

Uso da Transformada de Stockwell e Ondas Viajantes na Localização de Faltas em Linhas de Transmissão

Saulo C. A. de Souza, Arthur P. S. Braga
Grupo de Pesquisa em Automação e Robótica
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Ceará - UFC
Fortaleza, Ceará
saulo@dee.ufc.br, arthurp@dee.ufc.br

Aryfrance R. Almeida, Francisco C. M. A,
Otacilio M. Almeida
Grupo de Pesquisa em Automação do Sistema Elétrico
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Piauí - UFPI
Teresina, Piauí
aryfrance@ufpi.edu.br, carlosm.abreu@yahoo.com.br,
otacilio@ufpi.edu.br

Abstract—Neste trabalho, a aplicação da transformada de Stockwell, ou transformada S, é considerada para estimação da localização de faltas em uma linha de transmissão de energia elétrica de dois terminais. O método proposto identifica as frequências características dos transitórios de tensão decorrentes de faltas através do espectro de frequência da fase faltosa obtido através da transformada S. Posteriormente, utiliza-se a teoria das ondas viajantes para estimação da localização da falta. Uma linha de transmissão real de 500kV foi simulada no *software* ATP e a aplicação da transformada S foi executada no *software* MATLAB®. Os resultados mostram que a técnica é adequada para estimação da localização de faltas quando aliada a teoria das ondas viajantes.

I. INTRODUÇÃO

A localização precisa das faltas auxilia o setor de operação do sistema elétrico diminuindo o tempo de ocorrência do distúrbio e contribuindo para continuidade do fornecimento de energia elétrica.

O problema de localização de faltas em linhas de transmissão (LTs) pode ser resolvido utilizando métodos baseados em componentes da frequência fundamental, componentes de alta frequência ou inteligência computacional. Ainda, tais métodos podem ser classificados quanto à quantidade de terminais de monitoramento de tensão e corrente, podendo ocorrer em um ou mais terminais [8].

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 requer a identificação da metade faltosa da linha, enquanto que o método multi-terminal necessita de sincronização dos dados amostrados [8].

As técnicas baseadas em componentes de alta frequência fazem uso da Teoria das Ondas Viajantes (TOVs) e transformada *wavelet*. Estes métodos podem apresentar

problemas na localização de faltas próximas ao terminal de monitoramento, onde são gerados transitórios em alta frequência, e em faltas cujo ângulo de incidência aproxima-se de 0°, onde os transitórios gerados possuem magnitude reduzida [3,7].

Neste trabalho, a aplicação da transformada de Stockwell [1], ou transformada S, é considerada para estimação da localização de faltas em uma linha de transmissão de energia elétrica de dois terminais. Esta técnica já foi utilizada para extração de componentes de alta frequência geradas a partir de faltas simuladas em uma LT de três ou mais terminais [2,3].

Uma abordagem utilizando redes neurais artificiais e a transformada S como extrator de características a partir do espectro de energia é explorada em [4,5]. Em [6] esta técnica é utilizada para localização de faltas em redes de distribuição de energia elétrica através da extração das componentes de alta frequência características das faltas através do espectro de energia. Ainda, [14] explora a utilização da transformada S com aplicação em fenômenos relacionados com a qualidade da energia elétrica.

O método proposto determina a localização da falta com erros reduzidos mesmo sob diferentes localizações de falta, resistências de falta e ângulos de incidência. Ainda, a abordagem utilizada não necessita de sincronização de dados e a localização é feita de forma *off-line*.

A transformada de Stockwell é abordada na seção II. A teoria das ondas viajantes é discutida na seção III. O sistema de transmissão modelado e as situações de faltas consideradas são apresentadas na seção IV. A aplicação da teoria das ondas viajantes e da transformada de Stockwell na estimação da localização das faltas é abordada na seção V. Os resultados são apresentados na seção VI e, por fim, a conclusão do trabalho é tratada na seção VII.

II. TRANSFORMADA DE STOCKWELL

A transformada de Stockwell [1], ou transformada S, é uma poderosa ferramenta que pode ser utilizada na análise de sinais não-estacionários, retornando informações características no domínio da frequência e do tempo. Desta forma, esta técnica pode ser vista como uma extensão da transformada *wavelet* contínua (TWC) podendo ser expandido, também, para o domínio discreto. Esta técnica produz uma representação de sinais que combina, de forma única, a resolução dependente da frequência com localização simultânea do espectro real e imaginário [14].

Seja $x[kT]$, $k = 0, 1, \dots, N-1$ um sinal discreto amostrado em um intervalo de tempo T , a transformada discreta de Fourier é dada por (1), onde $n = 0, 1, \dots, N-1$ e N é a quantidade total de amostras.

$$X\left[\frac{n}{NT}\right] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x[kT] e^{-\frac{i2\pi nk}{N}} \quad (1)$$

A transformada S de uma série discreta $x[kT]$ pode ser determinada utilizando (1), resultando em (2), onde $j = m = n = 0, 1, \dots, N-1$.

$$ST\left[jT, \frac{n}{NT}\right] = \sum_{k=0}^{N-1} H\left[\frac{m+n}{NT}\right] G(m, n) e^{\frac{i2\pi mj}{N}} \quad (2)$$

Em (2) a função Gaussiana é expressa por (3).

$$G(m, n) = e^{-\frac{2\pi^2 m^2}{n^2}} \quad (3)$$

A transformada S de uma série com dados discretos produz uma matriz ST de números complexos onde cada linha contém os componentes em frequência nos diferentes tempos amostrados e as colunas representam o espectro local nesse tempo em particular [1]. Neste trabalho, a transformada S é aplicada ao sinal de tensão da fase faltosa amostrado na frequência de 200kHz.

III. TEORIA DAS ONDAS VIAJANTES (TOVS)

A TOVs mostra que a ocorrência de uma falta produz ondas de tensão que se propagam a partir do ponto de falta nos dois sentidos da linha. Ao encontrar uma descontinuidade essas ondas se refletem e retornam ao ponto de defeito, onde haverá novas reflexões. Uma maneira prática de abordar o problema é através do diagrama de Lattice, como apresentado na Fig. 1.

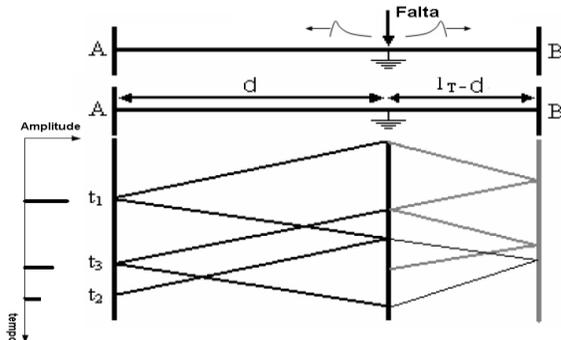


Figura 1. Diagrama de Lattice

A distância de uma falta em relação do ponto de referência ou terminal de medição A até a metade da linha pode ser estimada através de (4).

$$d = \frac{v \times (t_2 - t_1)}{2} \quad (4)$$

Onde v é velocidade de propagação das ondas no modo aéreo, t_1 é o tempo de propagação da primeira frente de onda originada no ponto de falta até o terminal de medição A; t_2 é o tempo de propagação considerando-se o tempo de retorno dessa primeira onda até o ponto de falta e desse ponto novamente ao terminal de origem [10].

Considerando um sistema de transmissão de dois terminais, sendo um terminal de medição e o outro um terminal remoto, (4) aplica-se na estimação da localização de qualquer tipo de falta desde que esta ocorra na primeira metade da linha [8]. Nesta condição, $0 \leq d \leq l_T/2$, onde l_T é o comprimento total da linha de transmissão.

Sabe-se que, por causa do acoplamento mútuo nas linhas de transmissão não transpostas, existirão diferentes modos de propagação das ondas no caso de faltas aterradas, normalmente um modo terra v_0 e dois modos aéreos v_1 e v_2 . Esses modos de propagação podem ser separados com o uso de transformações modais como, por exemplo, a transformada de Clarke ou Whedepohl [9].

Uma vez separados, utiliza-se a velocidade do modo aéreo para o cálculo da distância da falta, que possui velocidade de propagação semelhante à velocidade da luz, ou seja, 3×10^8 m/s. Esses modos de propagação têm velocidades e atenuações que, consequentemente, conduzem a efeitos de dispersão sobre frentes de ondas descritas pelas componentes de fase. Para sistemas com linhas transpostas, os dois modos aéreos têm a mesma impedância característica e velocidade de propagação. No caso de faltas aterradas como, por exemplo, monofásicas, as ondas refletidas no terminal remoto e refratadas no ponto de falta não podem ser mais desprezadas e duas condições devem ser consideradas: faltas localizadas na primeira e na segunda metade da linha.

Como dito anteriormente, faltas que ocorrem na primeira metade da linha podem ter sua distância estimada através de (4), após a obtenção do intervalo de tempo entre duas primeiras ondas que chegam ao terminal de medição. Por outro lado, para faltas que ocorrem na segunda metade da linha, a primeira onda refletida no terminal remoto é refratada no ponto de falta e a distância d pode ser estimada por (5).

$$d = l_T - \frac{v \times (t_2 - t_1)}{2} \quad (5)$$

IV. MODELO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO

Uma linha de transmissão de 500kV, 60Hz, foi modelada com parâmetros distribuídos e dependentes da frequência e perfeitamente transposta. A Fig. 2 ilustra a topologia da linha de transmissão considerada. Esta topologia envolve uma LT de dois terminais A e B, representando o terminal de medição e terminal remoto, respectivamente.

O modelo da torre de transmissão utilizado pode ser observado na Fig. 3. Este corresponde a um modelo de torre típico da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco – CHESF utilizado na linha de transmissão que interliga as subestações de Presidente Dutra, no estado do Maranhão e Boa Esperança no estado do Piauí.

O modelo de linha JMarti [11] de parâmetros variantes na frequência foi usado para modelar a linha de transmissão devido à precisão na análise de transitórios eletromagnéticos. Na modelagem da linha de transmissão utilizou-se o bloco LCC (linhas e cabos constantes) do *software* ATP.

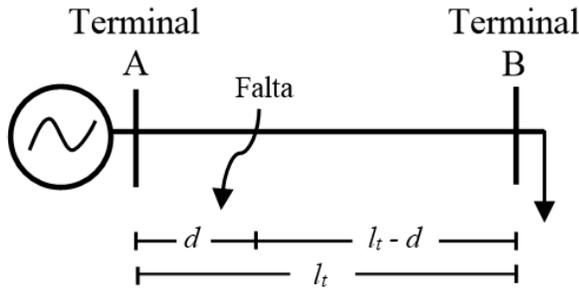


Figura 2: Linha de Transmissão com dois terminais

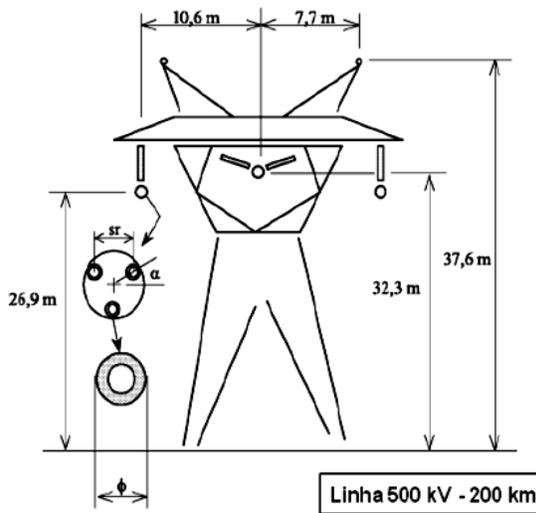


Figura 3 - Modelo da Torre de Transmissão de 500kV

O *software* ATP foi utilizado para simulação e obtenção do conjunto de dados dos sinais de falha. Uma vez que cerca de 70% a 80% dos casos de ocorrência de faltas nas LTs ocorrem entre um condutor e a terra [12], somente faltas monofásicas foram simuladas.

A Fig. 4 ilustra o sistema de transmissão modelado. O Trecho 1 está compreendido entre os pontos T1 e T2 e corresponde à distância da falha ao terminal de medição. O Trecho 2 está compreendido entre os pontos T2 e T3 e corresponde à distância entre o ponto de falha e o terminal remoto. Para modificar a distância da falha aplicada modifica-se o comprimento da linha nas propriedades do bloco LCC.

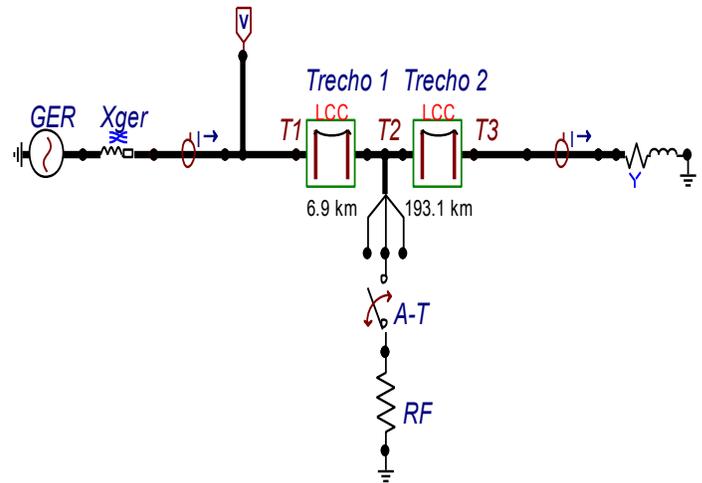


Figura 4. Sistema de Transmissão modelado no ATP

A. Transitórios em Sistemas Elétricos Faltosos

Os transitórios variam de acordo o ângulo de incidência da falha, resistência da falha, fluxo de potência na linha, local da falha, entre outros fatores. Em alguns casos, o sistema pode apresentar transitórios amortecidos e com frequências próximas da frequência da rede [13].

A Fig. 5 mostra os sinais das tensões trifásicas em kV ao longo do tempo, onde v:T1A representa o sinal de tensão na fase A, v:T1B representa o sinal de tensão na fase B e v:T1C representa o sinal de tensão na fase C, observadas no terminal de medição A quando ocorre uma falha monofásica do tipo A-T.

A Fig. 6 mostra os sinais das correntes trifásicas em kA ao longo do tempo, onde c:IA representa o sinal de tensão na fase A, c:IB representa o sinal de tensão na fase B e c:IC representa o sinal de tensão na fase C, observadas no terminal de medição A quando ocorre uma falha monofásica do tipo A-T.

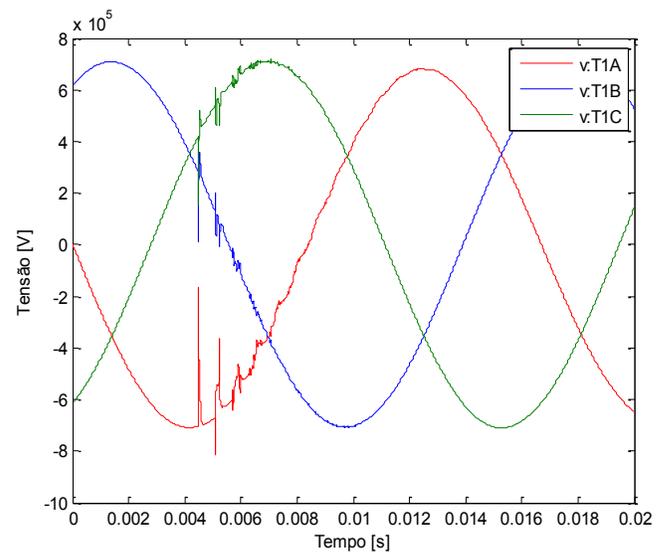


Figura 5. Sinais de Tensão para Falta Monofásica A-T

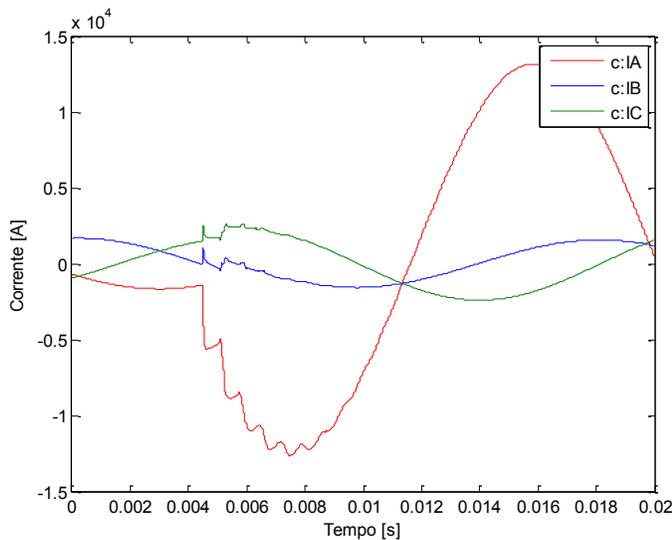


Figura 6. Sinais de Corrente para Falta Monofásica A-T

B. Pré-Localização da Falta

Uma vez que na simulação foi considerada uma LT de dois terminais é necessário identificar a metade faltosa da linha e o tipo de falta ocorrida (monofásica, bifásica ou trifásica).

O presente estudo admite apenas faltas monofásicas do tipo A-T que ocorrem na primeira metade da linha, ou seja, considerando $0 \leq \text{Trecho1} \leq 100\text{km}$. Desta forma, $0 \leq d \leq 100\text{km}$ e (4) é utilizada na estimação da distância da falta ao terminal de medição A.

C. Situações de Faltas Simuladas

Para avaliar a aplicação da transformada S na localização das faltas, 27 diferentes situações de faltas monofásicas A-T foram simuladas na frequência de amostragem de 200kHz variando a distância real da falta (d_R) ao terminal de medição A, o ângulo de incidência (θ) e a resistência de falta (R_f). A Tab. 1 resume as condições de faltas simuladas.

TABELA 1. SITUAÇÕES DE FALTAS SIMULADAS

d_R [km]	θ [°]	R_f [Ω]
6,90	0, 45, 90	1, 10, 20
38,90	0, 45, 90	1, 10, 20
78,20	0, 45, 90	1, 10, 20

V. ESTIMAÇÃO DA LOCALIZAÇÃO DAS FALTAS

Nas subseções seguintes, a aplicação da teoria das ondas viajantes e transformada S na estimação da localização das faltas é discutida.

A. Aplicação da TOVs na Localização de Faltas

A Fig. 7 destaca os transitórios do sinal de tensão da fase A (v:T1A) da Fig. 5. No caso de faltas aterradas, no instante da falta, as ondas viajantes de tensão refletidas no terminal remoto B não são vistas no terminal de medição A. Estas ondas se

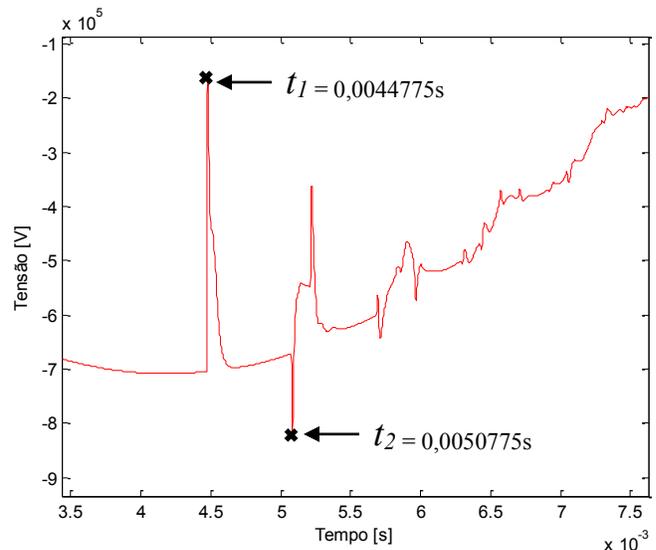


Figura 7. Tempo de Propagação da Primeira e Segunda onda Viajante

manifestam através de picos no sinal de tensão das fases até que a falta seja sanada ou o sistema atinja o regime permanente de falta.

Observando-se a Fig. 7, é possível extrair os tempos t_1 e t_2 de propagação das ondas viajantes de tensão e utilizar (4) para estimar a distância da falta d ao terminal de medição A.

$$d = \frac{3 \times 10^8 \times (5,0775 \times 10^{-3} - 4,4775 \times 10^{-3})}{2} \quad (6)$$

$$d = 90\text{km} \quad (7)$$

B. Aplicação da Transformada S na Localização de Faltas

Uma vez que sinais transitórios de tensão decorrentes de faltas são variantes no tempo os métodos tradicionais de análise de sinais como a Transformada Rápida de Fourier são inadequados para extrair as frequências características destes sinais [6]. Por outro lado, a transformada S se adequa na análise tempo-frequência de sinais não-estacionários.

Com a matriz ST é possível determinar componentes no espectro da frequência e variações do sinal no tempo. A partir de (8) é obtido o gráfico que permite visualizar e identificar componentes como a frequência fundamental e variações no espectro de frequência como harmônicos e transitórios, sendo MF (Máximo das Frequências) o vetor que contém os valores absolutos máximos da relação amplitude-frequência.

Por último, é obtido o gráfico que permite visualizar a relação tempo-amplitude em frequências específicas através do vetor AT (Amplitude no Tempo) fazendo uso de (9) [14].

Para melhor visualização, os valores absolutos dos elementos da matriz ST devem ser normalizados no intervalo $[0,1]$.

$$MF = \max \left| S \left[jT, \frac{n}{NT} \right]^T \right| \quad (8)$$

$$AT = \left| S \left[jT, \frac{n}{NT} \right] \right| \quad (9)$$

Uma vez que uma falta em uma LT ocorre, transitórios oscilatórios em altas frequências surgem através de ondas de tensão que se propagam no sentido do ponto de falta ao terminal de medição e terminal remoto [16]. Tais transitórios possuem características únicas em seu espectro de frequência. Considerando que a amplitude do sinal faltoso possui valores elevados em determinadas frequências, a localização da falta pode ser estimada considerando a relação entre estas frequências, chamadas de frequências características f_C ou “ativas”, as quais estão relacionadas com as ondas viajantes de tensão [6].

Em resumo, a localização da falta utilizando o método abordado pode ser estimada através dos seguintes passos:

- Aplicação da transformada S ao sinal de tensão faltoso para obtenção da matriz ST ;
- Obtenção do espectro de frequência do sinal de tensão da fase faltosa a partir de (8);
- Identificar as frequências características f_C ou “ativas” do sinal faltoso;
- Aplicação de (9) na frequência característica identificada para obtenção do gráfico amplitude-tempo;
- Extração dos tempos t_1 e t_2 a partir dos transitórios gerados pela primeira frente de ondas viajante e aplicação em (4).

Na frequência de amostragem de 200kHz, a máxima frequência que pode ser reproduzida a partir do sinal original é a frequência de $Nyquist = 100kHz$. Na aplicação abordada, nos gráficos amplitude-frequência, o eixo das abcissas é limitado por esta frequência.

VI. RESULTADOS

As situações de faltas da Tab. 1 foram simuladas e a transformada S foi aplicada aos sinais de tensão da fase faltosa, obtendo-se, portanto, 27 matrizes ST . Após a aplicação dos passos descritos na seção V, subseção B, foi possível obter a estimativa da localização das faltas sob diversas situações.

A Tab. 2 mostra as distâncias d_E estimadas das faltas obtidas de forma geral. Os erros relativos E_{rr} para as condições de faltas simuladas foram determinados de acordo com (10).

$$E_{rr}(\%) = \frac{|d_E - d_R|}{l_t} \times 100 \quad (10)$$

Verifica-se que a metodologia proposta é imune às variações de localização da falta, resistência de falta e ângulo de incidência. Ainda, os erros na estimativa da localização da falta, geralmente, são maiores à medida que o ponto de falta se distancia do terminal de medição. Este resultado já é esperado como consequência do amortecimento das ondas viajantes de tensão ao longo da linha de transmissão [15], tornando-se mais difícil sua detecção em magnitudes reduzidas. Além disso, é preciso considerar, também, os erros inerentes aos dispositivos responsáveis pela digitalização dos sinais monitorados [13], dentre outros fatores.

Para demonstrar o procedimento adotado, o espectro de frequência da amplitude do sinal faltoso e o gráfico amplitude-tempo, obtido através de (9), das situações de falta 2, 15 e 25 são exibidos na Fig. 8.

Utilizando o *software* MATLAB® foi possível determinar as frequências características f_C ou “ativas” para cada situação de falta.

TABELA 2. ESTIMAÇÃO DAS FALTAS

Situação de Falta	d_R [km]	θ [°]	R_f [Ω]	d_E [km]	Erro		
					Absoluto [km]	E_{rr} [%]	
1	6,9	0	1	6,75	0,15	0,07	
2			10	6,75	0,15	0,07	
3			20	6,75	0,15	0,07	
4		45	45	1	6,75	0,15	0,07
5				10	6,75	0,15	0,07
6				20	6,75	0,15	0,07
7		90	90	1	6,75	0,15	0,07
8				10	6,75	0,15	0,07
9				20	6,75	0,15	0,07
10	38,90	0	1	38,70	0,20	0,10	
11			10	38,70	0,20	0,10	
12			20	38,70	0,20	0,10	
13		45	45	1	38,70	0,20	0,10
14				10	38,70	0,20	0,10
15				20	38,70	0,20	0,10
16		90	90	1	38,70	0,20	0,10
17				10	38,70	0,20	0,10
18				20	38,70	0,20	0,10
19	78,20	0	1	79,50	1,30	0,65	
20			10	79,50	1,30	0,65	
21			20	79,50	1,30	0,65	
22		45	45	1	79,50	1,30	0,65
23				10	79,50	1,30	0,65
24				20	79,50	1,30	0,65
25		90	90	1	79,50	1,30	0,65
26				10	79,50	1,30	0,65
27				20	79,50	1,30	0,65

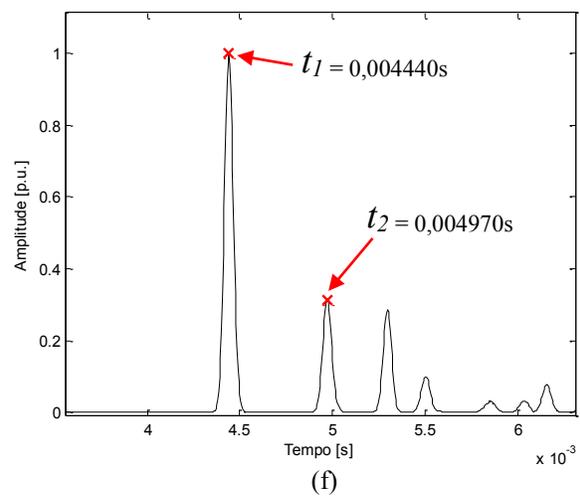
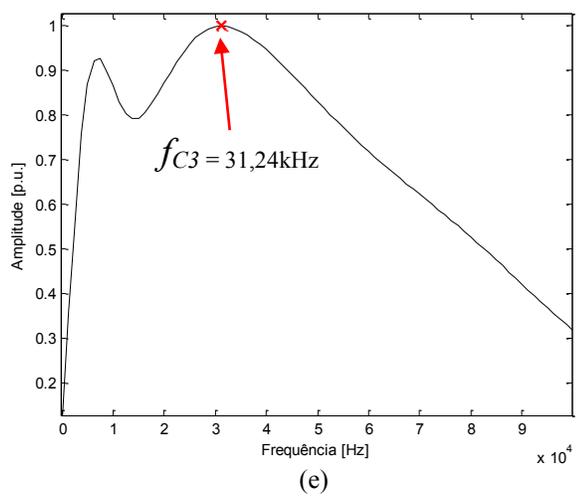
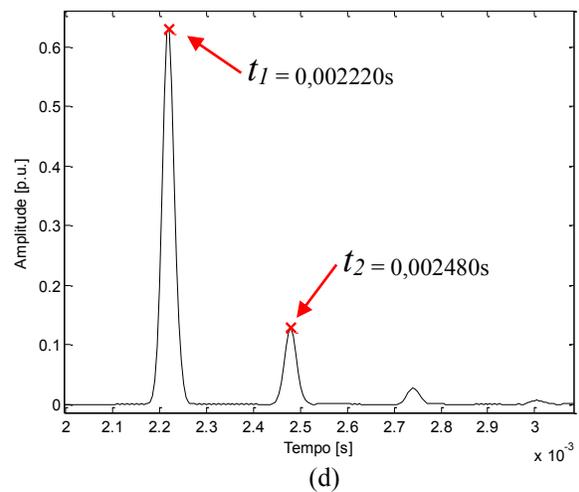
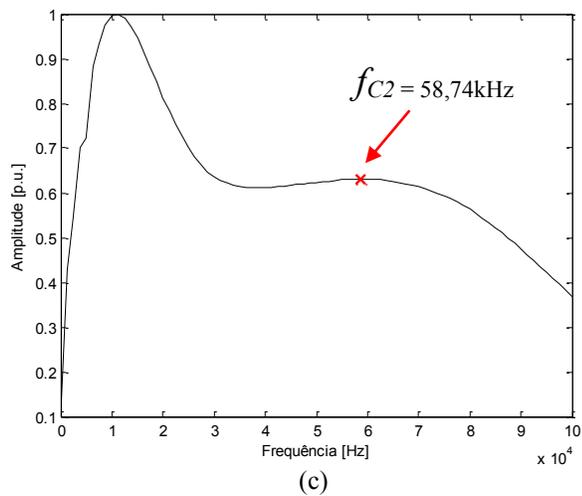
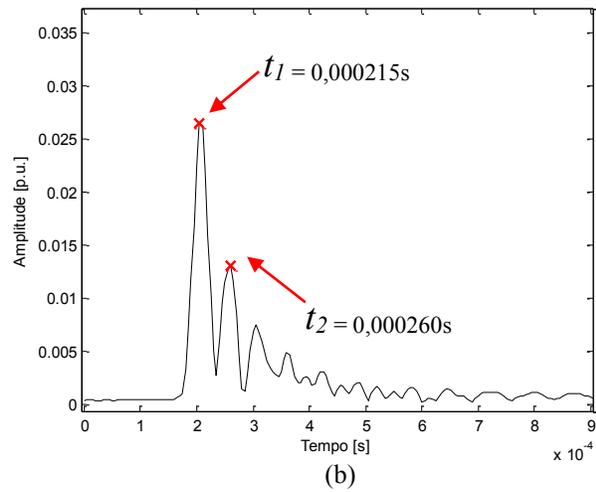
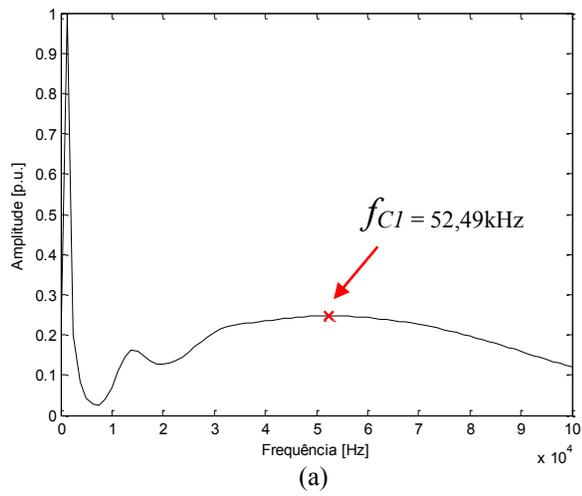


Figura 8. (a) Situação 2 – Determinação de $f_{C1} = 52,49\text{kHz}$, (b) Situação 2 – Extração dos tempos t_1 e t_2 em f_{C1} , (c) Situação 15 – Determinação de $f_{C2} = 58,74\text{kHz}$, (d) Situação 15 – Extração dos tempos t_1 e t_2 em f_{C2} , (e) Situação 25 – Determinação de $f_{C3} = 31,24\text{kHz}$, (f) Situação 25 – Extração dos tempos t_1 e t_2 em f_{C3}

VII. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um método de localização de faltas em uma linha de transmissão de energia elétrica de 500kV de dois terminais utilizando a transformada S aliada com a teoria das ondas viajantes. A transformada S foi utilizada para extrair as componentes de alta frequência características de cada situação de falta através do espectro de frequência do sinal de tensão da fase faltosa. O desempenho da técnica foi analisado considerando diferentes situações de falta variando a localização da falta, a resistência de falta e o ângulo de incidência.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Ceará – UFC, Universidade Federal do Piauí – UFPI, Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico – FUNCAP e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Piauí – FAPEPI.

REFERÊNCIAS

- [1] R.G. Stockwell, L. Mansinha and R.P. Lowe, “Localization of the complex spectrum: The S– transform,” *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 44, pp. 998–1001, 1996.
- [2] A. Ahmadimanesh and S.M. Shahrtash, “Employing S-transform for Fault Location in Three Terminal Lines,” 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2011, pp. 1-4.
- [3] A. Ahmadimanesh and S.M. Shahrtash, “Transient-Based Fault-Location Method for Multiterminal Lines Employing S-Transform”, *IEEE Transactions On Power Delivery*, vol. 28, n. 3, July 2013.
- [4] K.R. Krishnanand and P.V. Balasubramanyam, S.K. Swain,P.K. Dash, “S-Transform based Spectral Energy Feature Space for Fault Location Approximation,” *International Conference on Energy, Automation, and Signal (ICEAS)*, 2011, pp. 1-5.
- [5] N. Roy and K. Bhattacharya, “Identification and Classification of Fault Using S-Transform in an Unbalanced Network”, *IEEE 1st International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems*, CATCON, 2013.
- [6] H. Hasanvand, S. Soleymani, B. Feizifar and B.Bakhshideh Zad, “Fault Location in Distribution Networks Using S-Transform”, *Journal of Electrical Engineering (JEE)*, vol. 14, n. 1, 2014.
- [7] Teklic L, “Artificial Neural Approach for Locating Faults in Power Transmission System”, *IEEE EuroCon* 2013.
- [8] Ngu E.E. and K. Ramar, “A Combined Impedance and Travelling Wave Based Fault Location Method for Multi-Terminal Transmission Lines”, *Electrical Power and Energy Systems* 33, pp. 1767-1775, 2011.
- [9] Clarke, E, *Circuit analysis of A-C power systems*. New York: John Wiley, 1993.
- [10] Naidu, S. R, “Transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência”. Campina Grande, Ed. Grafset, 1985.
- [11] Marti, J. R., “Accurate Modeling of Frequency Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol, PAS-101, N°1, pp 147-155, 1982.
- [12] Stevenson Jr, W.D, “Elementos de Análise de Sistemas de Potência”. McGrawHill do Brasil, Edição 2, São Paulo, 1986.
- [13] Yonatha M.P., Felipe V., “Localização de Faltas em Linhas de Transmissão: Estudo de Métodos Baseados na Teoria das Ondas Viajantes e na Análise de Componentes de Frequencia Fundamental”, *XIX Congresso Brasileiro de Autmática*, CBA 2012.
- [14] Guido G. Peña, “Análise de Eventos em Redes de Distribuição por meio das Transformadas Wavelet e S”, 2012.
- [15] J. A. C. B Silva, K. M. Silva, W. L. A. Neves, B. A. Souza and F. B. Costa, “Sampling Frequency Influence at Fault Locations Using Algorithms Based on Artificial Neural Networks”, *IEEE Fourth World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing – NaBIC*, 2012.
- [16] M.M.Saha, J.Izykowski, and E.Rosolowski, “Fault Location on Power Networks”, First ed. New York: Springer, pp. 8–8, 2010.