

Métodos de Detecção de Falhas em Linhas de Transmissão de Corrente Contínua: Uma Análise Comparativa

Harrison B. Lima*. Damásio Fernandes Jr.**
Washington L. A. Neves***

*Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, (e-mail: harrison.lima@ee.ufcg.edu.br)

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

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

Abstract: It is proposed to carry out a comparative study between the methods of detecting faults in direct current transmission lines. The methods selected for the comparative study belong to the group of methods based on the theory of traveling waves. Methods based on the discrete redundant wavelet transform and a method based on the energy of the signal derivative were used. The performance of the methods was analyzed based on simulations performed via MATLAB/Simulink of a bipolar HVDC (*High Voltage Direct Current*) system. In the analyzes to evaluate the performance of the methods, the fault points, the type of fault and the fault resistance were varied, in order to test the robustness of the methods for high and low impedance faults. In all evaluated methods, a self-adaptive threshold for fault detection was applied. From the results, it was verified that the methods that use the TWDR Haar and the energy of the signal derivative obtained the best performances, however the TWDR Haar method has less computational effort.

Resumo: Propõe-se realizar um estudo comparativo entre os métodos de detecção de falhas em linhas de transmissão de corrente contínua. Os métodos selecionados para o estudo comparativo pertencem ao grupo dos métodos baseados na teoria de ondas viajantes. Foram utilizados métodos que se baseiam na transformada *wavelet* discreta redundante e um método que se baseia na energia da derivada de sinais. O desempenho dos métodos foi analisado com base em simulações realizadas via MATLAB/Simulink de um sistema HVDC (do inglês *High Voltage Direct Current*) bipolar. Nas análises para avaliar o desempenho dos métodos, foram variados os pontos de falta, o tipo de falta e a resistência de falta, a fim de testar a robustez dos métodos para falhas de alta e baixa impedância. Em todos os métodos avaliados, foi aplicado um limiar autoadaptativo para detecção de falhas. A partir dos resultados, foi verificado que os métodos que fazem uso da TWDR Haar e da energia da derivada de sinais obtiveram os melhores desempenhos, porém o método TWDR Haar possui um esforço computacional menor.

Keywords: Fault detection; Fault location; HVDC; Traveling waves; Transmission lines.

Palavras-chaves: Detecção de falhas; Localização de falhas; HVDC; Ondas viajantes; Linhas de transmissão.

1. INTRODUÇÃO

Um dos principais objetivos da transmissão de energia elétrica é que ela se dê com níveis mínimos de perdas e apresente boa continuidade de serviço. As linhas de transmissão (LT) podem ser classificadas em linhas em corrente alternada (CA) ou linhas em corrente contínua (CC), dependendo do tipo de sistema utilizado. A transmissão em CC é majoritariamente usada em duas situações: na interligação de sistemas elétricos de potência com frequências distintas e para o caso de sistemas de transmissão que apresentam longa extensão, seja aérea ou submarina (MELO, 2018). Como geralmente possuem grandes extensões, as linhas de transmissão em corrente contínua podem ter maior susceptibilidade a distúrbios provenientes da ação dos ventos, chuvas, descargas atmosféricas, entre outros. Assim, a realização de um diagnóstico rápido e preciso de

defeitos ocorridos no sistema de transmissão é de fundamental importância para o seu pronto restabelecimento. Percebe-se que a utilização de métodos eficientes para detecção de falhas está se tornando cada vez mais essencial, pois podem evitar longas interrupções de fornecimento de energia, assegurando, consequentemente, boas taxas de continuidade de serviço e uma restauração rápida da linha com defeito. Os sistemas do tipo HVDC começaram a ser mais utilizados, principalmente devido ao desenvolvimento de novos dispositivos na eletrônica de potência, resultando em um aumento da viabilidade destes sistemas. Atualmente, podem ser encontradas na literatura algumas técnicas que permitem a detecção de falhas em linhas de transmissão em sistemas do tipo HVDC a partir de diferentes análises e conceitos, cada um com as suas respectivas potencialidades e limitações. No entanto, pouco se relata sobre análises comparativas entre estes

3.2 Energia da Derivada de Sinais (EDS)

O algoritmo que utiliza a energia da derivada de sinais foi proposto por Melo (2018) para realizar a detecção de distúrbios na rede, utilizando dados de tensões e/ou correntes medidos nos terminais da LT. Tal algoritmo foi escolhido por ser capaz de detectar, de forma eficaz, faltas em LT bipolar em tempo real. O método proposto por Melo (2018) realiza a localização das faltas a partir do algoritmo proposto por Gale *et al.* (1993) para dois terminais. Este método faz uso ainda de um limiar de detecção de faltas autoadaptativo. As etapas para utilização do método consistem no cálculo da derivada dos sinais, em seguida no cálculo dos coeficientes de energia desta derivada, no cálculo do limiar autoadaptativo e, por fim, na realização da localização da falta por meio do equacionamento proposto por Gale *et al.* (1993). A aplicação da derivada de sinais pode ser expressa na fórmula (2).

$$C_{Xder}(k) = \frac{X(k) - X(k-1)}{\Delta t} \quad (2)$$

sendo $X(k)$ o sinal aplicado à derivada no instante k , podendo ser tanto sinais de tensões como de correntes, Δt é o passo de tempo, $C_{Xder}(k)$ é o coeficiente da derivada do sinal X analisado no instante k .

O cálculo da energia dos coeficientes de derivada de sinais é feito de modo que possa ser facilitada a detecção de transitórios, além do fato de garantir que todos os valores que serão obtidos no final possuam valores positivos. Esta energia é calculada de forma janelada de acordo com a expressão (3).

$$\xi_{C_{Xder}}(k) = \sum_{n=k+1-\Delta k_{En}}^k C_{Xder}^2(n) \quad (3)$$

sendo $\xi_{C_{Xder}}(k)$ a energia da k -ésima janela do coeficiente de derivada do sinal $C_{Xder}(k)$ e Δk_{En} o tamanho da janela deslizante.

4. METODOLOGIA

Para se fazer a análise comparativa entre os métodos escolhidos, foram realizadas simulações digitais no MATLAB/Simulink. Antes, porém, faz-se necessário a definição de alguns conceitos para determinação da precisão dos métodos, além de estudos sobre a aplicação dos métodos.

4.1 Cálculo dos Erros das Localizações de Faltas

O erro é um parâmetro fundamental na avaliação da precisão do método localizador de defeito na LT. Os erros podem ser definidos em três tipos, descritos a seguir.

- Erro Absoluto (EA): O erro absoluto é a diferença entre a distância do terminal ao ponto real de ocorrência do distúrbio e a distância do terminal local estimado pelo algoritmo localizador. Considera-se o EA como sendo o módulo da referida diferença, dado em quilômetros, conforme apresentado na expressão (4).

$$EA = |d_{real} - d_{estimada}| \quad (4)$$

onde d_{real} e $d_{estimada}$ são, respectivamente, as localizações real e estimada, ambas dadas em quilômetros.

- Erro Percentual (EP): O erro percentual admite uma avaliação da precisão dos métodos de localização de faltas aplicados às LT com diferentes comprimentos. Este parâmetro é percentual, sendo proporcional à razão entre o EA e o comprimento l da LT monitorada. Na expressão (5) é apresentada a fórmula para cálculo do EP.

$$ER = \frac{|d_{real} - d_{estimada}|}{l} \cdot 100, \quad (5)$$

em que l é o comprimento da LT na qual ocorreu a falta.

- Erro Admissível para os Métodos TWFL (*Traveling Wave Fault Locators*): De acordo com dados apresentados em RTDS (2008), o desvio máximo esperado, em módulo, para as localizações das faltas é proporcional à metade do período de amostragem Δt , conforme apresentado na expressão (6).

$$|e| \approx \frac{\Delta t \cdot c}{2} \quad (6)$$

em que e representa a tolerância de erro admissível para a localização da falta, Δt é o período de amostragem adotado e c é a velocidade da luz (300.000 km/s).

Com o período de amostragem de 50 μ s, a tolerância para o erro é de 7,5 km. Logo, simulações que apresentem desvios, em módulo, abaixo de 7,5 km podem ser consideradas bem-sucedidas, já que a localização da falta foi satisfatória.

4.2 Limiar de Detecção Auto-adaptativo

Melo (2018) propõe em seu trabalho que seja utilizado um limiar auto-adaptativo para detecção de transitórios. Uma vez que o valor do coeficiente calculado supere esse limiar pode ser detectado o transitório, se este valor for menor que o limiar, infere-se que o sistema está em regime permanente.

O limiar auto-adaptativo consiste em duas diferentes etapas. Uma destas etapas é o cálculo do desvio padrão das amostras analisadas em um determinado intervalo de tempo, desde que seja garantido que tais amostras estejam em regime permanente neste intervalo de tempo. Melo (2018) sugere que tal intervalo seja da ordem de 100 milissegundos.

A segunda etapa consiste em encontrar um parâmetro chamado de fator característico do sistema, F_{CS} . Este fator F_{CS} é encontrado pela razão entre o valor máximo do coeficiente calculado pelo valor médio destes coeficientes, conforme visto na expressão (7).

$$F_{CS} = \frac{\max(S)}{\text{mean}(S)} \quad (7)$$

em que $\max(S)$ é o máximo valor obtido para o coeficiente no intervalo de observação quando o sistema está em regime permanente e $\text{mean}(S)$ é o valor médio deste coeficiente neste mesmo intervalo.

O limiar autoadaptativo para o método proposto que se baseia na energia da derivada de sinais então é calculado de acordo com a expressão (8).

$$limiar = (S(k - 1) + desvio) \cdot (F_{CS}) \quad (8)$$

em que $S(k - 1)$ é a amostra anterior do coeficiente à amostra analisada, $desvio$ é o desvio padrão do curto período em que o fator característico do sistema foi calibrado e no qual foi garantido que o sistema estava em regime permanente.

4.3 Sistema Simulado

O sistema simulado foi um sistema bipolar, devido ao fato deste tipo de sistema ser o único aplicado para transmissão HVDC no Brasil. Foram simulados 1824 casos de faltas em uma LT HVDC bipolar, foi variada a distância da falta, a resistência da falta e o tipo de falta.

O sistema bipolar modelado foi um sistema HVDC fictício, de modo que representasse a LT que realiza a interligação entre Foz do Iguaçu e Ibiuna com 600 kV e uma LT bipolar com 790 km de extensão, simulado no MATLAB/Simulink®. Os dados desta linha podem ser observados no Quadro 1. A Figura 3 é utilizada para ilustrar o sistema HVDC bipolar simulado. Este sistema foi o mesmo utilizado em Freitas (2013) e Melo (2018) e os dados do sistema encontram-se na própria Figura 3.

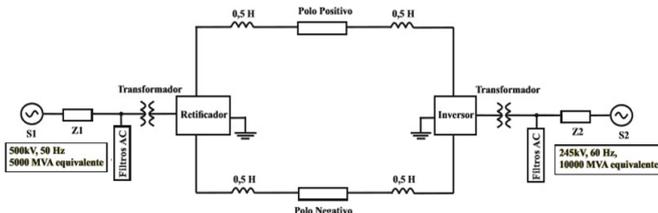


Fig. 3 Sistema bipolar simulado.

Quadro 1. Dados da linha de transmissão bipolar.

Parâmetros	Linha 600 kV
Comprimento (km)	790
Resistência (Ω /km)	0,04671
Indutância (H/km)	$1,3791 \cdot 10^{-3}$
Capacitância (F/km)	$12,91 \cdot 10^{-9}$

As condições para os 1824 casos de falta simulados podem ser vistas no Quadro 2. As resistências de falta foram escolhidas tomando como base valores utilizados em trabalhos como Nanayakkara *et al.* (2012) e Melo (2018). Pretende-se ainda avaliar os métodos para impedâncias de falta maiores.

Quadro 2. Condições de falta.

Resistência de falta	Local de Falta	Tipo de falta
0,1 Ω ; 0,2 Ω ; 0,5 Ω ; 1 Ω ; 3 Ω ; 5 Ω ; 10 Ω ; 30 Ω ; 50 Ω ; 100 Ω .	15 km; 20 km; 25 km; 30 km; ...; 765 km; 770 km; 775 km.	Polo-terra, polo- polo, polo-polo- terra.

5. RESULTADOS E ANÁLISES

Foram escolhidos os métodos que participaram da análise comparativa, os quais foram: TWDR Haar, TWDR db4 e Energia da derivada de sinais. Tais métodos foram aplicados no MATLAB.

Para o sistema simulado, foram realizados três diferentes tipos de análise: uma avaliando a influência da localização da falta, outro analisando a influência da resistência da falta e uma terceira analisando a influência do tipo de falta sobre o desempenho dos 3 métodos avaliados.

5.1 Análise da Influência da Localização da Falta

As simulações foram realizadas para encontrar as médias dos erros percentuais para cada local de falta variando-se a resistência de falta, com todas as faltas simuladas sendo do tipo polo-terra.

Para facilitar a compreensão, os locais de falta selecionados para a elaboração dos gráficos com os resultados foram variados de 15 em 15 km, diminuindo assim o número de pontos dos gráficos. Foi tomado o cuidado para que os pontos mais importantes da análise permanecessem aparentes no gráfico, ou seja, aqueles pontos com maiores erros percentuais de localização. Com os resultados encontrados foram montados os gráficos mostrados na Figura 4. O objetivo das simulações é observar como os métodos têm seus resultados afetados frente a variações nos locais de falta.

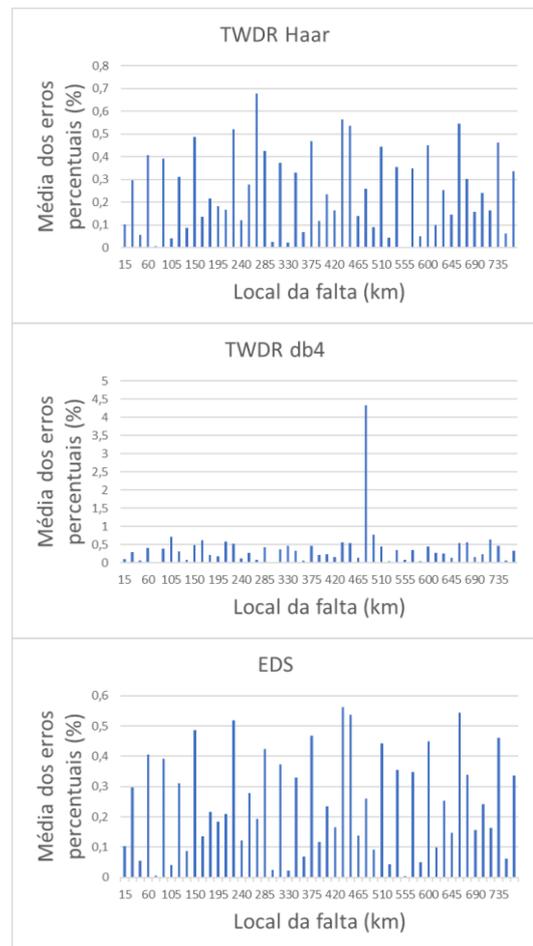


Fig. 4 Média dos erros percentuais variando o local de falta.

É interessante notar que apenas com o método TWDR db4 houve um caso de falta não detectada de modo satisfatório, pois a média dos erros percentuais ficou maior que 0,97% (erro

admissível para os métodos TWFL para uma LT de 790 km de comprimento).

Tal caso de falta não detectada de modo satisfatório pode ser explicado pelo fato de os coeficientes da TWDR db4 serem calculados utilizando 4 amostras do sinal analisado. Isso provoca um amortecimento no crescimento de seus coeficientes, de tal modo que para melhor detecção do transitório são necessários crescimento abruptos dos coeficientes. Quando simulados métodos com a TWDR db6 e db8, o número de casos de falta não detectada corretamente apresentou crescimento quanto maior foi o número de amostras do sinal utilizadas pelo método.

5.2 Análise da Influência da Resistência da Falta

Nestas simulações, o tipo de falta analisado foi a polo-terra. Foram realizadas as simulações e encontradas as médias dos erros percentuais para cada resistência de falta, ao variar o local de falta de 5 km em 5 km, desde 15 km até 775 km. Foram construídos os gráficos para as simulações, utilizando cada método avaliado com resistência de falta variando conforme os valores descritos no Quadro 2. Estes gráficos encontram-se ilustrados na Figura 5. O objetivo destas simulações é observar quão sensível são os métodos frente a variações nas resistências de falta.

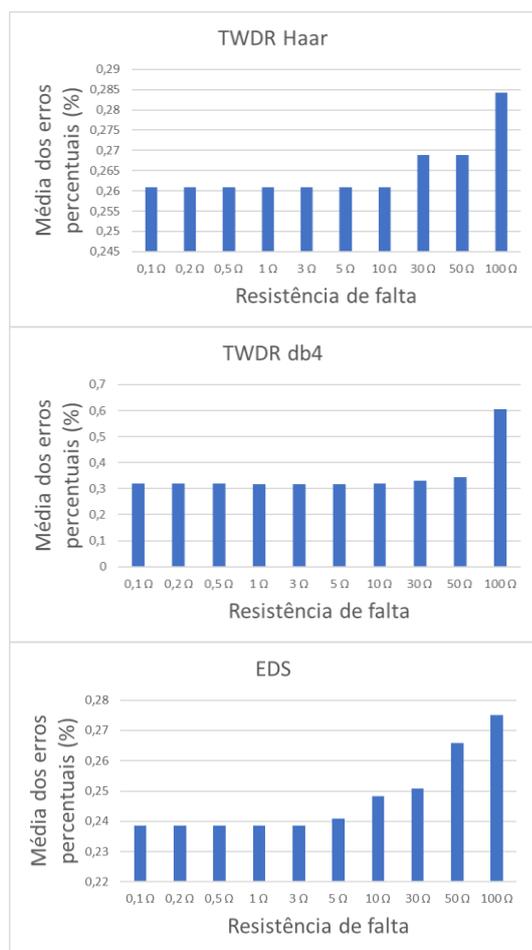


Fig. 5 Média dos erros percentuais variando a impedância de falta.

A partir dos gráficos da Figura 5, é possível perceber que os métodos obtiveram variações muito pequenas quando a resistência de falta foi variada, demonstrando pouca sensibilidade a mudanças na resistência de falta. Os métodos atuaram corretamente para faltas de alta impedância, com exceção do caso em que o método TWDR db4 foi aplicado a uma falta posicionada a 480 km do terminal retificador, como visto na Figura 4.

Na Figura 6 é apresentada a média dos erros percentuais para todos os casos de falta analisados, variando tanto a resistência de falta quanto o local de falta, mantendo o tipo de falta em polo-terra.

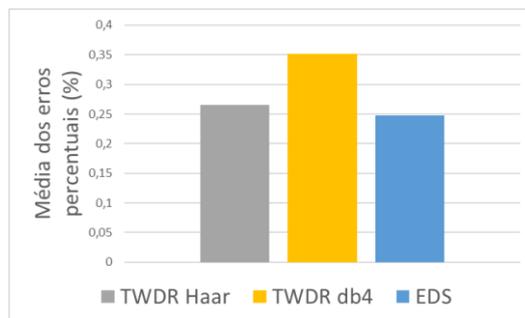


Fig. 6 Média dos erros percentuais para todos os casos de falta polo-terra analisados.

A partir da análise da Figura 6 é possível perceber que, de modo geral, o método que apresentou os melhores resultados foi o método EDS.

5.3 Análise da Influência do Tipo de Falta

Neste tipo de análise, o objetivo foi verificar como é o desempenho dos métodos frente a variações no tipo da falta. Desta forma, as simulações foram realizadas mantendo a resistência de falta fixa em 10 Ω e encontradas as médias dos erros de localização para cada tipo de falta, variando o local do distúrbio no decorrer da LT. Os resultados encontrados são apresentados na Figura 7.

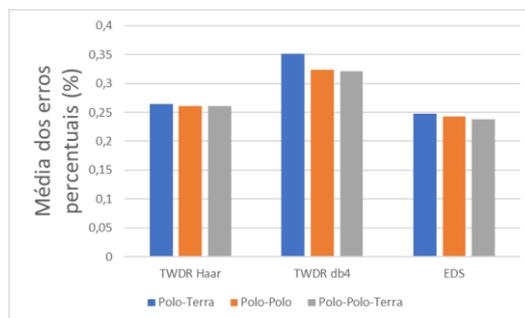


Fig. 7 Média dos erros percentuais variando o tipo de falta.

A partir dos resultados apresentados na Figura 7, é possível perceber que as variações foram muito pequenas para todos os métodos quando alterado o tipo de falta.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram simuladas as seguintes técnicas para detecção de faltas em linhas de transmissão em corrente contínua: TWDR com a *wavelet* mãe Haar e com a *wavelet* mãe db4, e energia da derivada de sinais.

As considerações sobre as simulações foram determinadas para uma simulação confiável de distúrbios nas LT do tipo HVDC. Foi aplicado ainda um limiar autoadaptativo para todos os métodos, de modo que não houvesse interferência do operador na escolha do limiar de detecção. Foi realizada a análise com os sinais de corrente medidos, pois estes apresentam variações mais perceptíveis em seus valores, em condições de regime transitório. Nos casos de falta no sistema HVDC bipolar simulado, foram realizadas três diferentes análises: uma variando o local de falta, outra variando a resistência de falta e uma terceira variando o tipo de falta.

Os métodos avaliados foram aplicados no MATLAB para simulação. De modo geral, os métodos apresentaram bons resultados quando a falta foi posicionada em diferentes pontos da LT. Apenas o algoritmo da TWDR com a *wavelet* mãe db4 não obteve um bom desempenho para um caso de falta simulado. Isto pode ser explicado pelo fato de que ao utilizar 4 amostras do sinal analisado para o cálculo dos coeficientes que são comparados com o limiar de detecção, o crescimento destes coeficientes sofreu um amortecimento. Para a correta detecção dos transitórios, são necessários crescimentos abruptos, de modo que ele cresça muito mais rápido que o limiar de detecção.

Todos os métodos analisados apresentaram variações pequenas em seus resultados, quando foi modificada a resistência da falta. Uma tendência comum entre todos os métodos foi que os erros de localização de falta aumentaram quando a resistência da falta aumentou. Isto pode ser explicado pelo fato de o sinal de corrente sofrer um amortecimento quando a resistência de falta é elevada, dificultando o crescimento abrupto dos coeficientes calculados.

Os métodos que fazem uso da energia da derivada de sinais e da TWDR Haar apresentaram os melhores desempenhos para o sistema bipolar. Porém, o método que faz uso da TWDR Haar tem um esforço computacional 40% menor, quando se avalia o tempo de convergência.

Quando foi modificado o tipo de falta, todos os métodos apresentaram pequenas variações, o que permite afirmar que eles podem ser aplicados a qualquer tipo de falta.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelo fomento da pesquisa que resultou neste trabalho e aos colegas do Grupo de Sistemas Elétricos (GSE) da UFCG, por todo o apoio e contribuição.

REFERÊNCIAS

Arruda, F. O. M (2012). *Localização de Faltas em Sistemas de Transmissão em Corrente Contínua (HVDC) Utilizando Transformada Wavelet*. Dissertação de Mestrado. Belo

- Horizonte – MG: Universidade Federal de São João Del-Rei.
- Bertho Jr., R. (2017). *Um Novo Algoritmo de Proteção para Redes HVDC Multiterminais*. Tese de Doutorado, Universidade De São Paulo, São Carlos, SP, Brasil.
- Brito, N. S. D., Souza, B. A., Pires F. A. C. (1998). *Daubechies Wavelets in Quality of Electrical Power*, Proceedings. *8th International Conference on Harmonics and Quality of Power*. [S.l.: s.n.], v. 1, p. 511–515 vol.1.
- Costa, F. B. (2010). *Uma Técnica de Diagnóstico em Tempo Real de Distúrbios Transitórios Baseada na Transformada Wavelet para Uso em Registradores Digitais de Perturbação*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil.
- Freitas, L. A. (2013). *Time-Domain Impedance-Based Fault Location for HVDC Transmission Lines*. Tese de Doutorado, Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- Fuchs, R. D. (2015). *Transmissão de Energia Elétrica: Linhas Aéreas - Volume 1*. EDUFU. Uberlândia, MG.
- Gale, P. F., Crossley, P. A., Bingyin, X., Yaozhong, G., Cory, B. J., Barker, J. R. G. (1993). *Fault Location Based on Travelling Waves*. 1993 *Fifth International Conference on Developments in Power System Protection*, p. 54–59.
- Hossan-Eldin, A., Lotfy, A., Elgamal, M., Ebeed, M.(2016). *Combined Traveling Wave and Fuzzy Logic Based Fault Location in Multi-terminal HVDC Systems*. p. 1–6.
- Kim, C. H. and Aggarwal, R. (2001). *Wavelet Transform in Power Systems: Part 2 Examples of Application to Actual Power System Transients*. *IEEE Power Engineering Journal*, p. 193–202.
- Lopes, F. V. (2011). *Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Baseada em Ondas Viajantes*. Dissertação de Mestrado. Campina Grande, PB: Universidade Federal de Campina Grande.
- Melo, Y. M. P. (2018). *Uma Técnica para Detecção e Classificação de Faltas em Linhas de Transmissão de Corrente Contínua por Meio da Derivada de Sinais*. Tese de Doutorado. Campina Grande, PB: Universidade Federal de Campina Grande.
- Nanayakkara, O. M. K. K., Rajapakse, A. D., Wachal, R. (2012). *Location of DC Line Faults in Conventional HVDC Systems with Segments of Cables and Overhead Lines Using Terminal Measurements*. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 27, n. 1, p. 279–288. ISSN 0885-8977.
- RTDS Technologies Inc (2018). *Real Time Digital Simulator Tutorial Manual (RSCAD Version)*.