



GRUPO - GPC

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

LOCALIZAÇÃO DE FALTAS COM CONEXÃO PARA O TERRA BASEADA NA TEORIA DAS ONDAS VIAJANTES: UMA NOVA ABORDAGEM DE DOIS TERMINAIS INDEPENDENTE DE AJUSTES E DA SINCRONIZAÇÃO DE DADOS

Felipe V. Lopes(*)
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA (UnB)

Kleber M. Silva
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA (UnB)

RESUMO

Nos últimos anos, a localização de faltas baseada na teoria das ondas viajantes (OVs) usando dados de dois terminais se consolidou no setor elétrico. Entretanto, sua dependência da sincronização de dados e a necessidade de ajustes são fontes de erro que ainda podem comprometer o processo de localização de faltas. Portanto, apresenta-se neste trabalho um algoritmo de dois terminais baseado na teoria das OVs para localização de faltas com conexão para o terra que é independente de ajustes e da sincronização de dados. Da avaliação do algoritmo proposto, comprova-se que o mesmo é simples, preciso e confiável.

PALAVRAS-CHAVE

Curto-circuitos, dados não-sincronizados, linhas de transmissão, localização de faltas, ondas viajantes.

1.0 - INTRODUÇÃO

As funções empregadas na localização de faltas em sistemas de transmissão têm sido cruciais para as redes elétricas modernas. De fato, após a ocorrência de curtos-circuitos, ao estimar o local do defeito, reduz-se o tempo de busca pelo ponto da linha a ser reparado, acelerando o processo de recomposição do sistema [1].

Na literatura, encontram-se vários métodos de localização de faltas, dentre os quais, por questões de simplicidade e custo, os baseados na análise de fasores fundamentais são os mais utilizados [1]. Porém, com o avanço da tecnologia, o uso de taxas de amostragem elevadas, conversores analógico-digital de alta resolução e de sistemas para sincronização de dados se tornou uma realidade nas redes elétricas modernas, viabilizando procedimentos de localização de faltas mais sofisticados, a exemplo dos fundamentados na teoria das OVs [2],[3].

Em relação aos métodos clássicos de localização de faltas que realizam a análise de OVs, sabe-se que o de um terminal é independente do sincronismo de dados, mas requer como ajuste a velocidade de propagação das OVs, a qual é calculada a partir dos parâmetros da linha monitorada [1]. Além disso, o método depende da detecção de ondas refletidas no ponto de falta, procedimento este tipicamente reportado como de difícil realização [1],[2]. Adicionalmente, embora o método clássico de dois terminais requeira apenas a detecção das primeiras ondas incidentes nos terminais da linha, esta abordagem depende da sincronização de dados e de dois ajustes, a saber: velocidade de propagação das OVs e comprimento da linha [1]. Em versões do algoritmo clássico de dois terminais que calculam a localização da falta em termos percentuais do comprimento dos condutores, ainda assim necessita-se de um ajuste: o tempo de trânsito da linha [3], o qual pode ser medido durante o comissionamento do sistema de localização de faltas ou calculado a partir do comprimento da linha e da velocidade de propagação das OVs.

Motivados pelos problemas supracitados, apresenta-se neste trabalho um algoritmo de dois terminais para localização de faltas com conexão para o terra, tipo este que figura como um dos mais comuns em sistemas de transmissão [1]. O novo algoritmo, avaliado preliminarmente em [4], não requer ajustes, não depende da sincronização de dados e realiza apenas a detecção de OVs incidentes dos modos aéreo e terra.

(*) Campus Universitário Darcy Ribeiro, Bloco SG-11, Laboratório LAPSE – CEP 70.910-900 Brasília, DF, Brasil
Tel: (+55 61) 3107-1039 – Email: felipevlopes@unb.br

Para avaliar o algoritmo proposto, em uma primeira etapa, simulações de faltas em um sistema de 500 kV/60 Hz foram realizadas no *Alternative Transients Program* (ATP). Usando os registros simulados, foram comparados os desempenhos do algoritmo proposto e de outras técnicas de um e dois terminais baseadas na teoria de OV's reportadas na literatura, considerando a influência de imprecisões nos parâmetros elétricos da linha, bem como no sincronismo de dados. Por fim, em uma segunda etapa, casos reais reportados na literatura de faltas ocorridas em linhas de transmissão da China foram avaliados. Dos resultados obtidos, atesta-se que a o algoritmo proposto é confiável e preciso, bem como vantajoso nos quesitos simplicidade e robustez.

2.0 - BREVE REVISÃO DE MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS BASEADOS NA TEORIA DAS OV's

Com o intuito de facilitar o entendimento das vantagens do algoritmo proposto que será apresentado posteriormente, uma breve revisão de técnicas de localização de faltas baseadas na teoria das OV's é apresentada nesta seção. Para tanto, utiliza-se o diagrama de reflexões ilustrado na Figura 1, onde L é o comprimento da linha, d é a distância da falta em relação à Barra L, v é a velocidade de propagação das OV's, t_L e t_R são os instantes em que as primeiras OV's incidentes atingem as barras L e R, respectivamente, t_{Lr} e t_{Rr} são os instantes em que as OV's refletidas no ponto de falta incidem nas barras L e R, respectivamente, t_{Lt} e t_{Rt} são os instantes nos quais as frentes de onda refratadas no ponto de falta atingem as barras L e R, respectivamente, e t_{Ladj} e t_{Radj} são os instantes em que as OV's refletidas em barras adjacentes atingem os terminais L e R da linha monitorada, respectivamente.

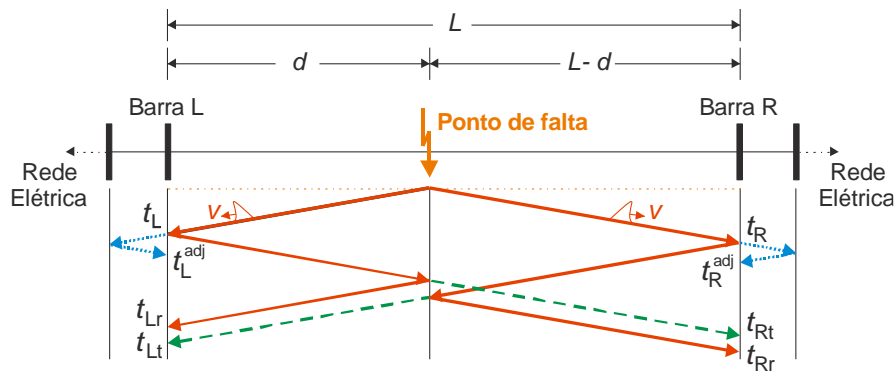


FIGURA 1 – Diagrama de reflexões para uma linha monitorada em dois terminais com barras adjacentes.

Adotando a Barra L como referência, a distância d é calculada pelo algoritmo clássico de um terminal usando [1]:

$$d_{1class} = \frac{(t_{Lr} - t_L)v}{2}. \quad (1)$$

Adicionalmente, assumindo que as medições tomadas dos terminais local e remoto se encontram sincronizadas, a localização da falta pode ser também estimada pelo método clássico de dois terminais usando [1]:

$$d_{2class} = \frac{L - (t_R - t_L)v}{2}. \quad (2)$$

Avaliando (1) e (2), percebe-se que os métodos clássicos de um e dois terminais apresentam diferentes vantagens e desvantagens. Por exemplo, (1) não requer a sincronização de dados e nem o conhecimento do comprimento da linha L , mas depende da detecção de OV's refletidas no ponto de falta, procedimento este que tem sido reportado por décadas como de difícil realização [1],[2]. De fato, o instante t_{Lr} pode ser facilmente confundido com os instantes t_{Ladj} e t_{Lt} relacionados com a incidência de OV's refletidas em barras adjacentes e refratadas no ponto de falta, respectivamente. O mesmo problema pode ser verificado ao assumir o terminal R como referência, visto que o instante t_{Rr} pode ser facilmente confundido com os instantes t_{Radj} e t_{Rt} . Por outro lado, (2) não depende da detecção de ondas refletidas, mas requer a sincronização de dados, característica esta que limita a aplicação de tal formulação em sistemas desprovidos de uma referência de tempo comum. Além disso, ambas as formulações usam como ajuste a velocidade de propagação das OV's, a qual é tradicionalmente calculada usando $v = 1/\sqrt{lc}$, sendo l e c a indutância e capacitância por unidade de comprimento de sequência positiva da linha, respectivamente. Dessa forma, pode-se concluir que (1) e (2) dependem dos parâmetros da linha de transmissão monitorada, os quais, por sua vez, podem apresentar imprecisões [1].

Na literatura, têm sido reportadas soluções alternativas para: (i) eliminação da velocidade de propagação das OV's das formulações empregadas na localização de faltas; (ii) eliminação da necessidade de uma referência de tempo comum quando utilizadas medições de mais de um terminal. Em [5], o método clássico de dois terminais é adaptado para aplicações em tempo real, eliminando a necessidade do uso do *Global Positioning System* (GPS) para sincronização de dados. Porém, nesta aplicação, a velocidade de propagação ainda é utilizada como ajuste. Em [6], propõe-se uma formulação para localização de faltas que não depende da velocidade de propagação das OV's. Entretanto, no algoritmo, a detecção de OV's refletidas e a sincronização de dados são necessárias.

Em [7], apresenta-se um método de um terminal para localização de faltas com conexão para o terra. Basicamente, nesta abordagem, parte-se do pressuposto que durante faltas com conexão para o terra existirão OV's dos modos aéreo e terra se propagando com diferentes velocidades, conforme ilustrado no diagrama de reflexões apresentado na Figura 2, onde t_{L0} , t_{L1} , t_{R0} e t_{R1} são os instantes de incidência das OV's dos modos aéreo e terra nas barras local e remota (barras L e R, respectivamente), e v_1 e v_0 são as velocidades de propagação das OV's dos modos aéreo e terra, respectivamente.

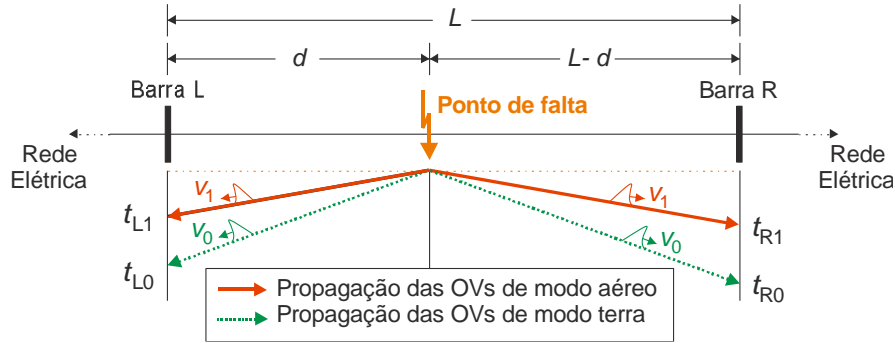


FIGURA 2 – Diagrama de reflexões para uma falta com conexão para o terra.

Sabendo que $v_1 > v_0$ [7], as OV's dos modos aéreo e terra incidem nos terminais monitorados em instantes diferentes. Assim, a detecção das OV's de modo terra pode substituir a detecção de ondas refletidas no ponto de falta requerida pelo método clássico de um terminal, facilitando o processo de localização de faltas com conexão para o terra. Portanto, tomando a Barra L como referência e assumindo que as frentes de onda dos modos aéreo e terra são detectadas corretamente, propõe-se em [7] que a distância d seja calculada usando:

$$d_{1terra} = \frac{(t_{L0} - t_{L1})v_0v_1}{v_1 - v_0}. \quad (3)$$

Avaliando a aplicação de (3) em um procedimento de localização de faltas, percebe-se que a equação não depende da sincronização de dados e nem do conhecimento do comprimento da linha L , o que já é vantajoso do ponto de vista prático. No entanto, verifica-se que (3) depende das velocidades de propagação dos modos aéreo e terra, as quais são tradicionalmente calculadas usando $v_1 = 1/\sqrt{l_1c_1}$ e $v_0 = 1/\sqrt{l_0c_0}$, respectivamente, sendo l_1 e c_1 a indutância e capacitância por unidade de comprimento de sequência positiva da linha, respectivamente, e l_0 e c_0 a indutância e capacitância por unidade de comprimento de sequência zero da linha, respectivamente. Dessa forma, pode-se concluir que (3) também depende dos parâmetros da linha de transmissão monitorada, assim como (1) e (2), o que torna o algoritmo reportado em [7] susceptível a erros em situações nas quais os parâmetros elétricos da linha não são precisos [1].

3.0 - ALGORITMO PROPOSTO

Assim como o método reportado em [7], o algoritmo proposto é desenvolvido partindo do pressuposto que, na ocorrência de uma falta com conexão para o terra, existirão OV's dos modos aéreo e terra se propagando na linha de transmissão monitorada com diferentes velocidades de propagação. Basicamente, a motivação para o desenvolvimento do algoritmo proposto consistiu no interesse de se obter uma formulação matemática baseada na teoria das OV's que não dependa da sincronização de dados e nem dos parâmetros da linha monitorada.

A equação (3) apresentada anteriormente representa uma forma alternativa para cálculo da distância d em relação à Barra L. A estratégia utilizada no algoritmo proposto se baseia na utilização de informações provenientes também da Barra R, para fins de eliminação das velocidades de propagação do novo equacionamento. Assim, adotando a Barra R como referência e assumindo que os instantes de incidência das OV's dos modos aéreo e terra são identificados corretamente, (3) pode ser adaptada para calcular a distância $L-d$, resultando em:

$$L - d = \frac{(t_{R0} - t_{R1})v_0v_1}{v_1 - v_0}. \quad (4)$$

Avaliando (3) e (4), percebe-se que a soma de ambas expressões resulta em uma equação para cálculo do comprimento L da linha monitorada em função das velocidades de propagação dos modos aéreo e terra e dos instantes t_{L0} , t_{L1} , t_{R0} e t_{R1} , conforme demonstrado a seguir:

$$\tilde{L} = d + (L - d) = \frac{[(t_{L0} - t_{L1}) + (t_{R0} - t_{R1})]v_0v_1}{v_1 - v_0}, \quad (5)$$

onde \tilde{L} é o comprimento da linha estimado.

Portanto, sabendo que a distância d da falta em relação à Barra L pode ser calculada em 'pu' usando $d_{prop(pu)} = d/\tilde{L}$, a formulação proposta para localização de faltas é obtida dividindo (3) por (5), resultando em:

$$d_{prop(pu)} = \frac{(t_{L0} - t_{L1})}{(t_{L0} - t_{L1}) + (t_{R0} - t_{R1})}. \quad (6)$$

Ao analisar (6), percebe-se que: (i) a detecção de ondas refletidas não é necessária, o que torna a aplicação do algoritmo proposto simples, aumentando sua confiabilidade e robustez; (ii) uma vez que os instantes de incidência das frentes de onda nos terminais local e remoto não são relacionados entre si, elimina-se a necessidade de uma referência de tempo comum, ou seja, a sincronização de dados não é necessária; (iii) as velocidades de propagação das OV's e o comprimento da linha não são variáveis de entrada do algoritmo, tornando a formulação proposta independente de ajustes, bem como imune a incertezas nos parâmetros da linha. Cabe ressaltar que em situações nas quais a localização da falta dada em quilômetros venha a ser necessária, o comprimento L da linha passaria a ser o único ajuste utilizado no algoritmo, sendo utilizada a expressão $d_{prop(km)} = d_{prop(pu)}L$. Nessas situações, o comprimento L pode ser estimado com boa precisão durante o comissionamento do sistema localizador de faltas, a partir de procedimentos de energização da linha monitorada, conforme reportado em [8].

Além das vantagens supracitadas, é importante frisar que, por não depender da detecção de ondas refletidas, o algoritmo proposto também é independente da configuração do sistema em torno da linha monitorada. De fato, para a aplicação de (6), não importam os valores assumidos pelos coeficientes de reflexão e refração nos terminais da linha, o que torna o algoritmo proposto generalista em termos de topologia do sistema monitorado.

4.0 - AVALIAÇÃO DO ALGORITMO PROPOSTO

Para avaliar o algoritmo proposto, registros oscilográficos reais e simulados foram considerados. Em ambos os casos, a frequência de amostragem utilizada/simulada foi de 1 MHz. Como o objetivo do presente trabalho não é avaliar técnicas de detecção de transitórios, mas sim, demonstrar as potencialidades da formulação proposta para localização de faltas, os transformadores para instrumentos foram intencionalmente modelados como ideais, evitando a influência destes no processo de detecção dos instantes de incidência das OV's de interesse.

No algoritmo proposto, apenas OV's de corrente dos modos aéreo e terra obtidas por meio da transformada modal de Karrenbauer são analisadas [9]. De fato, o uso de sinais de corrente em aplicações baseadas na teoria das OV's tem predominado nos sistemas que operam em regime de corrente alternada, visto que os transformadores de corrente (TCs) possuem respostas em frequência reconhecidamente melhores do que as dos transformadores de potencial capacitivos (TPCs), os quais são tipicamente empregados na medição de tensões em sistemas com tensão nominal acima de 138 kV [1]. Para extrair as altas frequências dos sinais de corrente monitorados, utilizou-se o filtro *differentiator-smoother* reportado em [2],[3], o qual tem sido empregado com sucesso em aplicações reais de proteção e localização de faltas baseadas na teoria das OV's. Novamente, ressalta-se que o objetivo desse trabalho não é avaliar técnicas de detecção de OV's, de modo que outras abordagens disponíveis na literatura poderiam ter sido empregadas na detecção das frentes de onda de interesse, a exemplo das baseadas na transformada *wavelet* discreta [10] e na transformada de Park [11].

4.1 Avaliação de Registros Simulados

No total, 306 registros oscilográficos foram gerados por meio da simulação de faltas com conexão para o terra usando o ATP. Para tanto, foram aplicadas faltas francas dos tipos AT e ABT no sistema de 500 kV/60 Hz ilustrado na Figura 3, cujos parâmetros foram tomados de um sistema real Brasileiro. Deve-se destacar que quatro linhas adjacentes com diferentes comprimentos foram incluídas para tornar as simulações mais adversas no que diz respeito à influência de OV's refletidas em outros pontos do sistema diferentes dos terminais da linha monitorada.

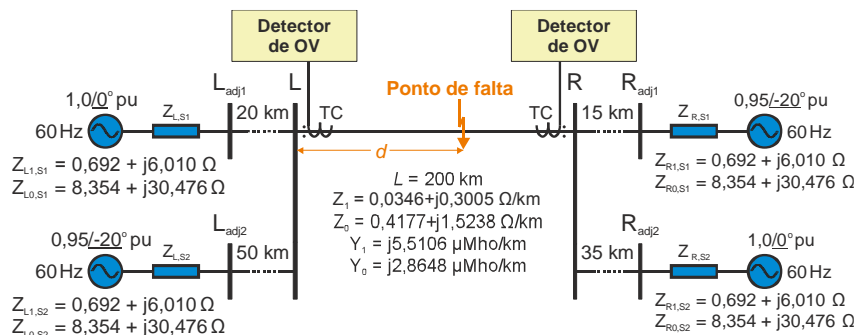


FIGURA 3 – Sistema elétrico de potência modelado para geração de registros oscilográficos simulados.

Para tornar as simulações mais realísticas, foram modelados filtros anti-aliasing de segunda ordem do tipo Butterworth com frequência de corte em 400 kHz, ou seja, menor que a metade da frequência de amostragem adotada de 1 MHz, conforme previsto no teorema de Nyquist [9].

A distância das faltas simuladas em relação à Barra L foi variada de 10% a 90% do comprimento da linha, com passos de 5%. Em todos os casos, foram simulados curtos-circuitos iniciando no pico da tensão no ponto de falta, situação esta considerada comum em sistemas de transmissão [1]. Nas simulações realizadas, considerou-se que o comprimento da linha é conhecido sem erros, viabilizando o cálculo das estimativas da distância de falta em quilômetros. Assim, em cada cenário avaliado, as estimativas obtidas usando o método clássico de dois terminais (d_{2class}), o método alternativo de um terminal para faltas com conexão para o terra (d_{1terra}) e o algoritmo proposto (d_{prop}) são avaliados.

Ao assumir que os parâmetros de sequência positiva e zero da linha são conhecidos sem erros e que os dispositivos localizadores de faltas nos terminais local e remoto estão perfeitamente sincronizados, todos os algoritmos avaliados demonstraram ser precisos, resultando em erros absolutos nas localizações estimadas que não excederam a ordem de 40 m. Assim, com o objetivo de comparar o desempenho dos algoritmos em situações mais adversas, foram considerados quatro cenários:

- Cenário 1) erros de $\pm 10\%$ apenas nos parâmetros de sequência positiva da linha em relação aos valores reais e dados sincronizados;
- Cenário 2) erros de $\pm 10\%$ apenas nos parâmetros de sequência zero da linha em relação aos valores reais e dados sincronizados;
- Cenário 3) erros de sincronismo entre as medições local e remota de $\pm 100 \mu s$ e parâmetros de sequência positiva e zero da linha conhecidos sem erros;
- Cenário 4) Erros de $\pm 10\%$ nos parâmetros de sequência positiva e zero da linha em relação aos valores reais e erros de sincronismo entre as medições local e remota de $\pm 100 \mu s$.

Os resultados obtidos para os quatro cenários supracitados são apresentados na Figura 4 em forma de diagramas de dispersão, nos quais os erros absolutos das estimativas d_{2class} e d_{1terra} (representados no eixo X dos gráficos) são relacionados com os erros absolutos verificados na estimativa d_{prop} (representados no eixo Y dos gráficos). Com o objetivo de facilitar a identificação dos casos nos quais o algoritmo proposto apresentou desempenho melhor do que as duas outras abordagens avaliadas, os diagramas de dispersão foram divididos em duas partes, sendo a região azul inferior à direita relacionada aos casos em que d_{prop} apresentou uma melhor precisão (erros menores) e a região branca superior à esquerda relacionada aos casos em que d_{prop} apresentou uma pior precisão (erros maiores).

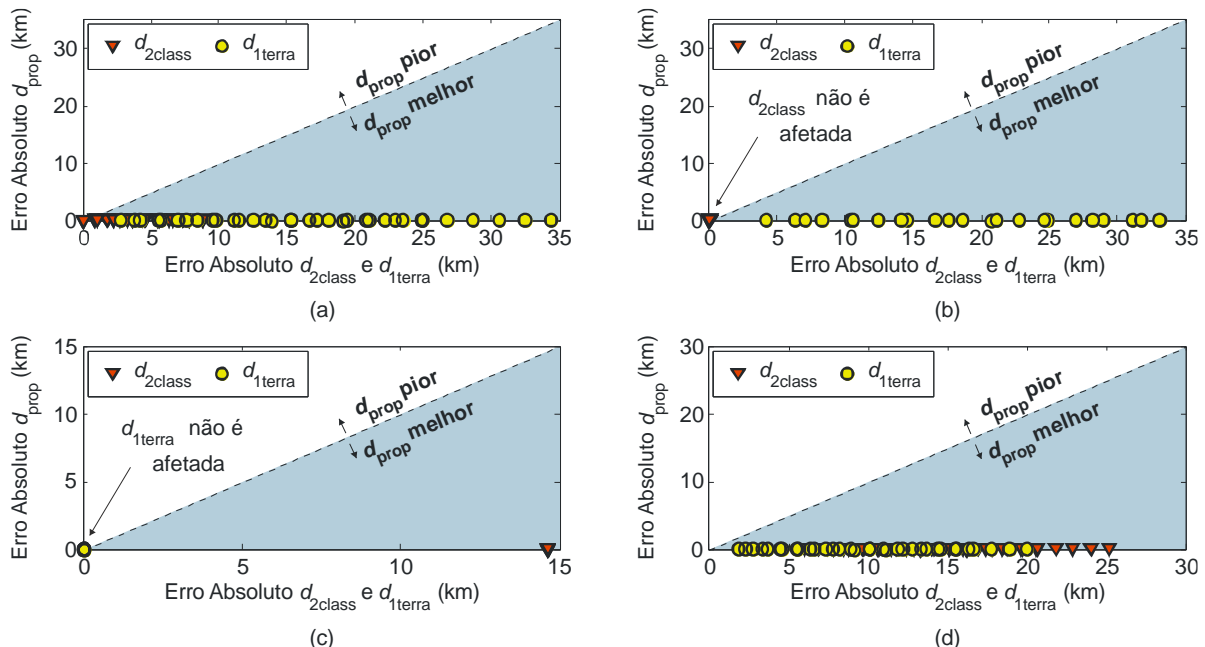


FIGURA 4 – Diagramas de dispersão dos erros absolutos das estimativas d_{2class} e d_{1terra} em relação à estimativa d_{prop} , considerando: (a) Cenário 1: Erros nos parâmetros de sequência positiva de $\pm 10\%$ em relação aos valores reais; (b) Cenário 2: Erros nos parâmetros de sequência zero de $\pm 10\%$ em relação aos valores reais; (c) Cenário 3: Erros de sincronização das medições nos dois terminais da linha igual a $\pm 100 \mu s$; (d) Cenário 4: Erros nos parâmetros de sequência positiva e zero de $\pm 10\%$ em relação aos valores reais e erros de sincronização das medições nos dois terminais da linha igual a $\pm 100 \mu s$.

Analisando a Figura 4(a), nota-se que erros nos parâmetros de sequência positiva da linha monitorada comprometem completamente as estimativas d_{2class} e d_{1terra} . De fato, ambas estimativas dependem da velocidade de propagação das OV's do modo aéreo, a qual, por sua vez, é calculada usando os parâmetros de sequência positiva da linha. Neste cenário, os erros em d_{prop} não excederam a ordem de 40 m, enquanto que d_{2class} e d_{1terra} apresentaram erros da ordem de 10 km e 35 km, respectivamente.

Ao avaliar a Figura 4(b), percebe-se que erros nos parâmetros de sequência zero da linha não afetam a estimativa d_{2class} . Tal comportamento já era esperado, visto que d_{2class} não depende da velocidade de propagação das OV's do modo terra. Porém, neste cenário, d_{1terra} divergiu, apresentando erros da ordem de 33 km. Adicionalmente, a estimativa d_{prop} apresentou precisão semelhante à de d_{2class} , sendo, portanto, mais precisa que d_{1terra} .

Da análise da Figura 4(c), observa-se que a estimativa d_{1terra} não é afetada, pois não depende da sincronização de dados. No entanto, d_{2class} diverge, conforme esperado, apresentando erros da ordem de 15 km. Como consequência, neste cenário, d_{prop} e d_{1terra} apresentaram precisão semelhante ao caso ideal (erros menores que 40 m), sendo ambas estimativas mais precisas do que d_{2class} .

Por fim, avaliando a Figura 4(d) referente ao cenário 4, nota-se que todos os pontos do diagrama de dispersão recaíram na região azul, demonstrando que o algoritmo proposto foi mais preciso do que o método clássico de dois terminais e o método alternativo de um terminal avaliado. Da figura, percebe-se que, assim como nos cenários anteriores, os erros em d_{prop} não excederam a ordem de 40 m, enquanto que d_{2class} e d_{1terra} apresentaram erros absolutos da ordem de 20 km e 25 km, respectivamente.

4.2 Avaliação de Registros Reais

Para avaliar o algoritmo proposto em uma situação real, analisam-se nesta subseção dois registros oscilográficos reais reportados em [12], provenientes de localizadores de faltas baseados na teoria das OV's instalados em uma linha de 220 kV/50 Hz, 93,11 km de extensão, que se encontra em operação na China. Os referidos dispositivos usam uma frequência de amostragem de 1 MHz e os registros salvos contêm apenas as versões filtradas dos sinais de corrente obtidas por meio de um banco de filtros passa-altas. Os dois registros avaliados foram disponibilizados pelos autores de [12], os quais trabalham em parceria com os autores do presente trabalho.

Na Figura 5, apresentam-se os registros oscilográficos decorrentes de uma falta ABT, cuja distância em relação ao terminal de referência (terminal local) foi de 18,82 km, segundo o relatório das equipes de manutenção da linha.

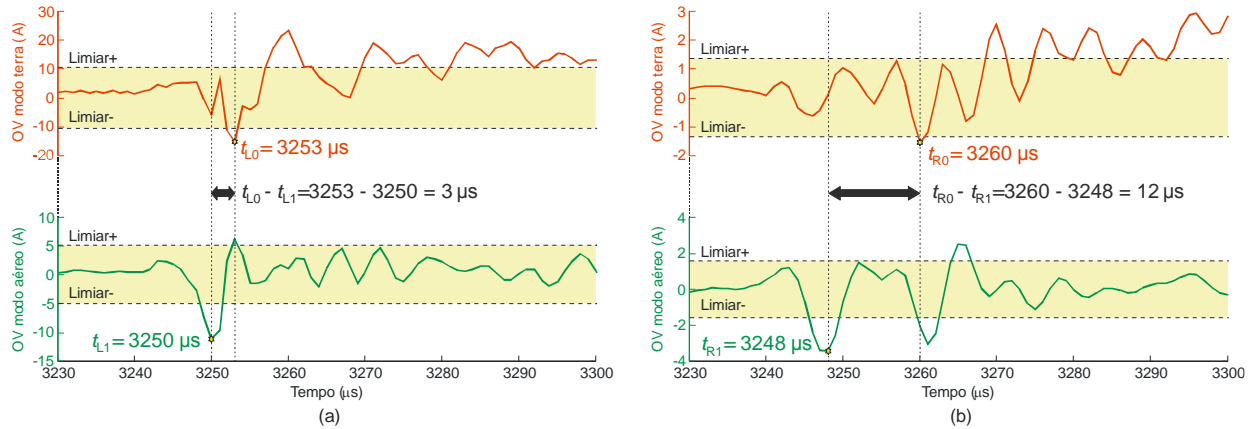


FIGURA 5 – Registro oscilográfico da falta ABT localizada a 18,82 km do terminal de referência: (a) Componentes modais no terminal local; (b) Componentes modais no terminal remoto.

Conforme ilustrado na Figura 5, foram considerados limiares fixos para detecção dos instantes t_{L0} , t_{L1} , t_{R0} e t_{R1} . Esses limiares foram ajustados como sendo um percentual do valor máximo assumido pelos sinais filtrados (neste trabalho 45% do valor máximo dos sinais modais filtrados), conforme proposto em [13]. Na figura, os instantes de detecção das OV's de interesse são indicados, resultando na seguinte localização estimada:

$$d_{prop(km)} = d_{prop(pu)}L = \frac{(t_{L0} - t_{L1})}{(t_{L0} - t_{L1}) + (t_{R0} - t_{R1})}L = \frac{3 \mu}{3 \mu + 12 \mu}93,11 = 18,62 \text{ km} . \quad (7)$$

A partir da localização estimada d_{prop} , o erro absoluto ϵ_{abs} pode ser calculado usando: $\epsilon_{abs} = |d_{real} - d_{prop}|$, onde d_{real} é a localização real da falta. Portanto, sendo $d_{real} = 18,82$ km, no caso avaliado, $\epsilon_{abs} = |18,82 - 18,62| = 200$ m, ou seja, um erro menor do que um vão de linha típico (≈ 300 m [14]), comprovando a precisão do algoritmo proposto.

Na Figura 6, apresentam-se os registros oscilográficos decorrentes da outra falta ABT avaliada, cuja distância em relação ao terminal de referência (terminal local) reportada pelas equipes de manutenção foi de 51,31 km. Novamente, limiares fixos foram empregados para detecção dos instantes t_{L0} , t_{L1} , t_{R0} e t_{R1} , cujos ajustes foram os mesmos empregados no caso anterior.

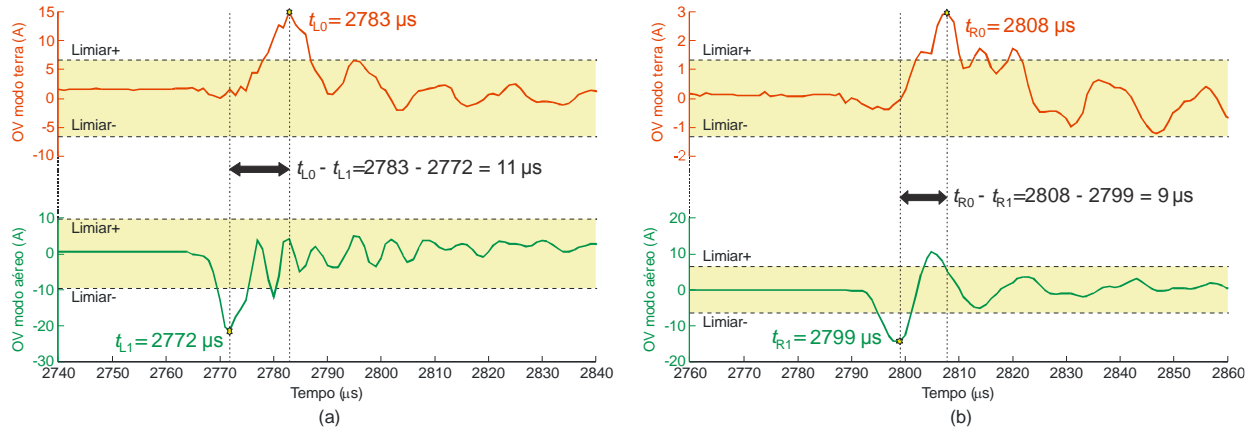


FIGURA 6 – Registro oscilográfico da falta ABT localizada a 51,31 km do terminal de referência: (a) Componentes modais no terminal local; (b) Componentes modais no terminal remoto.

Considerando os instantes de detecção das OV's de interesse indicados na Figura 6, a localização estimada é calculada usando:

$$d_{prop(km)} = d_{prop(pu)}L = \frac{(t_{L0} - t_{L1})}{(t_{L0} - t_{L1}) + (t_{R0} - t_{R1})}L = \frac{11 \mu}{11 \mu + 9 \mu}93,11 = 51,21 \text{ km} . \quad (8)$$

Para este segundo caso, sendo $d_{real} = 51,31 \text{ km}$ e $d_{prop} = 51,21 \text{ km}$, o erro absoluto da localização estimada é dado por $\epsilon_{abs} = |51,31 - 51,21| = 100 \text{ m}$. Assim como no caso anterior, o erro absoluto verificado foi menor do que um vão de linha típico ($\approx 300 \text{ m}$ [14]), atestando novamente a precisão do algoritmo proposto.

4.3 Comentários Adicionais

Avaliando os resultados obtidos, conclui-se que o algoritmo proposto é preciso, simples e confiável. De fato, da análise dos registros simulados, constatou-se que o algoritmo proposto é vantajoso em situações nas quais existem incertezas nos parâmetros da linha e quando os dispositivos localizadores nos terminais local e remoto não estão sincronizados. No total, 306 simulações foram avaliadas e em todas o algoritmo proposto resultou em um desempenho igual ou melhor do que o da abordagem clássica de dois terminais e do método alternativo de um terminal reportado em [7]. Da mesma forma, ao avaliar registros oscilográficos reais, erros absolutos da ordem de apenas 200 m foram verificados, comprovando a eficiência do algoritmo proposto. Entretanto, faz-se oportuno comentar alguns aspectos relacionados à implementação do algoritmo que garantirão o seu bom desempenho:

- Assim como os demais algoritmos de localização baseados na teoria das OV's, elevadas frequências de amostragem devem ser empregadas. Atualmente, dispositivos que operam com frequências de amostragem da ordem de 1 a 5 MHz já são encontrados no mercado [3],[15], taxas estas que são consideradas suficientes para a aplicação do método proposto;
- Deve-se atentar para a definição dos limiares utilizados na detecção dos instantes t_{L0} , t_{L1} , t_{R0} e t_{R1} . Estes limiares devem ser refinados o suficiente para distinguir ruídos elétricos e transitórios de pré-falta dos transitórios induzidos no instante de incidência do curto-circuito. Embora os registros simulados reproduzam situações de curto-circuito com um bom nível de fidelidade, a problemática supracitada é mais evidente em registros reais. Assim, embora neste trabalho uma abordagem simplificada para cálculo de limiares fixos tenha sido empregada, indica-se o uso de técnicas auto-adaptativas que viabilizem uma detecção precisa das OV's, sem requerer ajustes, a exemplo dos métodos reportados em [10] e [11].
- Conforme mencionado anteriormente, para calcular as estimativas da distância da falta em quilômetros, o comprimento da linha passa a ser um ajuste necessário para o algoritmo proposto. Neste caso, indica-se o cálculo do comprimento L durante o comissionamento do esquema de localização de faltas ao invés do uso de valores disponíveis na documentação das linhas de transmissão. Assim, ao estimar o comprimento da linha, os comprimentos dos condutores que interligam os TCs até os dispositivos localizadores também são incluídos no cálculo, tornando as localizações estimadas do ponto de falta mais precisas [8];
- Uma vantagem do algoritmo proposto é a possibilidade deste ser aplicado *off-line*, ou seja, sem requerer a transmissão de dados de um terminal para o outro durante o curto-circuito. Ainda assim, destaca-se que sua implementação em tempo real seria simples, bastando transmitir via canal de comunicação do terminal remoto para o local o período $t_{R0} - t_{R1}$. Nesta aplicação, a compensação da latência do canal de comunicação não é necessária, o que simplifica sobremaneira o uso do algoritmo proposto.

5.0 - CONCLUSÃO

Neste trabalho, apresentou-se um algoritmo de dois terminais baseado na teoria das OV's para localização de faltas com conexão para o terra. Como vantagens do algoritmo proposto em relação a outras abordagens reportadas na literatura, destacam-se: (i) a detecção de ondas refletidas no ponto de falta não é necessário, o que torna o algoritmo imune à presença de linhas curtas adjacentes à linha monitorada; (ii) o algoritmo requer a análise de medições em cada terminal da linha monitorada separadamente, sendo, portanto, independente da sincronização de dados; (iii) a formulação proposta para localização de faltas não utiliza a velocidade de propagação das OV's como uma variável de entrada, de modo que o algoritmo não requer ajustes.

Para avaliar o desempenho do algoritmo proposto, 306 simulações computacionais de faltas em um sistema elétrico de potência de 500 kV/60 Hz foram avaliadas. Em todos os casos, a abordagem apresentada resultou em um desempenho similar ou melhor do que o da técnica clássica de dois terminais e de um método alternativo de um terminal que não requer a detecção de ondas refletidas no ponto de falta. Além disso, para validar o algoritmo proposto, foram também avaliados dois registros oscilográficos reais provenientes de dispositivos localizadores de faltas instalados em uma linha de 220 kV/50 Hz em operação na China. Em ambos os casos, o erro absoluto não excedeu 200 m, comprovando a precisão da formulação proposta para localização de faltas. Portanto, conclui-se que o algoritmo proposto é útil para as concessionárias de energia elétrica, visto que faltas com conexão para o terra são as mais comuns em sistemas de transmissão. Além disso, em decorrência de sua simplicidade, pode-se dizer que o algoritmo proposto é generalista, podendo ser aplicado em sistemas desprovidos de uma referência de tempo comum ou até mesmo quando os parâmetros da linha monitorada não se encontram disponíveis.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SAHA, M. M.; IZYKOWSKI, J.; ROSOLOWSKI, E. *Fault Location on Power Networks*. London: Ed. Springer, 2010. (Power Systems). ISBN 978-1-84882-885-8.
- [2] SCHWEITZER, E.; GUZMÁN, A.; MYNAM, M.; SKENDZIC, V.; KASZTENNY, B.; MARX, S., "Locating Faults by the Traveling Waves They Launch," *67th Annual Conf. for Protective Relay Engineers*, TX, pp. 95-110., Oct. 2014.
- [3] SCHWEITZER, E.; KASZTENNY, B.; MYNAM, M. "Performance of Time-Domain Line Protection Elements on Real-World Faults," *3rd Annual PAC World Americas Conference*, North Carolina, Sep. 2016.
- [4] LOPES, F. V., "Settings-Free Traveling Wave-Based Earth Fault Location Using Unsynchronized Two-Terminal Data," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 31, no. 5, pp. 2296-2298, Oct. 2016.
- [5] LOPES, F. V.; SILVA, K. M.; COSTA, F. B.; NEVES, W. L. A.; FERNANDES Jr., D., "Real-Time Traveling Wave-Based Fault Location Using Two-Terminal Unsynchronized Data," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 3, pp. 1067–1076, Jun. 2015.
- [6] GILANY, M.; IBRAHIM, D.; ELDIN, E., "Traveling Wave-Based Fault Location Scheme for Multiend-Aged Underground Cable System," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 1, pp. 82–89, Jan. 2007.
- [7] LIU, Y.; SHENG, G.; HE, Z.; JIANG, X., "A Traveling Wave Fault Location Method for Earth Faults Based on Mode Propagation Delays of Multi-Measuring Points," *Przeglad Elektrotech*, vol. 88, no. 3a, pp. 254–258, 2012.
- [8] KASZTENNY, B.; GUZMÁN, A.; FISCHER, N.; MYNAM, M.; TAYLOR, D., "Practical Setting Consideration for Protective Relays That Use Incremental Quantities and Traveling Waves," *43rd Annual Western Protective Relay Conference*, Washington, Oct. 2016.
- [9] PHADKE, A. G.; THORP, J. S. *Computer Relaying for Power Systems*, 2nd ed. New York, USA: John Wiley & Sons Inc., 2009.
- [10] COSTA, F. B.; SOUZA, B.; BRITO, N., "Real-Time Detection of Fault-Induced Transients in Transmission Lines," *IET Electronic Letters*, vol. 46, no. 11, May 2010.
- [11] LOPES, F. V.; FERNANDES Jr., D.; NEVES, W. L. A., "A Traveling-Wave Detection Method Based on Park's Transformation for Fault Locators," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 3, pp. 1626–1634, Jul. 2013.
- [12] ZHANG, G.; SHU, H.; LIAO, Y. "Automated Double-Ended Traveling Wave Record Correlation for Transmission Line Disturbance Analysis," *Electric Power Systems Research*, vol. 136, pp. 242-250, Jul. 2016.
- [13] SANTOSO, S.; POWERS, E. J.; GRADY, W. M., "Power Quality Disturbance Data Compression Using Wavelet Transform Methods," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, no. 3, pp. 1250-1257, Jul. 1997.
- [14] LEE, H.; MOUSA, A. M.; "GPS Travelling Wave Fault Locator Systems: Investigation Into the Anomalous Measurements Related to Lightning Strikes," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 3, pp. 1214-1223, Jul. 1996.
- [15] ZIMATH, S. L.; RAMOS, M. A. F.; FILHO, J. E. S. "Comparison of impedance and travelling wave fault location using real faults," *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, 2010.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Felipe V. Lopes nasceu em Campina Grande, 1985. Recebeu os títulos de B.Sc., M.Sc. e D.Sc. no domínio da Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) em 2009, 2011 e 2014, respectivamente. Atualmente é Professor Adjunto no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília (UnB). Tem atuado em pesquisas relacionadas às áreas de transitórios eletromagnéticos, proteção de sistemas elétricos e localização de faltas.



Kleber M. 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. Em 2007, foi professor Visitante da Universidade Federal da Paraíba (UEPB). De 2008 a 2009 foi professor efetivo do Instituto Federal da Paraíba (IFPB). Em 2009, esteve em cooperação técnica com o Instituto Federal de Brasília (IFB). Atualmente é Professor Adjunto no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília (UnB). Tem atuado nas áreas de proteção de sistemas elétricos de potência e transitórios eletromagnéticos.