

COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS BASEADOS EM ONDAS VIAJANTES EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE SISTEMAS LCC-HVDC

F.C.S. JÚNIOR*, F.B.COSTA*, R.L.S.FRANÇA*, D.M.SILVA*

*Avenida Senador Salgado Filho, 59078-970
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Natal, RN, Brasil

Emails: fcojunioreng@gmail.com, flaviocosta@ect.ufrn.br, rafaellucas03@gmail.com, daniellmarquesds@gmail.com

Abstract— This paper performs a comparison among the performance of one- and two-terminal traveling waves-based fault location classical methods when applied to monopolar LCC-HVDC systems. This comparison is executed by means of computational simulations, whose results demonstrate that the two-terminal method presents, in general, greater accuracy of location than the one-terminal method, despite being subject to more inaccuracies sources, specially when uncertainties in the transmission line electrical parameters exist.

Keywords— Fault Location, Traveling Waves, HVDC systems.

Resumo— Este artigo realiza a comparação de desempenho dos métodos clássicos de localização de faltas baseados em ondas viajantes com um e dois terminais quando aplicados a linhas de transmissão de sistemas LCC-HVDC monopolares. A comparação é realizada por meio de simulações computacionais, cujos resultados demonstram que o método com dois terminais apresenta, no geral, maior precisão de localização em relação ao método com um terminal, apesar de estar sujeito a mais fontes de imprecisões, especialmente quando incertezas nos parâmetros elétricos da linha de transmissão existem.

Palavras-chave— Localização de Faltas, Ondas Viajantes, Sistemas HVDC.

1 Introdução

Os sistemas de transmissão em corrente contínua (CC) têm sido cada vez mais utilizados, principalmente, pelas suas vantagens em relação aos sistemas de transmissão convencionais em corrente alternada (CA) como, por exemplo, sua maior viabilidade econômica quando grandes blocos de potência são transmitidos a longas distâncias, e também pelo avanço tecnológico na eletrônica de potência (Arrilaga et al., 2007). Segundo um relatório de pesquisa realizada pela *Pike Research*, publicado em 2012, existiam, no mundo, 97 projetos de sistemas de transmissão HVDC (*High Voltage Direct Current*) planejados para comissionamento entre os anos de 2012 e 2020, totalizando uma capacidade de potência igual a 399,18 GW (Pike Research, 2012), o que evidencia a tendência de crescimento na utilização de sistemas de transmissão CC.

Uma característica marcante dos sistemas de transmissão em corrente contínua tradicionais (sistemas LCC (*Line Commutated Converter*)), foco deste trabalho, é, em geral, o grande comprimento das linhas de transmissão, que além das vantagens técnicas, acaba sendo mais viável economicamente. As linhas CC podem atingir comprimentos maiores que 1000 km como, por exemplo, a linha de transmissão Xingu-Estremo com extensão total de 2086,9 km e a linha de transmissão Xingu-Rio com extensão igual a 2525,8 km, ambas presentes no Brasil, estando a primeira em operação e a segunda em fase de construção (BMTE SPE S.A., 2014; XRTE S.A., 2016). Esse

fato pode ser também verificado, por exemplo, em linhas de transmissão em corrente contínua presentes na Índia de acordo com Kamalapur et al. (2014).

O comprimento extenso das linhas de transmissão em corrente contínua associado ao ambiente imprevisível ao qual estão expostas contribui para o aumento da probabilidade da ocorrência de faltas. De fato, segundo Wu et al. (2017), a linha de transmissão é o elemento do sistema de transmissão HVDC que apresenta a maior taxa de faltas, o que aumenta as exigências sobre os esquemas de localização.

Quando uma falta ocorre sobre uma linha de transmissão, a sua precisa localização é desejada, pois acelera o processo de manutenção, o que diminui o tempo de interrupção do fornecimento de energia, acelerando a restauração da transmissão e, com isso, aumentando a confiabilidade do sistema elétrico de potência. Diante disso, é uma motivação contínua da comunidade científica a busca por métodos de localização cada vez mais precisos. Dentre os diversos métodos de localização propostos como, por exemplo, os baseados em impedância e ondas viajantes (Andrade, 2013), destaca-se os baseados em ondas viajantes por estarem sendo atualmente investigados para aplicações em linhas de transmissão de sistemas CC (Nanayakkara et al., 2012; Azizi et al., 2014).

Os métodos de localização baseados em ondas viajantes dividem-se, de uma maneira geral, em métodos de um e dois terminais (Nanayakkara et al., 2012). O método clássico com dois terminais localiza a falta com base nos tempos de che-

gada da primeira onda viajante em cada terminal da linha de transmissão. Portanto, é um método que necessita de um esquema de comunicação e de sincronismo de dados entre os terminais.

No método clássico com um terminal não há a necessidade de esquemas de comunicação e tampouco de esquemas de sincronização, uma vez que a localização da falta é realizada com base nos tempos de chegada da primeira onda viajante e de sua sucessiva reflexão do ponto de falta incidentes sobre um único terminal da linha. No entanto, este esquema necessita de um sofisticado método de detecção de ondas viajantes, já que a onda refletida do ponto de falta é de difícil detecção.

Quando erros de sincronismo de dados e na estimação do comprimento da linha existem, imprecisões na localização são adicionadas ao método clássico com dois terminais. Além disso, devido às imprecisões no valor dos parâmetros elétricos das linhas de transmissão, a velocidade real das ondas viajantes não é tida com exatidão, implicando em imprecisões na localização para ambos os métodos convencionais com um e dois terminais, já que o conhecimento da velocidade de propagação das ondas viajantes é demandado por ambos.

Diante das fontes de imprecisões existentes nos métodos clássicos com um e dois terminais, esquemas alternativos de localização baseados em ondas viajantes que eliminem tais fontes são alvos de pesquisas, conforme o método de localização publicado por Lopes et al. (2018), por exemplo, que utiliza recursos tanto do método com um quanto com dois terminais. O método localiza faltas em linhas de transmissão CA a partir da diferença do tempo de chegada da primeira onda viajante e de sua sucessiva reflexão do ponto de falta em ambos os terminais da linha. Assim, a fórmula de localização proposta não requer uma referência de tempo comum entre os terminais da linha nem o conhecimento da velocidade de propagação das ondas viajantes. De um modo geral, métodos alternativos utilizam recursos dos métodos clássicos com um e/ou dois terminais, o que torna importante a comparação dos métodos clássicos em sistemas HVDC.

A técnica convencional com dois terminais é mais difundida em relação à com um terminal (Nanayakkara et al., 2012), principalmente porque nesta última, a detecção da onda refletida do ponto de falta não é trivial (Lopes et al., 2018). Entretanto, esquemas de detecção de ondas viajantes vêm sendo investigados a exemplo dos baseados na transformada *wavelet* (Costa et al., 2010), o que pode viabilizar a aplicação do método com um terminal. Portanto, a análise comparativa do desempenho de ambos os métodos é relevante diante deste cenário. Além disso, a avaliação dos dois métodos é importante para que os limites de cada esquema sejam identificados para dar suporte ao desenvolvimento de novos esquemas, a exemplo

do proposto por Lopes et al. (2018), que utilizem recursos de ambos os métodos.

Neste artigo, por meio de simulações computacionais, o desempenho dos métodos clássicos de localização com um e dois terminais são comparados quando aplicados à linha de transmissão de um sistema LCC-HVDC monopolar considerando dois casos: 1) caso ideal, em que não há erros de sincronização, imprecisões nos parâmetros elétricos da linha CC nem erros na estimação do comprimento da linha; 2) caso real, em que são considerados erros de sincronização, as imprecisões nos parâmetros elétricos da linha CC e erros na estimação do comprimento da linha.

2 Teoria Básica Sobre Ondas Viajantes

Na ocorrência de uma falta sobre uma linha de transmissão, impulsos eletromagnéticos de alta frequência são gerados, devido à mudança abrupta da tensão no ponto de falta, que se propagam como ondas viajantes a partir do ponto de falta em direção aos terminais da linha, tanto na corrente quanto na tensão, a uma determinada velocidade v , conforme ilustrado na Fig.1, em que tem-se uma linha de transmissão sujeita a uma falta F_1 . No ponto de falta, são geradas ondas viajantes na tensão e corrente que se propagam em direção à barra i e j , conforme o diagrama *Lattice*. Ao incidirem sobre os terminais da linha, as ondas fornecem ostensiva informação sobre a falta, podendo ser utilizadas, portanto, para propósitos de localização.

A teoria sobre ondas viajantes afirma que durante a propagação ao longo da linha, as ondas, além de sofrerem atenuação e distorção, podem sofrer reflexão e refração ao incidirem sobre pontos de descontinuidade da linha de transmissão como, por exemplo, os terminais da linha e o ponto de ocorrência da falta, conforme ilustrado na Fig. 1, o que resulta em sucessivas ondas sobre os terminais da linha. Conforme a Fig.1, por exemplo, após a falta com distância d_F , tomando a barra i como referência, a primeira onda viajante atinge as barras i e j nos tempos t_i e t_j , respectivamente. As suas respectivas reflexões do ponto de falta atingem as barras i e j em t_{ir} e t_{jr} , respectivamente. A amplitude dos sinais refletidos e refratados são regidos por coeficientes de reflexão e refração, respectivamente. A teoria completa sobre ondas viajantes pode ser encontrada em Powel (1964).

Apesar da teoria sobre ondas viajantes ser antiga, aplicações práticas utilizando ondas viajantes só estão sendo viabilizadas recentemente devido ao avanço tecnológico, por exemplo, na tecnologia de transdutores (Nanayakkara et al., 2012).

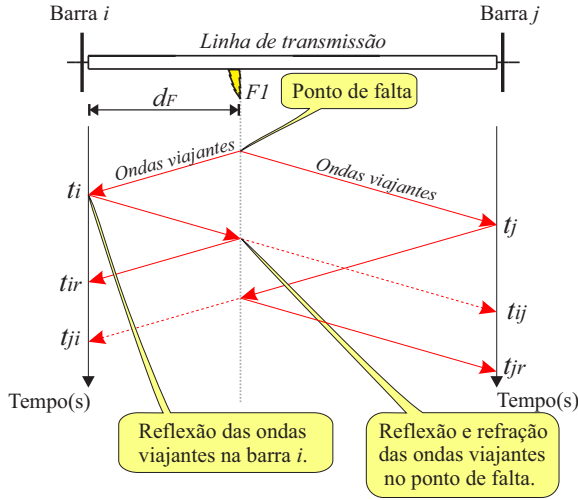


Figura 1: Diagrama *Lattice* das ondas viajantes para uma falta sobre uma linha de transmissão.

3 Método de Localização Clássico Baseado em Ondas Viajantes com Dois Terminais

Com base nos instantes t_i e t_j (Fig.1), o método clássico de localização baseado em ondas viajantes com dois terminais estima a localização da falta, tomando a barra i como referência (Fig.1), por meio da seguinte expressão (Magnago and Abur, 1998; Lopes et al., 2018):

$$d_e = 0,5[l - (t_j - t_i)v], \quad (1)$$

em que d_e e l são a estimativa da localização da falta e o comprimento da linha, respectivamente. A velocidade v é, geralmente, aproximada por $1/\sqrt{LC}$, em que L e C são a indutância e a capacitância da linha de transmissão por unidade de comprimento.

Baseado em (1), destaca-se a seguinte vantagem do método:

- é necessário detectar apenas a primeira onda incidente sobre cada terminal da linha, cuja detecção é de mais fácil realização.

Entretanto, o método apresenta as seguintes desvantagens:

- um canal de comunicação de dados entre os terminais da linha é necessário, já que são utilizadas informações de ambos os terminais, o que aumenta custos para a sua implementação prática;
- é necessário sincronização de tempo entre os terminais da linha para computar corretamente a diferença $(t_j - t_i)$, o que é um obstáculo quando erros de sincronização existem, pois imprecisões são adicionadas à localização. O sistema global de posicionamento (GPS - do inglês, *Global Positioning System*)

é usualmente utilizado para sincronização de tempo, apresentando precisão entre $\pm 0,1\mu s$ (Nanayakkara et al., 2012; Azizi et al., 2014);

- o conhecimento da velocidade de propagação v das ondas viajantes é demandado. Entretanto, devido às imprecisões nos parâmetros elétricos da linha, que variam, por exemplo, com as condições climáticas locais, a velocidade da onda não é tida com exatidão, o que acarreta erros ao método (Lopes et al., 2018).
- o conhecimento do comprimento l da linha de transmissão é demandado. Entretanto, erros na estimação do comprimento da linha em relação ao seu valor real podem existir (Lopes et al., 2018), acarretando em imprecisões para a localização.

4 Método de Localização Clássico Baseado em Ondas Viajantes com Um Terminal

Com base nos instantes t_i e t_{ir} (Fig.1), o método clássico de localização baseado em ondas viajantes com um terminal estima a localização da falta, tomando a barra i como referência, por meio da seguinte expressão (Magnago and Abur, 1998; Lopes et al., 2018):

$$d_e = 0,5(t_{ir} - t_i)v. \quad (2)$$

Baseado em (2), destacam-se as seguintes vantagens do método:

- não é necessário um canal de comunicação entre os terminais da linha, já que é demandada informações apenas dos tempos de chegada das ondas viajantes incidentes sobre um único terminal;
- não é necessário sincronismo de dados entre os terminais da linha, uma vez que a diferença $t_{ir} - t_i$ é realizada apenas sobre um único terminal;
- não é demandado o conhecimento do comprimento l da linha de transmissão.

Entretanto, o método apresenta as seguintes desvantagens:

- o conhecimento da velocidade de propagação v das ondas viajantes ainda é necessário;
- é necessário detectar corretamente a onda refletida do ponto de falta, cuja detecção é de difícil realização devido aos efeitos da propagação da onda ao longo da linha de transmissão. Neste sentido, técnicas mais precisas de processamento de sinais precisam ser verificadas nestas aplicações.

5 Características Particulares dos Sistemas LCC - HVDC

Conforme discutido, a correta detecção das ondas viajantes refletidas do ponto de falta é necessária para alguns métodos de localização. Neste trabalho, a correta detecção de tais ondas é realizada com base nas condições de fronteira das linhas de transmissão CC e na informação de polaridade das ondas viajantes de corrente.

Uma característica peculiar das linhas de transmissão de sistemas LCC - HVDC refere-se à presença de reatores de alisamento e filtros CC em suas fronteiras (terminações), conforme o sistema LCC - HVDC monopolar ilustrado na Fig.2. Os filtros CC são conectados entre o final da linha CC e a terra e os reatores de alisamento em série entre os conversores e os filtros CC. Desta forma, as fronteiras da linha CC atuam como um filtro passa-baixa. Diante disso, ondas viajantes ao sofrerem refração sobre as fronteiras como, por exemplo, ondas que se desloquem das regiões 1 e 2 em direção à linha de transmissão CC e vice-versa, perdem a sua característica de impulso tornando-se um sinal suave e atenuado devido à característica de filtro passa-baixa das fronteiras (Kong et al., 2016). Com isso, ondas viajantes provenientes de sistemas adjacentes à linha CC como, por exemplo, das regiões 1 e 2 (Fig.2), não são um empecilho para a correta detecção das ondas viajantes refletidas do ponto de falta, como são no caso das linhas CA (Lopes et al., 2018), já que devido às fronteiras das linhas CC tais ondas são atenuadas. Trabalhos baseados na atenuação da amplitude das ondas viajantes devido às condições de fronteira das linhas de transmissão CC vêm sendo publicados (Liu et al., 2009; Kong et al., 2016).

Quando uma falta ocorre sobre a linha CC, as ondas viajantes iniciais de corrente que se deslocam em ambos os sentidos da linha a partir do ponto de falta apresentam polaridades opostas (Liu et al., 2009). Para um sistema LCC-HVDC com terminação capacitiva (Hingorani, 1970), terminação geralmente encontrada em sistemas HVDC (Liu et al., 2009), conforme a Fig.3, por exemplo, o coeficiente de reflexão para a onda de corrente na terminação da linha é positivo (Liu et al., 2009). No ponto de falta, o coeficiente de reflexão e refração são também positivos para a onda de corrente (Liu et al., 2009). Portanto, a primeira onda viajante de corrente, proveniente de uma falta sobre a linha CC, incidente sobre cada uma das duas barras da linha CC apresentam polaridades opostas e a sucessiva onda refletida exatamente do ponto de falta apresenta a mesma polaridade da primeira onda incidente sobre a respectiva barra considerada, conforme ilustrado na Fig.4, em que assume-se a onda inicial para a esquerda possuindo polaridade positiva e para a direita, polaridade negativa.

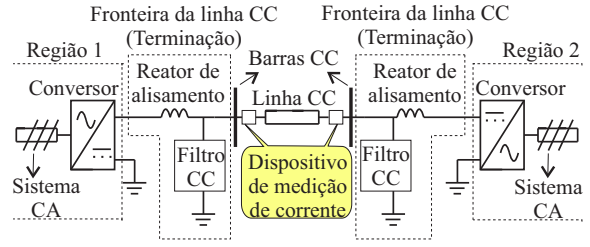


Figura 2: Fronteiras das linhas de transmissão CC.

As demais ondas incidentes sobre a barra considerada, resultante de reflexões sobre a barra remota, podem ser diferenciadas da onda refletida do ponto de falta com base na sua polaridade, já que estas apresentam polaridade inversa à da onda refletida do ponto de falta, conforme a Fig.4. Portanto, devido às condições de fronteira das linhas de transmissão dos sistemas LCC-HVDC, ondas viajantes provenientes de sistemas adjacentes não são uma complicação para a correta detecção da onda viajante refletida do ponto de falta já que são filtradas pelos elementos de fronteira das linhas CC. Diante disso, com base na polaridade das ondas viajantes de corrente, geradas por faltas internas à linha CC, é possível detectar corretamente a onda refletida do ponto de falta. Assim, tais ondas são detectadas neste trabalho, tomando a barra i ou j como referência, de acordo com os passos da metodologia apresentada na Fig.5.

6 Detecção das Ondas Viajantes

Neste trabalho, as ondas viajantes são detectadas nos passos 1 e 2 (Fig. 5) por meio da transformada *wavelet* estacionária (SWT - do inglês, *Stationary Wavelet Transform*) (Costa et al., 2010), ferramenta comumente utilizada para identificar transitórios em sistemas de potência, cuja *wavelet* mãe escolhida é a Daubechies 4 (db4) por fornecer uma detecção precisa de transitórios em sistemas de potência (Costa et al., 2010).

A transformada *wavelet* é aplicada aos sinais de corrente das barras da linha de transmissão CC, cujos instrumentos de medição estão localizados de acordo com a Fig.2. A detecção das ondas viajantes é realizada por meio da análise da am-

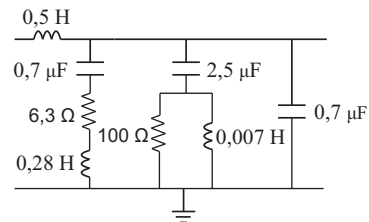


Figura 3: Exemplo de terminação capacitiva (Hingorani, 1970).

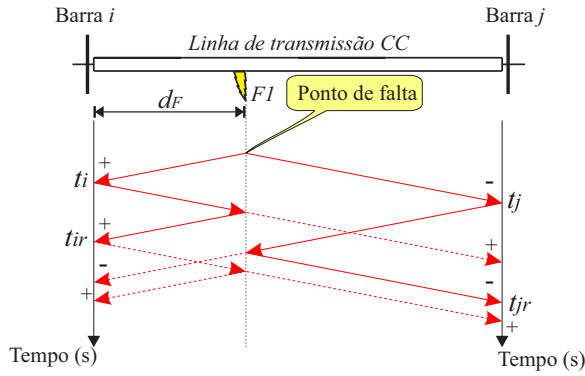


Figura 4: Polaridade das ondas viajantes de corrente.

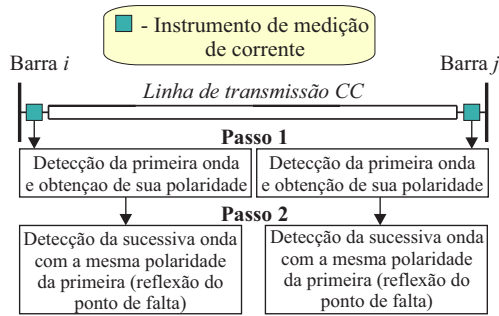


Figura 5: Metodologia para a detecção das ondas viajantes refletidas do ponto de falta.

plitude dos coeficientes *wavelet* no primeiro nível de decomposição. Em regime permanente, a amplitude dos coeficientes é influenciada pelo ruído de alta frequência apresentando uma distribuição normal de probabilidade dada pela média (μ) e o desvio padrão (σ) da magnitude dos coeficientes. Portanto, em regime permanente, é esperado que a amplitude dos coeficientes estejam dentro dos limites $[\mu - 4\sigma, \mu + 4\sigma]$ (Costa, 2014). Entretanto, a amplitude dos coeficientes é fortemente influenciada pelas ondas viajantes apresentando altos valores (picos em seus valores) em módulo em relação aos de estado estacionário, o que permite a detecção das ondas. Portanto, limiares podem ser estabelecidos para a detecção das ondas viajantes. Considerando a *wavelet* db4, um coeficiente com pico negativo indica uma onda com polaridade positiva e um com pico positivo uma onda com polaridade negativa, semelhante à metodologia desenvolvida por Liu et al. (2009).

O desempenho do método de detecção com base nos limiares escolhidos não está sendo avaliado neste trabalho, sendo objetivo comparar o desempenho dos métodos convencionais de localização considerando as ondas viajantes detectadas corretamente.

7 Avaliação de Desempenho

Por meio de simulações computacionais, compara-se o desempenho dos métodos de localização clássicos com um e dois terminais quando aplicados à localização de faltas sobre a linha de transmissão de um sistema LCC-HVDC monopolar, conforme ilustrado na Fig.6. O sistema é baseado no sistema HVDC padrão do CIGRE, que consiste em um sistema monopolar de 500 kV-1000 MVA com conversores comutados por linha de 12 pulsos, baseado em tiristores, tanto no retificador quanto no inversor, proposto por Szechtman et al. (1991).

O sistema HVDC é modelado com algumas modificações quando comparado ao modelo padrão do CIGRE para se obter resultados mais realistas. Por exemplo, o modelo a parâmetros concentrados da linha CC é substituído pelo modelo de linha de transmissão de Bergeron, mais adequado para modelar linhas de transmissão que representem as propagações das ondas viajantes. Os parâmetros distribuídos são extraídos do sistema HVDC de Itaipu, uma linha aérea de transmissão CC presente no Brasil, cujos parâmetros são disponibilizados por Andrade (2013).

Uma outra adaptação consiste na substituição do equivalente CA no lado do inversor do modelo padrão do CIGRE por linhas de transmissão CA do sistema teste do IEEE (IEEE, 2005), conforme ilustrado na Fig.6, com o objetivo de tornar o sistema mais realista.

As terminações da linha CC são capacitivas conforme a Fig.3, cujos parâmetros são escolhidos baseados em Hingorani (1970), os filtros CA1 e CA2 estão de acordo com Szechtman et al. (1991) e a velocidade de propagação das ondas viajantes sobre a linha de transmissão CC é igual a $1/\sqrt{LC} = 236995$ km/s. A transformada *wavelet* é aplicada às correntes das barras *i* e *j*, cujos instrumentos de medição estão dispostos de acordo com a Fig.6. Os instrumentos de medição são considerados ideais, já que erros provenientes de tais dispositivos não estão sendo avaliados neste trabalho. Os sinais apresentam um nível relativamente baixo de ruído, já que seu efeito sobre a detecção das ondas não está sendo avaliado neste trabalho, resultando em uma relação sinal-ruído igual a 66 dB. Para permitir uma boa precisão na identificação do tempo de chegada das ondas, utilizou-se uma frequência de amostragem igual a 100 kHz, valor possível de ser implementado na prática já que existem relés comerciais operando a taxas de, por exemplo, 1 MHz, a saber, o relé SEL-T400L. O canal de comunicação para o método com dois terminais é considerado ideal, sendo as localizações de faltas realizadas tomando a barra *i* como referência para ambos os métodos.

Para possibilitar a avaliação do desempenho dos métodos diante de diferentes localizações e re-

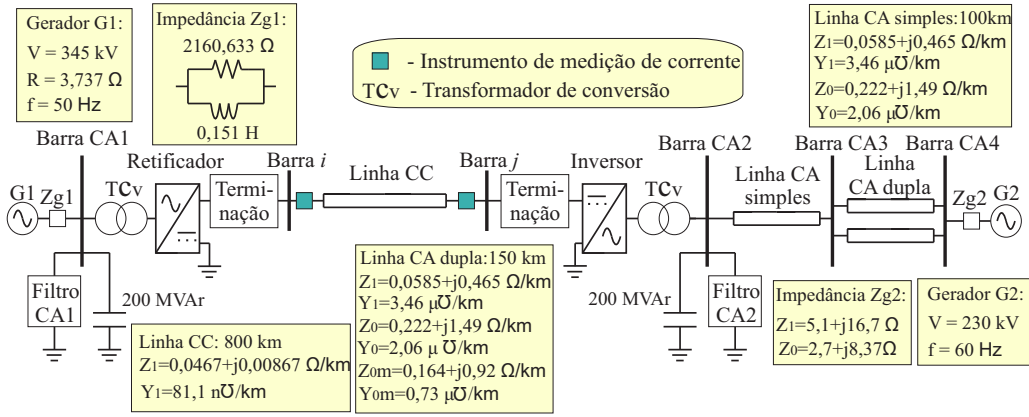


Figura 6: Sistema elétrico utilizado.

sistências de falta, faltas sobre a linha CC para a terra com resistência igual a 1Ω são realizadas a partir de 50 km até 690 km com passo de 40 km (conjunto de faltas 1) e com resistência igual a 100Ω a partir de 80 km até 720 km com passo de 40 km (conjunto de faltas 2), tomando como referência a barra i .

Três cenários para a localização são considerados: 1) cenário 1, em que não há erros na estimação dos parâmetros elétricos da linha CC, erros de sincronismo nem erros na estimação do comprimento da linha; 2) cenário 2, em que são considerados erro de sincronismo igual a $0,1 \mu s$, erros na estimação dos parâmetros elétricos L e C da linha igual a 5% e erro na estimação do comprimento da linha CC igual 0,625%, o que equivale a um erro igual a 5 km; 3) cenário 3, em que são considerados erro de sincronismo igual a $0,1 \mu s$, erros na estimação dos parâmetros elétricos L e C da linha igual a -5% e erro na estimação do comprimento da linha CC igual 0,625%. Combinando todas as faltas e cenários, 102 diferentes simulações são analisadas.

7.1 Comparação de Desempenho

Na Fig.7, apresentam-se os coeficientes *wavelet* da corrente da barra i para uma falta a 440 km (conjunto de faltas 2) da respectiva barra. A primeira onda incidente sobre a barra i e a sua reflexão do ponto de falta apresentam polaridades positivas, conforme a amplitude dos coeficientes *wavelet*. Entre as duas ondas há a presença de uma onda refletida da barra j com polaridade negativa. Nenhuma onda proveniente do sistema CA adjacente à linha CC é verificada devido ao processo de filtragem proporcionado pelas fronteiras da linha de transmissão CC, o que demonstra que é possível detectar corretamente a primeira onda e sua sucessiva reflexão do ponto de falta em cada barra da linha CC utilizando a informação de polaridade. Faltas no sistema CA são simuladas e verifica-se que, de fato, ondas viajantes provenientes das faltas CA não chegam aos pontos de

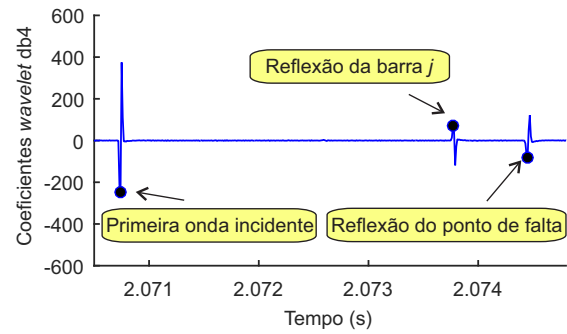


Figura 7: Ondas viajantes incidentes sobre a barra i para uma falta a 440 km da respectiva barra.

monitoramento da linha CC, como indicado na literatura, não afetando os métodos de localização discutidos.

Nas Tab.1 e 2, são apresentados os erros absolutos $|d_F - d_e|$ da distância de falta estimada d_e em relação à localização real d_F para os conjuntos de faltas 1 e 2, respectivamente, considerando os cenários 1, 2 e 3. O erro absoluto para o método com um e dois terminais é designado por ϵ_{1T} e ϵ_{2T} , respectivamente.

Nas Tab.3 e 4, são apresentados a média e o desvio padrão (DP) dos erros absolutos para os conjuntos de faltas 1 e 2, respectivamente, considerando os cenários 1, 2 e 3. A média e o desvio padrão do erro absoluto do método com dois terminais é menor que o do método com um terminal em todos os cenários e conjuntos de faltas. Quando o cenário 1 é considerado, a média e o desvio padrão dos métodos apresentam valores bem próximos. Entretanto, quando erros de sincronismo e imprecisões nos parâmetros elétricos e no comprimento da linha são considerados (cenários 2 e 3), tais parâmetros passam a ser significativamente maiores para o método com um terminal em relação ao com dois terminais. Tal fato deve-se, principalmente, às imprecisões nos parâmetros elétricos da linha de transmissão e a sua extensa

Tabela 1: Erros absolutos de estimação da localização das faltas para o conjunto de faltas 1. Valores em km.

d_F	Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3	
	ϵ_{1T}	ϵ_{2T}	ϵ_{1T}	ϵ_{2T}	ϵ_{1T}	ϵ_{2T}
50	0,23	0,43	2,60	19,57	2,39	15,48
90	1,13	0,72	5,36	17,94	3,55	13,07
130	0,84	0,17	6,99	15,18	5,96	11,91
170	0,55	0,11	8,62	13,55	8,37	9,5
210	1,44	0,40	11,38	11,92	9,53	7,09
250	1,16	0,49	13,01	9,16	11,94	5,92
290	0,87	0,20	14,63	7,53	14,35	3,52
330	0,58	0,09	16,26	5,90	16,76	1,11
370	0,29	0,38	17,89	4,28	19,17	1,30
410	0	0,66	19,52	2,65	21,58	3,71
450	0,89	0,23	22,28	0,11	22,74	4,88
490	0,61	0,06	23,91	1,74	25,15	7,29
530	1,50	0,35	26,67	3,37	26,31	9,70
570	1,21	0,55	28,30	6,13	28,72	10,86
610	0,92	0,26	29,93	7,76	31,13	13,27
650	0,63	0,03	31,56	9,39	33,54	15,68
690	0,34	0,32	33,19	11,02	33,95	18,09

dimensão.

O método com um terminal localiza a falta com base no produto $(t_{ir} - t_i)v$. Entretanto, devido às imprecisões nos parâmetros elétricos da linha (L e C), a velocidade v não é tida com exatidão, o que se traduz em imprecisões para a localização. Como o produto $(t_{ir} - t_i)v$ é diretamente proporcional à diferença $t_{ir} - t_i$, quanto maior esta for, maior será o erro na localização devido à imprecisão na velocidade de propagação da onda.

A diferença $t_{ir} - t_i$ aumenta com o aumento da distância de falta, apresentando valores entre $0 < t_{ir} - t_i \leq l/v$ para faltas na primeira metade da linha ($0 < d_F \leq l/2$) e entre $l/v < t_{ir} - t_i \leq 2l/v$ para faltas na segunda metade da linha ($l/2 < d_F \leq l$). Portanto, à medida que a distância de falta aumenta, as imprecisões na localização da falta aumentam para o método com um terminal, considerando os cenários 2 e 3, conforme as Tab.1 e 2. Além disso, devido ao extenso comprimento da linha de transmissão, característica dos sistemas LCC - HVDC, conforme discutido, tal efeito é amplificado, já que a diferença $t_{ir} - t_i$ passa a atingir significativos valores, induzindo significativos erros de localização conforme indicado nas Tab.1 e 2.

No método com dois terminais tal problemática também existe, já que a localização é baseada no produto $(t_j - t_i)v$. Entretanto, o método é menos afetado em relação ao com um terminal uma vez que a diferença $t_j - t_i$ apresenta valores apenas entre $0 \leq t_j - t_i \leq l/v$. Portanto, no cenário de longos comprimentos de linhas de transmissão, o método com um terminal é mais afetado pelas imprecisões nos parâmetros elétricos da linha que o método com dois terminais, o que se traduz em significativos e maiores erros de localização de falta em relação ao método com dois terminais especialmente quando longas distâncias de falta são consideradas, conforme as Tab.1 e 2.

Tabela 2: Erros absolutos de estimação da localização das faltas para o conjunto de faltas 2. Valores em km.

d_F	Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3	
	ϵ_{1T}	ϵ_{2T}	ϵ_{1T}	ϵ_{2T}	ϵ_{1T}	ϵ_{2T}
80	0,61	0,06	4,39	17,78	3,57	14,29
120	1,50	0,84	7,15	15,02	4,73	13,13
160	1,21	0,55	8,77	13,39	7,14	10,72
200	0,92	0,26	10,40	11,76	9,55	8,31
240	0,64	0,03	12,03	10,13	11,96	5,90
280	0,35	0,32	13,66	8,51	14,37	3,49
320	0,06	0,61	15,29	6,88	16,78	1,08
360	0,23	0,29	16,92	4,12	19,19	0,08
400	0,52	0	18,55	2,49	21,60	2,49
440	0,37	0,29	21,31	0,86	22,76	4,90
480	1,27	0,61	24,07	1,90	23,93	6,06
520	0,98	0,32	25,70	3,53	26,34	8,47
560	0,69	0,03	27,33	5,16	28,75	10,88
600	0,40	0,26	28,96	6,79	31,15	13,29
640	0,11	0,55	30,58	8,42	33,56	15,70
680	1,01	0,84	33,34	10,05	34,73	18,11
720	0,72	0,06	34,97	12,80	37,14	19,27

Tabela 3: Média e desvio padrão (DP) dos erros absolutos de localização de faltas para o conjunto de faltas 1. Valores em km.

Param.	Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3	
	ϵ_{1T}	ϵ_{2T}	ϵ_{1T}	ϵ_{2T}	ϵ_{1T}	ϵ_{2T}
Média	0,78	0,32	18,36	8,66	18,54	8,96
DP	0,42	0,20	9,33	5,47	10,33	5,02

Tabela 4: Média e desvio padrão (DP) dos erros absolutos de localização de faltas para o conjunto de faltas 2. Valores em km.

Param.	Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3	
	ϵ_{1T}	ϵ_{2T}	ϵ_{1T}	ϵ_{2T}	ϵ_{1T}	ϵ_{2T}
Média	0,68	0,35	19,61	8,21	20,43	9,19
DP	0,41	0,27	9,27	4,75	10,41	5,71

Tabela 5: Quantidade de casos em que o erro absoluto do método com dois terminais é menor que o do método com um terminal.

Conjunto	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Conjunto 1	14	12	13
Conjunto 2	14	13	14

Na Tab.5, são apresentadas as quantidades de casos em que o erro absoluto do método com dois terminais é menor que o do método com um terminal considerando todos os conjuntos de faltas e cenários. Considerando os 102 casos analisados, em 80 casos o erro do método com dois terminais é menor, o que corresponde a 78,43% dos casos. Considerando o cenário 1 para ambos os conjuntos de faltas, dos 34 casos, em 28 o método com dois terminais é mais preciso, o que corresponde a 82,35% dos casos. Considerando ambos os cenários 2 e 3 para ambos os conjuntos de faltas, dos 68 casos analisados, em 52 casos o método com dois terminais apresentou erro absoluto menor que o do método com um terminal, o que corresponde a 76,47% dos casos, evidenciando a maior precisão do método com dois terminais diante de cenários com erros de sincronismo e imprecisões nos parâ-

metros elétricos e no comprimento da linha.

8 Conclusões

Neste artigo, é realizada a comparação do desempenho dos métodos clássicos de localização de faltas baseados em ondas viajantes com um e dois terminais, considerando cenário ideal e com erros, quando aplicados à linha de transmissão de um sistema LCC-HVDC monopolar. Resultados indicam que no cenário ideal e com erros, o método com dois terminais se apresenta mais preciso, no geral. No cenário com erros, significativos erros de localização, em relação ao cenário ideal, são obtidos em ambos os métodos. Nesse cenário, apesar do método com dois terminais está sujeito a mais fontes de erros (sincronismo de dados e comprimento da linha) em relação ao com um terminal, as imprecisões nos parâmetros elétricos da linha adicionam significativos erros de localização ao método com um terminal, especialmente para longas distâncias de faltas, o que torna o método com dois terminais bem mais preciso em termos de erro médio de localização.

Agradecimentos

Este trabalho teve apoio da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico)

Referências

- Andrade, L. (2013). *Time-domain impedance-based fault location for HVDC transmission lines*, PhD thesis, Univ. do Porto, Portugal.
- Arrilaga, J., Liu, Y. and Watson, N. (2007). *Flexible power transmission - the HVDC options*, John Wiley & Sons, Ltd, England.
- Azizi, S., Sanaye-Pasand, M., Abedini, M. and Hasani, A. (2014). A traveling-wave-based methodology for wide-area fault location in multiterminal dc systems, *IEEE Transactions on Power Delivery* **29**(6): 2552–2560.
- BMTE SPE S.A. (2014). Linha de transmissão CC 800 kV Xingu/Estreito, <http://www.bmte.com.br/wp-content/uploads/2016/06/RIMA.pdf>.
- Costa, F. B. (2014). Fault-induced transient detection based on real-time analysis of the wavelet coefficient energy, *IEEE Transactions on Power Delivery* **29**(1): 140–153.
- Costa, F. B., Souza, B. A. and Brito, N. S. D. (2010). Real-time detection of fault-induced transients in transmission lines, *Electronics Letters* **46**(11): 753–755.
- Hingorani, N. G. (1970). Transient overvoltage on a bipolar HVDC overhead line caused by DC line faults, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* **PAS-89**(4): 592–610.
- IEEE (2005). EMTP reference models for transmission line relay testing, <http://www.pes-psrc.org/kb/published/reports/EMTP%20Ref%20Model-Final.pdf>.
- Kamalapur, G. D., Sheelavant, V. R., Hyderabad, S., Pujar, A., Baksi, S. and Patil, A. (2014). HVDC Transmission in India, *IEEE Potentials* **33**(1): 22–27.
- Kong, F., Hao, Z. and Zhang, B. (2016). A novel traveling-wave-based main protection scheme for ± 800 kV UHVDC bipolar transmission Lines, *IEEE Transactions on Power Delivery* **31**(5): 2159–2168.
- Liu, X., Osman, A. H. and Malik, O. P. (2009). Hybrid traveling wave/boundary protection for monopolar hvdc line, *IEEE Transactions on Power Delivery* **24**(2): 569–578.
- Lopes, F. V., Dantas, K. M., Silva, K. M. and Costa, F. B. (2018). Accurate two-terminal transmission line fault location using traveling waves, *IEEE Transactions on Power Delivery* **33**(2): 873–880.
- Magnago, F. H. and Abur, A. (1998). Fault location using wavelets, *IEEE Transactions on Power Delivery* **13**(4): 1475–1480.
- Nanayakkara, O. M. K. K., Rajapakse, A. D. and 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* **27**(1): 279–288.
- Pike Research (2012). High-voltage direct current Transmission Systems, <https://www.navigantresearch.com/wordpress/wp-content/uploads/2012/06/HVDC-12-Executive-Summary-2.pdf>.
- Powel, C. A. (1964). *Electrical transmission and distribution Reference Book*, USA.
- Szechtman, M., Wess, T. and Thio, C. (1991). A benchmark model for hvdc system studies, *Electra* (135): 54–67.
- Wu, J., Li, H., Wang, G. and Liang, Y. (2017). An improved traveling-wave protection scheme for LCC-HVDC transmission lines, *IEEE Transactions on Power Delivery* **32**(1): 106–116.
- XRTE S.A. (2016). Sistema de transmissão Xingu-Rio, <http://www.comiteguandu.org.br/downloads/ARTIGOS%20E%20OUTROS/EIA-SISTEMA-XINGU-RIO.pdf>.