



Grupo de Estudo de Proteção, Medição, Controle e Automação em Sistemas de Potência-GPC

Localização de Faltas em Linhas de Transmissão em HVDC Baseadas na Teoria de Ondas Viajantes

**PEDRO CAMPOS FERNANDES(1); TIAGO DA ROCHA HONORATO(1); KLEBER MELO E SILVA(1);
FELIPE VIGOLVINO LOPES(1);
Universidade de Brasília - UnB(1);**

RESUMO

Propõe-se no presente artigo uma metodologia *offline* de localização de faltas baseada na teoria de ondas viajantes (OVs) para sistemas de transmissão em corrente contínua (HVDC). Na metodologia proposta, utiliza-se uma ferramenta computacional que permite aplicação de formulações independentes dos parâmetros da linha monitorada (comprimento e velocidade de propagação) e da sincronização dos dados locais e remotos. Os resultados da metodologia proposta em casos de faltas polo-terra e polo-polo simuladas no bipolo do Rio Madeira apresentam precisão de centenas de metros, demonstrando que a solução é promissora para localização de faltas em linhas HVDC, mesmo quando apresentam comprimento muito extenso.

PALAVRAS-CHAVE

HVDC, Ondas Viajantes, Localização de Faltas, Linhas de Transmissão, Transitórios Eletromagnéticos.

1.0 - INTRODUÇÃO

A localização de faltas em linhas de transmissão (LTs) de forma precisa tornou-se requisito importante para a boa operação dos sistemas de transmissão que compõem o Sistema Interligado Nacional (SIN). Tal requisito ganha ainda maior destaque para os sistemas de transmissão em corrente contínua (HVDC), cujas LTs superam 2000 km de extensão, a exemplo dos bipolos do Complexo do Rio Madeira e de Belo Monte. Uma das possibilidades de localização de falta para sistemas HVDC consiste na análise de OVs, resultando em técnicas que se destacam por apresentar precisão da ordem de centenas de metros. Adicionalmente, facilidades são verificadas quando métodos baseados em OVs são aplicados em sistemas HVDC devido às estruturas mais simples das LTs, além do fenômeno de aprisionamento de OVs pelas estações conversoras [1] – [3]. Com isso, evitam-se problemas decorrentes de reflexões em sistemas adjacentes, conforme tipicamente verificado em sistemas CA.

Dentre as técnicas de localização de faltas baseadas em OVs, têm se destacado formulações que fazem uso de dados de dois ou um terminal da LT. A técnica de dois terminais clássica, apesar de ter boa precisão relatada na literatura, depende da sincronização de dados, além de depender de parâmetros de linha [4] – [8]. Por outro lado, a técnica de um terminal, apesar de necessitar apenas de dispositivo localizador em um lado da LT, também depende de parâmetros de linha, além da necessidade de distinção de OVs refletidas pelo terminal remoto ou pelo ponto de falta, o que pode prejudicar a precisão do localizador [8] , [9]. Assim, visando aprimorar o processo de localização de faltas em LTs HVDC diante das limitações de métodos clássicos, propõe-se nesse artigo uma metodologia *offline* de localização de faltas, aplicável tanto para sinais de tensão quanto para sinais de corrente em LTs de sistemas HVDC, de forma independente dos parâmetros da LT e da sincronização de dados. Para tanto, utiliza-se uma ferramenta de análise de OVs disponível no mercado, viabilizando a aplicação da metodologia proposta em sistemas HVDC reais.

2.0 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DA DETECÇÃO DE ONDAS VIAJANTES

Em casos de faltas em LTs, verifica-se o fenômeno de propagação de OVs, o qual está amplamente descrito na literatura [10] – [11]. No momento de ocorrência do distúrbio, OVs propagam-se a partir do ponto de falta na direção dos terminais da LT, refletindo e refratando nesses pontos. Para facilitar a compreensão dos tópicos abordados nesse artigo, apresenta-se na Figura 1 um diagrama de reflexões, no qual ilustra-se a propagação das OVs de modo aéreo e terra partindo de um dado local de falta com distância x em relação ao lado retificador da LT HVDC.

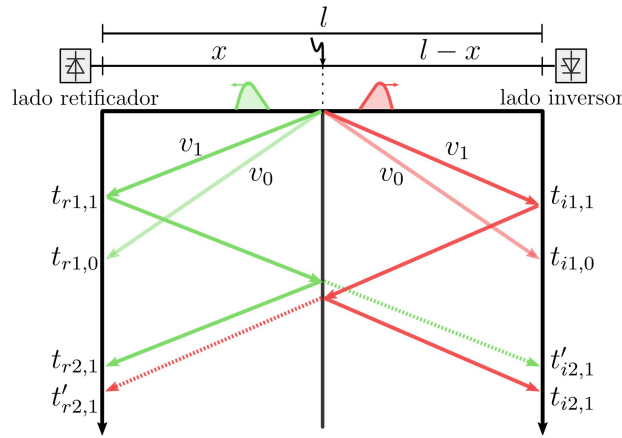


FIGURA 1 – Diagrama de reflexões para formulações de localização de faltas baseadas em OV.

2.1 Transformação Modal

Tipicamente, em sistemas com partes condutoras acopladas, antes de detectar as OV, procede-se com a aplicação da transformação modal, a qual permite decompor o sistema sistema de M fases em M sistemas desacoplados monofásicos denominados de modos [12]. Dessa maneira, a análise das frentes de onda induzidas pela falta que deverão ser detectadas é facilitada.

Analisando especificamente um bipolo HVDC, este pode ser transformado de maneira análoga a um sistema bifásico, pois embora não haja transposição, a disposição dos condutores resulta em matrizes impedância e admitância simétricas. Assim, aplicando a denominada transformação de Karrenbauer via matriz T , é possível desacoplar o bipolo HVDC em dois modos, sendo um aéreo e outro terra [12]:

$$T = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad \text{De modo que:} \quad \begin{cases} V_0 = 1/2 (V_+ + V_-) \\ V_\alpha = 1/2 (V_+ - V_-) \end{cases} \quad (1)$$

2.2 Detecção de Ondas Viajantes

Com o sistema HVDC devidamente desacoplado, agora é necessário detectar o instante exato da chegada das OV nos terminais monitorados da LT para posterior estimação do local de falta. Existem diversas técnicas capazes de extrair OV de sinais de tensão e corrente tais como a transformada wavelet, que é bastante difundida na literatura [6], o filtro *Differentiator-Smoother* (DS) [13], filtros passa-faixa, entre outras técnicas.

Após a filtragem dos sinais e extração de informações das OV, identificam-se os instantes de chegada das frentes de onda. Neste trabalho, adota-se o uso do filtro DS para filtragem dos sinais, de modo que a identificação da incidência das OV consiste basicamente na detecção de picos nas saídas do filtro DS com formato aproximadamente triangular [13]. Essa etapa, quando executada *online*, usa limiares fixos ou até mesmo adaptativos para localizar os picos das OV e pode ainda ser refinada através de técnicas de interpolação do tipo *spline* para melhor estimação dos instantes de incidência das OV de interesse [13].

2.3 Técnicas de Localização de Faltas

2.3.1 Técnica a Dois Terminais

A técnica de localização de faltas de dois terminais clássica baseada em OV usa os instantes $t_{r1,1}$ e $t_{i1,1}$ de incidência das primeiras OV nos terminais local e remoto, respectivamente, conforme ilustrado na Figura 1. Assim, sendo l o comprimento da LT e v_1 a velocidade de propagação de modo aéreo, estima-se o local da falta usando:

$$\tilde{x} = \frac{1}{2} [l + (t_{r1,1} - t_{i1,1})v_1]. \quad (2)$$

2.3.2 Técnica a Um Terminal

A técnica de localização de faltas de um terminal clássica baseada em OV usa os instantes de incidência da primeira OV incidente no terminal local e a segunda OV que pode ser proveniente tanto do terminal remoto quanto da primeira reflexão subsequente no ponto de falta. Assim, com base nos instantes de incidência descritos, estima-se o local da falta usando:

$$\tilde{x} = \frac{1}{2} (t_{r2,1} - t_{r1,1})v_1 \quad \text{ou} \quad \tilde{x} = \frac{1}{2} (t'_{r2,1} - t_{r1,1})v_1 \quad (3)$$

sendo $t_{r2,1}$ o instante de chegada da OV vinda do terminal remoto e $t'_{r2,1}$ o instante de chegada da OV refletida no ponto de falta, conforme ilustrado na Figura 1.

3.0 - METODOLOGIA PROPOSTA

O mercado dispõe de ferramentas computacionais diversas para analisar tensões e correntes provenientes de sistemas de potência. Dentre essas ferramentas destaca-se o *SEL-5601 SynchroWAVE Event Software*, aqui chamado apenas de *SynchroWAVE* [14]. Esse software é capaz de receber registros tipo COMTRADE e aplicar o filtro DS aos sinais de corrente e tensão, permitindo a visualização das OVs de modo aéreo e terra de sistemas trifásicos convencionais. Para tanto, conjuntamente com o filtro DS, o *SynchroWAVE* aplica a transformada de Clarke para desacoplamento do sistema trifásico.

Para que o *SynchroWAVE* consiga extrair OVs análogas aos modos aéreo e terra de um sistema bifásico como o bipolo HVDC analisado neste trabalho, é necessário adaptar as condições de medição de sinais de tensão e corrente para desacoplar o sistema corretamente. Assim, para sistemas trifásicos, quando aplicada a transformada de Clarke, a matriz T' demonstrada a seguir é empregada, gerando as seguintes tensões modais:

$$T' = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \quad \text{resultando em:} \quad \begin{cases} V_0' = 1/3 (V_a + V_b + V_c) \\ V_\alpha' = 1/3 (2V_a - V_b - V_c) \\ V_\beta' = 1/3 (\sqrt{3}V_b - \sqrt{3}V_c) \end{cases} \quad (4)$$

Se os valores das tensões de fase de um sistema trifásico convencional forem $V_a = 0$, $V_b = V_+$ e $V_c = V_-$, sendo V_+ , V_- as tensões do polo positivo e do polo negativo de um bipolo HVDC, respectivamente, as tensões modais na equação (4) são obtidas da seguinte forma:

$$\begin{cases} V_0' = 1/3 (V_+ + V_-) \\ V_\alpha' = 1/3 (-V_+ - V_-) \\ V_\beta' = \sqrt{3}/3 (V_+ - V_-) \end{cases} \quad (5)$$

Percebe-se então que, com as condições iniciais propostas, a transformada de Clarke trifásica é capaz de desacoplar um bipolo HVDC da mesma forma que a transformada de Karrenbauer bifásica, representando os modos aéreo V_α e terra V_0 do bipolo HVDC pelos modos aéreo V_β' e terra V_0' de um sistema trifásico quando considerados os sinais de entrada do *SynchroWAVE* como sendo $V_a = 0$, $V_b = V_+$ e $V_c = V_-$. A única diferença está na magnitude dos modos, que pode ser corrigida através da multiplicação por constantes de correção $\sqrt{3}/2$ e $3/2$ para os modos aéreo e terra respectivamente.

$$\begin{cases} V_0' = 3/2 \cdot 1/3 (V_+ + V_-) = 1/2 (V_+ + V_-) = V_0 \\ V_\alpha' = 3/2 \cdot 1/3 (-V_+ - V_-) = 1/2 (-V_+ - V_-) = -V_0 \\ V_\beta' = \sqrt{3}/2 \cdot \sqrt{3}/3 (V_+ - V_-) = 1/2 (V_+ - V_-) = V_\alpha \end{cases} \quad (6)$$

Tendo em vista a proposta de aproveitamento da transformada de Clarke trifásica disponível no *SynchroWAVE* para emular a transformada bifásica de Karrenbauer, percebe-se que é necessário adequar o registro COMTRADE com as medições de campo para que correntes e tensões obedeçam as condições iniciais propostas. Para ilustrar a questão supracitada, assumo dois pares de registros COMTRADE de um bipolo HVDC com dados de corrente/tensão de cada terminal dos polos negativo e positivo amostrados a 1 MHz, conforme realizado por dispositivos reais disponíveis no mercado que funcionam com base na análise de OVs. A aferição das medidas de forma a obedecer as condições iniciais impostas pode ser feita em campo, utilizando a fase A a vazio e as fases B e C como medições de corrente/tensão dos polos positivo e negativo, respectivamente.

Caso essa alternativa não seja possível, adequa-se o registro COMTRADE conforme as referências dos manuais dos relés SEL-T400L e SEL-T411L, por exemplo, pois eles documentam o padrão necessário para que o registro seja interpretado corretamente pelo *SynchroWAVE* [15], [16].

Uma vez adaptado o registro COMTRADE com as condições pré-estabelecidas, abre-se o arquivo utilizando o *SynchroWAVE*. Internamente, os modos aéreo e terra do bipolo HVDC já estarão representados pelas variáveis *TWV0.zero* para OV de modo terra e *TWVBC.beta* para OV de modo aéreo. Por fim, aplica-se a metodologia de localização de faltas usando as OVs identificadas via *SynchroWAVE*, baseando-se na solução proposta em [17], que é composta por técnicas de localização de faltas independentes de ajustes e sincronização de dados.

O primeiro passo da metodologia consiste na verificação de visibilidade das OVs de modo terra. Para tanto, analisa-se via *SynchroWAVE* se as OVs de modo terra estão visíveis, com amplitude relevante em relação às demais visíveis no registro. Em caso de detecção de modo terra, usam-se as OVs de modo terra e modo aéreo para localização da falta, caso contrário, aplica-se um novo conceito de janela de tempo para OVs de modo aéreo.

3.1 Localização da Falta: Modo Terra Visível

Para faltas envolvendo polo e terra, há propagação visível de OV's modo terra. Então, baseando novamente na Figura 1 com o diagrama de reflexões sucessivas, formula-se um método a dois terminais que localiza a falta, em pu, o qual depende dos instantes de chegada das primeiras OV's de modo aéreo e terra nos terminais da LT [17]:

$$\tilde{x}_{pu} = \frac{(t_{r1,0} - t_{r1,1})}{(t_{r1,0} - t_{r1,1}) + (t_{i1,0} - t_{i1,1})} \quad (7)$$

Para ter a posição estimada da falta, multiplica-se \tilde{x}_{pu} pelo comprimento da LT, caso este seja conhecido.

3.2 Localização da Falta: Modo Terra Não-Visível

Para faltas que não envolvem a terra, ou até mesmo casos em que a visualização do modo terra é ruim, utiliza-se uma formulação alternativa para localização de faltas. Para o caso de sistemas de corrente alternada, faz-se tipicamente uma pré-estimação fasorial para criar uma janela de tempo para localização da OV refletida do ponto de falta e posterior localização da falta, utilizando a formulação abaixo [17]:

$$\tilde{x}_{pu} = \frac{(t_{r2,1} - t_{r1,1})}{(t_{r2,1} - t_{r1,1}) + (t_{i2,1} - t_{i1,1})} \quad (8)$$

Deve-se notar que, para o bipolo HVDC, não é possível pré-estimar a falta de forma fasorial. Porém, é possível aplicar o conceito de criação de uma janela de tempo para identificação da OV refletida do ponto de falta, cuja análise se baseia na avaliação das polaridades das OV's em cada terminal.

Pela característica de falta e terminações do bipolo HVDC, assumindo as terminações da LT como circuitos abertos em ambos os terminais, espera-se que OV's de tensão medidas no terminal local mantenham suas polaridades, oscilando entre valores mais negativos e valores menos negativos, quando refletidas do ponto de falta. Por outro lado, espera-se que OV's de tensão medidas no terminal local invertam suas polaridades quando refletidas do terminal remoto, apresentando polaridade positiva conforme a Figura 2 ilustra. O mesmo comportamento ocorre para OV's de corrente, mas as polaridades das OV's medidas no terminal local refletidas do ponto de falta oscilam entre valores mais positivos e valores menos positivos, e OV's medidas no terminal local refletidas do terminal remoto apresentam polaridade negativa. Em sistemas HVDC, essa inversão de polaridade tanto para OV's de tensão quanto corrente é bem pronunciada.

Considere a Figura 2 representando OV's que chegam nos terminais local e remoto do polo positivo com falta. Pela não proximidade de outras OV's, a localização da OV refletida do ponto de falta não é problema para o terminal local mas, para o terminal remoto, OV's muito próximas dificultam a distinção da OV refletida do ponto de falta.

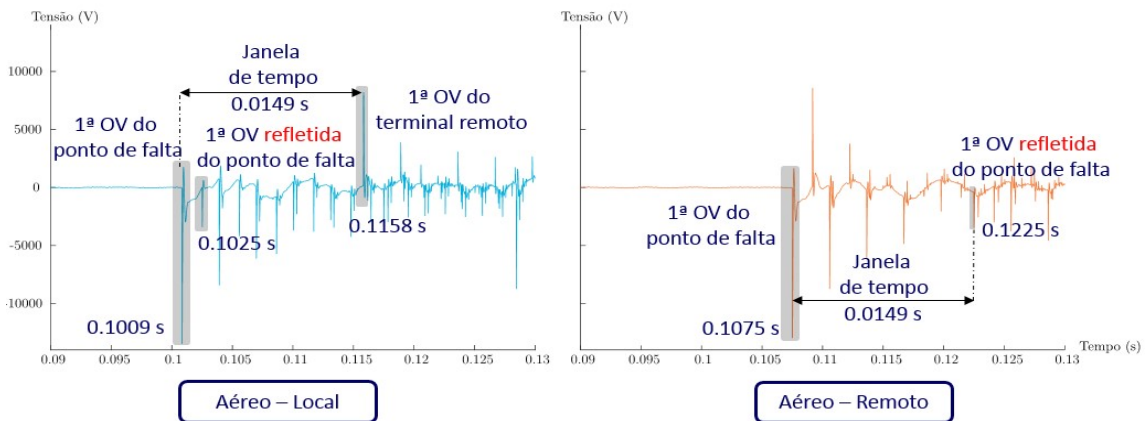


FIGURA 2 – Janela de tempo para localização da OV refletida do ponto de falta.

Para contornar o referido problema, cria-se então uma janela de tempo que parte da primeira OV incidente no terminal local até a primeira OV de polaridade invertida vinda do terminal remoto. Essa janela é então extrapolada para o terminal remoto e a OV mais próxima à janela é tomada como sendo a OV refletida no ponto de falta. Assim, em termos práticos, após adaptar o registro COMTRADE para leitura no *SynchroWAVE*, analisam-se os sinais *TWV0.zero* para OV modo terra e *TWVBC.beta* para OV de modo aéreo da ferramenta computacional. No caso de *TWV0.zero* estar visível, utiliza-se a metodologia de localização de faltas de modo terra visível.

Diferentemente, no caso de *TWV0.zero* não estar visível, a metodologia subdivide-se em duas. Caso a onda de polaridade invertida (refletida do terminal remoto) *TWVBC.beta* esteja visível, utiliza-se a metodologia de modo terra não-visível com auxílio da janela de tempo. Caso contrário, utiliza-se a formulação (8) da metodologia de modo terra não-visível, mas sem auxílio da janela de tempo, pois as OV's refletidas do ponto de falta ficam evidenciadas.

4.0 - BENCHMARK DO BIPOLO HVDC ESTUDADO

O bipolo HVDC usado nesse artigo para avaliar a metodologia proposta para localização de faltas utilizando OV's foi modelado através da ferramenta computacional *Alternative Transients Program (ATP)*. Esse modelo é uma transcrição de um bipolo modelado via PSCAD demandado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) para prover os primeiros estudos técnicos em transmissão em corrente contínua. O esquemático do bipolo HVDC modelado via ATP/ATPdraw está ilustrado na Figura 3.

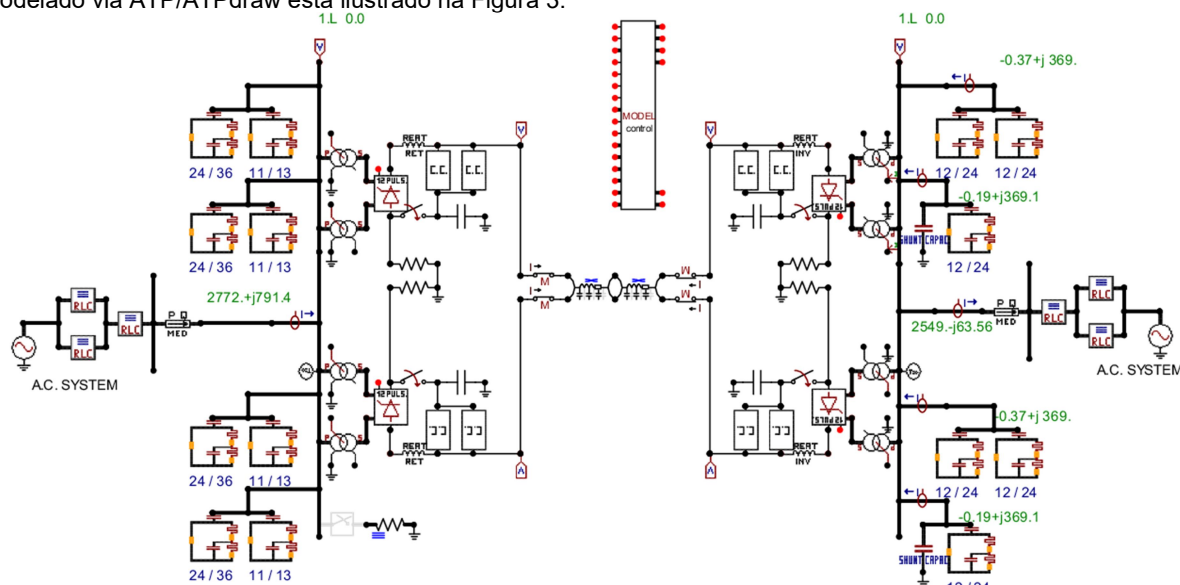


FIGURA 3 – Bipolo HVDC do Rio Madeira modelado via ferramenta computacional ATP/ATPdraw [18].

O bipolo HVDC da Figura 3 representa o bipolo do Rio Madeira (3150 MW cada polo e ± 600 kV) que interliga as subestações Coletora Porto Velho e Araraquara II por uma linha modelada com 2450 km de extensão, com corrente nominal de ± 2625 A. O bipolo HVDC usa um modelo de linha perfeitamente transposto, com parâmetros distribuídos independentes da frequência, os quais se encontram disponíveis em [18].

5.0 - ANÁLISE DE RESULTADOS

Para avaliar o desempenho da metodologia proposta de localização de faltas baseada em OV's, faltas polo-terra e polo-polo em posições e com resistências de falta aleatórias foram avaliadas via ATP/ATPdraw, simulando uma frequência de amostragem de 1 MHz, considerando a análise de sinais de tensão para extração das OV's. A precisão das estimativas é estimada pelo cálculo do erro absoluto em metros da estimativa, considerando o comprimento da linha modelada como 2450 km:

$$e_{abs} = |\tilde{x} - x| \quad (9)$$

sendo \tilde{x} a estimativa do local da falta e x o local real da falta. Os resultados das estimações de local de falta da metodologia proposta estão dispostos na Tabela 1 e serão discutidos com maior profundidade a seguir.

5.1 Falta Polo-Terra: Modo Terra Visível

Para o caso em que OV's de modo terra estão visíveis no registro oscilográfico, basta alinhar os cursores de tempo do *SynchroWAVE* para os tempos de chegada das primeiras OV's de modo aéreo e terra no terminal local e remoto, conforme mostrado na Figura 4 para uma falta a 20% do terminal local com resistência de falta de 1Ω . Com os cursores de tempo corretamente alinhados, aplica-se a equação (7) apresentada na seção 3.1, resultando em uma estimativa de 490,0143 km, cujo erro é de 14,2560 m apenas. Para os diversos cenários de simulação de falta polo-terra apresentados na Tabela 1, percebe-se um desempenho bastante satisfatório para as estimativas de falta, com erros inferiores a 200 m mesmo frente variações relevantes das resistências de falta.

5.2 Falta Polo-Terra: Modo Terra Não-Visível

Para o caso em que OV's de modo terra não estão visíveis no registro oscilográfico, é necessário aplicar janela de tempo abordada na seção 3.2 para localizar a OV de modo aéreo refletida do ponto de falta no terminal remoto. A Figura 5 exemplifica o uso da janela de tempo para estimação do local de falta a 80% do terminal local com resistência de falta de 1Ω . Primeiro, alinham-se os cursores de tempo no terminal local para determinar o intervalo de tempo entre primeira OV vinda do ponto de falta e primeira OV refletida do ponto de falta que, nesse caso, vale 3,329354 ms (3329,354 μ s na Figura 5).



FIGURA 4 – Exemplificação da metodologia de modo terra visível para uma falta polo-terra a 20% do terminal local com resistência de falta de 1Ω . À esquerda, OV do terminal local; à direita, OV do terminal remoto.

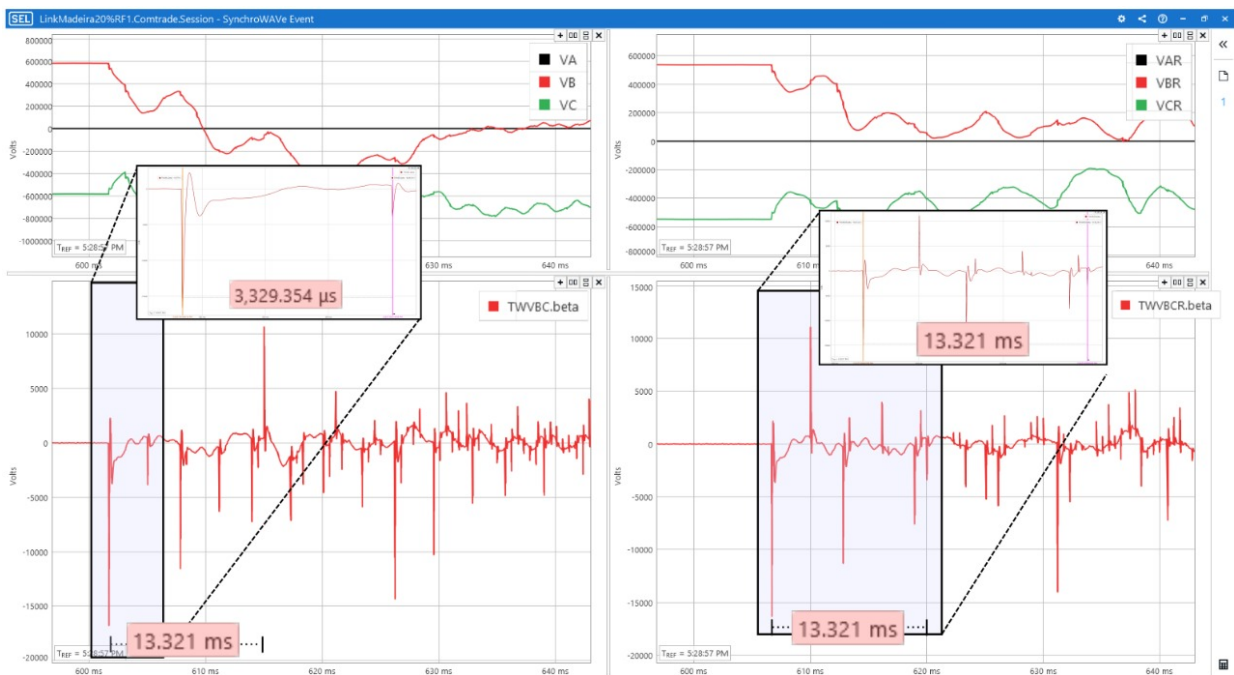


FIGURA 5 – Exemplificação da metodologia de modo terra não-visível para uma falta polo-terra a 80% do terminal local com resistência de falta de 1Ω . À esquerda, OV do terminal local; à direita, OV do terminal remoto.

Na sequência, localiza-se a OV refletida do terminal remoto, cuja polaridade é invertida, e mede-se a janela de tempo que vale 13,321 ms. Com a janela definida, basta somá-la à primeira OV vinda do ponto de falta e alinhar os cursores de tempo no terminal remoto de modo a localizar a OV mais próxima ao final da janela de tempo. O resultado da estimação da Figura 5 através da formulação (8) é 1960,1055 km, resultando em um erro absoluto de 105,4728 m. Para os diversos cenários de simulação de falta polo-terra presentes na Tabela 1, percebe-se um desempenho semelhante ao caso em que o modo terra é visível, preservando erros absolutos inferiores a 400 m mesmo frente fortes variações nas resistências de falta.

5.3 Falta Polo-Polo

Por fim, analisa-se o caso em que uma falta entre polos ocorre no sistema HVDC estudado. A Figura 6 exemplifica uma falta polo-polo em 20% do local remoto com resistência de falta de 1Ω . O perfil dessa falta favorece a extração imediata das OV's vinda do ponto de falta e da OV refletida do ponto de falta pelo alinhamento direto dos cursores de tempo em ambos os terminais da linha, devido à baixa resistência de falta. Sendo assim, para o terminal local, tem-se um intervalo de tempo entre OV's de 3,329311 ms (3329,311 μ s na figura) e, para o terminal remoto, 13,321 ms. Aplicando a formulação (8), o resultado da estimativa do local de falta é 489,8895 km, com erro absoluto na estimativa de 110,5349 m.

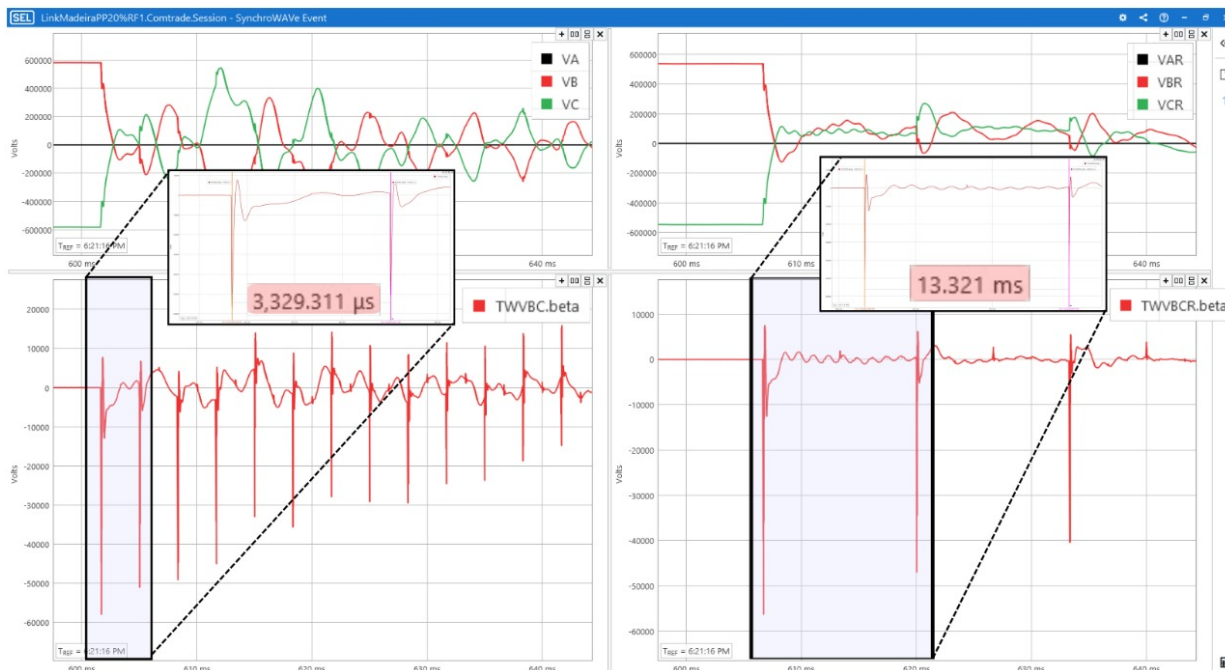


FIGURA 6 – Exemplificação da metodologia de modo terra não-visível para uma falta polo-polo a 20% do terminal local com resistência de falta de 1Ω . À esquerda, OV's do terminal local; à direita, OV's do terminal remoto.

Vale ressaltar que, em casos em que a OV refletida do terminal remoto (polaridade invertida) é visível, há um forte indício de alta resistência de falta. Aconselha-se então o uso da janela de tempo para localização da falta, pois a alta resistência de falta gera um coeficiente de transmissão elevado e permite passagem da OV do terminal remoto com maior amplitude, o que acaba reduzindo bastante as amplitudes das OV's refletidas do ponto de falta.

Analisando os resultados da Tabela 1 para faltas polo-polo, as estimativas de local de falta continuam satisfatórias mesmo frente variações nas resistências de falta. Os resultados de forma geral mantêm-se menores que 250 m, resultado este bastante positivo para uma LT cujo comprimento supera 2400 km. Por fim, ressalta-se ainda que a solução apresentada é passível de aplicação por meio de um software disponível no mercado, o que torna a metodologia atrativa para concessionários durante o processo de localização de faltas em LTs HVDC.

TABELA 1 – Resultados das estimativas de local de falta da metodologia proposta para faltas polo-terra e polo-polo em diversos locais de falta e resistências de falta.

Local de Falta/Resistência de Falta	Polo-Terra: Modo Terra Visível	Erro Absoluto em Metros	Polo-Terra: Modo Terra Não-Visível	Erro Absoluto em Metros	Polo-Polo	Erro Absoluto em Metros
2,85% - $0,001 \Omega$	2,8552%	127,8267	2,8436%	156,9481	2,8406%	231,5168
17,56% - 400Ω	17,5629%	71,3015	17,5523%	187,8012	17,5535%	158,6825
35,20% - 1Ω	35,1956%	107,5651	35,1847%	375,0569	35,1923%	187,8705
40,08% - 800Ω	40,0803%	7,3380	40,0793%	17,3161	40,0800%	0,0268
59,92% - $0,001 \Omega$	59,9198%	4,1225	59,9202%	4,1505	59,9201%	2,1559
64,84% - 400Ω	64,8454%	132,4585	64,8363%	89,4697	64,8478%	191,2444
82,41% - 1Ω	82,4030%	171,4049	82,4124%	58,0769	82,4118%	44,6441
97,15% - 800Ω	97,1453%	115,9357	97,1564%	155,7729	97,1569%	168,5619

6.0 - CONCLUSÃO

O presente artigo apresenta uma metodologia *offline* para localização de faltas usando a teoria de OV's em bipolos HVDC através da ferramenta computacional *SEL-5601 synchroWAVE Event Software*, adaptando sua leitura trifásica padrão para um sistema bifásico. Essa metodologia faz uso de formulações a dois terminais propostas na literatura originalmente para sistemas CA, sendo independentes de parâmetros de linha e da sincronização de dados, características essas que reduzem as fontes de erros no processo de localização de faltas.

Para avaliar o desempenho da metodologia proposta, simularam-se faltas polo-terra e polo-polo através de um sistema computacional do bipolo do Rio Madeira modelado via ATP/ATPDraw, cujos parâmetros de linha e demais informações foram validados pela EPE para viabilizar os estudos pré-operacionais da referida LT.

Com base nos resultados de localização de faltas obtidos, classifica-se o desempenho da metodologia proposta como bastante satisfatória dada a precisão na ordem de 250 m tanto frente às variações de local da falta quanto de resistência de falta, demonstrando boa precisão para localizar faltas em linhas tão extensas como as dos bipolos existentes no SIN. Ademais, a solução foi desenvolvida de modo a viabilizar o uso de um software disponível no mercado, permitindo que a metodologia seja aplicada em sistemas reais sem maiores problemas.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ZHANG, Y., TAI, N. AND XU, B., 2012. Fault analysis and traveling-wave protection scheme for bipolar HVDC lines. *IEEE Transactions em Power Delivery*, 27(3), pp.1583-1591.
- [2] LIU, X., OSMAN, A.H. AND MALIK, O.P., 2009, Julho. Hybrid traveling wave/boundary protection for bipolar HCDC line. Em 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting (pp. 1-8). IEEE.
- [3] LIU, X., OSMAN, A.H. AND MALIK, O.P., 2009. Hybrid traveling wave/boundary protection for monopolar HVDC line. Em *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24(2), pp.569-578.
- [4] LOPES, F.V., SILVA, K., COSTA, F., NEVES, W., FERNANDES, D., 2015. Real-time traveling-wave-based fault location using two-terminal unsynchronized data. Em *IEEE Transactions on Power Delivery*, 30(3), pp.1067-1076.
- [5] GALE, P., CROSSLEY, P., BINGYIN, X., YAOZHONG, G., CORY, B., BARKER, J.R.G., 1993. Fault location based on travelling waves. Em 5th International Conf. on Developments in Power System Protection (pp. 54-59).
- [6] MAGNAGO, F.H. AND ABUR, A., 1998. Fault location using wavelets. Em *IEEE Transactions on Power Delivery*, 13(4), pp.1475-1480.
- [7] SAHA, M.M., IZYKOWSKI, J.J. AND ROSOLOWSKI, E., 2009. Fault location on power networks. Springer Science & Business Media.
- [8] LOPES, F.V., 2016. Settings-free traveling-wave-based earth fault location using unsynchronized two-terminal data. Em *IEEE Transactions on Power Delivery*, 31(5), pp.2296-2298.
- [9] LOPES, F.V., DANTAS, K.M., SILVA, K.M. AND COSTA, F.B., 2018. Accurate two-terminal transmission line fault location using traveling waves. Em *IEEE Transactions on Power Delivery*, 33(2), pp.873-880.
- [10] JÚNIOR, L.C.Z., 2003. Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência Vol. 52. EdUSP.
- [11] NAIDU, S.R., 1985. Transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência. Editora GRAFSET, Campina Grande, Brasil.
- [12] DOMMEL, H.W. AND MEYER, W.S., 1974. Computation of electromagnetic transients. Em *Proceedings of the IEEE*, 62(7), pp.983-993.
- [13] SCHWEITZER, E., GUZMÁN, A., MYNAM, M., SKENDZIC, V., KASZTENNY, B., MARX, S., 2014. Locating faults by the traveling waves they launch. Em 67th Annual Conf. for Protective Relay Engineers (pp. 95-110). IEEE.
- [14] *SynchroWAVE Event Software Instruction Manual*. 2018. Schweitzer Engineering Laboratories.
- [15] *SEL-T400L Instruction Manual*. 2018. Schweitzer Engineering Laboratories.
- [16] *SEL-T411L Instruction Manual*. 2018. Schweitzer Engineering Laboratories.
- [17] LOPES, F.V., LIMA, P., RIBEIRO, J.P.G., HONORATO, T.R., SILVA, K.M., JUNIOR, E.L., NEVES, W.L.A. AND ROCHA, G., 2019. Practical Methodology for Two-Terminal Traveling Wave-Based Fault Location Eliminating the Need for Line Parameters and Time Synchronization. Em *IEEE Transactions on Power Delivery*.
- [18] LUZ, G. S., JUNIOR, D. S. C. AND JUNIOR, S. G., 2014. "Hvdc transmission line modeling analysis in pscad and atp programs," em XIII Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica. Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



PEDRO CAMPOS FERNANDES nasceu em Brasília, 1994. Recebeu o título de B.Sc. no domínio da Engenharia Elétrica pela Universidade de Brasília (UnB) em 2018. Atualmente está cursando M.Sc. no domínio da Engenharia Elétrica pela UnB, além de ser Engenheiro Trainee da Gerência de Estudo de Intervenções na Rede (PRI) pelo ONS. Tem experiência na área de Sistemas Elétricos de Potência, atuando principalmente nos seguintes temas: Localização de Faltas em Sistemas HVDC e Transitórios Eletromagnéticos.



TIAGO DA ROCHA HONORATO nasceu em Brasília, 1992. Recebeu o título de B.Sc. no domínio da Engenharia Elétrica pela Universidade de Brasília (UnB) em 2016. Atualmente está cursando M.Sc. no domínio da Engenharia Elétrica pela UnB. Tem experiência na área de Sistemas Elétricos de Potência, atuando principalmente nos seguintes temas: Proteção de Sistemas Elétricos e Automação de Testes em Relés de Proteção Numéricos.



KLEBER MELO E SILVA nasceu em João Pessoa, 1980. Recebeu os títulos de B.Sc., M.Sc. e D.Sc. no domínio da Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) em 2004, 2005 e 2009, respectivamente. Atualmente é Professor Associado no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília (UnB), editor associado da IEEE Transactions on Power Delivery, membro do Comitê de Estudos B5 (Proteção e Automação) do Cigré e membro do Conselho de Assessoramento Científico (CAC) da FAPDF. Tem experiência na área de Sistemas Elétricos de Potência, atuando principalmente nos seguintes temas: Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, Localização de Faltas e Transitórios Eletromagnéticos.



FELIPE VIGOLVINO LOPES nasceu em Campina Grande, 1985. Recebeu os títulos de B.Sc., M.Sc, D.Sc. e pós-doutor no domínio da Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) em 2009, 2011, 2014 e 2018, respectivamente. É membro do Comitê de Estudos B5 (Proteção e Automação) do Cigré e atualmente é professor do quadro permanente da Universidade de Brasília (UnB), atuando em nível de graduação e pós-graduação. Tem experiência na área de Sistemas Elétricos de Potência, atuando principalmente nos seguintes temas: Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, Localização de Faltas em Sistemas de Distribuição e Transmissão, e Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas Elétricos de Potência.