

# Métodos para Detecção de Falhas em Linhas de Transmissão do tipo HVDC Multiterminal

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 multi-terminal 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 wavelet transform, on the discrete redundant wavelet transform, on the park 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 multi-terminal HVDC (*High Voltage Direct Current*) system. In the analyses 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 park transform and the energy of the signal derivative obtained the best performances.

**Resumo:** Propõe-se realizar um estudo comparativo entre os métodos de detecção de falhas em linhas de transmissão de corrente contínua multiterminal. 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, na transformada *wavelet* discreta redundante, na transformada de park 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*) multiterminal. 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 transformada de park e da energia da derivada de sinais obtiveram os melhores desempenhos.

**Keywords:** Fault detection; Fault location; HVDC; Traveling waves; Transmission lines; Multi-terminal HVDC.

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

---

## 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, conseqüentemente, 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 faltas 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 métodos, fato este que dificulta a identificação dos pontos positivos e negativos de cada um deles.

Na seção 2, é apresentada uma fundamentação teórica sobre esquemas de transmissão em corrente contínua e ondas viajantes em linhas de transmissão. Na seção 3, é realizada uma descrição sobre os algoritmos avaliados. Na seção 4, são apresentadas as metodologias utilizadas na análise comparativa. Na seção 5, os resultados são expostos e analisados. Na seção 6, são discutidas as conclusões deste trabalho.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Esquemas de Transmissão em Corrente Contínua

Uma forma de categorizar os esquemas de transmissão em corrente contínua, segundo Fuchs (2015), é dividi-los nos três seguintes grupos: transmissão monopolar, transmissão bipolar e transmissão homopolar. Porém existem outras formas de categorizar os esquemas de transmissão, um desses esquemas é o multiterminal.

A transmissão multiterminal é utilizada para interligar mais de dois terminais. É a forma mais rara de transmitir energia com o sistema HVDC, devido à sua complexidade. Ela permite fluxo bidirecional de potência em cada um de seus terminais. Seu esquema de transmissão está ilustrado na Fig. 1.

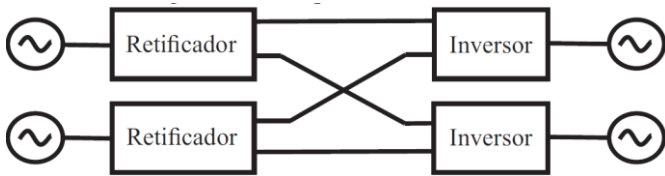


Fig. 1 Esquema de transmissão multiterminal bipolar.

### 2.2 Ondas Viajantes em Linhas de Transmissão

As LT em CC são mais susceptíveis a disrupção em seus isoladores do que as LT em CA, devido à polarização do ar ao redor dos condutores, e isto favorece o advento de cargas espaciais. Qualquer que seja a perturbação que ocorra em uma LT irá gerar transitórios eletromagnéticos que se propagam por meio de ondas viajantes (OV). Estas ondas sofrem reflexões até que sua energia seja dissipada pela resistência da LT.

O método desenvolvido por Gale *et al.* (1993) é capaz de localizar o ponto de ocorrência de falta em uma linha de transmissão a partir dos tempos de chegada das OV geradas

pelo transitório no ponto de falta. A Figura 2 é utilizada para mostrar um diagrama de reflexões que ilustra a propagação de OV decorrentes de uma falta em uma linha de transmissão.

Os métodos que utilizam dados medidos nos dois terminais da LT consideram apenas os primeiros instantes de chegada dos transitórios às barras 1 e 2. Com esses instantes sincronizados via GPS, a distância da falta à barra 1 pode ser calculada pela expressão (1).

$$d = \frac{l + (t_{21} - t_{11}) \cdot v}{2}, \quad (1)$$

sendo  $l$  o comprimento total da LT,  $v$  é a velocidade das ondas viajantes nas linhas de transmissão, e  $t_{21}$  e  $t_{11}$  o instante de chegada da onda progressiva na barra 2 e o instante de chegada da onda regressiva na barra 1, respectivamente.

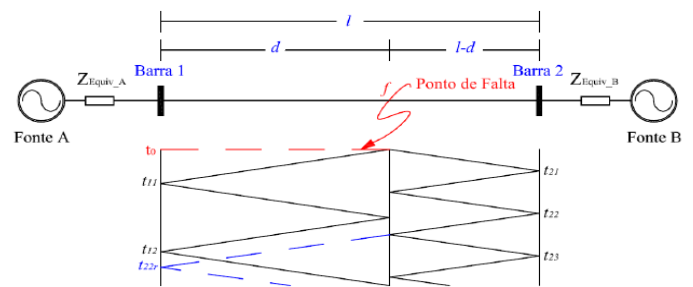


Fig. 2 Diagramas de reflexões para faltas em linhas de transmissão (LOPES, 2011).

## 3. DESCRIÇÃO DOS ALGORITMOS AVALIADOS

### 3.1 Transformada Wavelet Discreta (TWD)

A transformada *wavelet* é uma ferramenta bastante utilizada na detecção de transitórios, uma vez que ela consegue obter informações da frequência, sem perder informações do tempo.

A TWD tem sido largamente utilizada para detectar faltas em sistemas HVDC, como visto em trabalhos como: Arruda (2012), Nanayakkara *et al.* (2012), Hossan-Eldin *et al.* (2016) e Bertho Jr. (2017).

Na análise comparativa realizada neste trabalho foi utilizada ainda uma variação da Transformada *Wavelet* Discreta (TWD), a Transformada *Wavelet* Discreta Redundante (TWDR) para detecção de faltas em sistemas HVDC. Ao contrário da TWD, a TWDR não realiza subamostragem por 2. Além disso, a TWDR pode ser aplicada a qualquer número de amostras, diferentemente da TWD que requer que o número de amostras seja uma potência de dois. O cálculo dos coeficientes *wavelet* discretos redundantes é feito de forma igual aos coeficientes *wavelet* discretos, modificando apenas os filtros utilizados.

De acordo com Costa (2010), a TWDR consegue, de forma geral, apresentar melhores resultados para detectar faltas em sistemas HVAC que a TWD.

Uma vez aplicada a TWDR, os cálculos dos coeficientes *wavelets* da TWDR são comparados com o limiar de

detecção. Se este coeficiente for maior, então é detectado o transitório e utilizado o algoritmo de Gale *et al.* (1993) para determinação do local de falta.

A aplicação da TWDR depende necessariamente da seleção de qual será a *wavelet* mãe utilizada, de tal modo que quando se muda a *wavelet* mãe o filtro aplicado é diferente do anterior. Sendo assim, pode-se afirmar que é quando se muda a *wavelet* mãe, muda-se o método aplicado.

As *wavelets* mães selecionadas foram a Haar, devido à sua aplicação em trabalhos como Arruda (2012), e a Daubechies 4 (Db4), pois de acordo com Costa (2010) apud Brito (1998) e Kim & Aggarwal (2001), ela se destaca em métodos de detecção de distúrbios. O limiar de detecção utilizado foi o proposto por Melo (2018).

### 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,  $\Delta t$  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  $\Delta k_{En}$  o tamanho da janela deslizando.

### 3.3 Transformada de Park

Muito utilizada no estudo de máquinas elétricas de polos salientes, a transformada de Park (Tdq0) pode ser aplicada também para a detecção de transitórios em sistemas HVAC

(*High Voltage Alternating Current*) e sua utilização foi proposta por Lopes (2011). O método pode ser entendido da seguinte forma: considera-se que o sistema referencial das grandezas transformadas gira na frequência da rede em sincronismo com os fasores das fases de um dado sistema trifásico, as grandezas transformadas, em regime permanente, não identificarão variações de frequência, pois a velocidade angular relativa entre os referidos vetores será nula. Na ocorrência de transitórios, a velocidade relativa entre tais grandezas se torna diferente de zero fazendo com que os sinais gerados sejam oscilatórios e possuam amplitudes não nulas.

Melo (2018) propôs em seu trabalho a aplicação da transformada de Park para detecção de transitórios em sistemas HVAC. A aplicação da transformada de Park requer um sistema trifásico. Logo, para detecção de transitórios em HVDC requer a criação de duas componentes virtuais para cada polo. No caso de uma LT monopolar, seriam criados dois polos. A geração das componentes virtuais é feita a partir das expressões (4), (5) e (6).

$$S_{VirtualA}(k) = |S_{dc}| \cdot \cos(\theta_{Sdc}), \quad (4)$$

$$S_{VirtualB}(k) = |S_{dc}| \cdot \cos(\theta_{Sdc} - 120^\circ), \quad (5)$$

$$S_{VirtualC}(k) = |S_{dc}| \cdot \cos(\theta_{Sdc} + 120^\circ), \quad (6)$$

sendo  $S_{VirtualA}$ ,  $S_{VirtualB}$  e  $S_{VirtualC}$  os sinais trifásicos fictícios, que pode ser tanto corrente como tensão;  $S_{dc}$  o sinal medido no terminal inversor ou retificador e  $\theta_{Sdc}$  o ângulo de fase deste sinal.

Uma vez gerado os sinais virtuais, a transformada de Park é aplicada ao se considerar a frequência da rede igual a 0,05 Hz. As expressões (7) e (8) descrevem a aplicação matemática da transformada de Park aos sinais estudados.

$$T_{dq0} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & \cos(\varphi - 120^\circ) & \cos(\varphi + 120^\circ) \\ \sin(\varphi) & \sin(\varphi - 120^\circ) & \sin(\varphi + 120^\circ) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} S_d \\ S_q \\ S_0 \end{bmatrix} = T_{dq0} \cdot \begin{bmatrix} S_{VirtualA} \\ S_{VirtualB} \\ S_{VirtualC} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Em seguida, obtidos os sinais  $S_d$ ,  $S_q$  e  $S_0$  gerados a partir da aplicação da transformada de Park nos sinais virtuais, é possível obter os coeficientes de diferença ( $C_{dif}$ ) a partir da expressão (9).

$$C_{dif}(k) = G \cdot [S_d(k) - S_d(k-1)]. \quad (9)$$

Os coeficientes  $C_{dif}$  não relacionados à ocorrência de transitórios devem ser descartados, e para isso utiliza-se, geralmente, um procedimento de filtragem denominado de *hard thresholding*, nos quais os coeficientes abaixo de determinado limiar são considerados zero.

Ao tentar tornar a detecção de componentes de alta frequência mais robusta em relação à presença de ruídos elétricos, Lopes (2014) propôs o cálculo da energia dos

coeficientes  $C_{dif}$  por meio de uma janela retangular deslizante no tempo de tamanho igual a  $\Delta k_{EN} = N/2$ , onde  $N$  é o número de amostras por ciclo em regime permanente. O cálculo da energia dos coeficientes  $C_{dif}$  é apresentado na equação (10).

$$\xi_{dif}(k) = \sum_{n=k-1-\Delta k_{EN}}^k [C_{dif}(n)]^2, \quad (10)$$

em que  $C_{dif}(n)$  é a  $n$ -ésima amostra do sinal  $c_{dif}$  e  $\xi_{dif}(k)$  é a energia da  $k$ -ésima janela.

#### 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 Falhas

O erro é um parâmetro fundamental na avaliação da precisão do método localizador de defeito na LT. O erro de localização de falta pode ser utilizado para determinar a exatidão dos métodos de detecção de faltas, uma vez que a localização de falta só pode ser exata quando a detecção é bem realizada, nos casos em que se faz uso do equacionamento de Gale *et al.* (1993). Os erros de localização podem ser definidos em dois 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 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  $\Delta t$ , 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,  $\Delta t$  é o período de amostragem adotado e  $c$  é a velocidade da luz (300.000 km/s).

Com o período de amostragem de 5  $\mu$ s, a tolerância para o erro é de 750 m. Logo, simulações que apresentem desvios, em módulo, abaixo de 750 m podem ser consideradas bem-sucedidas, já que a localização da falta foi satisfatória, sendo assim a detecção também.

##### 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).

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

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 do tipo HVDC multiterminal, que foi modelado no MATLAB/Simulink.

O sistema multiterminal modelado foi um sistema HVDC-VSC fictício com quatro terminais e quatro LT bipolares de 400 km de extensão. O modelo de Bergeron foi utilizado para a modelagem da LT e os dados desta linha podem ser observados no Quadro 1. A frequência de amostragem utilizada no sistema foi igual a 200 kHz, logo, pela equação (6), o erro admissível é aproximadamente igual a 750 m. A Figura 3 é utilizada para ilustrar o SEP HVDC simulado.

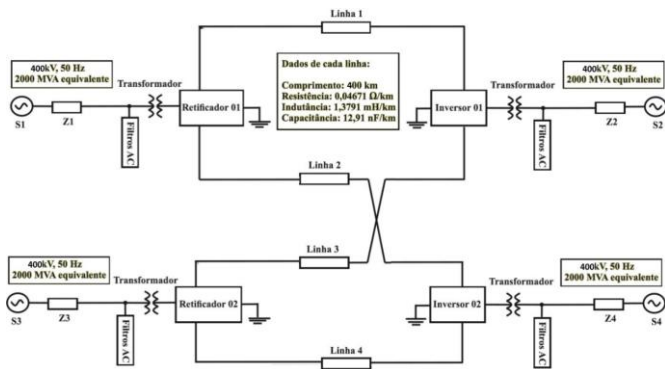


Figura3. Sistema multiterminal simulado.

**Quadro1. Dados da linha de transmissão monopolar.**

Parâmetros	Linha de 500 kV
Comprimento (km)	400
Resistência (Ω/km)	0,04671
Indutância (H/km)	$1,3791 \cdot 10^{-3}$
Capacitância (F/km)	$12,91 \cdot 10^{-9}$

Os 132 casos de falta simulados podem ser vistos no Quadro 2. Os locais de falta foram variados conforme uma progressão aritmética com razão de 37 km.

**Quadro 2. Condições de falta.**

Resistência de falta	Local de falta	Tipo de Falta
0,1 Ω; 1 Ω; 10 Ω; 100 Ω.	15 km; 52 km; 89 km; 126 km; ...; 311 km; 348 km; 385 km.	Polo-Terra, Polo-Polo, Polo-Polo-Terra.

A velocidade de propagação da onda em ambos os métodos foi calculada a partir da expressão para uma LT sem perdas. A velocidade de propagação calculada foi próxima ao valor muito referenciado na literatura de 98% da velocidade da luz, (ZIMATH *et al.*, 2010).

5. RESULTADOS E ANÁLISES

As simulações foram realizadas de forma a avaliar comparativamente os métodos. É importante ressaltar que foi suposto o prévio conhecimento de quais LT do sistema estavam em condição de falta.

Os sinais analisados foram os sinais de corrente, devido ao fato de estes serem mais susceptíveis em caso de distúrbios na LT.

Primeiramente, foram escolhidos os métodos que participaram da análise comparativa, os quais foram:

- Método 1: TWD Haar;
- Método 2: TWD db4;

- Método 3: TWDR Haar;
- Método 4: TWDR db4;
- Método 5: Energia da derivada de sinais (EDS);
- Método 6: Transformada de Park (Tdq0).

Uma vez definidos os métodos, eles foram aplicados no MATLAB e avaliados no sistema simulado. Os gráficos dos erros absolutos dos métodos TWD Db4, TWDR Haar, TWDR Db4, Tdq0 e EDS estão nas figuras 4, 5, 6, 7 e 8, respectivamente. Tais gráficos foram elaborados para todos os casos de falta polo-terra simulados.

Os resultados do método TWD Haar não foram colocados em um gráfico devido ao fato de seus resultados apresentarem 14 casos de métodos mal detectados dentre os 44 casos analisados, uma taxa de faltas mal detectada de 31,82%. Tais casos são classificados dessa forma quando seu erro de localização de falta é muito grande.

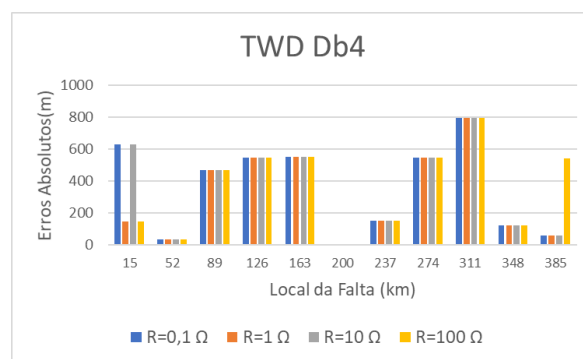


Fig. 4 Erros absolutos para o método TWD Db4.

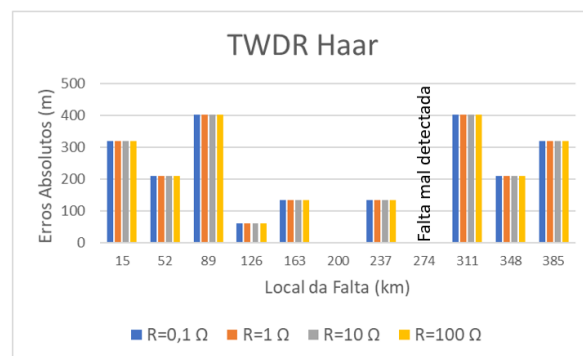


Fig. 5 Erros absolutos para o método TWDR Haar.

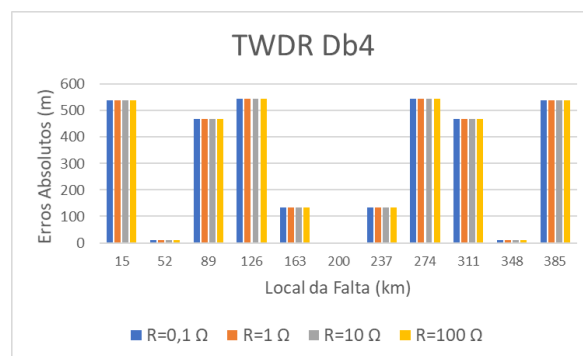


Fig. 6 Erros absolutos para o método TWDR Db4.

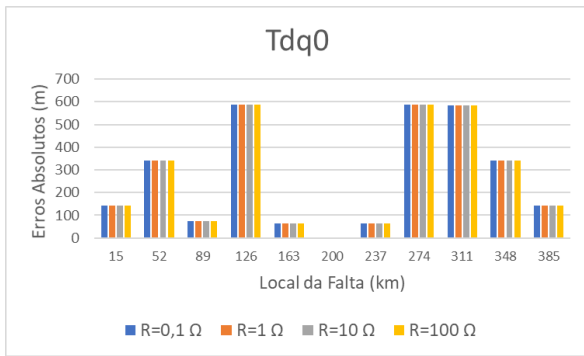


Fig. 7 Erros absolutos para o método Tdq0.

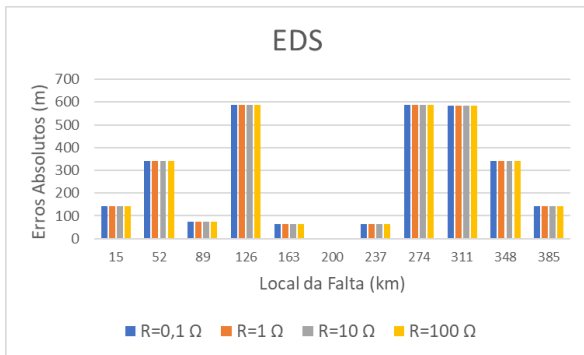


Fig. 8 Erros absolutos para o método EDS.

A partir dos gráficos das Figuras 4, 5, 6, 7 e 8, é possível observar que quase todos os métodos se mantiveram invariáveis quando variada a impedância de falta, com exceção do método TWD Db4.

Outro fato interessante é que todos os métodos detectaram corretamente todos os casos de falta simulados, exceto o método TWDR Haar, que em 4 casos não detectou corretamente a falta. Tal ocorrência pode ser justificada pelo fato de que, ao utilizar apenas duas amostras do sinal analisado, e diferente da EDS e da Tdq0 que fazem uso de um somatório para suavizar seu crescimento, o crescimento dos coeficientes da TWDR Haar ocorreu de forma muito abrupta, causando a detecção do transitório em uma amostra não proveniente dos dados obtidos de falta.

Todos os métodos mantiveram seus erros de localização de falta abaixo dos 750 m admissíveis. Somente o método TWD Db4 que em 4 casos de falta obteve erro maior que 750 m.

Foi montado um gráfico ilustrado na Figura 9 com a média dos erros absolutos de todos os casos de falta polo-terra detectadas corretamente para os métodos avaliados, com exceção do método TWD Haar.

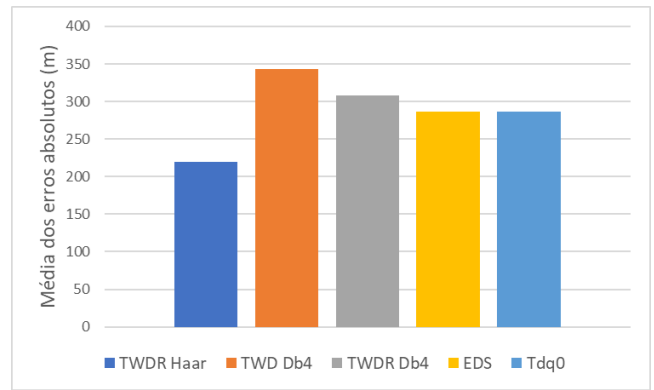


Fig. 9 Média dos erros absolutos para os casos de falta polo-terra.

Quando se exclui da análise os casos em que a TWDR Haar não detectou corretamente as faltas, é possível perceber, a partir do gráfico da Figura 9, que ele foi o método que obteve erros de localização de falta menores em média. Isto pode ser explicado pelo fato de ser o único método, dentre os avaliados no gráfico da Figura 9, que utiliza apenas duas amostras do sinal analisado para o cálculo de seu coeficiente e não faz uso de um somatório, que causa amortecimento no seu crescimento. Desta forma, a variação de seus coeficientes é mais abrupta, de forma que o transitório é detectado de forma mais rápida, porém, em alguns casos, esta variação foi maior que o limiar em regime permanente.

É interessante notar que os métodos EDS e Tdq0 tiveram desempenho igual, e dentre os métodos que detectaram corretamente todos os casos de falta, foram os que apresentaram os menores erros de localização de falta.

Foram realizadas ainda simulações com as mesmas condições de faltas anteriores para os casos de falta polo-polo e polo-polo-terra, com a intenção de verificar se o desempenho dos métodos é alterado quando é modificado o tipo de falta. Os resultados das médias dos erros absolutos, nos casos em que a falta foi detectada corretamente, para os métodos avaliados são apresentados na Figura 10.

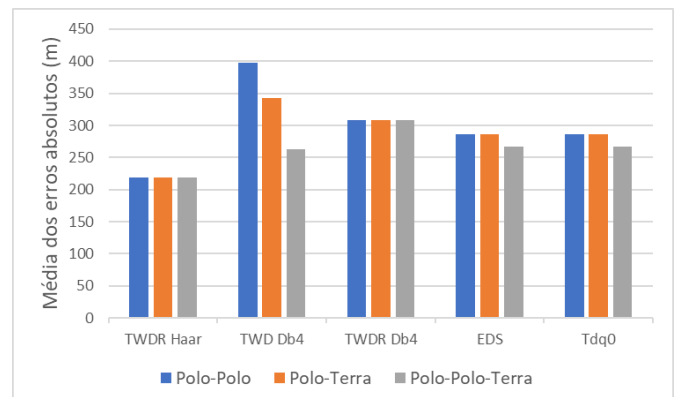


Fig. 10 Média dos erros absolutos para diferentes tipos de falta.

Ao analisar o gráfico da Figura 10, é possível perceber que, de forma geral os métodos apresentaram variações muito pequenas em seu desempenho, quando alterado o tipo de

falta, exceto o método TWD Db4. Como nos casos avaliados na Figura 9, somente o método TWDR Haar não detectou corretamente 12 casos de falta dos 132 analisados. Todos os demais métodos detectaram corretamente todos os casos de falta analisados.

## 6. CONCLUSÕES

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

As considerações sobre as simulações foram determinadas para uma simulação confiável de distúrbios na 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 multiterminal 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 os algoritmos da TWDR e da TWD com a *wavelet* mãe Haar não obtiveram um bom desempenho para alguns casos de faltas simulados. Isto pode ser explicado pelo fato de que ao utilizar 2 amostras do sinal analisado para o cálculo dos coeficientes que são comparados com o limiar de detecção e não fazer uso de um somatório, o crescimento destes coeficientes ocorreu de forma muito abrupta, detectando falso positivos. Para a correta detecção dos transitórios é necessário que o coeficiente cresça mais rápido que o limiar de detecção somente nos casos de falta.

Quase todos os métodos analisados apresentaram variações pequenas em seus resultados, quando foi modificada a resistência da falta, com exceção do método da TWD Db4. De modo geral, a aplicação da TWDR se mostrou mais eficiente que a TWD para detecção de transitórios, isto pode ser explicado pela TWDR não realizar subamostragem por 2 como a TWD.

Quando foi analisado o desempenho dos métodos frente a variações no tipo de falta, foi possível perceber que apenas o método da TWD db4 apresentou variações significativas em seus resultados. Ainda assim, seu desempenho foi satisfatório ao detectar corretamente todos os casos de falta analisados.

Os métodos que fazem uso da energia da derivada de sinais e da Tdq0 apresentaram os melhores desempenhos para o sistema multiterminal. Porém, o método que faz uso da energia da derivada de sinais tem um esforço computacional menor e código mais simples.

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

À CAPES 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.
- 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.
- Lopes, F. V. (2014). *Localização de Faltas em Tempo Real baseada na Teoria de Ondas Viajantes usando Dados não Sincronizados de Dois Terminais*. Tese de Doutorado. 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)*.