (TWD) é determinada, substituindo os parâmetros a e b discretizados em (2) e então, aplicado a um sinal $f(t)$, também discretizado, todavia no tempo, conforme em (9).

$$TWD(m,n) = \frac{1}{\sqrt{|a_0^m|}} \sum_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right), \quad m, n \in \mathbb{Z} \quad (4)$$

IV. TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE SINAL PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS POR ONDAS VIAJANTES

O método de localização de falta por ondas viajantes, usando dados de apenas um terminal, necessita de medições em apenas uma extremidade da linha. Outrossim, requer a identificação da chegada da primeira onda viajante gerada pela falta na linha, assim como a identificação adequada da reflexão da onda inicial a partir do próprio ponto de falta. O tempo entre onda incidente e onda refletida é usado para determinação da localização da falta.

Neste caso, foram feitas análises em dois cenários: quando a falta ocorre na primeira metade da linha e quando a falta ocorre na segunda metade da linha.

No primeiro cenário, representado pela Fig. 2, a distância é calculada levando em consideração, o produto da velocidade de onda viajante e metade do atraso entre dois picos consecutivos no coeficiente de transformada de Wavelet. Neste caso a distância até a falta pode ser calculada a partir de (5):

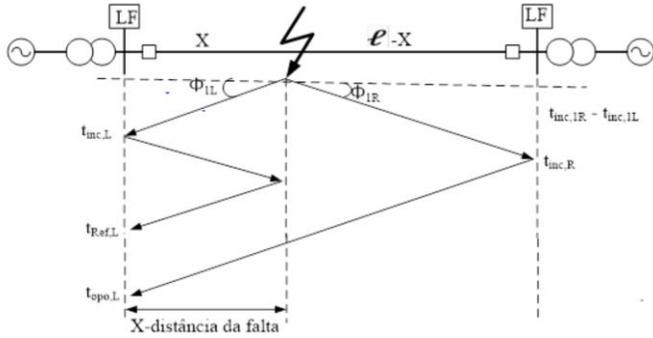


Fig. 2. Diagrama de quando ocorre a falta na primeira metade da linha [11].

Onde:

- $t_{inc,L}$ -tempo de incidência no terminal local
- $t_{ref,L}$ -tempo de reflexão no terminal local;
- $t_{opo,L}$ -tempo de refratado no terminal local;

$$X = \frac{v_p t_d}{2} = \frac{v_p (t_{ref,L} - t_{inc,L})}{2} \quad (5)$$

Em que:

- v_p é a velocidade de propagação de ondas viajantes;
- t_d é a diferença de tempo dos dois primeiros picos (primeira onda incidente e primeira onda refletida) do coeficiente de transformada wavelet do modo aéreo.

Se a falta ocorrer na segunda metade da linha, conforme mostra a Fig. 3, a distância é calculada levando em consideração o comprimento total da linha subtraído pelo produto da velocidade de onda viajante e metade do atraso entre dois picos consecutivos no coeficiente da transformada de Wavelet, sendo calculada a partir de (6):

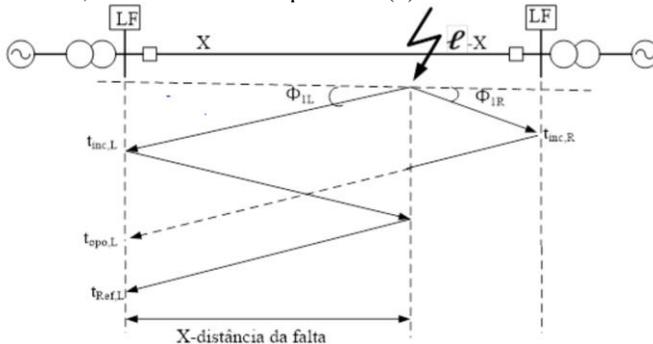


Fig. 3. Diagrama de quando ocorre a falta na segunda metade da linha [11]

$$X = \ell - \frac{v_p t_d}{2} = \ell - \frac{v_p (t_{ref,L} - t_{opo,L})}{2} \quad (6)$$

V. METODOLOGIA

Para realizar a avaliação do desempenho do algoritmo de localização de faltas usando sinais de corrente e MATLAB/Simulink, escolheu-se uma linha de 69kV baseada na linha de transmissão real que conecta as subestações de Benevides e Mosqueiro, localizadas no estado do Pará. Estas subestações distanciam-se 45 km, mas para fins de análise utilizou-se uma distância de 100 km.

A modelagem dessa linha foi realizada no MATLAB/Simulink, apresentada na Fig. 4. As características da linha em ambas as extremidades da falta foram mantidas constantes, com exceção do comprimento da linha.

Foram feitas análises para diferentes tipos faltas: monofásicas, bifásicas (com e sem terra) e trifásicas (com e sem terra). Utilizou-se as resistências de falta de 10, 50, 100 e 200 Ω , nas distâncias de 25 km, 50 km e 75 km em relação ao terminal de medição. Nestes pontos de falta também foi estudada a influência dos ângulos de incidência de 30°, 45° e 90°, na determinação da distância até a falta. Por último foram feitas análises considerando a relação da impedância de fonte e da linha, assim como a presença de ruído nos sinais medidos.

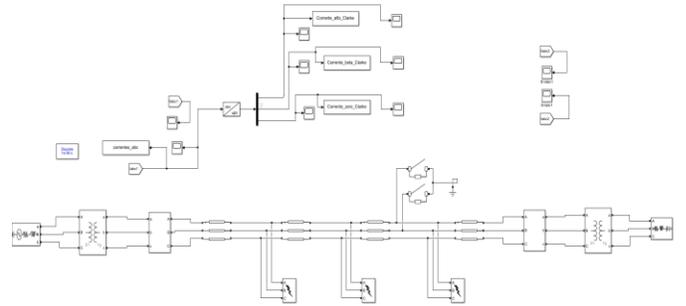


Fig. 4. Modelagem da linha de 69 kV, através do MATLAB/Simulink.

Aliado a este, com auxílio de TWD, através de coeficientes de detalhe 3 da corrente alfa, os quais determinam os tempos da primeira onda incidente, assim como a primeira onda refletida, ilustrados na Fig. 5.

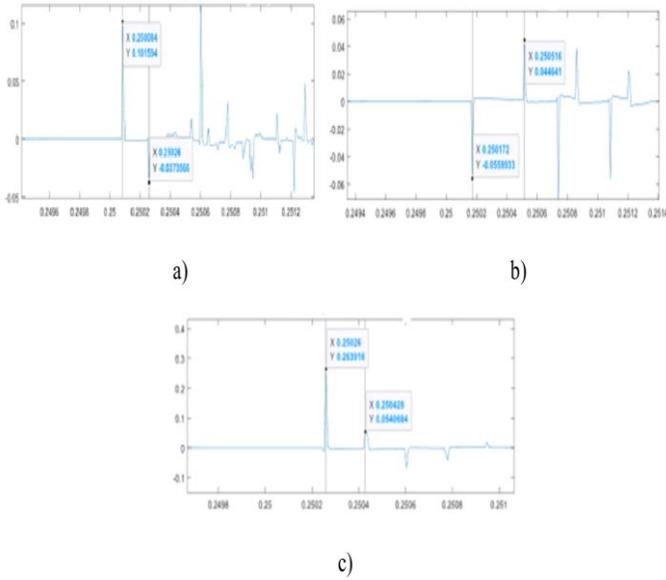


Fig. 5. Coeficiente de detalhe 3 da corrente alfa a) Falta da fase AT a 25 km, b) Falta da fase ACT a 50 km, c) Falta da fase ABC a 75 km

VI. RESULTADOS

A. Cálculo da distância para diferentes tipos de falta

Nas Tabelas 1, 2 e 3 estão representados resultados de localização de falta (A) com terra., AC com terra e ABC, respectivamente através do método de ondas viajantes e transformada wavelet discreta a um terminal, mostram uma similaridade para as distâncias em que se encontram as faltas e realizando a comparação da distância atual da falta e a estimada, aliada aos erros relativos, observa-se que os erros não excedem a 0,65%. e o menor erro 0,13 % correspondente a 50 km.

Tab 1 - Resultados de Localização de Falta Monofásica com Terra (AT).

Resistência de falta (Ω)	Distância		
	Atual (km)	Calculada (km)	Erro (%)
10	25	25,51	0,51
	50	50,13	0,13
	75	75,65	0,65
30	25	25,51	0,51
	50	50,13	0,13
	75	75,65	0,65
50	25	25,51	0,51
	50	50,13	0,13
	75	75,65	0,65
70.0	25	25,51	0,51
	50	50,13	0,13
	75	75,65	0,65
100	25	25,51	0,51
	50	50,13	0,13
	75	75,65	0,65
200	25	25,51	0,51
	50	50,13	0,13
	75	75,65	0,65

Tab 2 - Resultados de Localização de Falta bifásica (ACT)

Resistência de falta (Ω)	Distância		
	Atual (km)	Calculada (km)	Erro (%)
10	25	25,51	0,51
	50	49,87	0,13
	75	75,65	0,65
30	25	25,51	0,51
	50	49,87	0,13
	75	75,65	0,65
50	25	25,51	0,51
	50	49,87	0,13
	75	75,65	0,65
70	25	25,51	0,51
	50	49,87	0,13
	75	75,65	0,65
100	25	25,51	0,51
	50	49,87	0,13
	75	75,65	0,65
200	25	25,51	0,51
	50	49,87	0,13
	75	75,65	0,65

Tab 3 - Resultados de Localização de Falta Trifásica (ABC)

Resistência de falta (Ω)	Distância		
	Atual (km)	Calculada (km)	Erro (%)
10	25	25,51	0,51
	50	49,87	0,13
	75	75,65	0,65
30	25	25,51	0,51
	50	49,87	0,13
	75	75,65	0,65
50	25	25,51	0,51
	50	49,87	0,13
	75	75,65	0,65
70	25	25,51	0,51
	50	49,87	0,13
	75	75,65	0,65
100	25	25,51	0,51
	50	49,87	0,13
	75	75,65	0,65
200	25	25,51	0,51
	50	49,87	0,13
	75	75,65	0,65

B. Influência do ângulo de incidência de falta

Para as faltas AT, ACT, nos ângulos de 30°, 45° e 90° apresentam uma semelhança se se comparar a distância atual da falta e a estimada, conjugada aos erros relativos, observa-se que os erros não excedem a 0,65%. e o menor erro 0,13 % correspondente a 50 km. Porém, para falta ABC para ângulos de 30°, 45°, 90° e na distância de 25 km, localiza com erros expressivos com 97,68 km e 74,49 km respectivamente. isto deve-se pelo facto das faltas trifásicas gerarem mais reflexões de ondas, o que traz consigo erros de detecção das primeiras ondas refletidas, visto que a extremidade de medições, está mais próximo do ponto de ocorrência da falta, mas para as distâncias de 50 km e 75 km, o algoritmo calcula corretamente com erros, 0,13% e 0,51%, respectivamente.

C. Influência da relação entre impedância da fonte e a impedância da linha

Para uma falta envolvendo a fase AT, para diferentes percentagens da relação entre impedância da fonte (Z_S) e impedância da linha (Z_L), ($Z_S = 0.1 * Z_L$, $Z_S = 0.5 * Z_L$, $Z_S = Z_L$, $Z_S = 1,5 * Z_L$, $Z_S = 2 * Z_L$), mostram uma não influência da determinação das distâncias de falta e fazendo -se a comparação da distância atual da falta e a estimada, aliada aos erros relativos, observa-se que os erros são 0.52% 0.13 % e 0.65% para distância 25 km, 50 km e 75 km, respectivamente. Para falta ACT a 50 km e 75 km, o algoritmo determina as distâncias com erros relativos de 0.13 % e 0.65%. Contudo, a distância de 25 km, observa-se uma melhoria do erro relativo para ($Z_S = 0.1 * Z_L$, $Z_S = 1,5 * Z_L$, $Z_S = 2 * Z_L$) o qual é igual a 0.36% por outro, mostra um erro expressivo para ($Z_S = Z_L$)

Para falta ABC a 50 km e 75 km, o algoritmo determina as distâncias com erros relativos de 0.13 % e 0.65%. e na distância de 25 km, localiza com erros expressivos com a distância de 74,49km na relação $Z_S = 0.5 * Z_L$.

D. Influência do ruído na determinação da distância da falta

Para faltas AT e ABC, o algoritmo calcula corretamente até 90 dB e para valores inferiores a este, o algoritmo perde a sua consistência. Para falta ACT, a 50 km mostra um erro expressivo de 30% a 90 dB e para valores inferiores a este, o algoritmo perde a sua consistência.

VII. CONCLUSÃO

Conclui-se que o algoritmo de localização de faltas avaliado neste trabalho apresenta alta precisão na localização de faltas, com erros relativos que não excedem 0,65%. O menor erro registrado foi de 0,13%, correspondendo a uma distância de 50 km.

Para a influência dos ângulos de incidência: nas faltas AT e ACT, os ângulos de incidência de 30°, 45° e 90° não afetaram significativamente a precisão da localização. No entanto, para faltas ABC, ângulos e distâncias específicos apresentaram erros expressivos, indicando a necessidade de ajustes ou considerações adicionais nesses casos.

Na relação entre impedâncias, os resultados demonstram que a variação da razão entre a impedância da fonte e a impedância da linha não influenciou significativamente a determinação da distância da falta para faltas AT e AC à terra. Para faltas ABC e certas razões de impedância, erros expressivos foram observados. Esses resultados ressaltam a relevância de considerar os parâmetros de impedância para uma localização precisa de falhas.

Por fim, quanto à influência do ruído, o algoritmo apresentou consistência na localização de faltas para níveis de ruído de até 90 dB para faltas AT e ABC. No entanto, para faltas ACT, erros expressivos ocorreram a 50 km com ruídos abaixo do limite, evidenciando maior sensibilidade. Os resultados da comparação de resistência de falta indicam consistência na localização de falta, independentemente do valor da resistência. Isto é consistente com a literatura sobre a resiliência do método das ondas viajantes.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento e Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES/PROEX)

REFERÊNCIAS

- [1] Kindermann, Geraldo. Curto-Circuito. 2. ed. [Mod. e Ampl.] Edição do próprio autor: 1997.
- [2] Lima JR, J. R.; Neves, W. L. A.; Souza, B. A. Localizador de faltas baseado na teoria de ondas viajantes e transformada de wavelet com dados do terminal local. Pureto Iguazu, Argentina, 2015. K. Elissa, "Título do artigo, se conhecido", não publicado.
- [3] Bewley, L. V. Traveling Waves on Transmission Systems. 1Ed ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1933. Y. Yorozu, M. Hirano, K. Oka e Y. Tagawa, "Estudos de espectroscopia de elétrons em mídia magneto-óptica e interface de substrato plástico", IEEE Transl. J. Magn. Japão, vol. 2, pp. 740-741, agosto de 1987 [Resumo da 9ª Conferência Anual. Magnética Japão, p. 301, 1982].
- [4] Naidu, S. R. Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência. Paraíba: Editora-Crafset Co -Edição Eletrobrás, Editora, 1983.
- [5] Daubechies, I. Ten Lectures on Wavelets. New Jersey: AT&T Bell Laboratories and Rutgers University, 1992.
- [6] He, Z. Wavelet analysis and transient signal processing applications for power systems. 1st ed. John Wiley, 2016.
- [7] Misiti, M.; Misiti, Y.; Oppenheim, G.; Poggi, J.-M. Wavelet Toolbox Computation Visualization Programming User's Guide For Use with Matlab. The MathWorks, Inc. All Rights Reserved, 1996.
- [8] Da Silveira, P. M.; Seara, R.; Zum, H. H. Localização de Faltas por Ondas Viajantes-Uma Abordagem Baseada em Decomposição Wavelet. Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2001.
- [9] Kumar, V.; Gawre, S. K.; Kumar, T. Power Quality Analysis Using Wavelet Transform: A Review. Internacional of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 2014. Disponível em: <www.ijrset.com>.
- [10] Marques, L. E. V. P. Aplicação da teoria das ondas viajantes para detecção, classificação e localização de faltas em linhas de transmissão utilizando o software ATP, 28. nov. 2018. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina.
- [11] Fluty, Wesley, "Fault Location Techniques Using the Traveling Wave Method and the Discrete Wavelet Transform" (2019). Theses and Dissertations--Electrical and Computer Engineering. 146.

