

Teoria das Ondas Viajantes e Filtragem Adaptativa de Sinais para Localização de Faltas em Linhas de Transmissão

Marcos H. S. Alves, Otacílio M. Almeida, Aryfrance R. Almeida, José G. S. Carvalho, Bartolomeu F. S. Junior, Francisco C. M. Abreu

Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Piauí, UFPI
Teresina, Brasil
marcos.hsaves@gmail.com

Resumo — Dentre as principais técnicas de localização de faltas em linhas de transmissão (LT's), a Teoria das Ondas Viajantes (TOV's) se destaca pela eficácia dos resultados. Com vista ao alinhamento das concessionárias de energia elétrica quanto aos índices de continuidade e confiabilidade mais rigorosos, este trabalho propõe uma técnica baseada na TOV's em conjunto com a filtragem adaptativa de sinais, para estimar a localização de faltas monofásicas em uma LT de 500 kV e reduzir a imprecisão provocada por ruídos de origem externa e interna ao sistema de transmissão. Os resultados obtidos demonstram ser essa, uma ferramenta bastante precisa e de baixo custo computacional.

Palavras-chave — localização de faltas; ondas viajantes; filtragem adaptativa de sinais.

I. INTRODUÇÃO

Algumas concessionárias dispõem de relés digitais com tecnologia para localização de faltas por Ondas Viajantes (OV's), entretanto motivadas pela imprecisão na localização devido à distorções causadas por ruído, fazem uso de helicópteros, veículos aéreos não tripulados (VANT's) e/ou veículos terrestres, para percorrer a extensão da LT na busca do ponto de falta. Considerando a extensão da LT, isso pode levar horas, fazendo com que outros ramos do sistema interligado fiquem sobrecarregados pelo redirecionamento de emergência do fluxo de carga. No pior caso, pode haver corte da carga, levando grandes cidades a ficar sem energia elétrica. Buscando soluções para minimizar a influência de curto-circuito, a localização de faltas tem se tornado cada vez mais relevante.

As técnicas de localização de faltas disponíveis na literatura podem ser relacionadas de acordo com as características mais importantes, limitações e potencialidades. Os principais métodos são baseados em:

- ✓ Componentes de alta frequência;
- ✓ Componentes fundamentais;
- ✓ Teoria das ondas viajantes (TOV's);
- ✓ Inteligência artificial;

Algoritmos baseados em componentes de alta frequência buscam extrair características pela análise espectral dos transitórios. Porém é necessário maior esforço computacional, além de maior custo para aquisição e implantação de equipamentos.

As técnicas baseadas em componentes fundamentais são relativamente simples. Em geral não apresentam resultados precisos na localização de faltas devido a erros ocasionados pelo efeito combinado de corrente de carga, resistência do ponto de falta e ângulo de incidência da falta, pois são baseadas em modelos de linhas de parâmetros distribuídos, que leva em consideração o efeito da capacitância da linha e da impedância característica da linha [1].

As técnicas baseadas em inteligência artificial vêm sendo utilizadas como um meio de mitigar erros típicos dos métodos descritos anteriormente. Vários algoritmos têm sido desenvolvidos com esse propósito, especialmente os que se baseiam em redes neurais artificiais, lógica fuzzy e algoritmos genéticos, conforme [2]. A principal dificuldade prática consiste na significativa dependência das características do SEP monitorado, sendo necessária a atualização dos algoritmos sempre que há mudanças nas configurações ou parâmetros do SEP [3].

Os métodos baseados na teoria das ondas viajantes, tem se destacado pela precisão nos resultados. Segundo [4], o método que utiliza dados monitorados em apenas um terminal aplica-se na localização de todos os tipos de faltas (monofásicas, bifásicas e trifásicas), porém necessita a identificação da metade faltosa da linha; já o método multiterminal requer sincronização dos dados amostrados por meio de GPS (do inglês, "Global Positioning System").

Este trabalho propõe uma metodologia baseada na técnica de filtragem adaptativa de sinais em conjunto com a TOV's, para estimar a localização de faltas em uma LT real de 500 kV, simulada no aplicativo Alternative Transient Program (ATP).

II. TEORIA DAS ONDAS VIAJANTES

O conceito de ondas viajantes aplicado à localização de faltas pode ser melhor compreendido pelo diagrama de Lattice apresentado em Fig. 1.

O diagrama mostra que a ocorrência de uma falta (curto-circuito) produz ondas de tensão que se propagam a partir do ponto de defeito (descontinuidade) em ambos os sentidos da LT.

De acordo com [5], ao encontrar uma descontinuidade, essas ondas se refletem e retornam ao ponto de defeito, onde haverá novas reflexões e refrações.

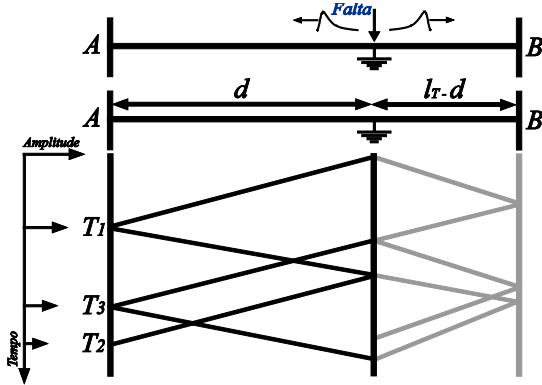


Fig. 1. Diagrama de Lattice para uma falta fase terra.

Assim, é possível estimar a distância de uma falta em relação ao terminal de medição A até a primeira metade da LT por:

$$d = \frac{(T_2 - T_1) \cdot v}{2} \quad (1)$$

Onde v é a velocidade de propagação das ondas; T_1 é o tempo de propagação da primeira frente de onda a partir do ponto de falta até o terminal A; T_2 é o tempo de propagação da primeira onda, medido após a segunda reflexão, no ponto de falta e desse ponto novamente ao terminal de medição A, conforme [6].

Devido ao acoplamento mútuo na LT, coexistirão diferentes modos de propagação das ondas, para o caso de faltas aterradas; sendo um modo aterrado v_0 e dois modos aéreos v_1 e v_2 . Contudo, é possível separar os modos de propagação utilizando as transformadas de Clarke ou Whedepohl, [7].

Pode-se utilizar a velocidade de propagação do modo aéreo para estimação da distância da falta, que é aproximadamente a velocidade da luz, cerca de 299.792.457 m/s.

Nessas condições, deve-se levar em conta o efeito dispersivo da velocidade e atenuação do modo aéreo, considerando-se as faltas na primeira e segunda metade da LT. No caso de faltas fase-terra, monofásicas, as frentes de onda refletidas e refratadas no terminal remoto e ponto de falta, respectivamente não podem ser mais desprezadas.

Consequentemente, faltas ocorridas na primeira metade da linha, podem ser estimadas por (1). Já as faltas que ocorrem na segunda metade da linha podem ser encontradas por:

$$d = l - \frac{(T_3 - T_1) \cdot v}{2} \quad (2)$$

Onde T_3 corresponde ao tempo que a segunda frente de onda leva para refletir no terminal B, refratar no ponto de falta e chegar ao terminal de medição A. A dificuldade da localização de faltas pela TOV's é encontrar a segunda frente de onda reversa que reflete no ponto de medição a partir de diferentes ângulos, influenciando na localização. Em condições reais o sinal de transitório é contaminado por muitos sinais com características de ruído branco não correlacionado com o sinal de falta de interesse, tornando mais difícil a estimativa.

III. FILTRAGEM ADAPTATIVA DE SINAIS

A finalidade do processamento adaptativo aplicado à localização de faltas tratado neste trabalho é condicionar os sinais de modo a reduzir gradualmente a influência de sinais ruidosos não correlacionados com o transitório da falta, [8]. O elemento fundamental do processamento adaptativo é um filtro digital com um número finito de pesos, ou coeficientes, que são ajustáveis de forma adaptativa.

A intervalos regulares os pesos são ajustados de acordo com o algoritmo adaptativo com o objetivo de otimizar um critério de qualidade relacionado com o erro de estimação e . O erro é dado pela diferença entre uma resposta desejada, d , e a saída do filtro, y . O critério de qualidade é normalmente estabelecido por função de custo.

Conforme [9], o algoritmo do gradiente é um dos métodos mais usados na filtragem adaptativa, e pode ser realizado pelo filtro de Wiener, pois sua simplicidade e robustez implicam em reduzido esforço computacional. A representação gráfica do erro em relação aos coeficientes do filtro é conhecida por superfície de desempenho do erro. A superfície define uma hiperparabolóide de $N+1$ dimensões com um mínimo global.

O mínimo global corresponde à máxima minimização do erro, podendo ser alcançado pelo ajuste iterativo dos coeficientes do filtro, de forma a mover-se na direção do mínimo global, subtraindo-se ao valor anterior dos coeficientes um termo proporcional ao gradiente. Neste caso, tem-se que:

$$c(n+1) = c(n) - \mu \nabla(n) \quad (3)$$

A constante μ é uma constante de proporcionalidade positiva, passo de adaptação ou coeficiente de aprendizagem, que influencia o desempenho do algoritmo.

O gradiente pode ser determinado derivando-se o erro com relação aos coeficientes do filtro. Observa-se que o erro pode ser expresso por:

$$e(n) = d(n) - c(n) \cdot a(n) \quad (4)$$

Considerando-se a definição do gradiente, tem-se que:

$$\nabla(n) = \frac{\partial e(n)}{\partial c(n)} = \frac{\partial [d(n) - c(n) \cdot a(n)]}{\partial c(n)} = -a(n) \quad (5)$$

Assim, (3) pode ser reescrita, como:

$$c(n+1) = c(n) + 2\mu E[e(n) \cdot a(n)] \quad (6)$$

Igualando-se o gradiente a zero é possível obter o valor mínimo do erro.

$$\nabla = -2E[e(n)a(n)] = -2p + 2Rc = 0 \quad (7)$$

$$c_{ot} = R^{-1}p \quad (8)$$

Substituindo (8) em (4), obtém-se o erro mínimo.

$$e_{min}(n) = d(n) - c_{ot}(n)a(n) \quad (9)$$

Na prática, deve-se utilizar estimativas do gradiente, $\hat{\nabla}(n)$, pois não é possível calcular valores médios com base em uma única amostra no instante n , sem conhecer a estatística de conjunto. A equação para atualização dos coeficientes fica então:

$$c(n+1) = c(n) - \mu \hat{\nabla}(n) \quad (10)$$

A mais conhecida de todas as estimativas foi proposta por [10], que basicamente consiste em substituir os valores médios das variáveis pelos seus valores instantâneos. Esse algoritmo é conhecido por LMS ("least-mean-square") ou algoritmo do gradiente estocástico, pois a estimativa do gradiente utilizada não é determinística. A estimativa do gradiente para o LMS é então:

$$\hat{\nabla}(n) = \frac{\partial e^2(n)}{\partial c(n)} = -2 \cdot e(n) \cdot a(n) \quad (11)$$

Portanto, o LMS é dado por:

$$c(n+1) = c(n) + 2\mu e(n)a(n) \quad (12)$$

Além da estimativa do gradiente, pode-se considerar o passo de adaptação variável.

Para este trabalho será considerado a seguinte regra: se $\mu > \mu_{min}$ então $\mu = \mu - \frac{\mu^2}{2}$.

Conforme [10], no caso particular do filtro transversal, a gama de valores de μ , para os quais haverá convergência pode ser expressa por:

$$0 < \mu < \frac{1}{NE[a^2(n)]} \quad (13)$$

Onde N pode ser considerado 10, para fins práticos.

IV. O MÉTODO PROPOSTO

Os sinais que trafegam nas LT's são ambientes bastante ruidosos devido à perturbações de natureza aleatória, causadas por agentes externos e internos ao sistema de transmissão, como variação de temperatura, correntes de fuga em isoladores, centelhamento e efeito corona, dentre outros, dificultando a aplicação da TOV's na localização de faltas, pois o sinal de tensão medido contém distorções que tornam a localização imprecisa, [3].

Esses ruídos são uniformemente distribuídos em todas as frequências do espectro, sendo caracterizados como ruídos gaussianos brancos, e é o sinal que se deseja mitigar por meio da filtragem adaptativa, visto que não podem ser prognosticados, somente por meios probabilísticos. Com a técnica de filtragem adaptativa adequada e produção de ruído de referência correlacionado com o ruído ambiente do sinal de falta medido, é possível reduzir significativamente a distorção no transitório de falta, tornando a localização mais precisa.

A proposta deste trabalho para a redução do efeito do ruído é utilizar um esquema adaptativo no qual a entrada de referência, é apenas ruído correlacionado, e a entrada primária receberá sinal útil e ruído. A Fig. 2 apresenta a configuração usada para esse propósito.

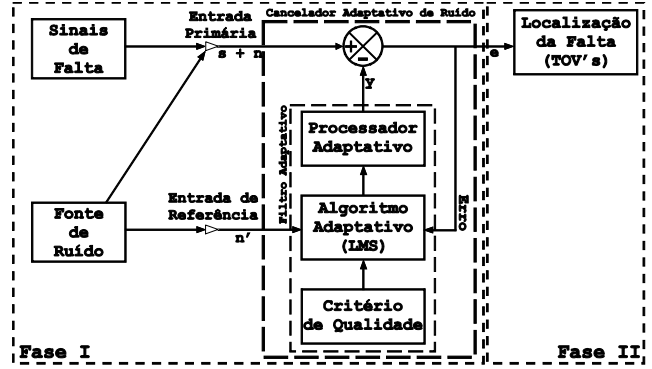


Fig. 2. Diagrama para o método proposto usando a técnica de filtragem adaptativa.

Na Fase I o filtro adaptativo tenta aproximar y de n de modo que, após convergência a saída do sistema, e , é aproximadamente igual a $e = s + n - \hat{n} \approx s$, que é o sinal sem ruído.

A Fase II representa a aplicação das TOV's para a localização da distância de falta a partir dos sinais transitórios de alta frequência recuperados pelo cancelamento adaptativo de ruídos.

V. APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE LMS COM DADOS SIMULADOS DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO

Para avaliar e validar a técnica proposta foi utilizado o modelo da LT de 500kV/60Hz da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF), que interliga as subestações de Presidente Dutra – MA e Boa Esperança – PI (BEA).

Da literatura, verifica-se que quanto mais próximo do ponto de medição, for o ponto de ocorrência da falta, maiores serão as frequências presentes nos transitórios induzidos [6].

Neste estudo, a LT foi modelada com parâmetros distribuídos e dependentes da frequência, e perfeitamente transposta em sua totalidade, conforme [11], devido à precisão na análise de transitórios eletromagnéticos. Na modelagem da LT foi utilizado o bloco LCC (linhas e cabos constantes) do software ATP.

A topologia da LT considerada para aplicação de curtos-circuitos francos do tipo A-T no SEP está ilustrada na Fig. 3. A estrutura da torre da LT considerada é apresentada na Fig. 4.

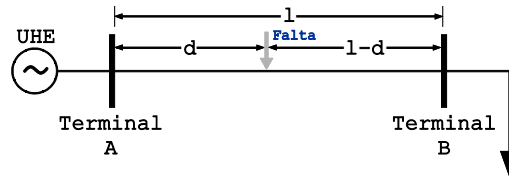


Fig. 3. SEP de 500 kV avaliado.

As simulações foram realizadas no software ATP, sendo que apenas faltas monofásicas foram avaliadas, pois conforme [6], cerca de 70% a 80% das ocorrências de faltas em LT's acontecem entre um dos condutores e a terra.

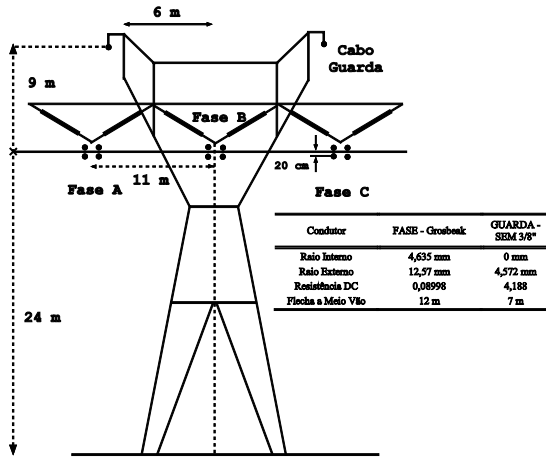


Fig. 4. Topologia da torre utilizada.

A. Condições Avaliadas

Considerando que as três fases estão defasadas de 120° entre si, a abordagem desenvolvida pode ser aplicada a qualquer das fases, quando sob mesmo carregamento e condições de falta. A Tabela 1 apresenta as condições avaliadas.

Tabela 1. Condições de falta avaliadas.

Frequência de Amostragem	Distâncias de Falta	Ângulos de Incidência	Relação Sinal Ruído - SNR
200 kHz, 400 kHz, 1 MHz	16 km, 72 km, 155 km	90°, 135°	25 dB, 35 dB, 45 dB, 55 dB, 65 dB, 75 dB

A Fig. 5 ilustra o sistema modelado no ATP. O Trecho 1, entre os pontos T1 e T2 representa a distância da falta ao terminal de medição. O Trecho 2, entre os pontos T2 e T3 representa a distância entre o ponto de falta e o terminal remoto.

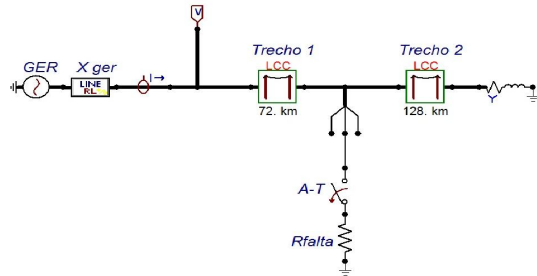


Fig. 5. Sistema modelado no ATP.

Modifica-se a distância da falta alterando-se o comprimento de ambos os Trechos 1 e 2 nas propriedades do bloco LCC.

B. Localização de Faltas a Partir de Sinais dos Transitórios Medidos

Os principais fatores que influenciam os transitórios são ângulo de incidência da falta, resistência de falta, fluxo de potência na LT, distância da falta, dentre outros fatores [12].

A Fig. 6 apresenta o sinal transitório de uma das faltas monofásicas, consideradas para a validação da proposta. As tensões trifásicas em kV estão ilustradas ao longo do tempo, onde V_{T1A} representa o sinal de tensão na fase A; V_{T1B} e V_{T1C} , representam os sinais de tensão nas fases B e C, respectivamente, com relação ao terminal de medição A, para falta monofásica A-T.

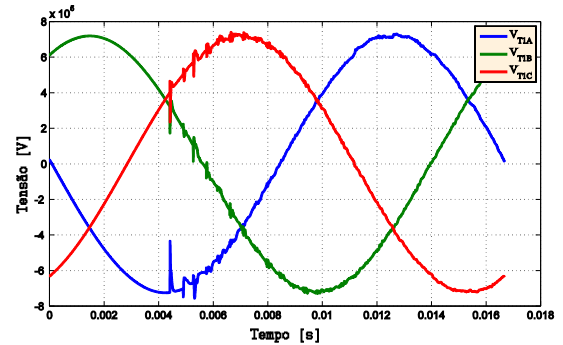


Fig. 6. Sinal transitório de falta monofásica A-T.

Neste trabalho, foram admitidas faltas em ambas as metades da LT, implicando $0 \leq \text{Trecho 1} \leq 200 \text{ km}$. Assim para a localização correta devem ser utilizadas as equações (1) e (2).

A Fig. 7 apresenta os tempos de propagação das ondas viajantes para o sinal V_{T1A} da Fig. 6.

Pela análise da Fig. 7, é possível utilizar os tempos T_1 e T_2 , para estimar a distância da falta ao terminal de medição A, fazendo uso de (1).

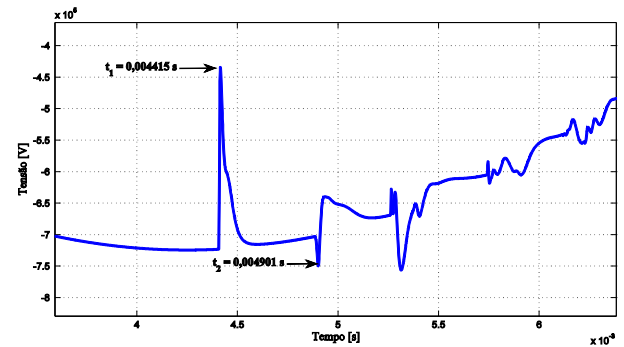


Fig. 7. Tempos de propagação para primeira e segunda onda viajante, para uma falta a 72 km.

$$d = \frac{299.792.458 \cdot (0,004901 - 0,004415)}{2} \quad (14)$$

$$d = 72,849 \text{ km} \quad (15)$$

VI. RESULTADOS

A Fig. 8 mostra um dos sinais de falta original, para uma distância de 16 km, utilizado para validação da técnica

proposta. Pode-se verificar os tempos de propagação (T_1 e T_2) das ondas viajantes utilizadas para o cálculo da distância da falta.

Já da Fig. 10 apresenta os resultados obtidos para a filtragem com LMS, para os níveis de SNR mencionados.

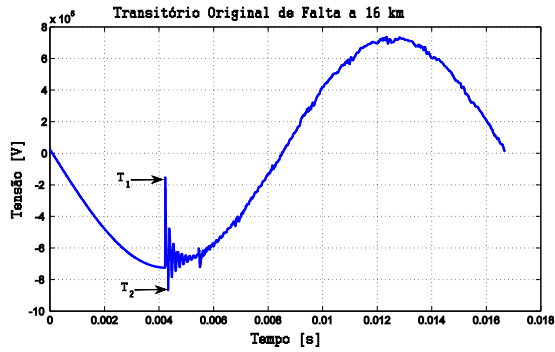


Fig. 8. Sinal transitório de uma falta monofásica A-T.

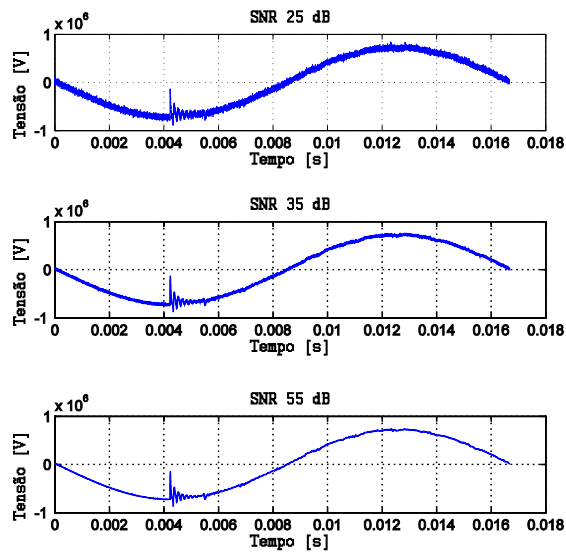


Fig. 9. Comparativo entre os níveis de ruído no transitório para falta a 16 km.

Na Fig. 9 é apresentado o comparativo para o transitório de falta com adição de ruído gaussiano branco nos níveis de SNR de 25 dB, 35 dB e 55 dB.

As Tabelas 2 e 3 apresentam os resultados para aplicação da técnica de LMS aos dados de transitório gerados, após a distorção provocada pela aplicação dos ruídos. A técnica foi avaliada com resistência de falta de 50 Ω . O tipo de falta considerada foi monofásica A-T.

O erro percentual apresentado nas tabelas para cada condição avaliada foi calculado a partir das equações (16) e (17), onde N é o número de situações avaliadas e l é o comprimento da LT, correspondente a 200 km.

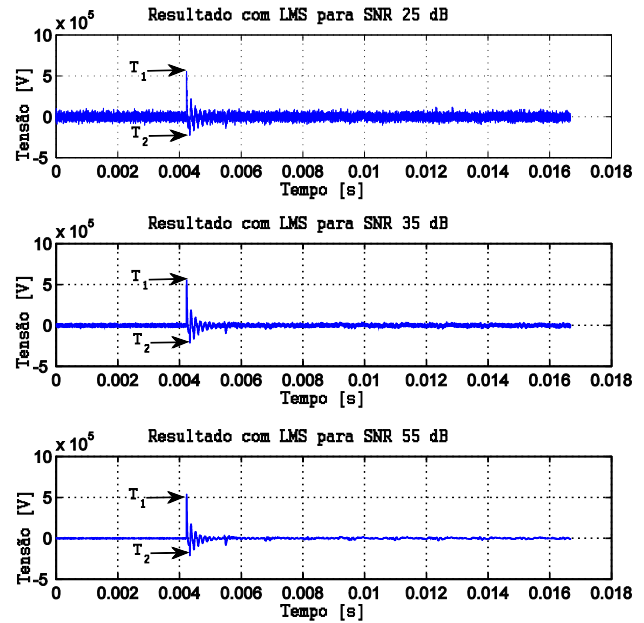


Fig. 10. Comparativo entre os sinais transitórios recuperados para falta a 16 km.

Tabela 2. Resultados obtidos para uma distância de 16 km.

SNR	90°						135°					
	Localização Estimada			Erro (%)			Localização Estimada			Erro (%)		
	200 kHz	400 kHz	1 MHz	200 kHz	400 kHz	1 MHz	200 kHz	400 kHz	1 MHz	200 kHz	400 kHz	1 MHz
25 dB	14,99	16,11	15,79	0,505	0,055	0,105	16,489	15,739	15,739	0,2445	0,1305	0,131
35 dB	15,73	16,11	15,81	0,135	0,055	0,095	15,739	15,739	15,739	0,1305	0,1305	0,131
45 dB	15,73	15,73	15,85	0,135	0,135	0,075	15,739	15,739	16,039	0,1305	0,1305	0,02
55 dB	15,73	15,73	15,85	0,135	0,135	0,075	15,739	15,739	16,039	0,1305	0,1305	0,02
65 dB	15,73	15,73	15,85	0,135	0,135	0,075	15,739	15,739	16,039	0,1305	0,1305	0,02
75 dB	15,73	15,73	15,85	0,135	0,135	0,075	15,739	15,739	16,039	0,1305	0,1305	0,02
Erro Médio (%)				0,1967	0,1083	0,083				0,1495	0,1305	0,057

Tabela 3. Resultados obtidos para uma distância de 155 km.

SNR	90°						135°					
	Localização Estimada			Erro (%)			Localização Estimada			Erro (%)		
	200 kHz	400 kHz	1 MHz	200 kHz	400 kHz	1 MHz	200 kHz	400 kHz	1 MHz	200 kHz	400 kHz	1 MHz
25 dB	169,932	150,908	147,686	7,466	2,046	3,657	149,04	160,94	157,34	2,98	2,97	1,17
35 dB	150,534	151,658	151,433	2,233	1,671	1,784	150,54	157,19	157,04	2,23	1,095	1,02
45 dB	150,534	152,033	153,831	2,233	1,4835	0,585	150,54	156,82	156,89	2,23	0,91	0,945
55 dB	152,782	153,157	154,131	1,109	0,9215	0,435	150,54	156,82	156,74	2,23	0,91	0,87
65 dB	152,782	153,157	154,131	1,109	0,9215	0,435	150,54	156,82	156,74	2,23	0,91	0,87
75 dB	152,782	153,157	154,131	1,109	0,9215	0,435	150,54	156,82	156,74	2,23	0,91	0,87
Erro Médio (%)				2,5432	1,3275	1,221				2,355	1,2842	0,958

$$E\% = \left| \frac{d_{estimada} - d_{real}}{l} \right| * 100 \quad (16)$$

$$EM = \frac{\sum_{i=1}^N E\%}{N} \quad (17)$$

VII. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Analisando as Fig. 8, 9 e 10, bem como as Tabelas 2 e 3, pode-se verificar que a estimação da distância de falta é dificultada pela aplicação de diferentes valores de SNR. Os resultados demonstram que a técnica proposta tem desempenho satisfatório, pois é capaz de estimar com boa precisão as distâncias tanto na primeira metade da linha como na segunda metade, pela identificação dos tempos de propagação. Verificou-se que a taxa de amostragem tem relevante influência no desempenho do algoritmo, visto que a precisão da localização está diretamente relacionada à uma maior quantidade de informação disponível. Em geral a técnica proposta apresentou robustez na presença de ruído na faixa de 25 dB a 75 dB, gerando resultados com baixo erro mesmo para as situações mais dificultosas.

A validade e confiabilidade da técnica de filtragem adaptativa aliada a TOV's é comprovada pelos baixos erros médios verificados, tanto para taxas de amostragem de 200 kHz, quanto para 1 MHz, apresentado melhores resultados para a taxa mais alta. A técnica proposta é vantajosa quando comparada a outros tipos de algoritmos, como o proposto por [13], pois apresenta baixa complexidade computacional para implementação, maior flexibilidade frente as mudanças nos parâmetros do SEP, bem como baixo erro na presença de ruído branco gaussiano, visto que a técnica proposta apresenta erros médios de 0,958% em comparação com 3,35%, da técnica proposta em [14].

Visto que o algoritmo utiliza filtragem adaptativa que pode ser associado com outras abordagens, avanços podem ser feitos no sentido de: localizar e classificar faltas bifásicas e trifásicas, aplicar a técnica de normalização ao LMS para reduzir erros de arredondamento, utilizar dados de transitório de sinais de corrente para localizar faltas em tempo real, aplicar o método proposto em conjunto com outras técnicas de inteligência computacional e técnicas de processamento digital de sinais (Wavelet, Transformada S).

AGRADECIMENTOS

À Eletrobras-Chesf pela parceria em trabalhos conjuntos, ao Programa de Educação Tutorial – PET da Universidade Federal do Piauí e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Piauí – FAPEPI.

REFERENCES

- [1] Shehab-Eldin, E. H., P. G. Maclaren, "Travelling Wave Distance Protection – Problem Areas e Solutions", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 3, pp. 894-902, July 1988.
- [2] Teklic L., (2013), Artificial Neural Approach for Locating Faults in Power Transmission System, IEEE EuroCon, 2013.
- [3] Costa, F. B, Brito, N. S. D, and Sousa, B. A, "Detecção de Faltas evolutivas e múltiplos distúrbios em registros oscilográficos baseada na Trans-formada Wavelet discreta" In:Revista Controle & Automação/vol.21 no 2./Março e Abril 2010.
- [4] Ngu E. E., K. Ramar, (2011). A Combined Impedan-ce and Travelling Wave Based Fault Location Method for Multi-Terminal Transmission Lines, Electrical Power and Energy Systems 33, pp. 1767-1775.
- [5] Gale, P., Crossley, P., Bingyin, X., Yaozhong, G., Cory, B. and Barker, J. (1993). Fault Location based on travelling waves, Fifth International Conference on Developments in Power System Protection, pp. 54-59.
- [6] Almeida, et al., (2014), Localização de Faltas em Sistemas de Transmissão de Alta Tensão a partir de Registros Oscilográficos Usando Análise de Componentes Independentes, Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE.
- [7] Clarke, E., (1993), Circuit Analysis of AC Power Systems. New York: John Wiley.
- [8] ABRANTES, Silvio A. Processamento Adaptativo de Sinais. 1 ed. Lisboa: Fundação Calouste Gul-benkian, 2000.
- [9] Slock, D. T. M., "On the Convergence Behavior of the LMS and the Normalized LMS Algorithms", IEEE Transactions on Signal Processing, Setem-bro de 1993, pp. 2811-2825.
- [10] Widrow, B. e Hoff Jr., M. E., "Adaptive Switching Circuits", Tech. Rep. 1553-1, Stanford Electron. Labs, Stanford, CA, EUA, Junho de 1960.
- [11] Marti, J. R., "Accurate Modeling of Frequency De-pendent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol, PAS-101, no. 1, pp 147-155, jan 1982.
- [12] Elmubark , O. A. A., "Fault Detection, Classification and Location in Power Transmission Line Using Artificial Neural Network," MSc. Dissertation, Dept. Elec. Eng., Sudan Univ. of Sci. & Tech. Khartoum, March 2011.
- [13] Souza, et al., (2014), Uso da Transformada de Stockwell e Ondas Viajantes na Localização de Faltas em Linhas de Transmissão, INDUSCON.
- [14] Baseer, Mohammad A., (2013), Travelling waves for finding the fault location in transmission lines, Journal Electrical and Electronic Engineering.