

# Diagnóstico Completo de Falhas em um Sistema HVDC Baseado na Teoria de Ondas Viajantes e em Dados de Monitoramento de Um Terminal

Júlio C. C. Vieira\* Damásio F. Júnior\*  
Washington L. A. Neves\*

\* Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande/PB - Brasil (e-mails: julio.vieira@ee.ufcg.edu.br, damasio@dee.ufcg.edu.br, waneves@dee.ufcg.edu.br).

**Abstract:** This work proposes a method for detecting, classifying and locating incident faults in the transmission line of a bipolar HVDC system. This method is based on the traveling waves theory and uses the redundant discrete wavelet transform to filter the voltage signals monitored in only one terminal of the system. A self-adaptive detection threshold is used to detect faults. The HVDC system was modeled in the Alternative Transient Program (ATP) and different fault scenarios were analyzed, which were generated by varying the type, resistance and fault location. From the results obtained, it was verified that the method correctly detected and classified all types of faults. In the localization stage, the efficiency of the method was inversely proportional to the resistance and the fault location.

**Resumo:** Neste trabalho é proposto um método de detecção, classificação e localização de falhas incidentes na linha de transmissão de um sistema HVDC bipolar. Tal método é baseado na teoria de ondas viajantes e utiliza a transformada wavelet discreta redundante para filtrar os sinais de tensão monitorados em apenas um terminal do sistema. É utilizado um limiar de detecção autoadaptativo para detectar as falhas. O sistema HVDC foi modelado no ATP (*Alternative Transient Program*) e diferentes cenários de falhas foram analisados, os quais foram gerados por meio da variação do tipo, resistência e local de falta. Dos resultados obtidos, foi verificado que o método detectou e classificou corretamente todos os tipos de falhas. Na etapa de localização, a eficiência do método se mostrou inversamente proporcional à resistência e ao local de falta.

**Keywords:** HVDC system; Transmission line; Fault diagnosis; Traveling waves theory; Wavelet transform.

**Palavras-chaves:** Sistema HVDC; Linha de transmissão; Diagnóstico de falhas; Teoria de ondas viajantes; Transformada wavelet.

## 1. INTRODUÇÃO

O sistema de transmissão de energia elétrica deve ser construído de modo que permita escoar a energia com qualidade e eficiência dentro dos critérios técnicos e econômicos adotados. Nas últimas décadas, os sistemas elétricos de potência evoluíram em complexidade e tamanho, acarretando o distanciamento entre as usinas geradoras e os principais centros consumidores. Com isso, várias pesquisas têm focado no desenvolvimento de soluções para permitir a transmissão de grandes blocos de potência a longas distâncias (Lopes et al., 2016). Dentre as soluções possíveis, destaca-se o sistema de transmissão HVDC, do inglês *High Voltage Direct Current*.

Os constantes avanços tecnológicos da eletrônica de potência tornaram viável o uso de corrente contínua para transmitir energia elétrica a longas distâncias com custos

mais baixos e sem a necessidade de instalar compensadores reativos ao longo da Linha de Transmissão (LT). Devido às suas longas extensões, as LTs do sistema HVDC atravessam ambientes distintos e imprevisíveis e, consequentemente, apresentam uma maior susceptibilidade a distúrbios provenientes do ambiente, tais como as descargas atmosféricas. De acordo com Wu et al. (2016), a grande maioria das falhas verificadas em um sistema HVDC são incidentes na LT. Portanto, um diagnóstico rápido e preciso dos distúrbios é de suma importância para garantir o restabelecimento da operação do sistema.

De acordo com Lopes et al. (2016), o processo de reparo da LT após a ocorrência do distúrbio pode ser demorado a depender da existência ou não de dispositivos localizadores de falhas confiáveis. Da literatura, sabe-se que os métodos baseados na Teoria de Ondas Viajantes (TOV) são os mais empregados para localizar distúrbios em sistemas HVDC. Em Ando et al. (1985), é proposta uma técnica para localizar as falhas no sistema HVDC usando dados

\* Os autores agradecem à CAPES pelo suporte financeiro.

monitorados em apenas um terminal da LT. Já em Dewe et al. (1993), os autores utilizam os dados obtidos em ambos os terminais para localizar as falhas.

Desde então, com o desenvolvimento de técnicas de comunicação e processamento digital de sinais, os métodos baseados na TOV vêm sendo bastante desenvolvidos. Além dos métodos clássicos de um e dois terminais, os quais já são aplicados em relés comerciais, novas metodologias vêm sendo desenvolvidas. Em Suonan et al. (2009) é formulada a equação da curva de distribuição de tensão na LT em função da localização de falta. Uma vez obtida tal equação, o local de falta corresponde ao mínimo da função. Em He et al. (2013), a frequência natural das ondas viajantes é utilizada a fim de localizar distúrbios em sistemas HVDC. Já em Silva et al. (2019), os autores aplicam um rede neural artificial para correlacionar o sinal de tensão pós falta monitorado no terminal retificador de um sistema HVDC com o local de incidência de falta.

Atualmente, apesar do avanço na operação de sistemas HVDC, pouco se encontra na literatura a respeito do diagnóstico completo (detecção, classificação e localização) de faltas incidentes na LT de sistemas HVDC. Diante desse cenário, como contribuição para o estado da arte do tema, apresenta-se neste trabalho um método para detectar, classificar e localizar faltas em um sistema HVDC bipolar usando dados de tensão monitorados apenas em um terminal.

O método aqui proposto é baseado na TOV e utiliza a Transformada Wavelet Discreta Redundante (TWDR) para filtrar os sinais monitorados. A detecção dos instantes de falta é realizada por meio de uma análise comparativa entre os módulos dos coeficientes da TWDR aplicada ao sinal de tensão com um limiar autoadaptativo. Para avaliar o desempenho do método, foram realizadas simulações de vários cenários de faltas incidentes na LT do sistema HVDC brasileiro do Rio Madeira. Tal sistema foi modelado no software *Alternative Transient Program* (ATP) e os casos de faltas foram gerados por meio da variação do local, resistência e tipo de falta. Por fim, a eficiência do método proposto é avaliada por meio da análise dos erros obtidos nas etapas de detecção, classificação e localização.

## 2. LOCALIZAÇÃO DE FALTAS BASEADA NA TEORIA DE ONDAS VIAJANTES

### 2.1 Teoria de Ondas Viajantes

O fenômeno de ondas viajantes em LT constitui um dos efeitos transitórios mais curtos do sistema elétrico. As ondas eletromagnéticas de tensão e corrente resultantes de faltas se propagam em ambas as direções da LT com uma determinada velocidade que depende dos parâmetros da linha. A propagação de tais ondas está sujeita aos fenômenos de reflexão e refração, que ocorrem nas discontinuidades do sistema, como, por exemplo, nas terminações da LT e no ponto de incidência de falta.

Na Figura 1 é apresentado o diagrama de Bewley para uma falta incidente a uma distância  $d$  do retificador em uma LT de comprimento  $L$ . Tal diagrama representa os fenômenos de reflexão e refração das ondas no domínio do tempo e espaço.

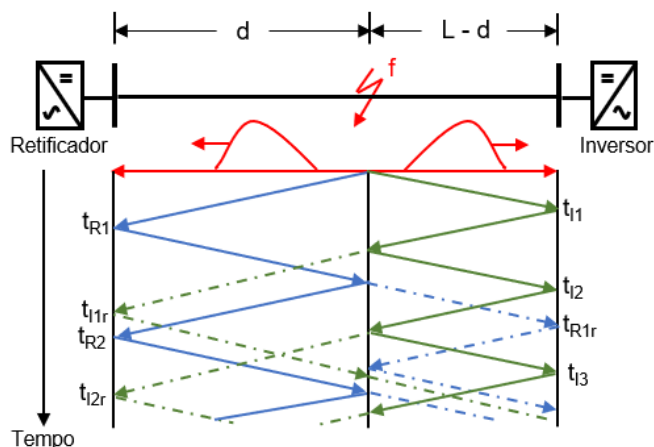


Figura 1. Diagrama de Bewley para um sistema HVDC.

De acordo com a Figura 1, as ondas eletromagnéticas de tensão e/ou corrente produzidas pela incidência da falta no ponto  $f$  da LT são transmitidas em ambas as direções da linha. Ao atingirem os terminais da LT, uma parte da onda incidente é refletida e a outra é refratada. Quando a onda refletida atinge novamente o ponto de falta, uma parte da onda é refletida de volta ao terminal de origem e a outra é refratada em direção ao terminal oposto. Tais processos de reflexão e refração ocorrem sucessivamente até que a energia da onda seja totalmente dissipada pela resistência da linha.

A aplicação da TOV na localização de faltas é baseada na detecção dos instantes de tempo em que a onda de tensão e/ou corrente produzida no ponto de falta é refletida em um ou nos dois terminais da LT. Caso os dados sejam obtidos em ambos os terminais, o método é dito de dois terminais. Caso os dados estejam disponíveis em apenas um terminal, o método é classificado como de um terminal.

No método de dois terminais é necessário realizar a detecção do instante de tempo de chegada da primeira frente de onda em ambos os terminais. Tal fato consiste em uma vantagem, pois a detecção, no terminal de monitoramento, da segunda frente de onda refletida no ponto de falta é uma tarefa mais complexa. Por outro lado, esta técnica exige a existência de um canal de comunicação sincronizado entre os terminais da linha, o que acarreta no aumento dos custos do projeto. Tal sincronização é necessária para que não haja atrasos nas medições em ambos os terminais. No mais, caso ocorram problemas de funcionamento nos dispositivos de comunicação, tal como o GPS, o desempenho do método é afetado.

O método de um terminal extingue a necessidade de um canal de comunicação entre os terminais da linha, o que representa uma grande vantagem em termos financeiros. Por outro lado, tal método exige a detecção da primeira e segunda frentes de onda refletidas no ponto de falta no terminal de monitoramento. A distinção da chegada da segunda frente de onda refletida e refratadas que atingem o terminal de monitoramento é uma tarefa complexa. Nota-se que, a depender do local de incidência da falta (primeira ou segunda metade da LT), as posições dos instantes de tempo  $t_{R2}$  e  $t_{I1r}$  no diagrama de Bewley são invertidas. Com isso,

para diferenciar  $t_{R2}$  e  $t_{I1r}$  são utilizadas as polaridades e amplitudes das ondas viajantes. Com base na Figura 1, os instantes de tempo  $t_{R1}$  e  $t_{R2}$  devem ser obtidos a fim de calcular o local de falta por meio do método de um terminal. Tal cálculo é realizado de acordo com a equação (1).

$$d = \frac{(t_{R2} - t_{R1}) \cdot v_p}{2}, \quad (1)$$

em que  $v_p$  é a velocidade de propagação das ondas viajantes.

### 2.2 Transformada Wavelet Discreta Redundante

Nos métodos de localização de faltas baseados na TOV, a filtragem dos sinais analisados é de suma importância para garantir a correta detecção dos instantes de tempo de chegada das frentes de ondas no terminal de monitoramento. Dentre as técnicas utilizadas para realizar tal filtragem, as transformadas wavelets apresentam grande destaque. As wavelets representam uma família de funções que são capazes de decompor e descrever uma série de dados, originalmente descrita no domínio do tempo, de forma a tornar possível sua análise em diferentes escalas de tempo e frequência (Murthy et al., 2008).

Neste trabalho, a transformada wavelet discreta redundante associada com a wavelet mãe Haar foi utilizada para filtrar os sinais de tensão monitorados no terminal retificador do sistema. Tal escolha é baseada nos resultados obtidos em Lima et al. (2020), os quais demonstraram que os métodos que fazem uso da TWDR Haar obtiveram os melhores desempenhos na detecção de faltas em um sistema HVDC bipolar. Além disso, ao contrário da transformada wavelet discreta, a TWDR não realiza o processo de subamostragem por dois, sendo assim aplicável a qualquer número de amostras.

Os coeficientes da TWDR são obtidos por meio da análise da variação de uma amostra atual do sinal com relação à anterior. De acordo com Stanković and Falkowski (2003), tais coeficientes são calculados com base na equação (2).

$$c(t) = \frac{x(t) - x(t-1)}{2\sqrt{2}}, \quad (2)$$

em que  $x(t)$  representa o sinal analisado no instante  $t$  e  $c(t)$  é o coeficiente da TWDR calculado.

Por fim, a detecção dos instantes de tempo de chegada das ondas no terminal de monitoramento ocorre por meio da comparação do valor absoluto do coeficiente calculado na equação (2) com um limiar de detecção.

## 3. DESCRIÇÃO DO SISTEMA HVDC

### 3.1 Sistema Modelado

O esquema HVDC utilizado neste estudo representa o sistema HVDC bipolar do Rio Madeira modelado por Luz et al. (2014) no software ATP/ATPDraw. Tal sistema é constituído por dois bipolos de 3.150 MW com um nível de tensão igual a  $\pm 600$  kV.

O sistema do Rio Madeira interliga as estações conversoras de Porto Velho e Araraquara por meio de uma linha de transmissão com comprimento de 2.450 km e corrente nominal igual a 2.625 A. Na Figura 2 é apresentado o diagrama do sistema modelado.

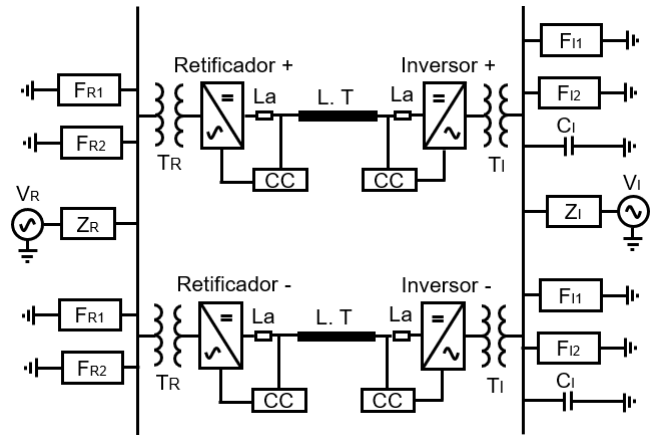


Figura 2. Sistema HVDC bipolar modelado.

Com base na Figura 2, o sistema em Corrente Alternada (CA) do terminal retificador é representado pela impedância equivalente  $Z_R$  e pela fonte de tensão  $V_R$ . Já no inversor, tal representação se dá por meio dos parâmetros  $Z_I$  e  $V_I$ . Os blocos  $F_{R1}$  e  $F_{R2}$  representam, respectivamente, os filtros de alta e baixa frequência no terminal retificador, enquanto que  $F_{I1}$  e  $F_{I2}$  representam tais filtros no terminal inversor. Este ainda conta com compensadores reativos, representados pelos capacitores  $C_I$ . O parâmetro  $L_a$  representa o reator de alisamento da LT, enquanto que o bloco  $CC$  representa o filtro capacitivo presente nas terminações da linha.

As linhas de transmissão do sistema são modeladas a parâmetros distribuídos constantes na frequência por meio do modelo de Bergeron (Dommel, 1969). Apesar de o modelo a parâmetros distribuídos dependentes da frequência representar melhor a dispersão das ondas viajantes, o modelo de Bergeron pode ser utilizado de forma precisa para linhas de transmissão com o valor da resistência muito menor do que o da impedância de surto (Yang et al., 2019). Os parâmetros das linhas do sistema analisado são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros da linha de transmissão.

Parâmetros	Linhas $\pm 600$ kV
Comprimento (l)	2.450 km
Resistência (R)	7,0200 m $\Omega$ /km
Indutância (L)	860,6020 $\mu$ H/km
Capacitância (C)	13,4166 $\eta$ F/km

A partir dos dados apresentados na Tabela 1 pode-se calcular a velocidade de propagação das ondas viajantes ( $v_p$ ) e a impedância característica da LT ( $Z_S$ ), assim como estão demonstrados nas equações (3) e (4), respectivamente.

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 294.291.411,80 \text{ m/s}, \quad (3)$$

$$Z_S = \sqrt{\frac{L}{C}} = 253,27 \Omega. \quad (4)$$

### 3.2 Simulações

As faltas na LT do sistema analisado foram simuladas no ATP. Utilizou-se o modelo de Bergeron para modelar a LT e um passo de integração igual a 5  $\mu$ s.

As diferentes características de falta analisadas neste trabalho foram geradas a partir da variação da localização, resistência e tipo de falta. Basicamente, a cada simulação, foram variados os valores da distância da falta em relação ao terminal retificador entre 50 km a 2.400 km, com passos de 50 km, o que representa aproximadamente 2% do comprimento total da LT. A resistência de falta foi variada entre 0,1 e 200  $\Omega$ . Já os tipos de falta analisados foram: polo+:terra, polo -:terra e polo:polo. Na Tabela 2 são apresentados os cenários de falta avaliados, totalizando 1.440 casos distintos.

Tabela 2. Características de falta.

Local (km)	Tipo	Resistência ( $\Omega$ )
50, 100, ..., 2.350, 2.400	Polo+:Terra, Polo -:Terra, Polo:Polo	0,1; 0,5; 1; 5; 10; 30; 50; 100; 150; 200

## 4. MÉTODO PROPOSTO

Propõe-se aqui implementar um método de detecção, classificação e localização de faltas incidentes na LT de um sistema HVDC. Tal método utiliza os dados de tensão monitorados nos polos do terminal retificador. Nesta seção serão apresentadas as metodologias utilizadas para realizar cada etapa do diagnóstico de faltas.

### 4.1 Detecção

Para cada caso de falta apresentado na Tabela 2, o sistema é simulado no ATP e os dados de tensão monitorados nos polos do terminal retificador são importados para o programa Matlab<sup>®</sup>. Neste software, os valores dos coeficientes da TWDR são calculados por meio da equação (2).

Após a obtenção dos coeficientes da TWDR, é necessário calcular os parâmetros que compõem o limiar autoadaptativo de detecção proposto por Melo et al. (2018). O primeiro parâmetro a ser calculado é o desvio padrão do sinal de tensão ( $\sigma_V$ ), que deve ser obtido em um intervalo de amostras no qual o sistema esteja operando em regime permanente. O intervalo sugerido por Melo et al. (2018) de 100 ms para as amostras em regime permanente foi utilizado no estudo.

O segundo parâmetro utilizado no cálculo do limiar autoadaptativo é o fator característico do sistema ( $F_{CS}$ ). Tal parâmetro é calculado pela razão entre o valor máximo e médio dos módulos dos coeficientes TWDR calculados no intervalo considerado para o cálculo do desvio padrão, assim como é demonstrado na equação (5).

$$F_{CS} = \frac{\text{máximo}(|c(t)|)}{\text{média}(|c(t)|)}. \quad (5)$$

Com os parâmetros  $\sigma_V$  e  $F_{CS}$  calculados, o valor do limiar autoadaptativo de detecção é obtido por meio da equação (6).

$$\text{limiar}(t) = (|c(t-1)| + \sigma_V) \cdot F_{CS}, \quad (6)$$

em que  $c(t-1)$  é o coeficiente TWDR anterior à amostra analisada.

Nota-se que o limiar autoadaptativo tem o seu valor modificado em função do instante de tempo anterior ao da amostra analisada. Logo, o limiar calculado na equação (6) deve ser comparado com o valor absoluto do coeficiente TWDR no instante  $t$ . Caso o valor de  $|c(t)|$  seja superior ao limiar, a falta é detectada.

### 4.2 Classificação

A classificação de faltas é realizada por meio de regras formuladas com base na análise dos sinais de tensão monitorados e seus respectivos coeficientes TWDR calculados.

Por meio da avaliação dos dados obtidos, foi verificado que a falta que envolve um dos polos (positivo ou negativo) e a terra produz um afundamento de tensão apenas no polo atingido pela falta. Por outro lado, a falta do tipo polo:polo produz um afundamento de tensão em ambos os polos do sistema. A fim de exemplificar essa constatação, na Figura 3 são apresentados os sinais de tensão nos polos do retificador para as faltas do tipo polo+:terra e polo:polo, respectivamente. Tais faltas foram aplicadas a 1.000 km do retificador e possuem uma resistência de falta igual a 100  $\Omega$ .

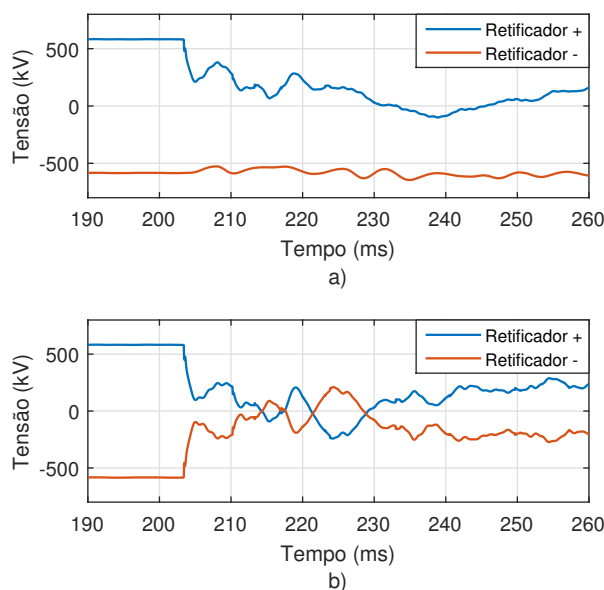


Figura 3. Tensão nos polos do retificador para uma falta do tipo a) polo+:terra e b) polo:polo.

Com base na análise da Figura 3.a, nota-se que as amostras do sinal de tensão no polo positivo sofrem bruscas e elevadas variações após o instante de incidência da falta. Entretanto, o sinal de tensão monitorado no polo negativo apresentou variações mínimas. No mais, para as faltas do tipo polo -:terra, esta dinâmica é semelhante, entretanto a tensão no polo negativo é a que mais sofre variações. Já de acordo com a Figura 3.b, conclui-se que os sinais de tensão nos polos positivo e negativo sofrem variações de ordem semelhantes. Como a transformada wavelet discreta redundante mensura a variação das amostras do sinal, infere-se que os coeficientes TWDR de tensão nos polos

positivo e negativo apresentam dinâmicas distintas para as faltas que envolvem apenas um polo e àquelas que envolvem ambos os polos.

Com base na análise anterior foram formuladas regras para classificar as faltas tomando como referência os coeficientes TWDR calculados. Tais regras estão descritas a seguir.

- (1) Cálculo do maior valor absoluto dos coeficientes TWDR para os sinais de tensão nos polos positivo ( $Cmax_{pos}$ ) e negativo ( $Cmax_{neg}$ ) do retificador;
- (2) Caso  $Cmax_{pos} \geq Cmax_{neg}$ , verifica-se se  $Cmax_{neg}$  é menor do que  $0,5.Cmax_{pos}$  e, caso essa condição seja satisfeita, conclui-se que a falta é do tipo polo+:terra;
- (3) Caso  $Cmax_{neg} \geq Cmax_{pos}$ , verifica-se se  $Cmax_{pos}$  é menor do que  $0,5.Cmax_{neg}$  e, caso essa condição seja satisfeita, conclui-se que a falta é do tipo polo-:terra;
- (4) Caso os itens 2 e 3 sejam falsos, conclui-se que a falta é do tipo polo:polo.

Nota-se que na aplicação dos passos 2 e 3 foi utilizado um fator multiplicador igual a 0,5. Tal valor foi escolhido de forma empírica, em que foram analisados fatores com valores de 0,1 até 0,9 e foi escolhido o menor valor que apresentou a melhor taxa de eficiência na classificação de faltas. A escolha do valor de tal fator depende das características do sistema, sendo assim um fator de ajuste do método e podendo ser alterado para aplicação em topologias distintas da analisada.

### 4.3 Localização

Com base na análise da Figura 2, verifica-se que as terminações da LT do sistema HVDC analisado são capacitivas devido a presença dos filtros capacitivos  $CC$ . Como o capacitor pode ser representado por um curto-circuito nos instantes iniciais de operação, a impedância na terminação capacitiva da linha ( $Z_T$ ) pode ser considerada nula. Logo, a polaridade do coeficiente de reflexão nas terminações da LT para ondas de tensão é negativa, assim como está descrito na equação (7).

$$\Gamma_r = \frac{Z_T - Z_S}{Z_T + Z_S} \approx \frac{0 - Z_S}{0 + Z_S} < 0, \quad (7)$$

em que  $Z_S$  representa a impedância característica da linha de transmissão.

De forma análoga, a falta incidente na LT pode ser vista como um curto circuito, ou seja, também apresenta uma impedância aproximadamente nula. Logo, de acordo com a equação (7), a polaridade de reflexão das ondas na descontinuidade do ponto de falta também é negativa. Com base nesta constatação, na Figura 4 é apresentado um diagrama com as representações das polaridades das ondas de tensão incidentes nas terminações capacitivas da LT de um sistema HVDC.

De acordo com a análise da Figura 4, conclui-se que a primeira frente de onda e àquela refletida no ponto de falta que são detectadas no terminal de monitoramento apresentam as mesmas polaridades. Tais ondas chegam no retificador nos instantes  $t_{R1}$  e  $t_{R2}$ , respectivamente. Logo, os coeficientes da TWDR verificados nos instantes de tempo  $t_{R1}$  e  $t_{R2}$  apresentam a mesma polaridade.

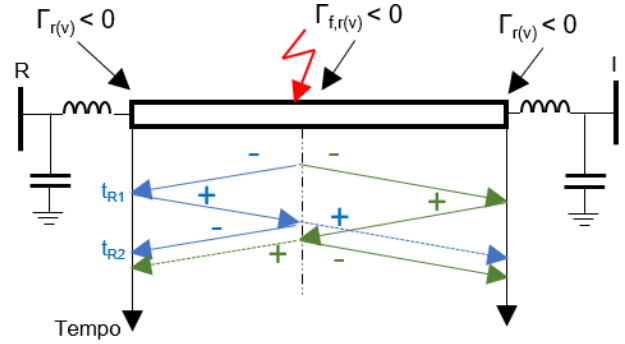


Figura 4. Análise das polaridades das ondas de tensão incidentes nas terminações capacitivas da LT.

A fim de exemplificar a constatação acima, na Figura 5 é apresentado o gráfico da segunda escala da TWDR aplicada ao sinal de tensão do polo positivo do retificador para a falta do tipo polo+:terra apresentada na Figura 3. A segunda escala da TWDR é obtida por meio da dupla aplicação da equação (2) aos sinais analisados e foi utilizada a fim de eliminar as variações intrínsecas do regime permanente.

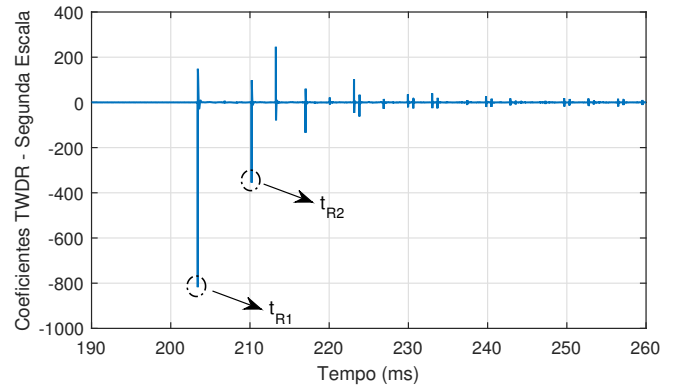


Figura 5. Coeficientes da segunda escalada da TWDR.

De acordo com a análise da Figura 5, verifica-se que os dois maiores valores absolutos dos coeficientes da segunda escala da TWDR ocorrem nos instantes  $t_{R1}$  e  $t_{R2}$ , os quais são os instantes de interesse para estimar o local de falta por meio da equação (1).

O gráfico apresentado na Figura 5 representa os coeficientes da TWDR para o sinal monitorado no polo positivo do retificador. A análise de tal sinal é utilizado para localizar as faltas do tipo polo+:terra e polo:polo. Já para as faltas polo-:terra, deve-se analisar o sinal de tensão monitorado no polo negativo do terminal de monitoramento.

Por fim, o desempenho da etapa de localização de faltas é avaliado por meio do cálculo do erro absoluto (EA) entre a distância real de falta e a estimada pelo método, assim como está descrito na equação (8). O EA foi utilizado com o objetivo de comparar os erros obtidos pelo método com a extensão de vãos de torre HVDC, assim como foi realizado em Fernandes et al. (2020).

$$EA = |d_{real} - d_{estimada}|. \quad (8)$$

## 5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A eficiência do método é avaliada por meio dos erros obtidos em cada estágio do diagnóstico de faltas. Na etapa de detecção, todos os casos de faltas avaliados foram corretamente detectados por meio do limiar de detecção autoadaptativo apresentado na seção 4.1.

De forma semelhante ao observado na etapa de detecção, as regras formuladas na seção 4.2 apresentaram uma eficiência de 100% no processo de classificação, em que todos as faltas foram corretamente classificadas. Portanto, apesar de a dinâmica do nível de tensão apresentada na Figura 3 ser influenciada pela variação da distância e resistência de falta, o método operou corretamente para todas as características de faltas analisadas na Tabela 2

Já a etapa de localização apresentou alguns erros no cálculo do ponto de falta na LT. Para realizar uma análise geral dos resultados, os erros obtidos para todos os tipos de faltas analisados são apresentados conjuntamente em forma de *boxplot*, o qual consiste em um tipo de gráfico composto por cinco índices: o valor máximo, representado pela cauda superior; o quartil superior, representado pelo limite superior da caixa; a mediana, representada pela linha intermediária da caixa; o quartil inferior, representado pelo limite inferior da caixa; e o valor mínimo, representado pela cauda inferior. O quartil superior, a mediana e o quartil inferior representam, respectivamente, o erro máximo verificado em 75%, 50% e 25% dos casos analisados. Os *boxplots* obtidos para os tipos de faltas simulados são apresentados na Figura 6.

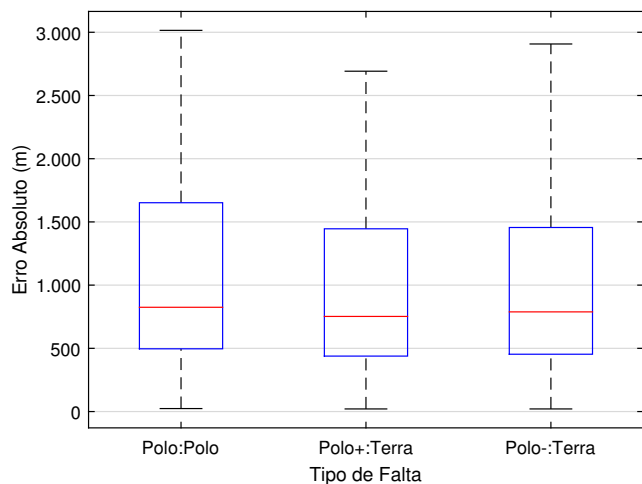


Figura 6. *Boxplots* dos erros de localização para cada tipo de falta.

Da Figura 6, verifica-se que o desempenho do método para as faltas do tipo polo:polo apresentou erros superiores aos observados nos casos de faltas que envolvem apenas um polo. No mais, nota-se que a mediana dos erros obtidos para as faltas do tipo polo:polo, polo+:terra e polo-:terra foram iguais a 824,75 m; 752,37 m e 788,35 m, respectivamente. Tais erros são inferiores a dois vãos de torre HVDC ( $\approx 960$  m), o que representa um bom desempenho para os métodos baseados na TOV (Fernandes et al., 2020). Observa-se ainda que o erro máximo obtido foi igual a

3.015,11 m verificado na falta do tipo polo:polo. Por outro lado, o erro mínimo obtido foi de 20,67 m verificado para uma falta polo+:terra.

A fim de avaliar de forma mais detalhada as fontes de erros do processo de localização de faltas, na Figura 7 é apresentado o gráfico que relaciona as médias dos erros obtidos em função da resistência de falta.

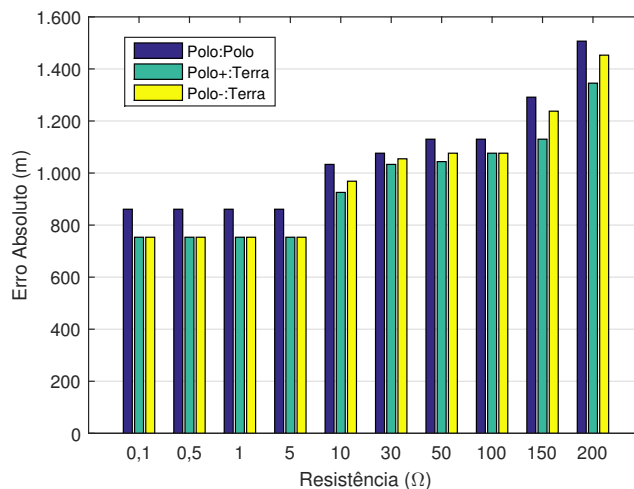


Figura 7. Média dos erros percentuais em função da resistência de falta.

Com base na análise da Figura 7, nota-se que, em geral, a eficiência do método é inversamente proporcional à resistência de falta. Esse resultado é esperado, pois o aumento da resistência diminui a amplitude das ondas de tensão e/ou corrente, o que dificulta a detecção da mesma pelos métodos baseados na TOV. No mais, em todos os casos, o desempenho para faltas do tipo polo:polo foi inferior ao desempenho para faltas que envolvem apenas um polo. Percebe-se ainda que para faltas de baixa resistência, o método não sofre interferência. Entretanto, a partir da resistência de 10  $\Omega$  o desempenho do método começa a ser afetado. A maior média de erros é igual a 1.507 m verificada para as faltas do tipo polo:polo com uma resistência de 200  $\Omega$ .

Por fim, o desempenho do método foi avaliado em função do local de falta. Na Figura 8 é apresentado o gráfico da média dos erros de localização obtidos em função do local de incidência da faltas com referência ao retificador, que é o terminal de monitoramento. Tal gráfico foi obtido considerando a média dos erros absolutos obtidos para os três tipos de faltas analisados.

Da Figura 8, conclui-se que, para grande maioria dos casos, a eficiência do método é afetada com o aumento da distância de aplicação da falta. Isto ocorre devido ao aumento do número de processos de reflexão e refração de ondas que ocorrem no terminal de monitoramento antes da chegada da segunda frente de onda refletida no ponto de falta. Tais processos podem sobrepor algumas ondas, o que afeta diretamente a eficiência do método. Além disso, a onda detectada pelo método é a resultante de todas as ondas verificadas naquele instante de tempo. Com isso, em alguns casos, o fenômeno de sobreposição de ondas viajantes pode atenuar a amplitude da onda medida

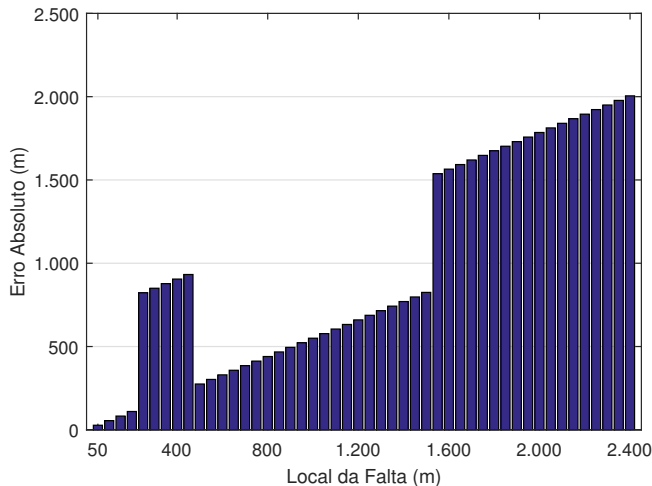


Figura 8. Média dos erros percentuais em função do local de falta.

pelo método baseado na TOV. Isto ocorre nos casos de sobreposição de ondas que apresentam polaridades distintas. Logo, torna-se ainda mais complexa a detecção da onda viajante produzida pela incidência do distúrbio no sistema. Isto é o que ocorre para as faltas aplicadas a 250 km e 1.550 km do retificador, em que o valor da média dos erros aumenta de forma brusca.

## 6. CONCLUSÕES

Foi proposto aqui um método de diagnóstico de faltas incidentes na LT de um sistema HVDC bipolar. Tal método é baseado na TOV e utiliza a TWDR para filtrar os sinais de tensão monitorados em apenas um terminal do sistema.

Foram simulados no ATP 1.440 cenários de faltas, os quais foram gerados pela variação do tipo, resistência e local de falta. A influência de tais parâmetros na eficiência do método foi avaliada. Nas etapas de detecção e classificação, o método foi capaz de realizar corretamente sua tarefa em 100% dos casos analisados. Tal fato comprova a eficiência do uso do limiar de detecção autoadaptativo e das regras formuladas nas seções 4.1 e 4.2, respectivamente.

Já na etapa de localização, verificou-se que a média total dos erros obtidos foi igual a 995,2 m, o que representa um valor muito próximo a dois vãos de torres de um sistema HVDC. Logo, o método apresentou um bom desempenho geral. No mais, a eficiência do método se mostrou, na maioria dos casos, inversamente proporcional ao aumento da resistência e da distância de falta.

Dos resultados obtidos, comprovou-se que o método proposto é 100% eficiente para detectar e classificar as faltas. Além disso, apresentou, no geral, erros de localização aceitáveis para os métodos baseado na TOV. Sendo assim, o método se mostra promissor, especialmente devido ao fato de utilizar apenas os dados monitorados em um terminal, o que elimina a necessidade de sincronização de dados.

## REFERÊNCIAS

Ando, M., Schweitzer, E., and Baker, R. (1985). Development and Field-Data Evaluation of Single-End Fault

Locator for Two-Terminal HVDC Transmission Lines Part i: Data Collection System and Field Data. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1(12), 3524–3530.

Dewe, M., Sankar, S., and Arrillaga, J. (1993). The Application of Satellite Time References to HVDC Fault Location. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 8(3), 1295–1302.

Dommel, H.W. (1969). Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single-End Multiphase Networks. *IEEE transactions on power apparatus and systems*, (4), 388–399.

Fernandes, P., Honorato, T., Lopes, F., Silva, K., and Gonçalves, H. (2020). Evaluation of Travelling Wave-Based Fault Location Methods Applied to HVDC Systems. *Electric Power Systems Research*, 189, 106619.

He, Z.Y., Liao, K., Li, X.P., Lin, S., Yang, J.W., and Mai, R.K. (2013). Natural Frequency-Based Line Fault Location in HVDC Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 29(2), 851–859.

Lima, H.B., Fernandes Jr, D., and Neves, W.L. (2020). Métodos de Detecção de Faltas em Linhas de Transmissão de Corrente Contínua: Uma Análise Comparativa. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE*, 1(1).

Lopes, F.V., Küsel, B., and Silva, K.M. (2016). Traveling Wave-Based Fault Location on Half-Wavelength Transmission Lines. *IEEE Latin America Transactions*, 14(1), 248–253.

Luz, G., Junior, D., and Junior, S. (2014). HVDC Transmission Line Modeling Analysis in PSCAD and ATP Programs. In *XIII Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning*.

Melo, Y., Neves, W., and Fernandes, D. (2018). Fault Detection and Localization for HVDC Transmission Lines. In *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*, 1–5. IEEE.

Murthy, P.K., Amarnath, J., Kamakshiah, S., and Singh, B. (2008). Wavelet Transform Approach for Detection and Location of Faults in HVDC System. In *2008 IEEE Region 10 and the Third international Conference on Industrial and Information Systems*, 1–6. IEEE.

Silva, A.S., Santos, R.C., Torres, J.A., and Coury, D.V. (2019). An Accurate Method for Fault Location in HVDC Systems Based on Pattern Recognition of DC Voltage Signals. *Electric Power Systems Research*, 170, 64–71.

Stanković, R.S. and Falkowski, B.J. (2003). The Haar Wavelet Transform: Its Status and Achievements. *Computers & Electrical Engineering*, 29(1), 25–44.

Suonan, J., Gao, S., Song, G., Jiao, Z., and Kang, X. (2009). A Novel Fault-Location Method for HVDC Transmission Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25(2), 1203–1209.

Wu, J., Li, H., Wang, G., and Liang, Y. (2016). An Improved Traveling-Wave Protection Scheme for LCC-HVDC Transmission Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 32(1), 106–116.

Yang, L., Chen, F., Xue, M., Li, Y., Chen, S., and Zou, L. (2019). A Novel Fault Location Method for HVDC Transmission Lines. In *2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia (GTD Asia)*, 341–346. doi:10.1109/GTDAAsia.2019.8715936.